

Улсын бүртгэлийн
Дугаар

Нууцын зэрэглэл: Б

Аравтын бүрэн
ангиллын код



**МОНГОЛ УЛСЫН ИХ СУРГУУЛЬ
ЦӨМИЙН ФИЗИКИЙН СУДАЛГААНЫ ТӨВ**

МОНГОЛД ТОХИРОМЖТОЙ ДЭВШИЛТЭТ ЦӨМИЙН РЕАКТОРЫН ХАРЬЦУУЛСАН СУДАЛГАА

**Шинжлэх ухаан технологийн суурь судалгааны
төслийн эцсийн тайлан
2018-2021**

Төслийн удирдагч:

С.Одмаа – доктор (Ph.D), дэд проф.

**Цөмийн физикийн судалгааны төвийн
эрдэм шинжилгээний ахлах ажилтан**

Санхүүжүүлэгч байгууллага:

Шинжлэх ухаан технологийн сан

Захиалагч байгууллага:

Боловсрол, соёл, шинжлэх ухааны яам

**Улаанбаатар
2021**

Улсын бүртгэлийн
дугаар.....

Нууцын зэрэглэл: Б

АБА код

Төсөл хэрэгжүүлэх гэрээний
дугаар

**МОНГОЛ УЛСЫН ИХ СУРГУУЛЬ
ЦӨМИЙН ФИЗИКИЙН СУДАЛГААНЫ ТӨВ**

**МОНГОЛД ТОХИРОМЖТОЙ ДЭВШИЛТЭТ
ЦӨМИЙН РЕАКТОРЫН ХАРЬЦУУЛСАН
СУДАЛГАА**

**Шинжлэх ухаан технологийн суурь судалгааны
төслийн эцсийн тайлан 2018-2021 он**

Төслийн удирдагч:

**С.Одмаа – доктор (Ph.D), дэд проф.
Цөмийн физикийн судалгааны төвийн
эрдэм шинжилгээний ахлах ажилтан**

Санхүүжүүлэгч байгууллага:

Шинжлэх ухаан технологийн сан

Захиалагч байгууллага:

Боловсрол, соёл, шинжлэх ухааны яам

Гүйцэтгэгч байгууллага:

**Монгол улсын их сургууль
Цөмийн Физикийн судалгааны төв**

Тайлан өмчлөгч:

**МУИС, Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв,
Улаанбаатар хот, 46а-ш/х305,
Их сургуулийн гудамж-1,
Утас: 456348, 326707
Факс:976-11-456348
E-mail: sodmaa1@num.edu.mn**

**Улаанбаатар
2021**

ГҮЙЦЭТГЭГЧДИЙН НЭРСИЙН ЖАГСААЛТ

№	Нэрс	Харъяалах байгуулга	Эрдмийн зэрэг, цол
1	Н.Норов	МУИС, Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв (ЦФСТ)	Доктор, проф.
2	С.Одмаа	МУИС, ЦФСТ	Доктор, дэд проф.
3	Б.Мөнхбат	МУИС, ЦФСТ	Доктор, дэд проф.
4	Ц.Золбадрал	МУИС, ЦФСТ	Доктор
5	Т.Жамъянсүрэн	МУИС, ЦФСТ	Магистр
6	Б.Хөхсүвд	МУИС, ЦФСТ	Магистр
7	Г.Нарантунгалаг	МУИС, ЦФСТ	Магистр
8	А.Цэндсүрэн	МУИС, ЦФСТ	Магистр
9	Г. Цэмбэлмаа	МУИС, ЦФСТ	Магистр

2018-2021 оны суурь судалгааны ажлын санхүүжилт

Он	Эрдэм шинжилгээний зардал
2018	6,964.900 мян.төг
2019	12,999.138 мян.төг
2020	-
2021	20,335.962 мян.төг
Бүгд	40,300.000 мян.төг

1. РЕФЕРАТ

НОМ ЗҮЙН ТОДОРХОЙЛОЛТ

Тайлангийн нэр:	“Монголд тохиромжтой дэвшилтэт цөмийн реакторын харьцуулсан судалгаа” суурь судалгааны төсөл
Хуудасны тоо:	255
Зураг:	177
Хүснэгт:	67
Тайлан бичсэн газар:	Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв, МУИС
Он:	2021
Тайлан өмчлөгчийн нэр:	МУИС Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв.

2. БИЧВЭР

Энэ судалгааны ажлын төслийг Боловсрол Соёл Шинжлэх Ухааны Яамны захиалгын дагуу “МУИС, Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв”-н судалгааны баг хийж гүйцэтгэв. Энэ суурь судалгааны ажлаар дараах чиглэлээр судалгаа хийв.

- Монголд тохиромжтой IV үеийн реакторын судалгаа, тэдгээрийн голомтын дизайны судалгаа;
- Устөрөгчийн технологид суурилсан ногоон хөгжлийн бодлогын нэгэн шийдэл;
- Устөрөгчийн эрчим хүчийг Монголд хөгжүүлэх үндэслэл;
- Судалгааны реактор бүхий цөмийн шинжлэх ухаан технологийн төв (ЦШУТТ)-ийг байгуулах үндэслэл;

2.1.Төслийн зорилго

“Монголд тохиромжтой дэвшилтэт цөмийн реакторын харьцуулсан судалгаа” нь Монгол Улсын Засгийн газрын 2015 оны 9-р сарын 14-ны 368-р тогтоолоор баталсан Шинжлэх ухаан, технологийг хөгжүүлэх тэргүүлэх чиглэл, цөм технологийн жагсаалтад орсон “аж үйлдвэрийн дэвшилтэт технологи” тэргүүлэх чиглэлийн хүрээнд хэрэгжүүлэх “эрчим хүчний үйлдвэрлэл, хэрэглээний үр ашиг, хэмнэлтийн технологи” цөм технологийн асуудлыг хэрэгжүүлэх үндсэн зорилгын хүрээнд Монгол улсад цөмийн эрчим хүчийг хөгжүүлэхэд шаардагдах орчин үеийн дэвшилтэт эрчим хүчний реакторыг сонгох судалгаа хийж, манай улсад ашиглахад тохиромжтой бага чадлын реакторын голомтын дизайны судалгаа, цөмийн реактороос гарах өндөр температурын гелийн хийг ашиглан устөрөгч үйлдвэрлэх, ашиглах, устөрөгчийн эрчим хүчийг Монголд хөгжүүлэх боломж, Монголд ашиглах судалгааны реакторын дэд бүтцийн судалгаанд чиглэсэн орчин үеийн түвшний суурь судалгаа явуулах зорилго тавив. Энэ ажлын хүрээнд:

- ✓ Дэлхий дахинд судлагдаж байгаа IV үеийн гэж нэрлэгддэг эрчим хүчний реакторуудыг судалж тэдгээр реакторуудын голомтын дизайныг өндөр түвшний физик тооцоолол хийдэг симуляцын кодыг ашиглан манай оронд тохиромжтой бага чадлын байхаар тооцон үзэж, голомтын тооцооллыг гүйцэтгэж, үр дүн гарган авах;
- ✓ Цөмийн энерги ашиглан ус ба нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэх судалгаа нь ойрын ирээдүйн манай улсад түүхий нүүрсний хэрэглээг халах устөрөгчийн түлшний элементийн технологи бүхий хүрээлэн буй орчинд зөвхөн ус ялгарах экологийн үнэмлэхүй цэвэр альтернатив устөрөгчийн эрчим хүч буюу устөрөгчийн эдийн засгийг хөгжүүлэх ногоон хөгжлийн бодлогын нэгэн шийдлийг дэвшүүлэх;
- ✓ Манай орон байгалийн хийн нөөцгүй тул ураны нөөцөөр ажиллах өндөр температурын реактор бүхий цөмийн станцаас цахилгаан эрчим хүчээ хангах, мөн түүнээс гарах өндөр температуртай гели хийг ашиглан усыг задалж эсвэл нүүрсээ гүн боловсруулан устөрөгч үйлдвэрлэж, түүгээр зарим хот, аймаг, сумын төвүүдийн цахилгаан, дулааны эрчим хүчийг түлшний элементийн станцаар хангах, устөрөгчийн түлшний элементтэй автомашины устөрөгчийн станцыг цэнэглэх, газрын тос боловсруулах, хими, хүнсний үйлдвэрийг хангах устөрөгчийн технологид суурилсан ногоон хөгжлийн бодлогыг дэвшүүлэх;
- ✓ ЦШУТТ-ийг шинээр байгуулахад шаардагдах дэд бүтцийн судалгаа, уг төвд багтах судалгааны реактор, цөмийн хурдасгуур, лабораториуд, тэдгээрийг ашиглах боломж талаар судалж шаардагдах үндэслэлийг боловсруулах;

2.2 Төслийн шаардлага

“Монголд тохиромжтой дэвшилтэт цөмийн реакторын харьцуулсан судалгаа” суурь судалгааны төсөл нь шинжлэх ухаан, технологийг хөгжүүлэх тэргүүлэх чиглэл, цөм технологийн жагсаалтад орсон “аж үйлдвэрийн дэвшилтэт технологи” тэргүүлэх чиглэлийн “эрчим хүчний үйлдвэрлэл, хэрэглээний үр ашиг, хэмнэлтийн технологи” цөм технологийн судалгааны чиглэлүүдтэй уялдуулан хэрэгжүүлэх шаардлагатай. Байгалийн хийн нөөцгүй манай улсад дэвшилтэт өндөр температурын реактор ашиглан цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэхээс гадна устөрөгч үйлдвэрлэж устөрөгчийн эрчим хүчийг ойрын ирээдүйд хөгжүүлэх цогц үндэсний хөтөлбөр боловсруулахад шинжлэх ухааны үндэслэл болгон ашиглах шаардлагатай.

2.3 Төслийн шинэлэг, дэвшилтэт тал

Монгол улсын эрчим хүчний эх үүсвэр нүүрс, уран тул ураны нөөцөөр ажиллах өндөр температуртай гели хийн хөргүүртэй IV үеийн реакторыг ашиглан цахилгаан эрчим хүчний хэрэгцээг хангах мөн ийм реактороос гарах өндөр температуртай гелийн хийгээр нүүрсээ гүн боловсруулан устөрөгч үйлдвэрлэж, түүгээр цахилгаан, дулааны эрчим хүч, автомашин, газрын тос боловсруулах, хими, хүнсний үйлдвэрийг хангах устөрөгчийн технологид суурилсан ногоон хөгжлийн бодлогыг төгс шийднэ.

Монгол улсын түүхий нүүрсний хэрэглээг халах альтернатив эрчим хүчний үндэс болсон, дэлхий дахины дулаарлын эх үүсвэр болдог нүүрстөрөгчийн хий ялгаруулахгүй ногоон хөгжлийн үзэл баримтлалыг хангах асуудлыг шийдсэн үндсэн судалгааны материал болон ашиглагдана.

2.4 Эдийн засаг, нийгмийн болон шинжлэх ухааны ач холбогдол

Манай улсын эрчим хүчний хангамжид ашиглахад тохиромжтой дэвшилтэт цөмийн реакторын дизайны судалгаа хийж, 2030 оноос цөмийн эрчим хүчийг ашиглах нь дэлхийн дулаарлыг нэмэгдүүлэх нүүрсхүчлийн хийг бууруулах, цэвэр эрчим хүчийг хөгжүүлэх эдийн засаг, нийгэмийн болон шинжлэх ухааны ач холбогдолтой.

2.4.1. Эдийн засгийн ач холбогдол

Өндөр температурын хийн реактор бүхий ЦЦС нь өндөр АҮК (47%)- тай цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэхээс гадна 850⁰С температуртай гелийн хийгээр нүүрсийг гүн боловсруулж устөрөгч үйлдвэрлэх давхар зориулалттай ашиглах нь түүний эдийн засгийн үр ашгийг ихээхэн нэмэгдүүлнэ.

Хотын агаар мандлыг бохирдуулах нүүрсхүчлийн болон бусад хий ялгаруулахгүй тул агаарын бохирдолтыг бууруулах зардлын хэмнэлт гарна. Нүүрсхүчлийн хийн торгуулиас чөлөөлөгдөнө. Агаарын бохирдолтой холбоотой хүн амын өвчлөлт буурч Монголын хүн амын ихэнх болох оршин эрүүл мэнддээ зарцуулах зардал буурна.

2.4.2. Нийгмийн ач холбогдол

Цөмийн эрчим хүч нь дэлхийн дулаарлын эх үүсвэр нүүрстөрөгчийн хий ялгаруулахгүй ногоон хөгжлийн бодлогыг хэрэгжүүлэх үндэс болж, монгол хүн экологийн тэнцвэртэй аюулгүй орчинд амьдарч, ажиллах нөхцөлийг бүрдүүлэх.

Манай улсын түүхий нүүрсэнд тулгуурласан эрчим хүчний салбарт цөмийн эрчим хүчийг ашиглан эрчим хүчний дэд бүтцийг сайжруулах, цаашдаа экологийн үнэмлэхүй

цэвэр урстөрөгчийн эрчим хүчинд шилжүүлэн хот суурин газрын агаарын бохирдол утааны асуудлыг бүрэн шийдвэрлэнэ.

2.4.3. Шинжлэх ухааны ач холбогдол

Манай улсын цахилгаан эрчим хүчний хангамжид тохиромжтой дэвшилтэт эрчим хүчний реакторын дизайн боловсруулагдана.

Цөмийн реактороос гарах өндөр температурын гелийн хийг устөрөгч үйлдвэрлэхэд ашиглах технологийн сонголт бий болно.

Монгол улсад цөмийн болон устөрөгчийн эрчим хүчийг хөгжүүлэх үндэсний цогц хөтөлбөрийн үндэс болгон ашиглагдана.

3. Үр дүн

3.1. Монголд тохиромжтой IV үеийн реактор сонголт

Дэлхий дахинд ашиглаж байгаа цөмийн эрчим хүчний реакторуудыг үечлэн ангилах болсон ба энэ нь тэдгээрийн зураг төсөл зохиох, бүтээх хугацаатай холбоотой юм. Цөмийн эрчим хүчний реакторуудын хөгжлийн дөрвөн үе болгон хуваан авч үздэг. Одоо дөрөвдүгээр үеийн реакторуудыг дэлхийн томоохон их сургууль, судалгааны хүрээлэнгүүд, тэргүүлэх компаниуд зохион бүтээж байгаа бөгөөд эдгээр реакторуудын чадал нь Монголын эрчим хүчний хангамжинд ашиглахад тохирсон, аюулгүй ажиллагааны түвшин өндөр байна. Иймд эдгээр реактораас өөрийн оронд илүү тохиромжтойг сонгон ашиглах нь манай улсын тогтвортой хурдацтай хөгжил, олон улсын түвшинд цөмийн зэвсгийг үл дэлгэрүүлэх асуудал, эдийн засгийн эрчимтэй хөгжлийг хангах үндэс суурь болох юм.

- **Түлшээ үржүүлэн шатаадаг реакторын судалгаа**

Хурдан нейтроноор ажилладаг байгалийн эсвэл ядуурсан уранаар хийсэн түлштэй реакторыг Түлшээ Үржүүлэн Шатаадаг реактор гэдэг. Энэ реакторын гол онцлог нь түлшний дахин боловсруулалт эсвэл түлшний баяжуулалт хийхгүйгээр хуваагдахуйц материалыг голомт дотроо нэгэн зэрэг үржүүлэн шатаадагт оршино. Өнөөг хүртэл түлшээ үржүүлэн шатаах реакторын голомтын олон дизайн хөгжүүлэгдсээр байна. Эдгээрийн дотроос шаталт явагдахад ямар нэгэн удирдлагын механизм шаардахгүй, голомтын шинж чанар өөрчлөгдөхгүй зэрэг реакторын дизайн болон ажиллагааг маш хялбар болгодог давуу талтай “CANDLE” реакторыг Монголын эрчим хүчний салбарт ашиглах боломжтой гэж үзэн сонгон судаллаа. Нейтроны тасралтгүй энергийг мужийн MVP/GMVP-II болон MVP-BURN реакторын симуляцийн кодууд, цөмийн өгөгдлийн сан JENDL-3.3-ыг ашиглан бага

чадлын “CANDLE” реакторын голомтын дизайны нейтроник анализ болон түлшний шаталт мөн голомтын ойлгогчийн зузааныг сонгох, шаталтыг эхлүүлэх зэрэг тооцооллыг хийж гүйцэтгэв. Мөн түлшээ үржүүлэн шатаадаг хурдан реакторын нейтроны тооны тэнцвэрийн шинж чанарыг судалж, жишиг хязгааргүй геометрт нейтроникийн үзүүлэлт, дулаан зайлуулах чадамжид тохирох алхамтай түлшний үүрийн нейтроник үзүүлэлтүүд, нейтроны алдагдалтай голомтын нейтроник үзүүлэлтүүдийг нарийвчлан судаллаа.

- **Хар тугалган хөргөлттэй хурдан нейтроны реактор**

Дэлхийн улс орнуудын судалгааны хүрээлэнгүүдэд судлагдаж буй 4-р үеийн хурдан нейтроны реакторын нэг болох хар тугалган хөргөлттэй хурдан реакторуудыг судлав. Энэ удаагийн судалгаагаар АНУ-д хөгжүүлж буй 20% баяжуулсан ураны нитрит түлштэй, 70МВт (дулаан), 25МВт (цахилгаан) чадалтай, хар тугалга-висмут хөргүүртэй Гиперион Эрчим хүчний Модуляр, 13%-ийн баяжилттай уран-циркониин хайлш болон 11%-ийн баяжилттай U-Pu-Zr түлштэй 50МВт-ийн цахилгаан үйлдвэрлэх чадалтай, шингэн металл хөргүүртэй ENHS, жижиг хэмжээний, маш удаан хугацааны туршид өөрөө ажилладаг, олон хэрэглээтэй SSTAR, STAR-LM, БА STAR-H₂ зэрэг реакторууд, Өмнөд Солонгос улсын их сургууль, хүрээлэн төвүүдэд хөгжүүлж буй хар тугалга-висмут хөргөлттэй, 850МВт дулааны (300МВт цахилгаан) чадалтай, дунд зэргийн хэмжээтэй, модуляр хурдан нейтроны болон трансмутаци хийх зориулалт бүхий реактор PEACER-300 (загвар), 100МВт-ийн дулаан (35МВт-ийн цахилгаан) үйлдвэрлэх чадалтай, хар тугалга-висмут хөргүүртэй жижиг хэмжээний PASCAR ба URANUS (загвар), дахин цэнэглэхгүйгээр хамгийн багадаа 20 жил 22,2 МВт-ийн дулааныг үйлдвэрлэх чадалтай байхаар загварчлагдсан BORIS реакторууд, Индонез болон Японы хамтын ажиллагааны хүрээнд хөгжүүлж буй нитрит, MOX, металл түлшээр ажилладаг, 6МВт-ас 100МВт хүртэл цахилгаан үйлдвэрлэх чадалтай SPINNOR реактор, Энэтхэг улсад хөгжүүлж буй торийд үндэслэсэн түлш бүхий 100МВт дулааны чадалтай хар тугалга-висмутын хайлш хөргүүртэй CHTR реактор, ОХУ-д хөгжүүлж буй цахилгаан эрчим хүч, плутонийг үйлдвэрлэх болон ашиглах, аж үйлдвэр ба эмнэлгийн хэрэглээнд зориулсан цацраг идэвхт изотоп үйлдвэрлэх, реактор ажиллагаанаас үүсэх актинидууд болон урт настай хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийг трансмутацлах зэрэг олон төрлийн зорилгоор ашиглахаар загварчлагдсан BREST-300 реакторуудын голомтын дизайн, параметрууд, онцлог давуу талуудыг судалсан.

Цөмийн эрчим хүчний 4-р үеийн реакторуудын нэг болох хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны БРЭСТ-ОД-300 реакторын тэгш өнцөгт призм ба зургаан талт призм хэлбэртэй түлшний эвлүүлгүүдийг сонгосон авч голомтын нейтроникийн харьцуулсан тооцоог JEFF-3.1.1 өгөгдлийн сан бүхий SERPENT-2.1.30 компьютер код ашиглан

гүйцэтгэсэн. Бид хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын дизайны суурь судалгаа, түүний физик үндэс, БРЕСТ-ОД-300 түлшний савааны, түлшний эвлүүлгийн реакторын голомтын тооцоонуудыг гүйцэтгэж, ойлгогчийн зузаан, түлшний төрөл хөргүүр болон бланкетын нөлөөнүүд тооцсон. Мөн UN түлш ачаалал болон NpN түлш нэмсэн тооцоол голомтын чадлын түгэлтийг жигдлэх судалгаа, шатан шингээгч материал судалгаануудыг гүйцэтгэсэн.

- **Өндөр температурын гелийн хийн хөргүүртэй реактор**

Өндөр температурын хийн хөргүүртэй реактор (ӨТХР)–ийн технологийг сүүлийн жилүүдэд дэлхийн өндөр хөгжилтэй ихэнх орнуудад ирээдүйн эрчим хүчний шинэ сонголт гэж үзэн сонирхон судалж байна. Анхны хийн хөргөлтэй реакторын арилжааны загвар болох Калдер Холл нь (Calder Hall, U.K) 1956 онд гарснаас хойш цөмийн эрчим хүч нь дэлхий нийтийн эрчим хүчний үйлдвэрлэлд чухал оролцоотой болж эхэлсэн гэж үздэг. Шинээр судлагдаж байгаа дизайнууд нь цацраг идэвхт хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг гадагш алдахгүй барих онцгой шинж чанартай TRISO түлшинд тулгуурласан төрөлхийн аюулгүй болон идэвхгүй шинж чанартай ба ашиглаж байгаа түлш нь маш өндөр температурыг (1600°C) тэсвэрлэх чадвартай. Энэ тайланд бид төвдөө ойлгогчин блоктой реакторын дизайны параметруудийг тодорхойлж, олсон параметрээ ашиглан нэгэн жигд түлшний баяжилттай байх үед төвийн ойлгогчийн блокийн тоог ялгаатай байдлаар авч үзэн харьцуулж хамгийн сайн хувилбарыг тодорхойлсны дараа голомт дахь түлш болон бусад материалыг түгэлтийг жигд болон жигд бус байдлаар тооцоолж өндөр температурын хийн хөргүүртэй реакторуудын голомтын дизайны судалгааг хийж харьцууллаа. Нейтроник тооцоог MVP/GMVP-II болон MVP-BURN реакторын симуляцийн кодууд, цөмийн өгөгдлийн сан JENDL-3.3-ыг ашиглан гүйцэтгэхээс гадна төвийн ойлгогчийн зузааны нөлөө, голомт дахь шатан шингээгч материалын нөлөө, илүүдэл реактивитийг бууруулах, түлш шатдаг хорлолт материал жигд бус түгэлттэй үеийн тооцоолол, голомтруу удирдлагын саваа оруулах замаар илүүдэл реактивитийг бууруулах, реактивитийн температурын болон чадлын коэффициент үнэлэх, ялгаатай хэлбэр, хэмжээтэй шатан шингээгч материалын тооцоонуудыг гүйцэтгэсэн.

- **Түлшээ үржүүлэн шатаадаг хурдан реакторын нейтроны тооны тэнцвэрийн шинж чанар**

Цөмийн эрчим хүчний станцын хөгжил 80 гаруй жил болж байгаа бөгөөд эдгээрийн дийлэнх нь баяжуулсан уран түлштэй дулааны нейтроноор ажиллах реактор байна. Иймд маш их хэмжээний ядуурсан уран хуримтлагдаж, хадгалагдсан байна. Түлшээ үржүүлэн

шатаах горимд ажиллах хурдан реактор нь ашигласан цөмийн түлшийг хадгалах байгууламжийн хэрэгцээг багасгах, цаашилбал ураны нөөцийг илүү ашигтай хэрэглэхийг нэмэгдүүлэх үр дүнтэй арга замуудын нэг юм. Түлшээ үржүүлэн шатаах горимыг хангах нь голомтын материалын сонголтоос хамаардаг. Иймд нейтроны тэнцвэрийн анализыг гүйцэтгэж голомтын түлш болон хөргүүрийн материалын хамгийн тохиромжтой хослолыг тодорхойлох анализ хийж, голомтоос нейтрон алдагдах хэмжээ болон хөргүүрийн дулаан зайлуулах чадамжид үндэслэн түлшээ үржүүлэн шатаах горимд ажиллах реакторын голомтын шинж чанарыг тодорхойлно. Ингээд метал түлштэй, том хэмжээний натри хөргүүртэй хурдан реакторын голомт нь гинжин урвалыг тэтгэж, түлшээ үржүүлэн шатаах горимд ажиллаж чадахыг тогтоох, ийм шинж чанартай бага оврын голомтын түлш нь баяжуулсан нитрид түлштэй байх хэрэгтэйг талаар судалгаа хийж, тооцооллуудыг гүйцэтгэн, үр дүнг гарган авав.

3.2. Устөрөгчийн технологид суурилсан ногоон хөгжлийн бодлогын нэгэн шийдэл

- **Устөрөгчийн эрчим хүч**

Цөмийн болон нарны энергийг ашиглан ус, нүүрс зэрэг устөрөгч агуулсан байгалийн түүхий эдээс устөрөгч гарган авах, түүнийг хадгалах, түлш болгон ашиглах, энерги дамжуулах технологиудын цогцолбор юм. Иймээс устөрөгчийн эрчим хүч нь устөрөгчийг үйлдвэрлэх, хадгалах, тээвэрлэх, хүмүүсийн ахуй, тээврийн дэд бүтэц, төрөл бүрийн үйлдвэрлэлийн чиглэлээрх энергийн хэрэглээнд зориулсан хэрэгсэл шиг ашиглахад үндэслэсэн хүн төрөлхтний эрчим хүчний үйлдвэрлэл, хэрэглээний эдийн засаг, экологийн чиглэл юм. Энерги агуулагчийг гарган авах альтернатив аргуудын нэг бол устөрөгчийн эрчим хүч юм. Устөрөгчийн түлш олборлох хувилбаруудыг боловсруулах ажлыг эрдэмтэд идэвхтэй эрхэлж байна. Устөрөгчийн эрчим хүчний үндсэн шийдэх асуудал нь устөрөгчийг гарган авахад бусад энерги агуулагч газрын тос, цахилгаан, хий зарцуулах шаардлагатай байдагт оршино. Хөгжилтэй болон хөгжиж буй орнууд дэлхий дахиныг хамарсан дулаарлыг бий болгодог хүлэмжийн нүүрсхүчлийн хий CO₂-г ялгаруулдаггүй, зөвхөн усны уур гаргах экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн эрчим хүчийг хөгжүүлэх үндэсний хөтөлбөр боловсруулан эрчимтэй хэрэгжүүлж байна.

2021 онд ОХУ-д устөрөгчийн эрчим хүчний хөгжлийн үзэл баримтлалаа батласан бөгөөд устөрөгчийн эрчим хүчний хөгжил дараах үе шаттай. I үе шат (2021-2024 он) устөрөгчийн кластер бий болно. 2024 онд дотоод зах зээлд устөрөгчийн энерги зөөгчийг ашиглахаас гадна устөрөгчийн экспорт 0,2 сая тонн хүрнэ. II үе шат (2025-2035 он) устөрөгч үйлдвэрлэх анхны худалдаан төслийг ашиглалтад оруулж 2035 онд устөрөгчийн экспорт 2—12 сая тонн хүрнэ. Энэ үе шатанд дотоод зах зээлд устөрөгч хэрэглэх лабораторид

туршихад зориулсан төслүүдийг хэрэгжүүлж, эдийн засгийн төрөл бүрийн салбар (нефтхими, цахилгаан эрчим хүч, хими ба төмөрлөгийн үйлдвэрлэл, орон сууц нийтийн аж ахуй, тээвэр)-т устөрөгчийг өргөн хэрэглэнэ. III үе шат (2035-2050 он) устөрөгчийн эрчим хүчний дэлхийн зах зээлийн хөгжил өргөн хэмжээтэй болно. 2050 онд дэлхийн зах зээл дэх устөрөгчийн нийлүүлэлт 15-50 сая тонн болно. Сэргээгдэх эрчим хүчний үүсгүүр дээр үйлдвэрлэх үнэ малтмал түүхий эдээс устөрөгч үйлдвэрлэх үнэтэй ойролцоо болно. Ийнхүү устөрөгчийн эрчим хүчний дэлхийн хөгжлийн хандлага нь:

- 2020 онд өрсөлдөх чадвартай устөрөгчийн автомашин,
- 2030 онд устөрөгчийн удаан хадгалах төхөөрөмж гарч, гэрийн түлшний элементээр цахилгаан үйлдвэрлэх болно.
- 2040 онд устөрөгчийн эрчим хүч зонхилох,
- 2050 онд устөрөгчийн нисэх онгоц бий болох төлөвтэй байна.

Манай улс ч гэсэн эрчим хүчний энэ альтернатив чиглэлийг сонгон хөгжүүлж, дэлхийн тэргүүлэх орнуудын хөгжлийг угтаж гүйцэх боломжтой.

Манай улс байгалийн хийн нөөцгүй тул нүүрсээ гүн боловсруулан устөрөгч үйлдвэрлэж эрчим хүч, автомашин, газрын тос боловсруулах, хими, хүнсний үйлдвэрийг хангах болон ураны нөөцөө ашигласан ногоон хөгжлийн бодлогыг төгс шийдэх шаардлага гарч байна. Дэлхий нийтээр устөрөгчийн эрчим хүч буюу устөрөгчийн эдийн засагт шилжиж байгаа үйл явдалтай мөр зэрэгцэн орох нь цаг хугацаа хэмнэж, эдийн засгийн алдагдалтай, экологийн хортой түүхий нүүрсний эдийн засгаас устөрөгчийн эдийн засагт шилжих боломж олдох юм. Устөрөгчийн түлшний элемент бүхий автомашины цэнэглэх станц болон цахилгаан, дулаан хангамжийн зориулалттай станцыг хангах устөрөгчийн үйлдвэрлэл, тээвэрлэлт, хадгалалт, хэрэглээний дэд бүтцийг хөгжүүлэх шаардлага гарч байна.

Цөмийн энерги ашиглан үйлдвэрлэх 1 кг устөрөгчийн үнэ 2,3\$ байхад цахилгаан эрчим хүчний сүлжээний цахилгаан ашиглан усны электролизын аргаар үйлдвэрлэх 1 кг устөрөгчийн үнэ 6-7\$, ирээдүйд 4\$ болж буурах, нарны цахилгаан станц ашиглан үйлдвэрлэх 1 кг устөрөгчийн үнэ 10-30\$, ирээдүйд 3-4\$ болж буурах төлөвтэй байна.

Цахилгаан эрчим хүч ашиглан усыг электролизын аргаар задалж устөрөгч үйлдвэрлэхээс нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэх нь хямд үнэтэй байна. Иймээс нүүрсний нөөцтэй манай улс цөмийн реактороос их температуртай гарах гелийн хийгээр нүүрсний уурын хувиргалт хийж устөрөгч үйлдвэрлэх нь чухал.

- **Өндөр температурын гелийн модуль реактор**

GTNTR300 (Gas turbine High Temperature Reactor 300 МВт(цах)) реактор нь идэвхгүй аюулгүй байдал нь IV үеийн реакторын онцлогуудын нэг бөгөөд цахилгаан, устөрөгч, үйлдвэрлэлийн дулааныг хамт үйлдвэрлэх боломжийг олгодог. Энэ нь реактор тус бүр нь 600 МВт хүртэл хүчин чадалтай модульчлагдсан МӨТХР (маш өндөр температурын хийн хөргүүртэй реактор), цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх үр ашигтай шууд эргэлттэй хийн турбин, хамтран үйлдвэрлэхэд устөрөгч болон дулааныг өндөр температурт дулаанаар хангах завсрын дулаан дамжуулах гогцооноос бүрдэнэ. Японы Атомын Энергийн Агентлаг (ЯАЭА) хэд хэдэн урт хугацааны судалгаа, хөгжлийн хөтөлбөрөөр дамжуулан GTNTR300-ийн дизайны үндэслэлийг бий болгож байна. 30МВт-ын дулааны хүчин чадалтай, хөргөлтийн шингэний гаралтын температур 950°C-ийн өндөр температурын инженерийн туршилтын реактор (HTTR)-ийн бүтээн байгуулалт, ашиглалтын баталгаатай хөтөлбөрийн үр дүнд МӨТХР-ийн дизайн, ашиглалт, засвар үйлчилгээний томоохон мэдээллийн санг бий болгосон.

МӨТХР нь одоогоор дэлхийн хамгийн том VHTR (Very High Temperature Reactor) технологийн туршилтын реактор юм. Энэ нь 950°C-ийн температурт удаан хугацаанд тогтвортой ажиллаж, хөргөлтийн шингэний эргэлтийн алдагдлаас хамгаалах идэвхгүй реакторын аюулгүй ажиллагааг харуулсан. GTNTR300-ийн өндөр үр ашигтай цахилгаан эрчим хүчийг хувиргах системийг зохион бүтээх, хөгжүүлэх хөтөлбөрийг хэрэгжүүлэв. Энэхүү хөтөлбөрт гелий хийн турбины төхөөрөмжийн гуравны нэгийн хэмжээний туршилтыг багтаасан бөгөөд гелий компрессорын технологийн өндөр аэродинамик үр ашгийг баталгаажуулсан. Үүний зэрэгцээ термохимийн иод-хүхрийн (IS) процессоор устөрөгч үйлдвэрлэх судалгааны хөтөлбөрийг явуулсан. IS процессыг VHTR дулааны эх үүсвэртэй хослуулснаар CO₂ ялгаруулалтгүйгээр их хэмжээний төвлөрсөн устөрөгчийн үйлдвэрлэлийг санал болгож байна. Дээр дурдсан хөтөлбөрүүдийн хүрээнд олж авсан реактор, хэрэглээний технологид үндэслэн ЯАЭА болон дотоодын цөмийн үйлдвэрүүдийн хамтын хүчин чармайлтаар GTNTR300 нь уян хатан үйлдвэрлэлийг хангах зорилгоор бүтээгдсэн.

Бид устөрөгчийн эрчим хүчийг ашиглах судалгааны хүрээнд өмнөх бүлэгт судалсан ӨТХР-ын дизайн дээр үндэслэн Маш өндөр температурын хийн-хөргүүртэй реактор (МӨТХР)-ын голомтын дизайныг авч үзэв. МӨТХР нь дээрх шаардлагуудыг хангасан IV үеийн реакторуудын нэг болон судлагдаж байгаа ба үүнд түлш болон голомтын хийцийн материалууд, түлшний сонголт чухал үүрэг гүйцэтгэнэ. МӨТХР-ын голомтын бүрэлдэхүүн нь өндөр температурт аюулгүй ажиллагаатай, түлшний чөмөг нь гадуураа олон давхар

хучаастай сайжруулсан TRISO түлш, дулаан багтаамж өндөртэй бал чулуун ойлгогч, гелийн инертийн хөргүүр зэргээс бүрдэх бөгөөд реакторын дулаан зайлуулах систем ажиллахгүй үед задралын дулаанаа идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай зэрэг нь түүнийг дэвшилтэт дизайнтай болохыг харуулна. Түүнчлэн голомтод үүсэх дулаан өндөр үр ашигтай зарцуулагддаг (АҮК=47%), 850°C-ээс их температуртай гелий нь устөрөгчийн үйлдвэрлэх боломж өгдөг зэргээс эдийн засгийн үр ашигтай ажилладаг арилжааны реакторын нэг юм. Үүнээс гадна сайжруулсан TRIZO түлшний загвар нь түлшний нүүлтээс сэргийлж, хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийг алдалгүй, хүчилтөрөгчийн нөлөөнд и сэлдэхгүй, бусад давхаргуудтай химийн харилцан үйлчлэлд ордоггүй зэрэг маш өндөр буюу 1600°C хүртэл температурт ажиллах чадвартай. Төслийн хүрээнд төвдөө ойлгогчгүй болон ойлгогчтой МӨТХР-ын дизайныг гүйцэтгэсэн ба түлшний найрлага болон дизайныг төрөл бүрийн байдлаар өөрчлөх, цаашлаад шатан шингээгч материалыг дан болон хосолмол хэлбэрээр голомтод ачааллуулан илүүдэл реактивитыг буулгах тооцооллуудыг хийж гүйцэтгэв.

3.3.Өндөр температурын гелийн хийн модуль реактор ашиглан устөрөгчийн эрчим хүчийг Монголд хөгжүүлэх үндэслэл

Монголын хувьд устөрөгчийн эрчим хүчийг хөгжүүлэх дараах үндэслэл байна.

Үүнд:

- Нэгдүгээрт, өнөөдөр даян дэлхий шинэ технологийн хэв маягийн босго дээр байна. Одоогийн эдийн засаг, техникийн тэргүүлэгч орнууд устөрөгчийн эрчим хүч хөгжүүлэх үндэсний хөтөлбөр боловсруулан ажиллаж байна. Манай улс ч гэсэн эрчим хүчний энэ альтернатив чиглэлийг сонгон хөгжүүлж, дэлхийн тэргүүлэх орнуудын хөгжлийг угтаж гүйцэх боломж;
- Хоёрдугаарт, бидэнд өөр сонголт байхгүй. Өнөөдрийн манай улсын эдийн засгийн алдагдалтай, экологийн хор хөнөөлтэй нүүрсний эдийн засгийг газрын тос, хийн импортын хамаарлыг бууруулах устөрөгчийн технологи ашигласан экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн эдийн засагт ойрын ирээдүйд шилжүүлэх шаардлагаа;
- Түлшний элементийн гол түүхий эд болох паллади (Pd), цагаан алт (Pt) зэрэг үнэтэй элементүүдийн оронд нано технологиор гарган авсан материалыг ашиглаж байгаа учир түлшний элементийн үнэ жилээс жилд буурч байна.

Өндөр температурын гелийн модуль реактор нь сүүлийн долоон жилд ихээхэн хөгжсөн бөгөөд өртгийн хувьд үр ашигтай байх, аюулгүй байдлыг илүү тогтвортой байлгах, түлш ашиглалтыг сайжруулах зэрэг өндөр түвшинд хүрэхийн тулд маш түргэн хувьсан өөрчлөгдөж байна. Цөмийн эрчим хүч нь геополитикийн нөхцөл байдал, технологийн

түвшин, аюулгүй байдал болон бусад асуудлуудын нөлөөнд автан хөгжлийн хэд хэдэн үе шатыг даван туулж байна. Маш өндөр температурын хийн хөргүүртэй реактор (VHTR) нь IV үеийн реактор бөгөөд бал чулуун удаашруулагчтай, гели хөргүүртэй реактор, нэг удаагийн түлшний циклтэй (ашигласан түлшийг дахин боловсруулахгүй), голомтын гаралтын температур нь 1000°C байна. Өндөр температурын IV үеийн реакторуудад термохимийн бүтээгдэхүүн устөрөгч үйлдвэрлэх боломжтой. Түүнчлэн өндөр температурт дулаан үйлдвэрлэх гелийн модуль реакторын эрчим хүчний суурилагдсан чадал (20 – 1700 МВт)-ын өргөн мужид байж болдог. Ийм модуль реактор бүхий систем нь дараах хэрэглээний чиглэлүүдийг бий болгож байна.

Жишээ нь:

- Термохимийн аргаар устөрөгч үйлдвэрлэх
- Бага температурын хүрээнд усыг цэвэршүүлэх
- Уур үүсгэх
- Нефть боловсруулах үйлдвэрийг дулаанаар хангах
- Нүүрснээс шингэн үйлдвэрлэх
- Өндөр температурын уурыг аж үйлдвэрт ашиглах
- Устөрөгч үйлдвэрлэх уурын-метаныг шинэчлэх
- Дундаж температурын хүрээнд үр ашиг өндөртэй цахилгаан үйлдвэрлэх
- Нүүрсийг хий болгон хувиргах
- Газрын тосыг шахах
- Тосыг сэргээх
- Петрохимийн аргаар нүүрс, байгалийн хийн дайвар бүтээгдэхүүн үйлдвэрлэх
- Синтетик түлш үйлдвэрлэх / Fischer-Tropsch or methanol/
- Бордоо үйлдвэрлэх /шүвтэр эсвэл аммиак/
- Хотыг дулаанаар хангах

Манай улсын тохиолдолд өндөр температурын гелийн модуль реакторыг ашиглаж 900°C температуртай гелийн хийг гарган авч, түүнийг ашиглан термохимийн аргаар усыг задалж эсвэл нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэж эрчим хүч, автомашин, газрын тос боловсруулах, хими, хүнсний үйлдвэрийг хангах болон ураны нөөцөө ашигласан ногоон хөгжлийн бодлогыг төгс шийдэх шаардлага гарч байна.

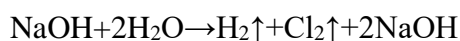
Дэлхий нийтээр устөрөгчийн эрчим хүч буюу устөрөгчийн эдийн засагт шилжиж байгаа үйл явдалтай мөр зэрэгцэн орох нь цаг хугацаа хэмнэж, эдийн засгийн алдагдалтай,

экологийн хортой түүхий нүүрсний эдийн засгаас устөрөгчийн эдийн засагт шилжих боломж олдох юм.

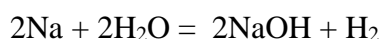
Сүүлийн үед органик түүхий эдээс устөрөгчийг цөмийн реакторын дулааныг ашиглан гаргаж авах судалгаа хийж байна. АНУ-ийн Генерал атомик фирм чанар муутай нүүрсийг хийжүүлтийн бүтээгдэхүүн, устөрөгч гарган авахад өндөр температурын хийн реакторыг хэрэглэхэд үндэслэсэн арга боловсруулж байна. Цөмийн реакторын дулааныг уур метаны хувиргуурт оруулж өгнө. Эдгээр хувиргуурт устөрөгч гаргаж авах процесс никел катализаторын оролцоотой 850⁰С орчим температуртай үед явагдана. Ер нь устөрөгчийг үйлдвэрт гаргаж дараах аргууд байдаг.

Үүнд:

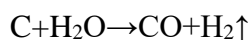
1. Шүлт ба давсны усан уусмалыг электролизд оруулна.



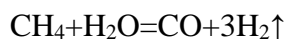
Шүлтэт ба газрын шүлтэт металл жирийн температурт устай урвалд орж шүлт, устөрөгч үүснэ.



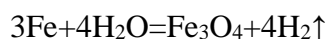
2. 1000⁰С-д улайсгасан нүүрсний дундуур усны уурыг нэвтрүүлнэ.



3. Метаныг 900⁰С-д конверсид оруулна.



4. Уур төмрийн арга



Иймээс олон аж үйлдвэрийн үйл явцад /жишээ нь: хөнгөнцагаан болон ган хайлуулах үйл явц, петрохими гэх мэт/ үндсэн химийн бүтээгдэхүүн нэн шаардлагатай ба энерги зөөх, цөмийн энергийг ашиглан устөрөгч үйлдвэрлэх нь цөмийн реакторын дараагийн үеийн хөгжлийн түлхүүр элемент юм. Тиймээс маш олон цөмийн судалгаа хөгжүүлэлтийн хөтөлбөрүүд байгаа ба хөтөлбөр нь ойролцоогоор санхүүгийн төсвийн 20% эзэлдэг ба үүнд цөмийн реакторыг ашиглан устөрөгч үйлдвэрлэхэд чиглэсэн чухал бүрэлдэхүүн хэсгүүд багтана. Энэ төрлийн зарим хөтөлбөрийн талаар олон улс, орон нутаг болон бүс нутгийн санаачлагуудыг хэлэлцсэн. Цөмийн устөрөгчийн хөтөлбөрийн гүйцэтгэгчээр Японы Атомын энергийн агентлаг (ЯАЭА) болон Японы атомын энергийн комисс (ЯАЭК) өндөр түвшний гүйцэтгэгчээр ажиллаж байна.

Цөмийн хөтөлбөр нь 1970-аад онд ашиг олох зорилготойгоор эхэлсэн ба Японы ӨТХР-ын анхны загвар гарсан ба Ойрай дахь судалгаа хөгжлийн төвд 30 Мвт чадалтай

туршилтын реакторын үйл ажиллагааг хөгжүүлэгдэж байна. Хүхэрт-иод термохимийн циклээр устөрөгч үйлдвэрлэх процессыг энэ реактор дээр туршиж байна. Уг циклийг 1980-аад оны үед General Atomic санал болгосон ба энгийн арилжааны 600 Мвт дулааны чадалтай реакторын хувьд ойролцоогоор 0.06 Мтн/жил устөрөгч үйлдвэрлэдэг байна. Америкт National Hydrogen-fuel Initiative (NHI), GHG-free устөрөгчийг үйлдвэрлэх технологид үндэслэн үндэсний судалгаа болон хөгжлийн хөтөлбөрийг баталсан. NHI түншүүд болох General Atomics, Areva NP, Westinghouse Electric Company-ууд арилжааны реактораар устөрөгч үйлдвэрлэх системийн хөгжүүлсэн.

- **Устөрөгч үйлдвэрлэх призм блок түлштэй өндөр температурын гелийн модуль реактор**

Хийн турбин модульчлогдсон цахилгаан үйлдвэрлэх өндөр үр ашигтай эрчим хүчний хувиргах Брайтоны цикл бүхий ӨТХР нь хос зориулалттай, гелийн хөргөлттэй реактор **GT-MHR**(Gas Turbine modular Helium Reactor) юм. Реакторын системийн 850⁰С гелийн хийн үр ашигтай өндөр температурт электролизийн эсвэл термохимийн аргаар усыг эсвэл нүүрсийг задалж устөрөгч үйлдвэрлэх боломжтой. Арилжааны GT-MHR - ийн стандарт түлшний цикл дахин боловсруулахаас гадна бага баяжуулсан уран хэрэглэнэ. GT-MHR нь үйлдвэрлэсэн нэг нэгж эрчим хүч нь цацраг идэвхт хүнд металлын хог бага гаргадаг учир үйлдвэрийн бүтээмж өндөртэй, түлшний шатаалтын гүн сайнтай. Үүний нэгэн адил GT-MHR - ийн үйлдвэрлэсэн эрчим хүчний нэгжид ноогдох нийт плутон болон ²³⁹Pu бага байна. GT-MHR - ийн аюулгүй байдлын дизайны зорилго нь ямар ч идэвхтэй аюулгүй ажиллагааны системийг ашиглахгүйгээр дулаан дамжуулдаггүй (байгалийн) материалаар зөвхөн задралын дулаан эсэргүүцэх явдал юм.

3.4.Монголд ашиглах судалгааны реакторын дэд бүтцийн судалгаа

Бид Монголд анхны судалгааны реакторын төсөл эхлүүлэхэд зориулан дэд бүтцийн зарим асуудлын өөрийн үнэлгээг Олон Улсын Атомын Энергийн Агентлагийн гаргасан арга зүйн дагуу боловсруулав. Энэхүү сэдвийн хүрээнд ОХУ-ын РОСАТОМ-ын шинжээчидтэй хамтран ажиллах, тэдний зүгээс өгсөн санал, зөвлөмжинд анализ хийх, РОСАТОМ-ын санал болгож буй Цөмийн Шинжлэх Ухаан, Технологийн Төвийг (ЦШУТТ)-ийг байгуулах, саналыг судлах, РОСАТОМ-ын байгууламжуудыг очиж үзэх, туршлага судлах зэргээр шаардлагатай мэдээлэл, туршлагийг цуглуулж Монгол улсад тохиромжтой ЦШУТТ-ийг байгуулахад шаардагдах үндэслэлийг боловсруулсан.

Энэ судалгаагаар бид ЦШУТТ-ийн ерөнхий төсөөлөл гаргаж, тус төвд байгуулах цөмийн судалгааны реактор, олон зориулалтаар ашиглах шарлагийн төв, сургалт,

судалгааны төв, нейтрон, реакторын физикийн лаборатори, нейтрон идэвхжлийн анализийн лаборатори, радиобиологийн лаборатори, материал судлалын лаборатори, радиохимийн лаборатори, хүрээлэн буй орчны судалгааны лаборатори гэх зэрэг суурь төхөөрөмж, лабораториудын хэрэгцээ шаардлага, ашиглах боломжуудыг нарийвчлан судалсан. Мөн ЦШУТТ-ийн суурь төхөөрөмж, лабораториудын эдийн засгийн урьдчилсан тойм үнэлгээг гаргалаа.

Монголд тохиромжтой судалгааны реакторын нейтроник тооцоололыг ОХУ-ын "Росатом" корпорацаас дэлхийн зах зээлд нийлүүлдэг судалгааны реакторын бага чадлын реакторуудад ашиглах VVR-M2, 10-15МВт өндөр чадалтай реакторуудад ашиглагдах IRT-4M, мөн 5-15МВт чадалтай реакторуудад ашиглах VVR-KN түлшнүүд бүхий судалгааны реакторуудын хувьд гүйцэтгэж тодорхойлсон. Мөн нейтроны урсгалын түгэлтийг ашиглаж шаардлагатай изотопуудыг үйлдвэрлэх оновчтой үйлдвэрлэх боломжийг судалсан.

3.5.Түлхүүр үг

Цөмийн эрчим хүч, дэвшилтэт реактор, түлшээ үржүүлэн шатаадаг реактор, хурдан нейтроны реактор, өндөр температурын хийн хөргүүртэй реактор, устөрөгчийн эрчим хүч, маш өндөр температурын хийн хөргүүртэй реактор, устөрөгч гарган авах, устөрөгчийн хэрэглээ, цөмийн шинжлэх ухаан, технологийн төв.

АГУУЛГА	
ГҮЙЦЭТГЭГЧДИЙН НЭРСИЙН ЖАГСААЛТ	1
РЕФЕРАТ	2
БИЧВЭР	2
1 БҮЛЭГ. МОНГОЛД ТОХИРОМЖТОЙ IV ҮЕИЙН РЕАКТОР СОНГОЛТ	19
1.1 Удиртгал	19
1.2 Түлшээ үржүүлэн шатаадаг реактор	19
1.2.1 Бага чадлын “CANDLE” реакторын голомтын тооцоо	21
1.2.2 Голомтын тооцоо	26
1.2.3 CANDLE шаталтыг эхлүүлэх	27
1.2.4 Дүгнэлт	33
1.3 Хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор	35
1.3.1 Голомтын дизайны нейтроник судалгаа	35
1.3.2 Түлшний савааны тооцоо	36
1.3.3 Түлшний эвлүүлгийн тооцоо	38
1.3.4 Реакторын голомтын тооцоо	42
1.3.5 Ойлгогчийн зузааны нөлөө	50
1.3.6 Түлшний нөлөө	51
1.3.7 Хөргүүрийн нөлөө	53
1.3.8 Бланкетын нөлөө	54
1.3.9 UN түлш ачаалал	56
1.3.10 Дүгнэлт	57
1.4 Өндөр температурын хийн хөргүүртэй призм реакторын дизайны судалгаа	59
1.4.1 ӨТХР-ын төрөл бүрийн дизайны өөрчлөлтийн харьцуулсан судалгаа	61
1.4.2 Төвийн ойлгогчийн зузааны нөлөө	65
1.4.3 Жигд бус голомттой, төвдөө ойлгогчин блоктой ӨТХР-ын нейтроник анализ	71
1.4.4 Реактивитийн температурын болон чадлын коэффициент	77
1.4.5 ӨТХР-ын голомт дахь шатан шингээгч материалын нөлөө	80
1.5 Түлшээ үржүүлэн шатаадаг хурдан реакторын нейтроны тооны тэнцвэрийн шинж чанар	90
1.5.1 Оршил	90
1.5.2 Жишиг хязгааргүй геометрт нейтроникийн үзүүлэлт	91
1.5.3 Дулаан зайлуулах чадамжид тохирох алхамтай түлшний үүрийн нейтроник үзүүлэлтүүд	95
1.5.4 Нейтроны алдагдалтай голомтын нейтроник үзүүлэлтүүд	100
2 БҮЛЭГ. Устөрөгчийн технологид суурилсан ногоон хөгжлийн бодлогын нэгэн шийдэл	103
2.1 Ногоон хөгжлийн бодлогын шийдэл-устөрөгчийн эрчим хүч	103
2.2 Устөрөгчийн шинж чанар	111
2.3 Өндөр температурын гелийн модуль реакторын төслүүд	116

2.3.1	Хе-100 реакторын төсөл (X-energy, АНУ)	116
2.3.2	PBMR модуль реакторын төсөл (ӨАБНУ).....	118
2.3.3	GTHTR-300 реактор (Япон, ЯАЭА).....	123
2.4	Маш өндөр температурын хийн реакторын голомтын дизайны судалгаа	131
2.4.1	МӨТХР-ын голомтын дизайны судалгаа	131
2.4.2	Голомтын дизайн	132
2.4.3	Түлшний дизайн	133
2.4.4	Үр дүн ба хэлэлцүүлэг	134
2.4.5	МӨТХР-ын голомтын түлшний дизайны судалгаа.....	139
2.4.6	Судалгааны арга зүй.....	140
2.4.7	Түлшний дизайн	141
2.4.8	Үр дүн ба хэлэлцүүлэг	144
2.4.9	МӨТХР-ын голомтын шатан шингээгч материалын дизайны судалгаа.....	154
2.4.10	Голомтын дизайн	156
2.4.11	Шатан шингээгч материал	157
2.4.12	Үр дүн ба хэлэлцүүлэг.....	158
2.4.13	Дүгнэлт	163

3 БҮЛЭГ. ӨНДӨР ТЕМПЕРАТУРЫН ГЕЛИЙН МОДУЛЬ РЕАКТОР АШИГЛАН УСТӨРӨГЧИЙН ЭРЧИМ ХҮЧИЙГ МОНГОЛД ХӨГЖҮҮЛЭХ ҮНДЭСЛЭЛ.....

3.1 Устөрөгчийн эрчим хүч нүүрстөрөгч ялгаруулдаггүй экологийн цэвэр тогтвортой эрчим хүч 164

3.2 Устөрөгч үйлдвэрлэх призм блок түлштэй өндөр температурын гелийн модуль реактор 173

3.2.1 GT-MHR реакторын төсөл (General Atomics, АНУ)

3.2.2 НТТТ туршилтийн реактор (Япон, JAЕА)

3.3 Монгол улсад устөрөгч үйлдвэрлэхэд ашиглах GT-MHR реактор.....

3.3.1 Утөрөгчийн тээвэрлэлт, хадгалалт.....

3.4 Монгол дахь устөрөгчийн хэрэглээ. Түлшний элемент

3.5 Монгол улсын 2040 оны устөрөгчийн хэрэгцээг GT-MHR реактор ашиглан хангах үндэслэл 212

4 БҮЛЭГ. МОНГОЛД АШИГЛАХ СУДАЛГААНЫ РЕАКТОРЫН ДЭД БҮТЦИЙН СУДАЛГАА 219

4.1 Удиртгал.....

4.2 ЦШУТТ-ийн ерөнхий төсөөлөл.....

4.3 ЦШУТТ-ийн суурь төхөөрөмж, лабораториуд

4.3.1 Цөмийн судалгааны реактор.....

4.4 Олон зориулалтаар ашиглах шарлагийн төв

4.5 Сургалт, судалгааны төв.....

4.6 Нейтрон, реакторын физикийн лаборатори.....

4.7 Нейтрон идэвхжилийн анализийн лаборатори.....	232
4.8 Радиобиологийн лаборатори.....	232
4.9 Материал судлалын лаборатори	233
4.10 Радиохимийн лаборатори	233
4.11 Хүрээлэн буй орчны судалгааны лаборатори.....	233
4.12 Эмнэлгийн оношилгоо, эмчилгээний зориулалттай цацраг идэвхт изотопын хэрэгцээ болон геологи, уул уурхай, хүрээлэн буй орчин, хүнс, материал судлал, эмийн найрлагын судалгаанд цөмийн идэвхжлийн шинжилгээ хийх хэрэгцээ, шаардлага.....	234
4.12.1 Эмнэлэгийн оношилгоо, эмчилгээний зориулалттай цацраг идэвхт изотопын хэрэгцээ ба үйлдвэрлэх боломж.....	234
4.13 Судалгааны реактор дээр нейтрон идэвхжлийн анализ хийх боломж.....	237
4.13.1 Монголд тохиромжтой судалгааны реакторын нейтроник тооцоолол	239
4.13.2 Түлшний эвлүүлгийн тооцооны үр дүн.....	240
4.13.3 Дүгнэлт.....	241
4.13.4 ЦШУТТ-ийн суурь төхөөрөмж, лабораториудын эдийн засгийн урьдчилсан тойм үнэлгээ.....	242
СЭДЭВТ АЖЛЫН ХҮРЭЭНД ХЭВЛҮҮЛСЭН БҮТЭЭЛИЙН ЖАГСААЛТ	245
СЭДЭВТ АЖЛЫН ХҮРЭЭНД 2018-2021 ОНД МАГИСТР, ДОКТОРАНТУУДЫГ	
ДАГАЛДУУЛЖ МЭРГЭШҮҮЛСЭН БАЙДАЛ	250
АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ	251
ХАВСРАЛТ	253

1 БҮЛЭГ. МОНГОЛД ТОХИРОМЖТОЙ IV ҮЕИЙН РЕАКТОР СОНГОЛТ

1.1 Удиртгал

Цөмийн цахилгаан станц гэдэг нь цөмийн хуваагдах урвалаас үүссэн дулааныг ашиглан цахилгаан эрчим хүчийг үйлдвэрлэх цогц систем юм. Хуваагдах урвал гэдэг нь ^{235}U цөм дээр дулааны энергитэй (~ 0.025 эВ) нейтрон тусаж уг цөм хуваагдахыг хэлэх ба ^{235}U -ийн нэг цөм хуваагдахад 200 МэВ энерги ялгарна. Энэ энергийг ашиглан дулаан, цахилгааныг үйлдвэрлэнэ. Хамгийн анх 1942 оны 12-р сарын 2-нд Энрико Ферми болон бусад эрдэмтэд хамтран цөмийн гинжин урвалыг тогтвортойгоор явуулж цөмийн реакторын үйл ажиллагааг эхлүүлж байжээ. Үүнээс хойш цөмийн эрчим хүчний реакторын систем нь I, II, III үе шаттай хөгжиж ирсэн ба сүүлийн жилүүдэд аюулгүй ажиллагаатай, эдийн засгийн үр ашигтай, ашигласан түлшний хаягдал багатай, цөмийн зэвсэг үл дэлгэрүүлэх бодлогод нийцсэн IV үеийн дэвшилтэт реакторын голомтын дизайны судалгааг олон улсын эрдэм шинжилгээний байгууллага болон их сургуулиудын эрдэмтэн, судлаачид эрчимтэй хийж гүйцэтгэж байна.

Бид 2015 оноос эхлэж Монголд тохиромжтой цөмийн судалгааны реактор болон цөмийн эрчим хүчний реакторын голомтын дизайны судалгаа хийж гүйцэтгэхээс гадна дэлхийн улс орны судалгааны хүрээлэнгүүдэд судлагдаж буй IV үеийн гэж нэрлэгддэг эрчим хүний реакторуудын голомтын дизайныг өндөр түвшний физик тооцоолол хийдэг симуляцын кодыг ашиглан түлш, материалын баяжуулалт, голомтод байрлах түлш, удирдлагын саваа гэх мэт бүрэлдэхүүн хэсгүүдийг хоорондоо ялгаатай байдлаар загварчилж, 100 МВт дулааны чадалтай реакторын голомтын дизайны тооцооллуудыг гүйцэтгэж үр дүнгүүдийг гаргасан. Энэ ажлын үр дүнгүүд олон улсын болон дотоодын хурлуудад илтгэгдэж, хэвлэгдсэн ба “Монголд тохиромжтой дэвшилтэт цөмийн реакторын харьцуулсан судалгаа” (2018-2022) суурь судалгааны төслийн зорилтод тусгагдсан ажлын хүрээнд хийж гүйцэтгэгдлээ.

1.2 Түлшээ үржүүлэн шатаадаг реактор

Хурдан нейтроноор ажилладаг реакторууд байгалийн уран эсвэл ядуурсан уранаар ажиллах боломжтой. Ийм төрлийн реакторыг Түлшээ Үржүүлэн Шатаадаг реактор гэх бөгөөд түлшний дахин боловсруулалт эсвэл түлшний баяжуулалт хийхгүйгээр хуваагдахуйц материалыг голомт дотроо нэгэн зэрэг үржүүлэн шатаах юм. Анх 1958 онд ОХУ-ын эрдэмтэн Feinberg түлшээ үржүүлэн шатаах реакторын санааг дэвшүүлсэн. Түүний дараа 1979-оноос “Brookhaven National Laboratory”-ийн Atefi, Fischer болон түүний судалгааны багийнхан энэ төрлийн реакторын судалгааг үргэлжлүүлэн хийж эхэлсэн.

1996 онд Teller болон түүний судалгааны баг “шилжих долгионы реакторын санааг дэвшүүлсэн ба үүнд үржин/шатах долгион үүссэний дараа цилиндр реакторын голомтын аксиал чиглэлд удаанаар шилжих юм. Үүний дараа 1997 онд Toshinsky үржин шатах горимоор ажилладаг ердийн хурдан реакторын голомттой төстэй түлшээ үржүүлэн шатаах реакторын ойлголтыг дэвшүүлсэн. Үүнд голомт хэдэн бланкет болон оптимал дарааллаар радиал чиглэлд байрлуулсан баяжуулсан түлшний багцуудаас бүрдэнэ. Үүнийг “Standing wave” реактор гэнэ. Циклийн төгсгөлд хамгийн өндөр шаталттай түлшний багцыг голомтоос авч, шинэ бланкет багцыг тухайн түлшний байранд оруулна.

2000 онд Теллерийн шилжих долгионы реакторын санаан дээр тулгуурлан Секимото нь CANDLE (**CANDLE-Constant Axial Shape of Neutron Flux, Nuclide Densities and Power Profile During Life of Energy Production** буюу эрчим хүч үйлдвэрлэлтийн явцад чадлын үзүүлэлт, түлшний нягт, нейтроны урсгал зэргийн тэнхлэгийн дагуух тогтмол хэлбэр) гэх нэртэй түлшээ үржүүлэн шатаах реакторын санааг дэвшүүлсэн. Энэ реакторын аксиал чиглэлд гурван муж байна (зураг 1.1). Үүнд шаталтын муж, цэвэр түлшний муж, шатсан түлшний муж. Шаталт явагдахад түлшний нягт, нейтроны урсгал өөрчлөгдөхгүй. Мөн энэхүү реактор шаталтыг хянахад хяналтын саваа, ойлгогч материал зэргийг ашиглах шаардлагагүй.



Зураг 1.1. “CANDLE” реакторын шаталт

2005 онд Driscoll Хийн хөргүүртэй хурдан реакторт үндэслэн түлшээ үржүүлэн шатаадаг реакторыг санааг дэвшүүлсэн. Үүнд голомт гели хөргүүр, ODS-бүрээс материалтай карбид түлшнээс бүрдэх бүрдэнэ.

2008 онд хэд хэдэн шинжлэх ухаанчдаар бүрдсэн баг шилжих долгионы реакторыг хөгжүүлэх зорилготойгоор “Terra Power” LLC үүсгэн байгуулсан. Гэвч түлшээ үржүүлэн шатаах реакторын хоёр үндсэн вариант болох шилжих долгионы болон босоо долгионы реакторын дизайныг хөгжүүлж байна.

2010 онд General Atomics (GA)-аас Energy Multiplier Module (EM2) гэх түлшээ үржүүлэн шатаах реакторын санааг дэвшүүлсэн. Үүнд голомт нь силикон карбид давхаргаар бүрсэн уран карбид түлш бүхий тоосгонуудаас бүрдэнэ. Мөн хөргүүр нь гели байна, шаталтын муж бүх чиглэлд байна.

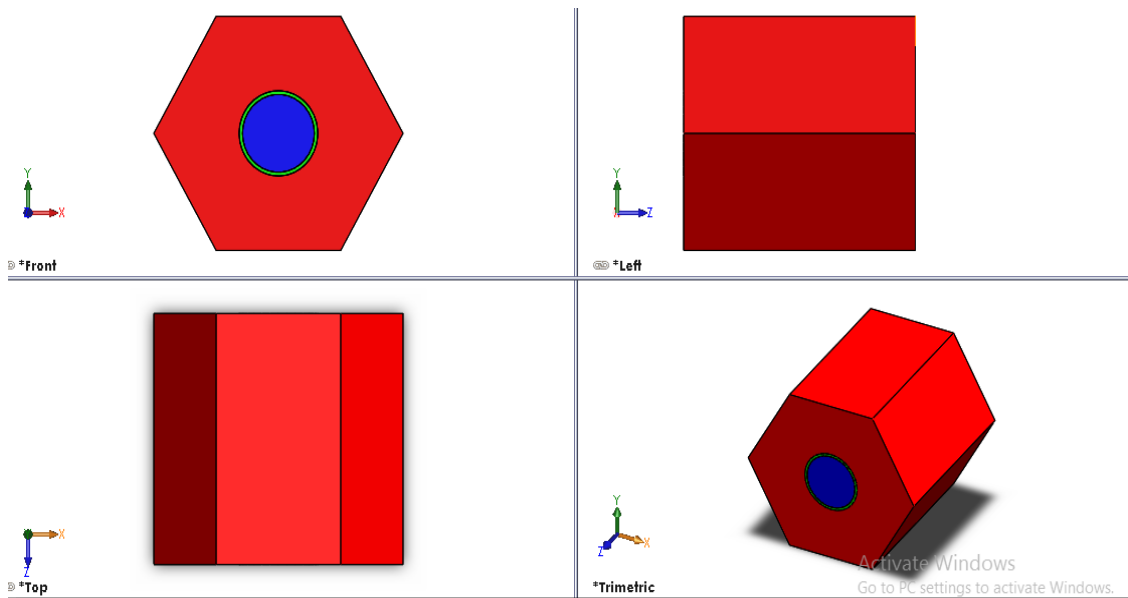
1.2.1 Бага чадлын “CANDLE” реакторын голомтын тооцоо

“CANDLE” реакторт шаталт явагдахад ямар нэгэн удирдлагын механизм шаардахгүй ба голомтын шинж чанар өөрчлөгдөхгүй (power feedback coefficients, power peaking factor) зэрэг нь энэхүү реакторын дизайн болон ажиллагааг маш хялбар болгодог. Мөн түүнчлэн реактор байгалийн уранаар ажиллах учраас дахин цэнэглэх түлшийг тээвэрлэх болон хадгалах бүрэн боломжтой. Иймээс энэ реакторыг алслагдсан, дэд бүтэц муутай хөгжиж буй орнуудад ашиглах нь илүү тохиромжтой. Хүснэгт 1.1-д бага чадлын “CANDLE” реакторын дизайны параметруудийг харуулав. Түлш болон түлшний бүрээс материалаар ураны нитрид болон төмөрлөг ган (HT-9) харин реакторын хөргүүр болон нейтрон ойлгогч материалаар Pb-Bi-ийг ашигласан.

Хүснэгт 1.1. Бага чадлын CANDLE реакторын дизайны параметрууд

Параметрууд	Утга
Дулааны чадал	350МВт
Голомтын радиус	100см
Голомтын өндөр	200см
Радиал ойлгогчын зузаан	50см
Түлшний материал	UN (N-15 баяжуулсан)
Бүрээс материал	HT-9
Хөргүүрийн материал	Pb-Bi (44.5, 55.5%)
Түлшний савааны төрөл	“Tube in shell”
Хөргүүрийн сувгийн диаметр	0.668 см
Бүрээс материалын зузаан	0.035 см
Түлшний нягт	14.32 г/см ³

Түлшний савааны төрөл нь “Tube in shell” юм. “CANDLE” реакторын шаталт нейтрон экономи маш байхад явагдах учир селл дэх түлшний эзлэхүүнийг нэмэгдүүлэхийн тулд ийм төрлийн сэллийг сонгосон. Үүний гурван хэмжээст Зураг 1.2-харуулав. Энэхүү сэллийг багцлан ассемблейг болгох замаар реакторын голомтыг бүтээдэг. Тооцоололд нийт 127 ширхэг сэллийг багцлан 1 ассемблей болгосон.

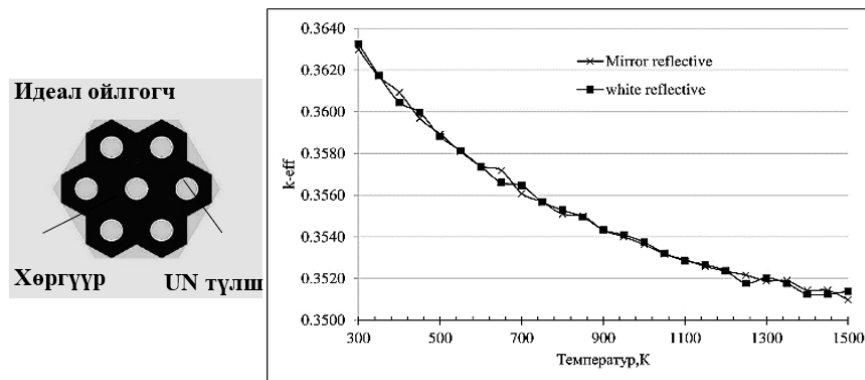


Зураг 1.2. “Tube-in-shell” түлшний элемент

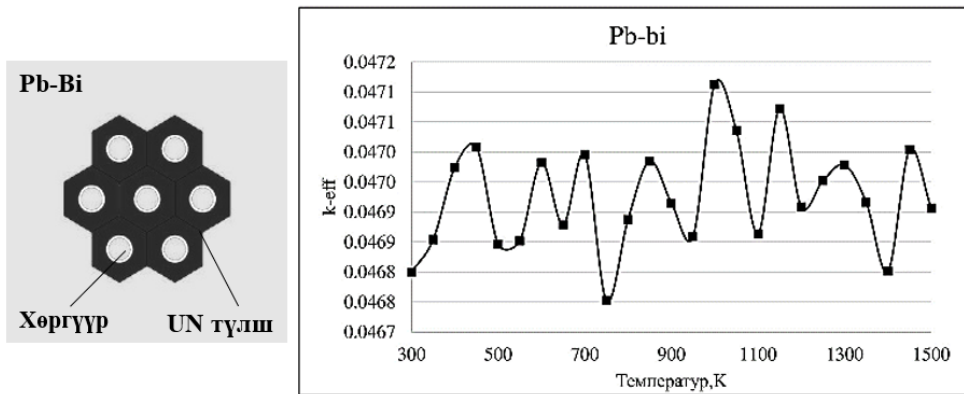
“CANDLE” реакторын голомтын нейтроникмйн тооцоог 3 үе шаттай гүйцэтгэж байна. Үүнд:

- Түлшний савааны тооцоо
- Түлшний багцын тооцоо
- Голомтын тооцоо

Түлшний савааны тооцооллоор нитрид түлшний нейтрон үржүүлэгч коэффициент (k_{eff}) температураас хамаарч хэрхэн өөрчлөгдөхийг авч үзсэн. Дараа нь түлшний багцийн тооцооллоор нитрид түлшнээс бүрдсэн түлшний багцны ураны баяжуулалтаас хамаарсан критик утгыг тооцоолсон. Харин голомтын тооцоо хийгдэж байгаа бөгөөд урьдчилсан байдлаар нэгэн жигд голомтын хувьд шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэж байна. Нейтрон үржүүлэгч коэффициентийн голомтын температураас (300К-1500К) хамаарсан өөрчлөлтийг Рb-Vi ойлгогчтой болон идеал нөхцөлүүдтэй 7 нитрид түлшний хувьд тооцоолсон. Үр дүнг зураг 1.3 ба зураг 1.4-д харуулав.



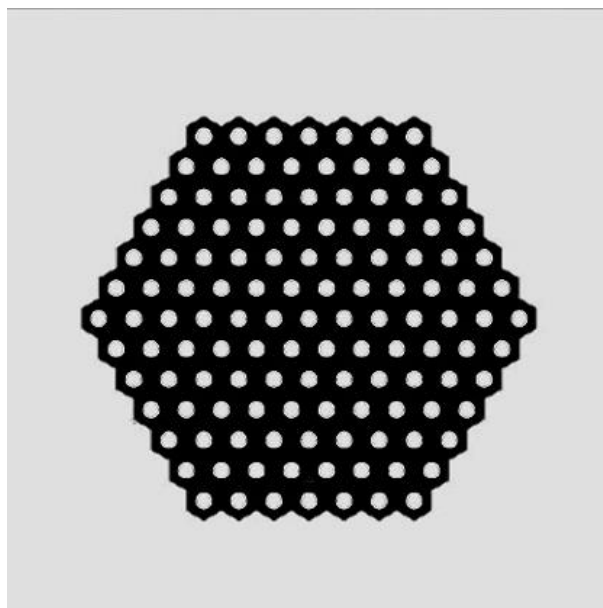
Зураг 1.3. Идеал ойлгогч бүхий ойлгогчтой түлшний савааны k_{eff} -ийн өөрчлөлт



Зураг 1.4. Pb-Bi ойлгогчтой үед k-eff-ийн өөрчлөлт

Хурдан реакторын хувьд ойлгогч материалын сонголт маш чухал гэдэг нь k-eff-ийн өөрчлөлтийн тооцооноос харагдаж байна. Хар тугалга-висмут ойлгогчтой байх үед k-eff-ийн өөрчлөлт температураас хамаарах өөрчлөлт тогтворгүй байгаач хамгийн их утга болон хамгийн бага утгуугуудын хооронд 0.0004 зөрөө байна.

Түлшний савааны тооцооны дараа түлшний багцын тооцоог гүйцэтгэсэн. 127 ширхэг түлшний элементээс бүрдсэн нэг түлшний багцыг зураг 1.5-д харуулав. Энэхүү түлшний багцын хувьд k-eff-ийн критик утгыг ураны баяжуулалтаас хамааруулж олсон (зураг 1.6).

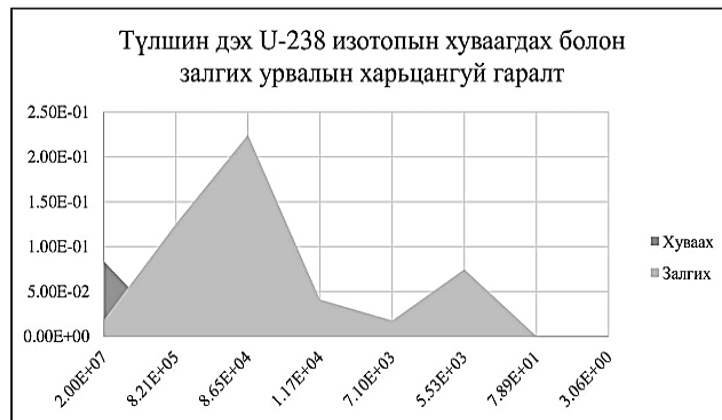


Зураг 1.5. Түлшний эвлүүлэг /127 ширхэг түлшний савааг багтаасан/

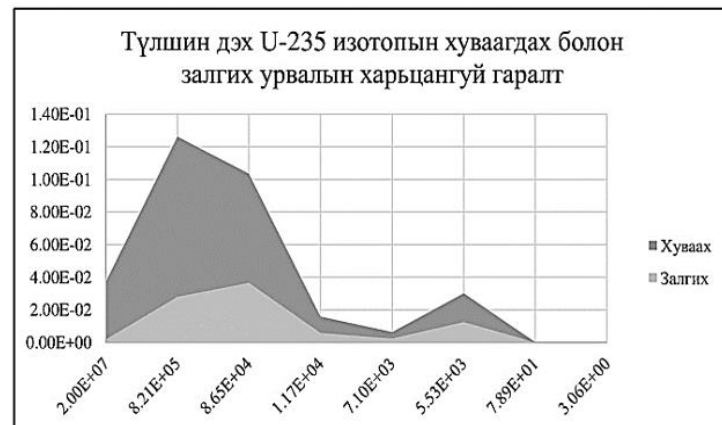
Энэхүү түлшний багцын хувьд 61.9% баяжуулалттай, 201.45 кг U-235 реакторыг тогтвортой ажиллуулахад шаардлагатай. Энэхүү жин нь нийт багцын 53.4% юм. Түлшин дэх U-238 болон U-235 изотопуудын хуваагдах ба шингээх урвалын спектрийн харьцангуй гаралтыг зураг 1.7 ба зураг 1.8-д харуулав.



Зураг 1.6 Ураны баяжуулалтаас хамаарсан $k\text{-eff}$



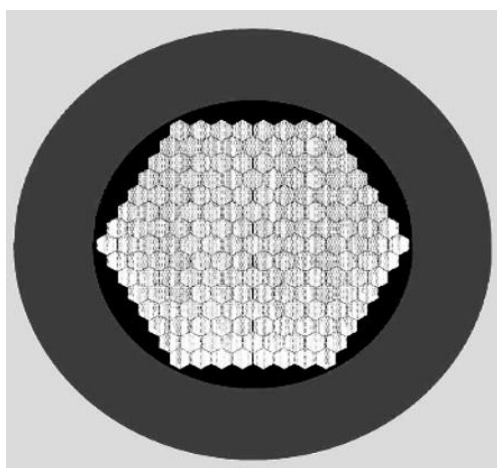
Зураг 1.7. Түлшин дэх U-238 изотопын хуваагдах болон залгих урвалын харьцангуй гаралт



Зураг 1.8. Түлшин дэх U-235 изотопын хуваагдах болон залгих урвалын харьцангуй

U-235 изотоп дахь хуваагдах урвалын хэмжээ U-238-аас маш их байна. Харин залгих урвалын хэмжээ U-238 изотопт их байна. Учир нь энэхүү түлшний багц дахь нейтроноор хуваагдаж гинжин урвалыг эхлүүлж байгаа изотоп бол U-235. Харин U-238 нь энэхүү хуваагдлаас үүссэн зарим нейтроныг шингээх замаар Pu-239 үүсгэх юм. Pu-239 үүссэнээр реакторын голомт дахь хуваагдах изотопын хэмжээ нэмэгдэж, реакторын тасралтгүй ажиллах хугацаа өсдөг. Гинжин урвал энэ изотопын хуваагдлаар үргэлжлэнэ.

Голомтын тооцооллыг нэгэн төрөл голомтын хувьд гүйцэтгэсэн байгаа ба реакторын ажиллах хугацаа болон хугацаанаас хамаарсан түлшний нөхөн үйлдвэрлэлтийн харьцааг (ТНХ) гаргасан. Голомтын бүтцийн хувьд нийт 169 ассемблейгаас бүрдсэн ба үүнийг 50 см зузаантай Хартугалга-Висмут ойлгогч хүрээлж байна. Голомтын өндөр болон диаметр 200 см. Нийт дулааны чадал нь 350 МВт. Энэхүү голомтын хөндлөн огтлолыг зураг 1.9-д харуулав. Энэ голомтын хувьд хийсэн шаталтын тооцооллын үр дүнг зураг 1.10-д, нөхөн үйлдвэрлэлийн харьцаа харьцааг зураг 1.11-д тус тус харуулав.



Зураг 1.9. 169 ассемблей бүхий голомт

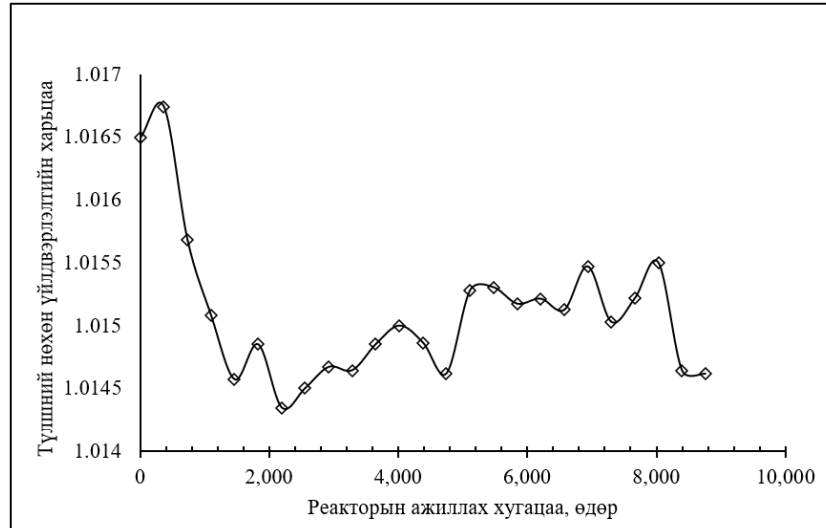


Зураг 1.10. Реакторын ажиллах хугацаа

Голомтыг нэгэн жигд 8.7% (U-235)-аар баяжуулахад анхны критик утга буюу нейтрон үржүүлэгч эффектив фактор ($k_{эфф}$) 1.0014 байсан ба энэхүү голомтын хувьд хийсэн шаталтын тооцооллын үр дүнгээс харахад реактор нийт 14 жил тасралтгүйгээр түлшээ нөхөн үйлдвэрлэн шатаах замаар ажиллаж байна. Мөн реактор унтарсны дараа буюу $k_{эфф}$ нэгээс доош орны дараа 6 жилийн дараа дахин критик болж байгаа нь реакторт хангалттай хэмжээний хуваагдахуйц материал (Pu-239) үүсэж байгааг илтгэж байна. Үүнийг мөн түлшний нөхөн үйлдвэрлэлтийн харьцаагаар илэрхийлж болно. Энэ нь хурдан үзүүлэлтийг илэрхийлэх чухал параметр болдог ба дараах харьцаагаар илэрхийлдэг.

$$ТНХ = \frac{\text{Голомтод үүсэн хуваагдахуйц материал}}{\text{Нийт зарцуулагдсан хуваагдахуйц материал}}$$

Хэрэв $ТНХ > 1$ бол тухайн реакторыг үржүүлэгч реактор, $ТНХ < 1$ бол хувиргагч реактор гэж нэрлэдэг.



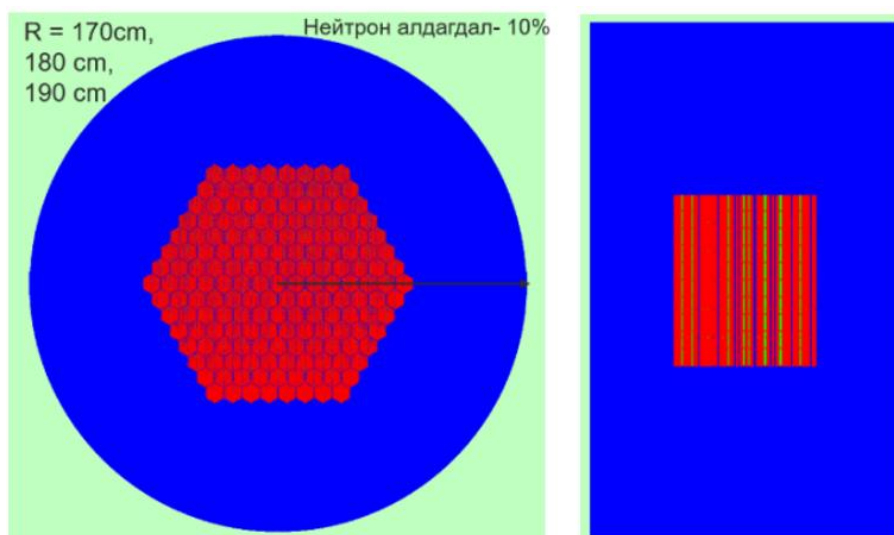
Зураг.1.11. Түлшний нөхөн үйлдвэрлэлтийн харьцаа

Голомтын хувьд анхны $ТНХ$ нь 1.0164 байсан ба реакторын ажиллах нийт хугацаанд нэгээс дээш байгаа нь реакторыг түлшээ нөхөн үйлдвэрлэж чадаж байгааг илтгэж байна. Мөн түүнчлэн өсөлт бууралттай байгаа нь нөхөн үйлдвэрлэхийн зэрэгцээ түлшээ шатааж байгааг илтгэнэ.

1.2.2 Голомтын тооцоо

Голомтын ойлгогчийн зузааныг сонгох

Реакторын дизайнд голомт дахь нейтроны алдагдлыг багасгахын тулд голомтын гадуур нейтрон ойлгогч материал байрлуулдаг. Бага чадлын реакторын хувьд нейтроны эдийн засаг маш чухал үзүүлэлт учраас голомт дахь нейтроны алдагдлыг багасгах хэрэгтэй болдог. Иймээс голомтын гадна хар тугалга-висмутыг байрлуулсан ба түүний зузаан хэр зэрэг байхыг тооцоолохын тулд радиусыг 10-20 см –аар нэмж нейтроны үржүүлэгч эффектив фактор ($k_{эфф}$), f -параметр, нейтроны алдагдал зэргийг үнэлэн ойлгогчийн зузааныг тодорхойлов. Үр дүнг Хүснэгт 1.2-д харуулав. f -параметр гэдэг нь голомтын нейтроны тоонд ойлгогчийн нөлөөг илэрхийлдэг параметр бөгөөд физик утга нь ойлгогч руу орсон нейтроны хэдэн хувь нь голомт руу буцаж орох юм. Ойлгогч материал бүхий голомтын хөндлөн огтлолыг Зураг 1.12-д харуулав.



Зураг 1.12. Голомтын хөндлөн огтлол

Хүснэгт 1.2. Ойлгогч материалын зузааныг олох тооцооллын дүн

Ойлгогчийн радиус, см	кэфф	f	Нейтроны алдагдал
100	0.353343	0.00E+00	15%
110	0.353899	1.57E-03	14%
120	0.35416	2.31E-03	13%
150	0.354684	3.78E-03	11%
170	0.354959	4.55E-03	10%
180	0.35544	5.90E-03	10%
190	0.355187	5.19E-03	10%
200	0.355429	5.87E-03	9%

Ойлгогчийн радиусыг 170-190 см хооронд байхад нейтроны алдагдал болон f-параметр тогтворжиж эхэлсэн. Энэ нь ойлгогч дахь нейтроны шилжих зай нь үүний чөлөөт замын дундаж уртаас их болсныг илтгэнэ. Тиймээс ойлгогчийн зузааныг дээрх хэмжээнээс их болгох нь голомтын нейтроны тоонд ямар нэг нөлөө үзүүлэхгүй.

1.2.3 CANDLE шаталтыг эхлүүлэх

Гадаад үүсгүүрээс хангалттай хэмжээний нейтроноор хангаж реакторыг асаах боломжтой ч энэхүү арга нь хэт үнэтэй бөгөөд түлшний эхний циклд чадлын нягтыг ихээр өөрчилдөг. Баяжуулсан уран эсвэл плутонийг ашиглан реакторыг асаах боломжтой. Ингэснээр тэнцвэрт төлвийн голомттой ижил чадлын нягттай анхны голомтыг бий болгох боломжтой ба тэнцвэрийн төлөв рүү ямар нэгэн огцом өөрчлөлтгүйгээр (реактивитигийн огцом өөрчлөлтгүй) хүрэх боломжтой.

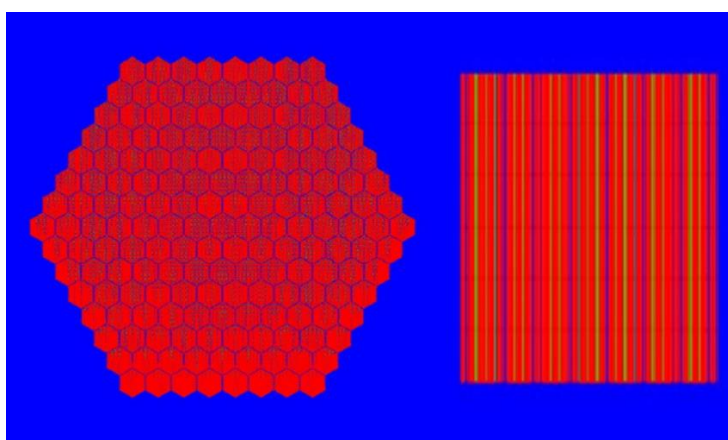
Цэвэр түлшний мужийг асаах шаталтын хугацаа нь харьцангуй удаан байдаг тул “burning region” буюу шаталтын муж нь их хэмжээний хуваагдлын бүтээгдэхүүн болон хүнд актиноидууд агуулдаг. Тиймээс энэхүү мужийг бодит байдалд бий болгох нь маш хүндрэлтэй. Энэхүү асуудлыг шийдвэрлэхийн тулд олон санаануудыг дэвшүүлсэн байдаг. Үүнд:

- Шатдаг хорлолт материалтай хамт блок төрлийн өндөр температурын хийн реакторыг CANDLE-ын шаталтыг эхлүүлэхэд ашиглах-Охака, Секимото
- Хийн хөргүүртэй хурдан реакторын ашигласан түлшээр CANDLE-ийг асаах- Saadi et al., 2012.
- Шаталтын мужыг баяжуулсан уранаар, хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийг Nb-аар оруулан “CANDLE” реакторыг асаах- Sekimoto, Miyashita, 2006.

зэрэг болно.

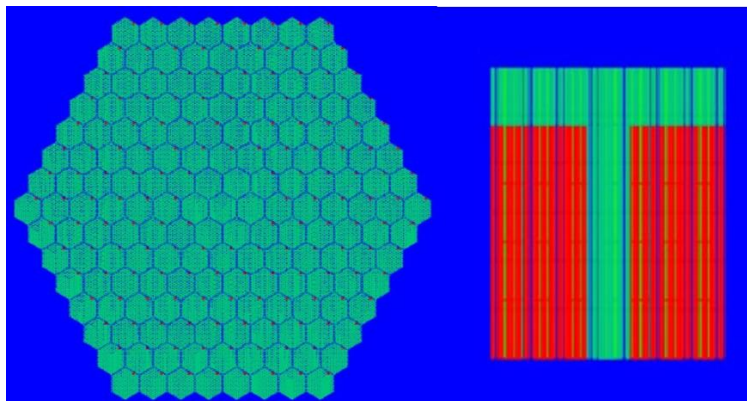
Энэ ажилд баяжуулсан ураныг ашиглан “CANDLE” реакторыг асаахыг зорьсон. Баяжуулсан ураны ачааллыг голомтод төрөл бүрийн байдлаар ачаалж шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэсэн. Нэг төрлийн ачаалал бүрийн хувьд $k_{эфф}$ болон түлшний нөхөн үйлдвэрлэлийн коэффициент (CR)-уудийг хугацаанаас хамааруулж тооцоолж, энэ нь түлшний нөхөн үйлдвэрлэл явуулах боломжтой ачаалал байж болох эсэхийг судалсан. Ачааллын 7 төрөл бүхий 169 түлшний эвлүүлгээс бүрдсэн голомтын хөндлөн огтлолыг доор харуулав. Эдгээр голомтын хувьд $k_{эфф}$ болон CR-уудыг тооцоолсон ба үр дүнг шаталтын тооцооны хэсэгт харуулав.

Ачааллын төрөл 1: Голомтын бүх түлшний эвлүүлэгт нэгэн жигд байдлаар U-235-ийг 8.7-11.0% хүртэл баяжуулсан.

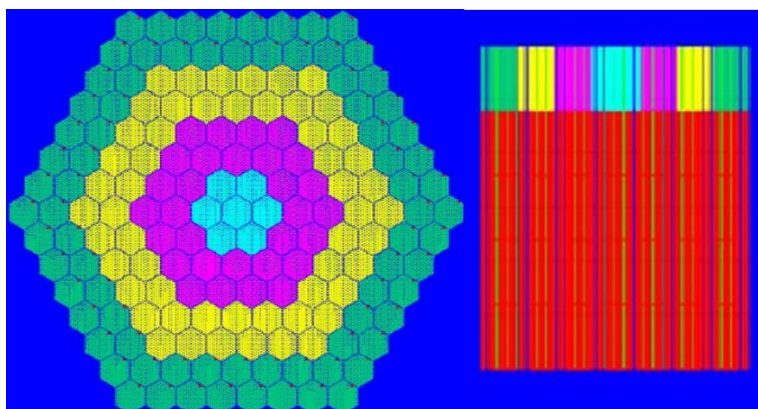


Ачааллын төрөл 2: Голомтын аксиал болон радиал чиглэлд баяжуулалт хийсэн ба голомтын нийт өндрийн 40 см уртад харгалзах, голын 7 эвлүүлгийн нийт уртад харгалзах

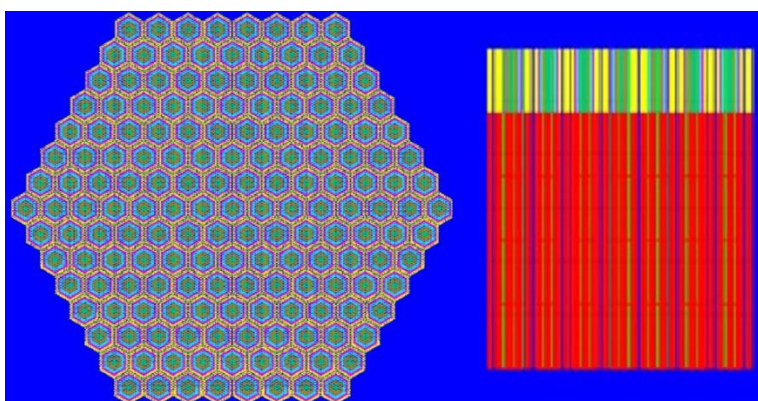
байдлаар U-235-ийг ачаалсан. Өөрөөр хэлбэл, доорх зурагт харагдаж байгаа ногоон хэсэгт баяжуулсан уран, улаан хэсэгт байгалийн ураныг ачаалсан.



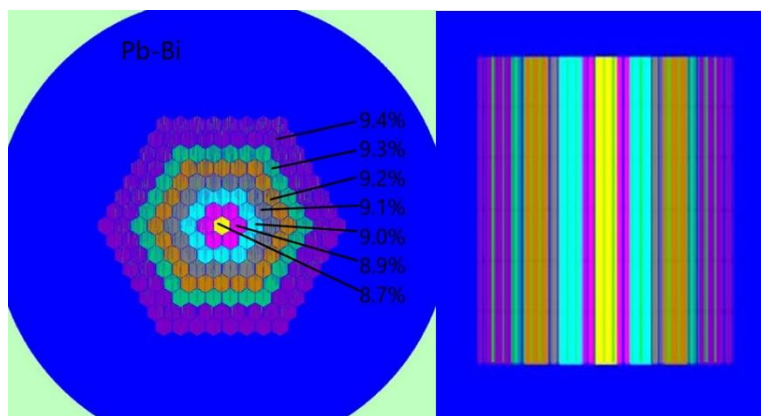
Ачааллын төрөл 3: Энд голомтын нийт эвлүүлгийн хувьд нэгэн жигд бус баяжуулалттай бөгөөд нийт өндрийн 40 см уртад харгалзах U-235-ийг ачаалсан. Доорх зурагт харагдаж буй ногоон, шар, ягаан, цэнхэр өнгөнүүдэд 20%, 16%, 14%, 10% -ийн U-235-ийн баяжуулалт, улаан өнгө нь байгалийн ураныг илэрхийлнэ.



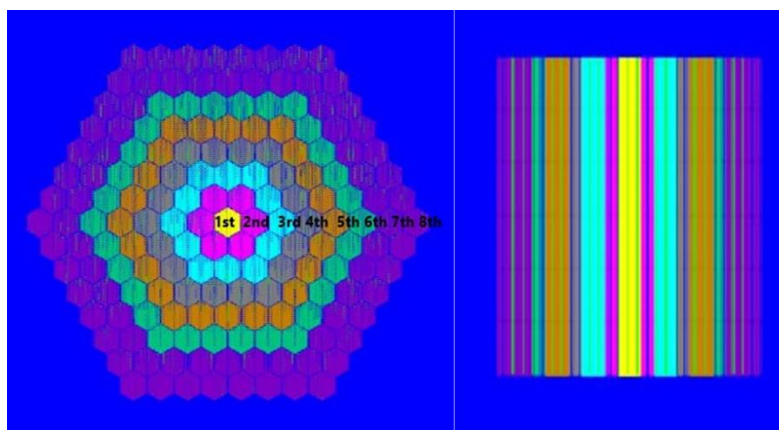
Ачааллын төрөл 4: Энэ ачаалал нь нэг эвлүүлгийн хувьд нэгэн жигд бус баяжуулалт хийсэн бөгөөд нийт өндрийн 40 см уртад харгалзах U²³⁵-ийг ачаалсан. Доорх зурагт харагдаж буй ногоон, шар, ягаан, цэнхэр өнгөнүүдэд 20%, 16%, 14%, 10% -ийн U²³⁵-ийн баяжуулалт, улаан нь байгалийн ураныг илэрхийлнэ.



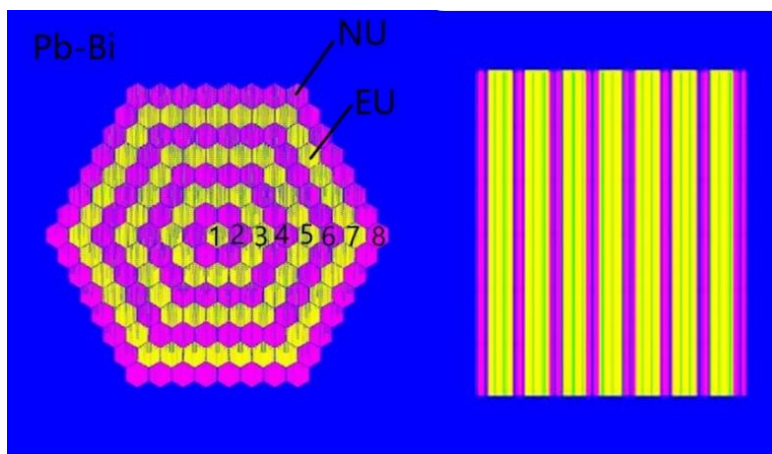
Ачааллын төрөл 5: Түлшний эвлүүлгийг радиал чиглэлд 1-8 хүртэлх бүсэд хувааж, бүс бүр дээр U-235-баяжуулалтыг ялгаатай байхаар оруулсан.



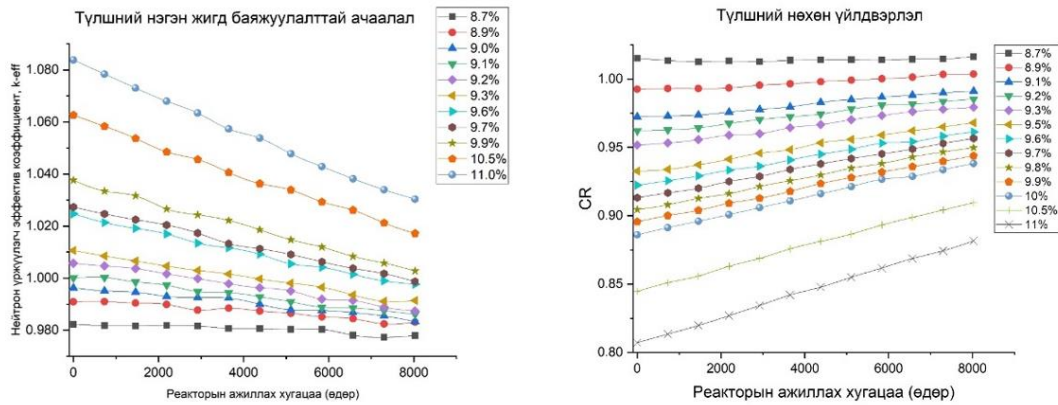
Ачааллын төрөл 6: Түлшний эвлүүлгийг радиал чиглэлд 1-8 хүртэлх бүсэд хувааж, бүс бүр дээр тооцооллыг хийх юм. Тухайлбал, 1-ээр бүсэд баяжуулалт оруулна гэвэл бусад шар хэсэгт баяжуулсан уран, бусад бүсэд байгалийн ураныг оруулах юм.



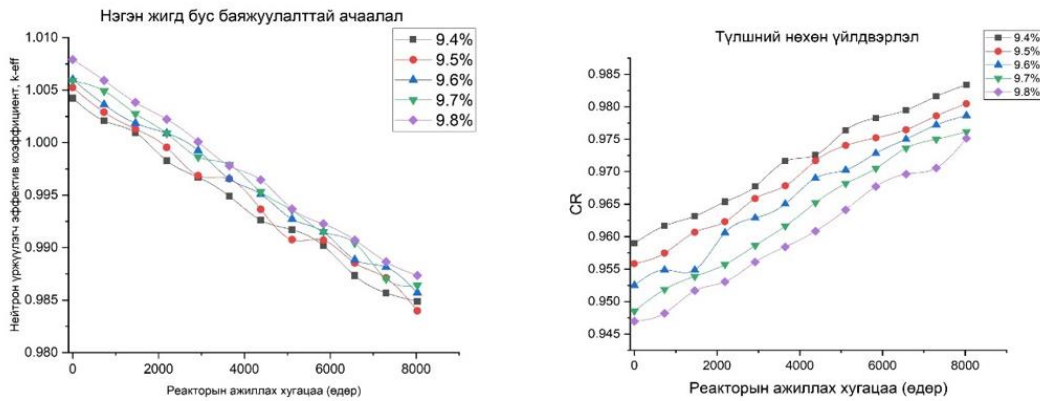
Ачааллын төрөл 7: Голомтыг радиал чиглэлд 8 бүсд хувааж, сондгой бүсүүд дээр баяжуулсан уран, тэгш бүсүүд дээр байгалийн ураныг ачаалсан. Зурагт харагдаж буй шар хэсгүүдэд баяжуулсан уран, ягаан хэсгүүдэд байгалийн уран байх юм.



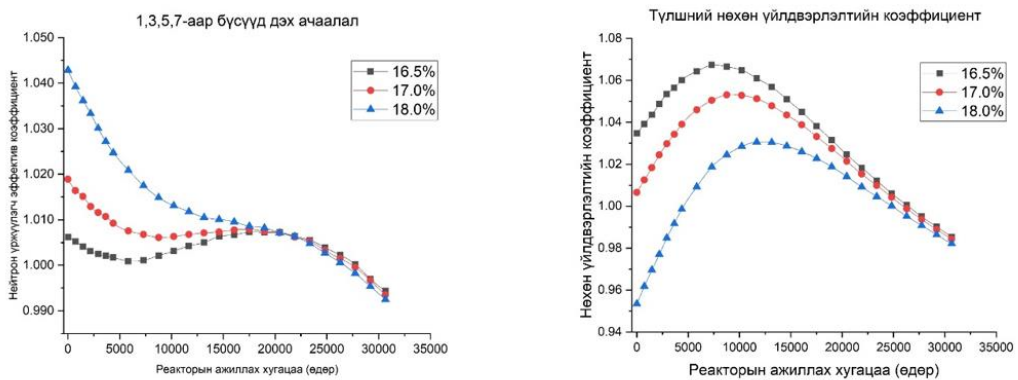
Шаталтын тооцооны үр дүн: Шаталтын тооцооны үр дүнд ачааллын төрөл 1, 5, 7-оор ачаалласан голомтуудын хувьд хугацаанаас хамааруулж тооцоолсон $k_{эфф}$ болон CR-ийн үр дүнг харуулав.



Зураг 1.13. Ачааллын төрөл 1-ийн хувьд тооцоолсон $k_{эфф}$ болон CR



Зураг 1.14. Ачааллын төрөл 3-ийн хувьд тооцоолсон $k_{эфф}$ болон CR



Зураг 1.15. Ачааллын төрөл 7-ийн хувьд тооцоолсон $k_{эфф}$ болон CR

Ачааллын төрөл 1 дээр хийгдсэн тооцооллын үр дүн: Нэгэн жигд ачаалсан голомтод 8.7%-11.0% хүртэл нийт 11 өөр баяжуулалт тус бүр дээр шаталтын тооцооллыг явуулсан. Шаталтыг нийт “0-8000” өдөр хүртэл явуулсан ба шаталт эхлэхээс өмнө анхны критик утга 11.0%-9.1% баяжуулалтуудын хувьд 1.082-оос бага байсан. Реактор ажиллах

хугацаанд реактивитийн огцом өөрчлөлт байхгүй, $k_{эфф}$ нэгэн жигд буурсан. CR харьцаа нь шаталтын бүхий л хугацааны турш 1-ээс бага байна. Энэ нь голомтыг нэгэн жигд 11%-9.1% баяжуулахад түлшний нөхөн үйлдвэрлэл явагдахгүй, дан U-235-ийн хуваагдал явагдаж байна гэдгийг илэрхийлж байна. Харин 8.7%, 8.9%, 9.0% баяжуулалтуудын хувьд голомт критик болж чадаагүй ба $k_{эфф}$ -ийн анхны утга 0.982 байна. Реакторын ажиллах нийт хугацаанд $k_{эфф}$ -ийн утга тогтвортой бөгөөд 8.7% баяжуулалтын хувьд CR реакторын ажиллах нийт хугацаанд 1-ээс их байна. Энэ нь голомтод хуваагдахуйц материал (Pu-239) үүсч байгаа ч реакторыг критик болгоход хангалттай хэмжээнд хүрэхгүй байна гэдгийг илэрхийлж байна.

Ачааллын төрөл 5 дээр хийгдсэн тооцооллын үр дүн: Энд баяжуулсан ураны ачааллыг голомтын бүсүүдэд багаас их рүү (8.7%->9.4%) байхаар байрлуулсан голомтын хувьд тооцооллууд хийгдсэн. Тооцооллыг 5 өөр (9.4%, 9.5%, 9.6%, 9.7%, 9.8%) дундаж баяжуулалттай байх үед хийсэн. Шаталтыг нийт “0-8000” өдөр хүртэл явуулсан ба шаталт эхлэхээс өмнө анхны критик утга нийт баяжуулалтуудын хувьд 1.009-оос бага байсан. Реактор ажиллах хугацаанд реактивитийн огцом өөрчлөлт байхгүй, $k_{эфф}$ нэгэн жигд буурсан. CR харьцааны хувьд шаталтын бүхий л хугацааны турш 1-ээс бага байна. Энэ нь голомтыг нэгэн жигд бус (хувилбар 2) баяжуулахад түлшний нөхөн үйлдвэрлэл явуулахгүй, дан U-235-ийн хуваагдал явагдаж байна гэдгийг илэрхийлж байна.

Ачааллын төрөл 7 дээр хийгдсэн тооцооллын үр дүн: Бүс ачааллын тооцооллын хувьд голомтыг радиал чиглэлд 1-8 хүртэлх бүсд хувааж, түүний сондгой тоотой (1, 3, 5, 7) бүсүүд дээр баяжуулсан уран, тэгш тоотой (2, 4, 6, 8) бүсүүд дээр байгалийн ураныг ачаалсан. Энэ тооцооллыг 3 өөр (18.0%, 17.0%, 16.5%) баяжуулалтын хувьд гүйцэтгэсэн. Нэгдүгээр тооцоолол буюу 18.0%-ийн баяжуулалттай голомтын хувьд анхны критик утга 1.042 байсан ба реакторын ажиллах “0-11680 өдөр” хугацаанд реактивитийн огцом өөрчлөлтгүй, $k_{эфф}$ нэгэн жигд буурсан боловч критик хэвээр буюу 1.010 байсан. Үүнээс хойш шаталт маш тогтвортойгоор буюу 4 жилд ~ 0.0004 өөрчлөлттэйгээр нийт 76 жил ажилласан. Үүний дараа анхны критик утгыг бууруулахын тулд түлшний баяжуулалтыг бууруулж 17.0% болгосон ба энэ үед анхны критик утга 1.018 болсон. Үүний дараа шаталтын тооцооллыг явуулахад “0-5840 өдөр” хугацаанд голомт реактивитийн огцом өөрчлөлтгүй, $k_{эфф}$ нэгэн жигд буурсан боловч мөн критик хэвээр буюу 1.006 байсан. Үүнээс хойш шаталт маш тогтвортойгоор явагдсан бөгөөд 4 жилд ~ 0.0006 өөрчлөлттэйгээр нийт 72 жил ажилласан. Эцэст нь энэхүү голомтын хувьд түлшний нөхөн үйлдвэрлэл явуулахад тохиромжтой хамгийн бага баяжуулалт нь 16.5% байсан бөгөөд ийм баяжуулалттай байх үед анхны критик утга 1.006 байсан. Ингээд шаталтын тооцооллыг

явуулахад 17.0%-ийнхтай адил шаталтын эхний хугацаанд $k_{эфф}$ нэгэн жигд буурсаар 1.0009 утгад хүрсэн. Энэ цэгээс тасралтгүй 0.0003 өөрчлөлттэйгээр нэмэгдэж 1.007-д хүрч анхны критик утгаас давсан. Үүний дараа тасралтгүйгээр буусаар шаталтын 29200 өдөр хугацаанд $k_{эфф}$ -ийн утга 0.997 болж реактор критик биш болсон.

Бүс ачааллын түлшний нөхөн үйлдвэрлэлийн тооцооллын үр дүнгийн хувьд хугацааны эхэнд 18.0%-ийн баяжуулалтаас бусад голомтын CR нь 1-ээс их байна. Харин шаталт явагдаж эхлэхэд CR тасралтгүй нэмэгдсээр хугацааны тодорхой утгад хамгийн их утгандаа хүрсний дараа тасралтгүй буурсаар нэгээс бага болсон. 18.0%-ийн баяжуулалттай голомтын CR нь хугацааны эхэнд 0.95 байсан ба шаталт явагдаж эхлэхэд тасралтгүй нэмэгдсээр 11680 өдөр дээр хамгийн их утга болох 1.03-д хүрсэн. Үүнээс хойш тасралтгүй буурсаар шаталт дуусахад (30660 өдөр) 0.98 болж буурсан. Харин 17.0%-ийн баяжуулалтын хувьд хугацааны эхэнд түлшний нөхөн үйлдвэрлэлийн харьцаа 1.00 байсан ба шаталт явагдах хугацаанд (0-8760 өдөрт) тасралтгүй нэмэгдсээр хамгийн их утга (1.05)-д хүрсний дараа тасралтгүй буурсаар шаталт дуусахад 0.98 болсон. баяжуулалт 16.5%-ийн хувьд мөн адил байсан ба хугацааны эхэнд 1.03, шаталт явагдахад тасралтгүй нэмэгдсээр 1.06-д шаталтын 7300 дахь өдөрт хүрсэн. Энэ хугацаанаас хойш тасралтгүй буурсаар шаталт дуусахад 0.98 болсон.

Бүх тооцооны хувьд баяжуулалт бага байх тусам түлшний нөхөн үйлдвэрлэлийн харьцаа өндөр байх бөгөөд шаталт явагдахад CR-ийн утга нэмэгдэж байна. Харин бүс ачааллын хувьд шаталт явагдахад CR-ийн утга тодорхой хэмжээнд хүртлээ нэмэгдээд буцаад буурч байгаа нь голомтод хангалттай хэмжээний хуваагдахуйц материал бий болж, хуваагдаж байгааг илэрхийлэх бөгөөд хугацааны тодорхой моментоос буцаад буурч байгаа нь голомтод анх ачаалласан U-235 шатаж дуусаад дан Pu-239-ийн хуваагдал голомтод явагдаж байгааг илэрхийлж байна.

1.2.4 Дүгнэлт

1. Урт хугацаанд түлшээ солихгүй, нөхөн үйлдвэрлэн ажиллах бага чадлын “CANDLE” реакторын голомтын өөр өөр дизайн хийн хувьд нейтроник анализ болон түлшний шаталтын тооцооллыг нейтроны тасралтгүй энергийг мужийн MVP/GMCP-II болон MVP-BURN реакторын симуляцийн кодуудыг, цөмийн өгөгдлийн сан JENDL-3.3-тай хамт хийв.
2. Реакторын дизайнд голомт дахь нейтроны алдагдлыг багасгахын тулд голомтын гадуур хар тугалга-висмут ойлгогчийг байрлуулсан. Ойлгогчийн зузааныг 10-20

см-аар нэмэгдүүлсээр 70-90 см хүрэхэд нейтроны алдагдал болон ойлгогчийн эффектгийг харуулах параметр харьцангуй багасч, тогтвортой болсон.

3. “CANDLE” реакторыг баяжуулсан уранаар асаахын тулд үүнийг хэрхэн ачаалах нь чухал асуудал байсан. Иймд ачааллыг хамгийн энгийн тохиолдлоос эхлэн байж болох бүхий л төрлөөр ачаалж шаталтын тооцооллыг явуулж түлшний нөхөн үйлдвэрлэл явуулах эсэхийн шалгаж үзсэн. Олон удаагийн тооцооллын үр дүнд баяжуулсан ураныг бүсэд хувааж ачаалах нь нөхөн үйлдвэрлэл явуулах боломжтойг олсон.
4. Бүс ачааллын хувьд түлшний нөхөн үйлдвэрлэл явуулж болох, анхны критик утга харьцангуй бага байх баяжуулалтуудын хувьд тооцоо хийгдсэн ба U-235 баяжуулалт 17.0% байх нь энэхүү голомтын хувьд хамгийн тохиромжтой гэдэг үр дүнгээс харагдаж байна. Ийм ачааллаар реактор нийт 72 жил тасралтгүй түлшээ нөхөн үйлдвэрлэн ажиллах боломжтой байна. Энэхүү үр дүн нь урт хугацаанд ажиллах реакторын дизайны судалгааг хийх зорилгод нийцэж байна гэж үзэж байна.
5. Цаашид энэхүү голомтын хувьд реакторын физикийн аюулгүй байдлын параметрууд болон Pu-239 изотопын хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлтийг тооцож илүү оновчтой болгох тооцооллыг үргэлжлүүлэн хийх шаардлагатай.

Дээрх судалгааны ажлаар “Бага чадлын CANDLE реакторын дизайны судалгаа” сэдвээр 1 магистрант магистрын судалгааны ажил гүйцэтгэж амжилттай хамгаалсан.

1.3 Хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор

Хурдан нейтроны реакторын дизайныг 1950 оноос олон улс орнууд сонирхон судалж ирсэн. Анх 1946 онд АНУ-д мөнгөн усан хөргүүртэй, хурдан нейтроны “CELEMENTINE” реакторын туршилтыг амжилттай хийж гүйцэтгэсэн. Гэвч “CELEMENTINE” реактор нь хөргүүрийн аюулгүй байдлын шаардлага хангаагүй улмаас туршилтын асаалтаас хойш дахин асаагаагүй. Үүнээс хойш дэлхийн улс орнууд хурдан нейтроны реакторын хөргүүр болоход тохиромжтой материалуудыг судалж эхэлсэн бөгөөд шингэн натри (Na), гели хий (He), шингэн хар тугалга (Pb) болон хар тугалга-бисмутын хайлш (Pb-Bi) хөргүүрүүдийн дулааны болон нейтроник үзүүлэлтүүд нь хөргүүрээр сонгож авахад илүү тохиромжтой гэж үзэн судалсаар ирсэн. Өнөөг хүртэл хийгдсэн судалгаануудаас натри хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор нь бусад төрлийн хөргүүртэй хурдан нейтроны реактортай харьцуулахад илүү өргөнөөр судлагдсан дизайн юм. Хар тугалганы хайлшыг реакторын хөргүүр болгон ашиглаж болох санааг анх ОХУ дэвшүүлсэн бөгөөд шумбагч онгоц болон хөлөг онгоц дээрх реакторууддаа ашиглан түүний аюулгүй ажиллагааг баталсан.

Хар тугалга болон хар тугалга-бисмутын хайлшийг хүнд шингэн металл хөргүүр гэж нэгтгэн ойлгодог бөгөөд ийм төрлийн хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторуудыг ерөнхийд нь хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор гэж нэрлэдэг. Хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор нь аюулгүй байдлыг сайжруулсан, эдийн засгийн хувьд өрсөлдөхүйц мөн хаягдал багатай зэрэг шинж чанараараа дэвшилтэт 4-р үеийн реакторуудын шаардлагыг хангаж тэдгээрийн нэгээр нэрлэгддэг. Хурдан нейтроны реакторын хөгжлийн эхэн үед “doubling time” буюу реакторын чадал 2 дахин ихсэх хугацаа бага байх нь чухал үзүүлэлт байсан бол сүүлийн үед түлшний шаталтаас илүү аюулгүй байдлыг чухалчилж авч үзэж байгаа. Тиймээс ч натри хөргүүрээс илүү өндөр буцлах температуртай аюулгүй байдлын шинж чанар сайтай хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын судалгаа сүүлийн жилүүдэд түлхүү хийгдээд байна.

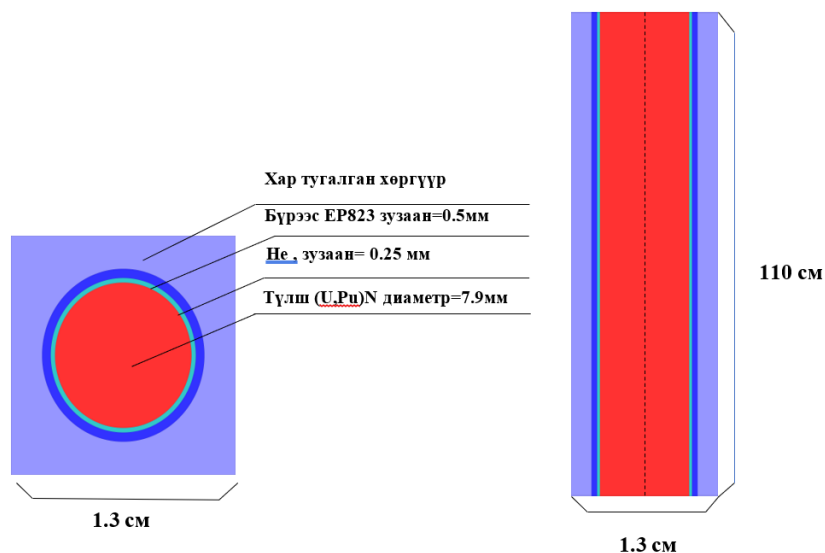
1.3.1 Голомтын дизайны нейтроник судалгаа

Хар тугалга болон хар тугалга-бисмутын хайлшийг хүнд шингэн металл хөргүүр гэж нэгтгэн ойлгодог бөгөөд ийм төрлийн хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторуудыг ерөнхийд нь хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор гэж нэрлэдэг. Хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор нь аюулгүй байдлыг сайжруулсан, эдийн засгийн хувьд өрсөлдөхүйц мөн хаягдал багатай зэрэг шинж чанараараа дэвшилтэт 4-р үеийн реакторуудын шаардлагыг хангаж тэдгээрийн нэгээр нэрлэгддэг. Хурдан нейтроны

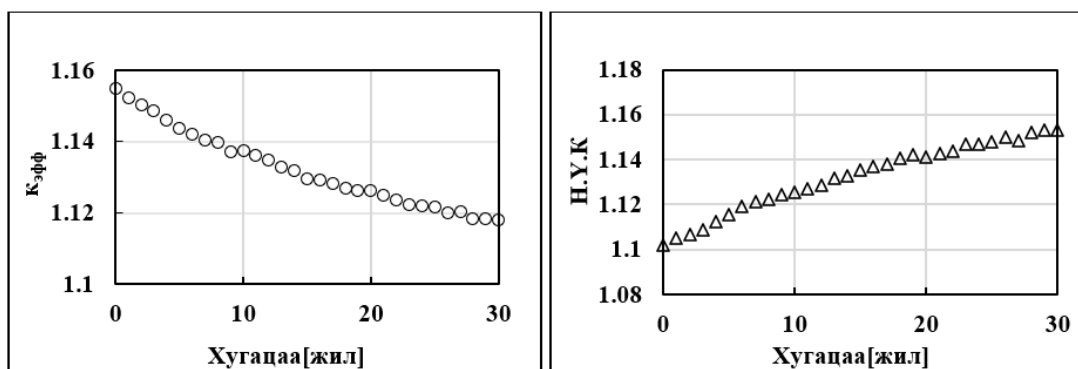
реакторын хөгжлийн эхэн үед “doubling time” буюу реакторын чадал 2 дахин ихсэх хугацаа бага байх нь чухал үзүүлэлт байсан бол сүүлийн үед түлшний шаталтаас илүү аюулгүй байдлыг чухалчилж авч үзэж байгаа. Тиймээс ч натри хөргүүрээс илүү өндөр буцлах температуртай аюулгүй байдлын шинж чанар сайтай хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын судалгаа сүүлийн жилүүдэд түлхүү хийгдээд байна.

1.3.2 Түлшний савааны тооцоо

Гурван өөр радиус бүхий түлшний саваануудаас тогтсон эвлүүлгүүдээр хийсэн загвар реакторын нэг түлшний саваанд оногдох чадлыг олж, ийм хэмжээний чадлыг үйлдвэрлэх 9.4 см диаметртэй цилиндр түлшний савааны (Зураг 1.16) шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэж, $k_{эфф}$ болон Н.Ү.К-ийн өөрчлөлтийг Зураг 1.17-т харуулав.



Зураг 1.16. Түлшний савааны хэмжээс болон хийцийн материал



Зураг 1.17. Түлшний савааны эффектив нейтрон үржүүлэх фактор болон нөхөн үйлдвэрлэлийн коэффициентын өөрчлөлт

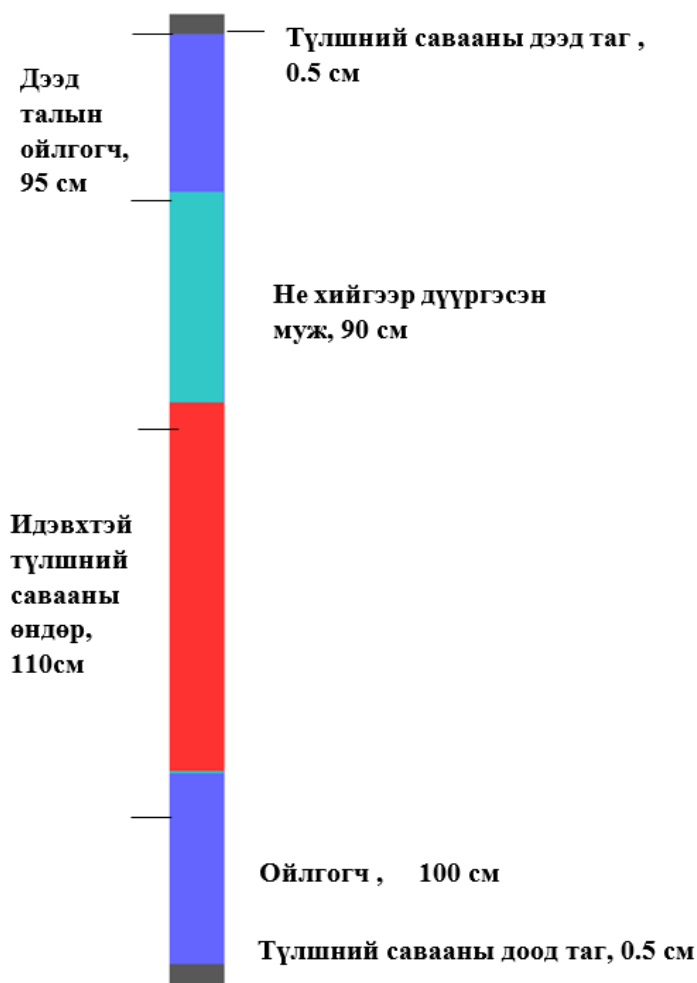
Зураг 1.17-с түлшний саваа нь 30 жилийн турш критикээс дээгүүр нөхцөлд ажиллаж байгаа ба түлшний нөхөн үйлдвэрлэл хугацаа өнгөрөх тусам нэмэгдсэн нь түлш дэх үржүүлэгч изотопууд хуваагдагч изотопууд болж хувирч байгааг илтгэж байна.

Хүснэгт 1.3. Түлшний савааны $k_{эфф}$ -д үзүүлэх температурын нөлөө

Температур [K]			Кэфф (РАЭҮ)	Кэфф (РАСҮ)
Түлш	Бүрээс	Хөргүүр		
300			1.1274±0.0004	1.1185±0.0004
600	600	600	1.1259±0.0004	1.1135±0.0004
900			1.1254±0.0004	1.1108±0.0004
1200			1.1257±0.0004	1.1089±0.0004
		300	1.1249±0.0004	1.1118±0.0004
900		600	1.1254±0.0004	1.1108±0.0004
		900	1.1252±0.0004	1.1111±0.0004
		1200	1.1249±0.0004	1.1112±0.0004
		300	1.1225±0.0004	1.1109±0.0004
900	600	600	1.1254±0.0004	1.1108±0.0004
		900	1.1259±0.0004	1.1112±0.0004
		1200	1.1298±0.0004	1.1116±0.0004

Хүснэгт 1.3-д түлшний савааны өндрийг нэгж урттай гэж үзсэн хоёр хэмжээст геометрт хийцийн материалуудын температурыг өөрчлөн $k_{эфф}$ -д хэрхэн нөлөөлж байгааг судлав. Хүснэгт 1.3-д реактор ажиллаж эхлэх үе (РАЭҮ) буюу түлшийг шинээр ачаалсан үе болон түлш ачаалаад 30 жил болсон буюу реакторын ажиллагааны сүүл үед (РАСҮ) харгалзах үр дүнг үзүүлэв. Түлшний болон хөргүүрийн температур нь бүрээсний температуртай харьцуулахад $k_{эфф}$ -д илүү нөлөөлж байна. Түлшний температур өсөхөд Допплерийн эффектийн нөлөөгөөр ^{238}U изотопын резонансийн шингээлтийн хөндлөн огтлол ихэсэж уг изотопд нейтрон илүү ихээр шингээгддэг тул $k_{эфф}$ буурдаг. Температур ихэсэхэд хөргүүрийн нягт буурч нейтрон хар тугалганы цөмийг онож мөргөн залгигдах хувь нь багассанаар түлшинд илүү залгигдаж хуваагдал явуулна. Ингэснээр $k_{эфф}$ нэмэгдэж байна.

Загвар реакторын түлшний саваа нь түлшийг агуулсан идэвхтэй хэсэг, хуваагдлаас үүсэх хий хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийг агуулах гелийн хийгээр дүүргэсэн муж, савааны дээд, доод үзүүрийн ойлгогчид болон тагуудаас тогтдог. Түлшний савааны хэмжээс болон бүтцийг Зураг 1.18-д дүрслэв.



Зураг 1.18. Бодит түлшний савааны хэмжээс болон бүтэц

Бодит түлшний саваа болон идэвхтэй урттай түлшний саваануудын тооцооллыг харьцуулахад хийцийн нэмэлт материалуудын нөлөөгөөр бодит түлшний савааны $K_{эфф}$ болон Н.Ү.К их байгаа нь нийт хугацааны турш хадгалагдаж байна (Хүснэгт 1.4).

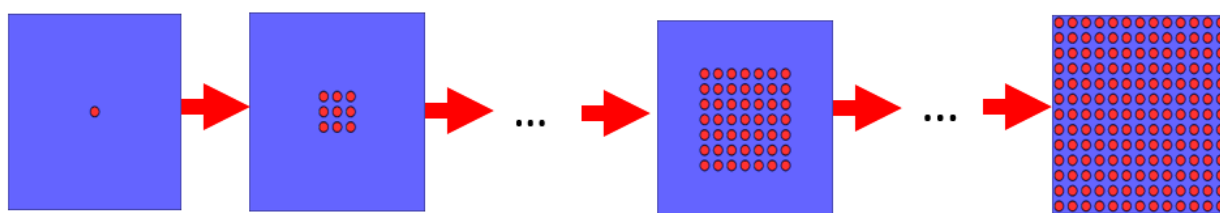
Хүснэгт 1.4. Бодит болон идэвхтэй урттай түлшний савааны тооцооны харьцуулсан үр дүн

	Идэвхтэй урттай (110см) түлшний саваа		Бодит (395см) түлшний саваа	
	РАЭҮ	РАСҮ	РАЭҮ	РАСҮ
$K_{эфф}$	1.1548±0.0004	1.1185±0.0004	1.0877±0.0004	1.0513±0.0004
Н.Ү.К	1.1022±0.0006	1.1524±0.0007	1.0900±0.0007	1.1422±0.0007

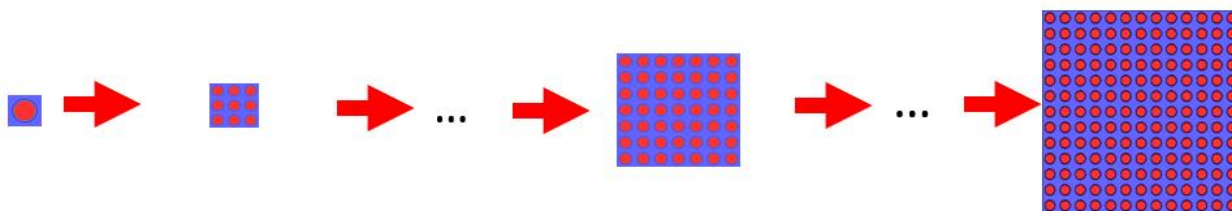
1.3.3 Түлшний эвлүүлгийн тооцоо

Түлшний эвлүүлгийг Зураг 1.19, 1.20-д харуулсан хоёр загвараар хийсэн. Эхний загварт түлшний эвлүүлгийн өргөнийг хэвээр хадгалан бодит болон идэвхтэй урттай савааны тоог 1-169 хүртэл нэмэгдүүлсэн. Хоёрдугаар загварт түлшний эвлүүлгийн нийт эзлэхүүнд оногдох түлшний хэмжээ ижил байхаар хийсэн. Зураг 1.21-д харуулсан үр дүнгээс харвал, нэгдүгээр загварт түлшний эзлэхүүн хөргүүрийн эзлэхүүнээс харьцангуй

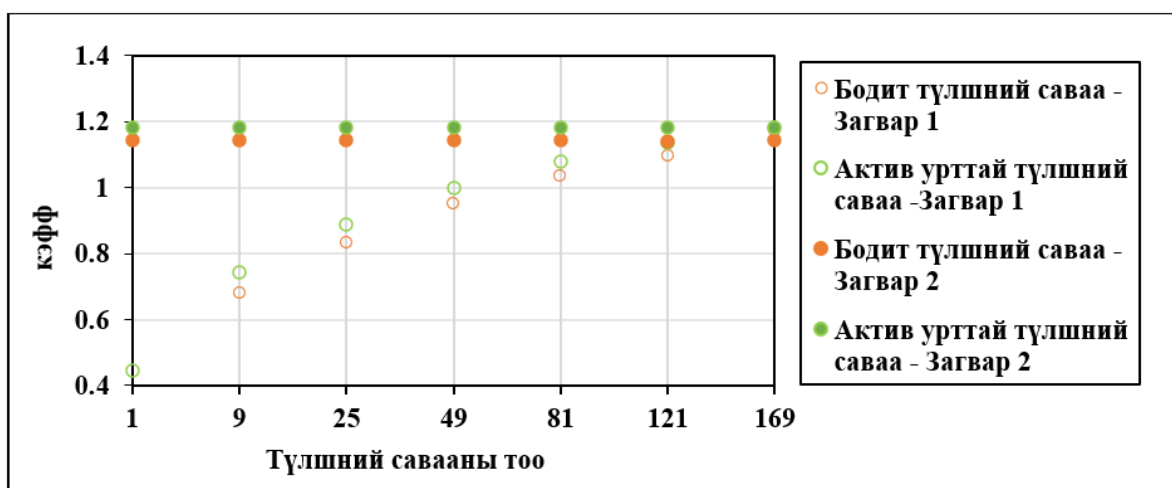
бага байгаа ба эвлүүлэг дэх савааны тоо нэмэгдэхэд $k_{эфф}$ нэмэгдэж байна. Харин хоёрдугаар загварын хувьд түлшний эзлэхүүн хөргүүрийн эзлэхүүнтэй харьцуулсан харьцаа ижил учир $k_{эфф}$ -ийн утга эвлүүлэг дэх савааны тооноос үл хамаарч байна. Уг үр дүнгээс түлшний эзлэхүүн хөргүүрийн эзлэхүүний харьцаа $k_{эфф}$ хэрхэн нөлөөлж байгааг ойлгож болно. $k_{эфф}$ нь үүсэж байгаа болон алдагдаж байгаа нейтроны тоон харьцаагаар илэрхийлэгддэг. Нейтрон хөргүүртэй харилцан үйлчлээд тодорхой хэмжээгээр алдагдаж байгаа гэж үзвэл нэгдүгээр загварын хувьд үүсэж байгаа нейтроны тоо ихэсэж байгаа бол алдагдлын тоо багассан. Тиймээс түүний $k_{эфф}$ нь багаас ихэсэж байна. Харин загвар 2-ийн хувьд үүсэж байгаа болон алдагдаж байгаа нейтроны тоо жигд байгаа учраас $k_{эфф}$ нь мөн адил жигд гарсан.



Зураг 1.19. Түлшний саваануудыг ижил өргөнтэй эвлүүлэгт угсарсан байдал (Загвар1)



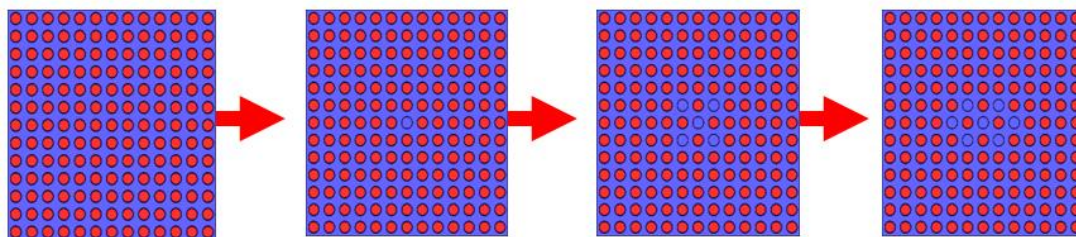
Зураг 1.20. Түлшний саваануудыг ижил эзлэхүүний харьцаатай эвлүүлэгт угсарсан байдал (Загвар2)



Зураг 1.21. Бодит болон идэвхтэй өндөртэй түлшний саваагаар хийсэн эвлүүлгийн үр дүн

Тооцооллын дараагийн хэсэгт байгуулсан түлшний эвлүүлэгт удирдлагын саваа орох хоосон зайнуудыг (“Guide tube”) байрлуулсан. Бодит реакторын голомт нь дизайнаас

хамааран хэд хэдэн удирдлагын саваануудыг багтаасан байдаг. Энэхүү судалгааны ажлаар эвлүүлэгт 1, 3, 5, 7 ширхэг саваануудыг тус тус багтааж тооцоо хийсэн. (Зураг 1.22)



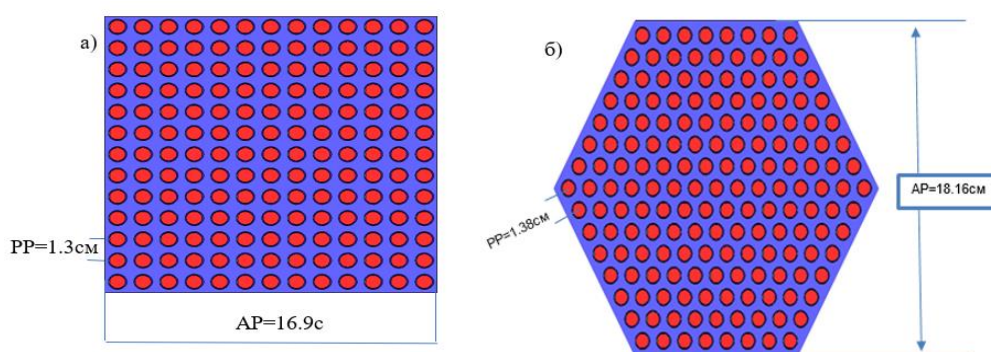
Зураг 1.22. Удирдлагын савааны хоосон зай буюу “Guide Tube” оруулсан түлшний эвлүүлэг

Түлшний эвлүүлэгт “Guide Tube” –ийн тоо нэмэгдэх тусам түлшний хэмжээ багасаж нейтрон үржүүлэгч фактор хамааралтайгаар дагаж буурч байна. (Хүснэгт 1.5)

Хүснэгт 1.5. Түлшний эвлүүлэгт удирдлагын саваа орох хоосон зай нэмсэн тооцооны үр дүн

Төрөл	кэфф
Guide tube-гүй түлшний эвлүүлэг	1.0916±0.0007
1 guide tube-тэй түлшний эвлүүлэг	1.0904±0.0007
3 guide tube-тэй түлшний эвлүүлэг	1.0840±0.0006
7 guide tube тэй түлшний эвлүүлэг	1.0819±0.0007

Тэгш өнцөгт түлшний эвлүүлгийн нэг саваанд оногдох чадлын нягт болон түлшний эзлэхүүнийг нийт эзлэхүүнд харьцуулсан харьцаа ижил байхаар зургаан өнцөгт түлшний эвлүүлэг хийхэд Зураг 1.23-д үзүүлсэнчлэн саваа хоорондын зай (PP) болон нийт гадаргуугийн талбай их болж байна. Зураг 1.23-д үзүүлсэн хоёр эвлүүлгийн хэмжээсийг Хүснэгт 1.6-д харуулсан.



PP-Түлшний саваа хоорондын зай

AP-Түлшний эвлүүлгийн өргөн

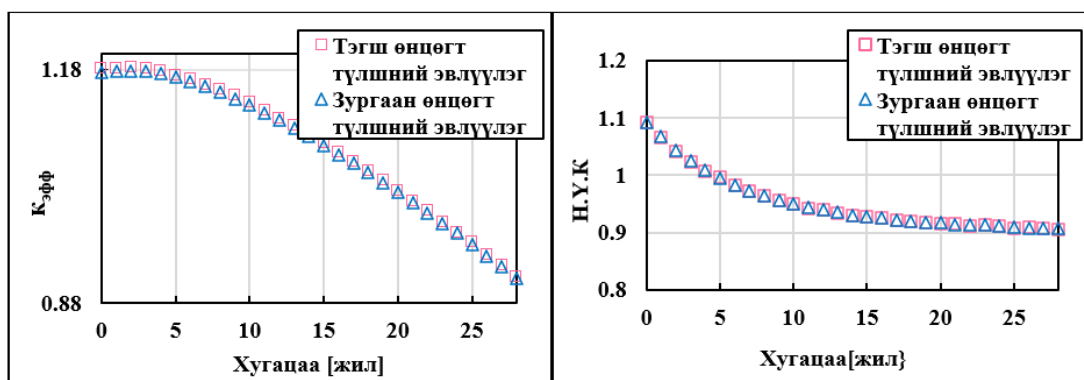
Зураг 1.23. Түлшний эвлүүлгийн хэмжээс

Хүснэгт 1.6 Түлшний эвлүүлгийн хэмжээс болон эзлэхүүний харьцаа

Үзүүлэлт	Тэгш өнцөгт түлшний эвлүүлэг	Зургаан өнцөгт түлшний эвлүүлэг
Түлшний савааны тоо		169
Нийт эзлэхүүн [см ³]		31417.1

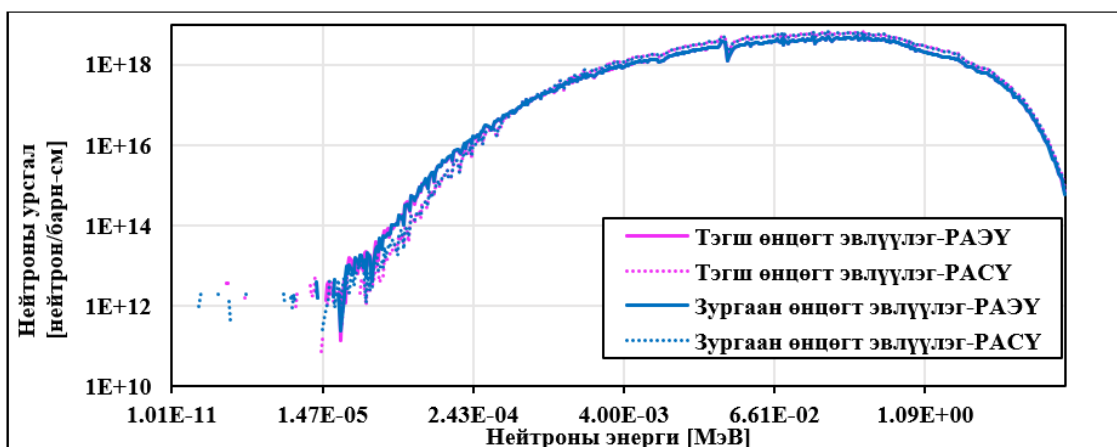
Түлшний эзлэхүүн [см ³]	9112.48	
Хөргүүрийн эзлэхүүн [см ³]	18522.59	
Түлшний савааны өндөр[см]	110	
Түлшний савааны диаметр [мм]	9.4	
Түлшний саваа хоорондын зай [см]	1.3	1.36
Түлшний эвлүүлгийн гадаргуугийн талбай [см ²]	8007.22	8043.8

Хоёр өөр дизайн бүхий түлшний эвлүүлгийн нейтроник анализын харьцуулсан үр дүнг Зураг 1.24-1.26-д харуулав. $k_{эфф}$ нь тэгш өнцөгтийн хувьд 1.1814 ± 0.0004 –ээс 0.9144 ± 0.0005 хүртэл, зургаан өнцөгт эвлүүлгийн хувьд 1.1771 ± 0.0004 –ээс 0.9119 ± 0.0005 хүртэл буурсан. Зургаан өнцөгт түлшний эвлүүлгийн саваа хоорондын зай урт буюу хөргүүрийн хэмжээ их учир нейтрон хөргүүрийн харилцан үйлчлэл ихэсдэг. Тиймээс энэ нь $k_{эфф}$ нөлөөлж зургаан өнцөгтийн $k_{эфф}$ -ийн утга буурж байна.

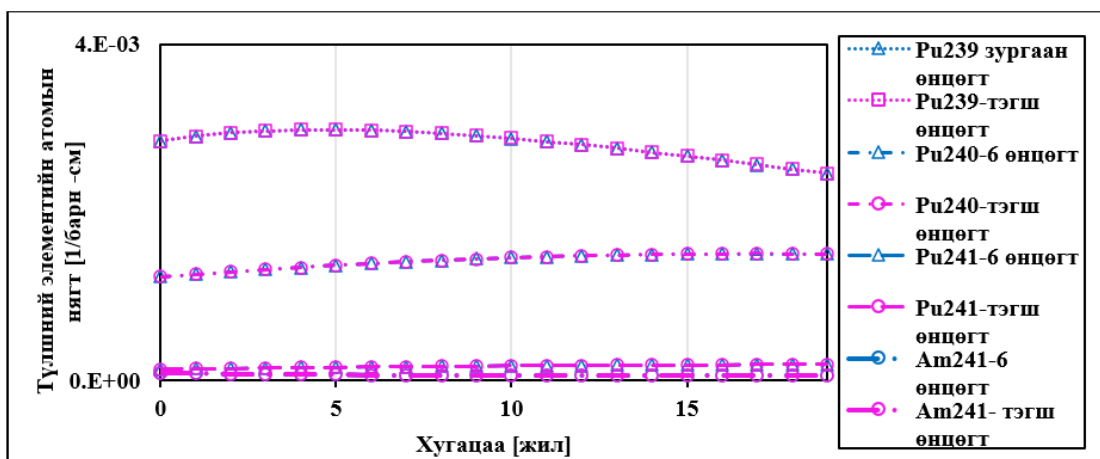


Зураг 1.24. Түлшний эвлүүлгийн $k_{эфф}$ болон Н.У.К тооцооллын үр дүн

Харин Н.У.К нь харгалзан 1.0917 ± 0.0007 болон 1.0919 ± 0.0007 -оос 0.9056 ± 0.0008 болон 0.9075 ± 0.0008 болж тус тус буур сан. Түүнчлэн голомт даяарх нейтроны урсгал нь хоёр дизайны хувьд РАЭҮ-д ижил $\sim 10^{18}$ (нейтрон/барн-см) орчим байсан ба РАСҮ-д дулааны нейтроны урсгал багасаж, хурдан нейтроны урсгал өссөн. Урсгалын өсөлтийг тайлбарлахийн тулд түлшний шаталтын анализ хийсэн.



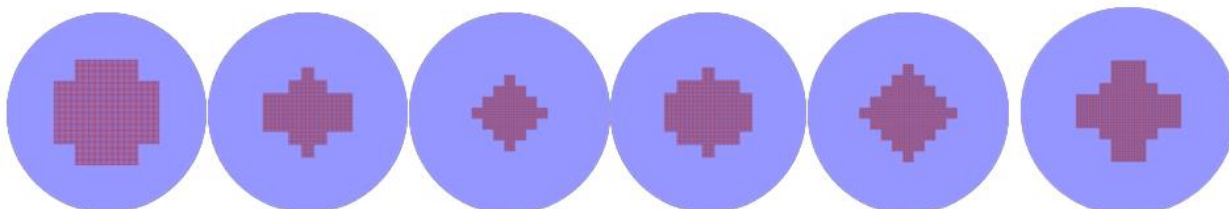
Зураг 1.25. Түлшний эвлүүлгийн урсгалын үр дүн



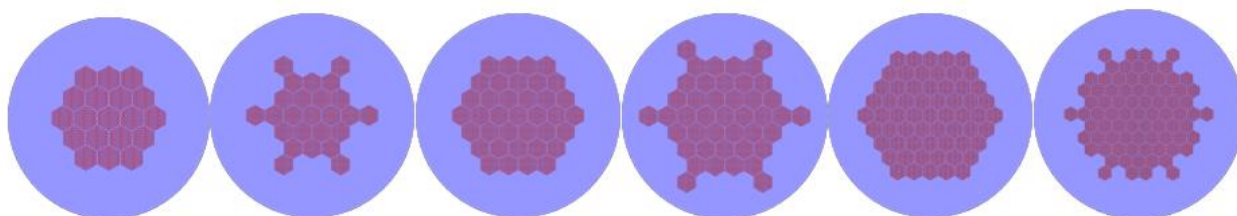
Зураг 1.26. Түлшний эвлүүлгийн МА-ийн шаталтын анализын үр дүн

1.3.4 Реакторын голомтын тооцоо

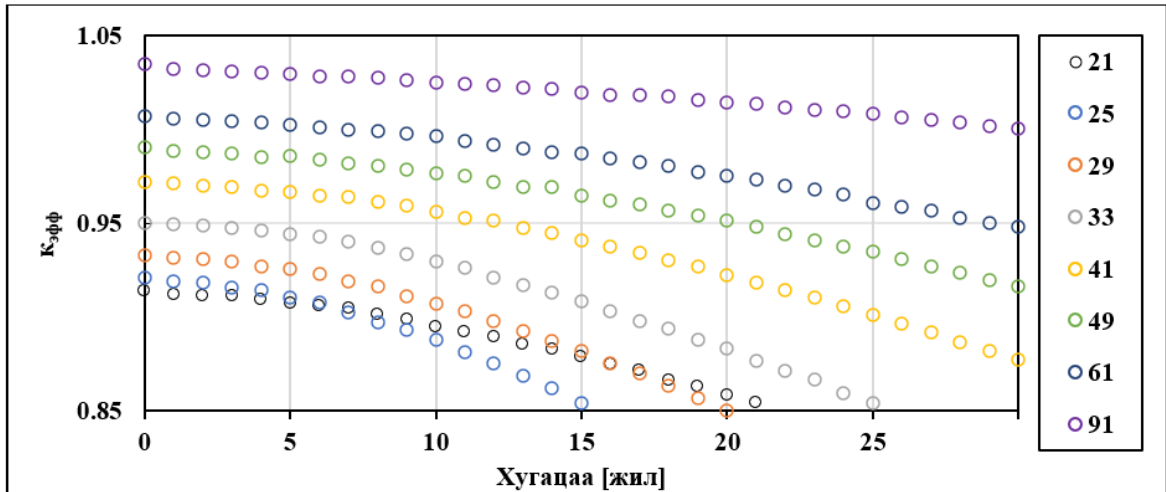
Тэгш өнцөгт түлшний эвлүүлгийг зургаан өнцөгт болгосон тооцооллын үр дүнд геометр нөлөө бага байсан учир илүү томруулж голомтын тооцоолол дээр харьцуулсан. Тодорхой чадалтай эвлүүлгүүдийг нийлүүлж угсарснаар нийлбэр чадалтай голомт үүсдэггүй ба тухайн чадлын голомтыг хийхэд системийн конфигураци их чухал. Тиймээс голомтыг хоёр өөр хэлбэртэй түлшний эвлүүлгүүдийг 100 МВт чадлыг үйлдвэрлэж байхаар тэгш хэмтэйгээр нэмж мөн гадуурх ойлгогчийн зузаан ижил байхаар хийж (Зураг 1.27 болон Зураг 1.28) тэдгээрийн кэфф -ийг тооцоолсон үр дүнг Зураг 1.29 болон Зураг 1.30-д харуулав.



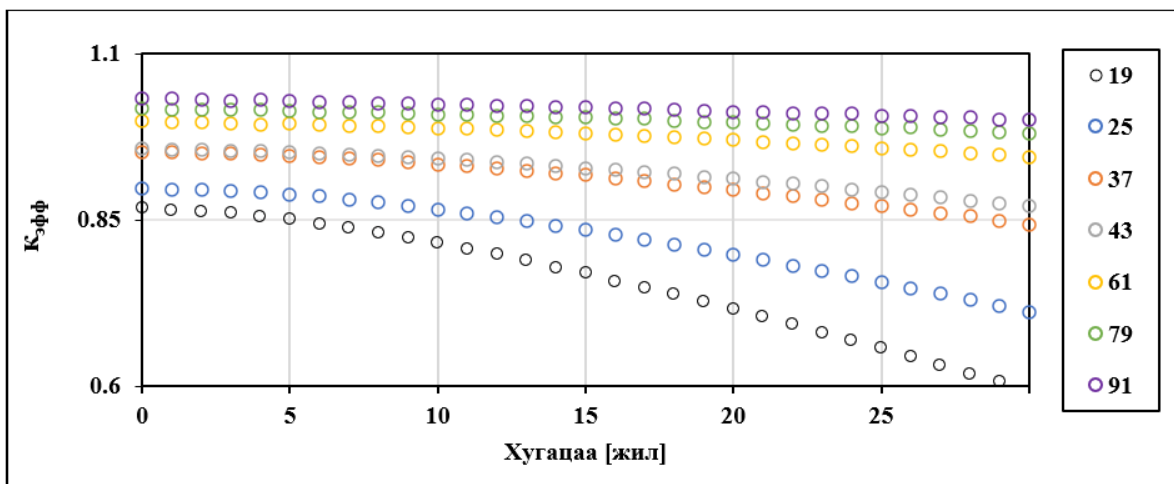
Зураг 1.27 100 МВт чадалтай тэгш өнцөгт голомтын конфигураци



Зураг 1.28. 100 МВт чадалтай зургаан өнцөгт голомтын конфигураци



Зураг 1.29. 100МВт чадалтай тэгш өнцөгт голомтын $k_{эфф}$ -ийн үр дүн



Зураг 1.30. 100 МВт чадалтай зургаан өнцөгт голомтын $k_{эфф}$ -ийн үр дүн

Бид өмнөх ажилд тэгш өнцөгт болон зургаан өнцөгт түлшний эвлүүлгүүдийн дизайныг судалж, тэдгээрийн анхан шатны нейтроник тооцооллыг гүйцэтгэсэн. Түлшний эвлүүлгийн тоо 91 байхад голомт критик утгадаа хүрсэн учир 100 МВт чадалтай голомт 91 түлшний эвлүүлгээс тогтоно гэж үзэв. Нэг түлшний эвлүүлэгт 169 түлшний саваа байгаа ба тэгш өнцөгт хэлбэрийн эвлүүлэг дэх түлшний саваа хоорондын зай буюу алхам 1.3 см бол зургаан өнцөгтийн хувьд 1.36 см болно. Зургаан өнцөгт болон тэгш өнцөгт эвлүүлгээс тогтох голомтын геометр хэмжээсийг Хүснэгт 1.7-д жагсаав. Голомтод ачаалж байгаа түлшний физик шинж чанар болон түүний изотопын агууламжийг Хүснэгт 1.8-д харуулав.

Хүснэгт 1.7. 100 МВт чадалтай голомтын геометр хэмжээс

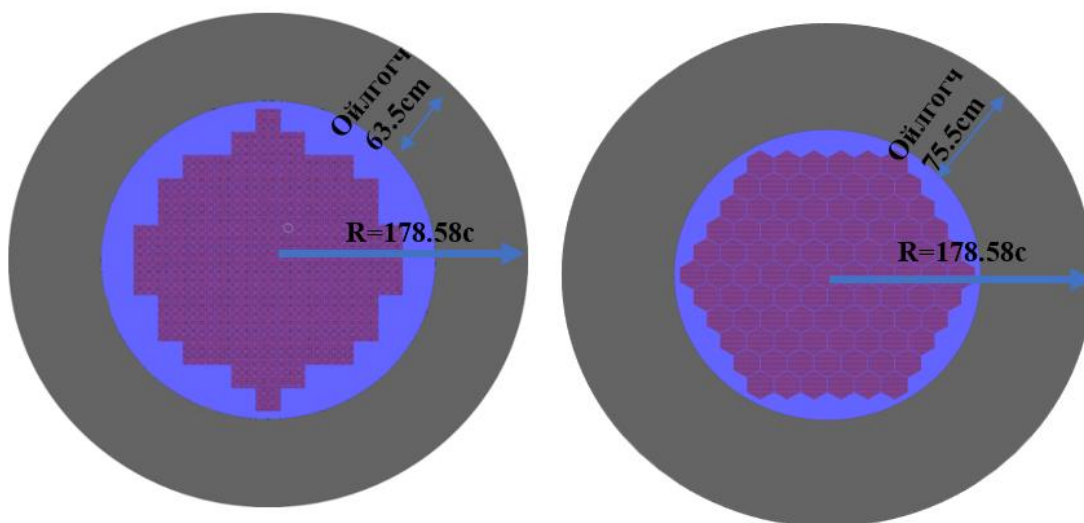
Голомтын хэмжээс	
Голомтын өндөр [см]	110
Голомтын радиус [см]	178.5
Түлшний савааны радиус [см]	9.4
Эзлэхүүний харьцаа	
Түлш/нийт эзлэхүүн	0.045

Түлш/хөргүүр	0.578	
Түлш/ойлгогч	0.053	
	Тэгш өнцөгт	Зургаан өнцөгт
Гадаргуугийн талбай [м ²]	13.03	13.18

Хүснэгт 1.8. Түлшний шинж чанар болон түүн дэх изотопын агууламж

Физик шинж чанар	
Эзлэхүүн [см ³]	9112.48
Нягт [г/см ³]	13.585
Изотопын агууламж [%]	
²³⁴ U	0.0041
²³⁵ U	0.5462
²³⁸ U	75.2729
²³⁸ Pu	0.0651
²³⁹ Pu	8.3281
²⁴⁰ Pu	3.6435
²⁴¹ Pu	0.4034
²⁴² Pu	0.2212
²⁴¹ Am	0.2733
²⁴² Am	0.013
²⁴³ Am	0.0651
¹⁵ N	11.1641

$K_{эфф}$ -ийн үр дүнгээс эвлүүлгийн тоо 91 болоход голомт критик нөхцөлд ажиллаж эхэлсэн (тэгш өнцөгт голомт: $K_{эфф}=1.0322\pm 0.0004$, зургаан өнцөгт голомт: $K_{эфф}=1.0331\pm 0.0004$) учраас дээрх тооны эвлүүлэгтэй голомтыг 100 МВт чадлын голомт гэж үзсэн. Хоёр өөр дизайнтай 100 МВт чадалтай голомтын хөндлөн зүсмэгийг Зураг 1.31-д, геометр хэмжээг Хүснэгт 1.9-д харуулсан.

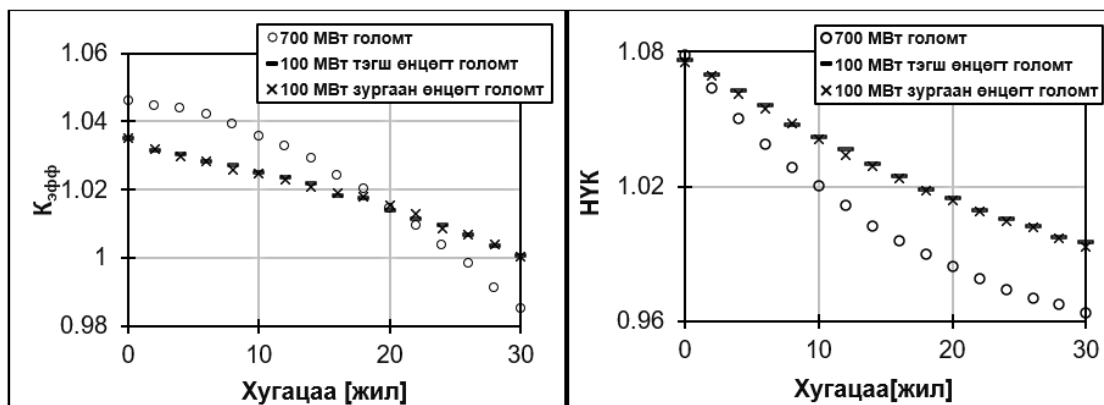


Зураг 1.31 Тэгш өнцөгт болон зургаан өнцөгт түлшний эвлүүлэгтэй 100 МВт чадлын голомтын хөндлөн зүсмэг

Хүснэгт 1.9. 100 МВт чадалтай голомтын геометр хэмжээс

Голомтын хэмжээс		
Голомтын өндөр (см)	110	
Голомтын радиус (см)	178.5	
Түлшний савааны радиус [см]	9.4	
Эзлэхүүний харьцаа		
Түлш/нийт эзлэхүүн	0.045	
Түлш/хөргүүр	0.578	
Түлш/ойлгогч	0.053	
	Тэгш өнцөгт	Зургаан өнцөгт
Гадаргуугийн талбай [см ²]	130354.02	131888.45

Хоёр өөр эвлүүлэгтэй 100 МВт чадлын голомтуудыг өмнө нь харуулсан хэмжээсний дагуу хийсэн загвар реакторын голомттой харьцуулсан $K_{эфф}$ болон Н.Ү.К-ын үр дүнг Зураг 32-д, нейтроны урсгалын үр дүнг Зураг 1.34-д тус тус үзүүлэв.



Зураг 1.32. 100МВт чадалтай тэгш өнцөгт болон зургаан өнцөгт голомтыг 700МВт чадалтай голомтын $K_{эфф}$ болон Н.Ү.К-ийн тооцоо

100 МВт чадлын голомт нь загвар реакторын голомттой харьцуулахад тогтвортойгоор 30 жил критик нөхцөлд байсан ба Н.Ү.К нь мөн харьцангуйгаар тогтворжсон (Хүснэгт 1.10). Энэ нь 100 МВт голомтын шаталтын утга загвар реакторын голомтын шаталтаас бага байгаатай холбоотой (Зураг 1.33). Өөрөөр хэлбэл, загвар реакторын голомт 700 МВт чадал үйлдвэрлэхийн тулд түлшээ их хэмжээгээр, богино хугацаанд шатааж байгаа бол 100 МВт голомт нь бага хэмжээгээр алгуур шатааж байна. Шаталт бага явагдсанаар түлшний агууламжууд илүү тогтвортой өөрчлөгдөж байгаа нь шаталтын анализын үр дүн болох Зураг 1.35 болон Зураг 1.36-аас харагдаж байна.

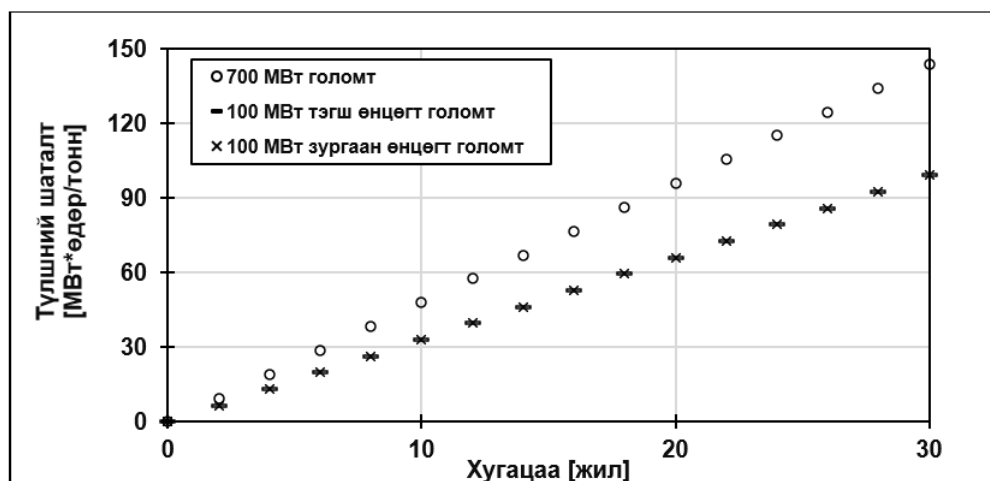
Хүснэгт 1.10. 100МВт чадлын тэгш өнцөгт болон зургаан өнцөгт голомтыг 700МВт чадлын голомтын $K_{эфф}$ болон Н.Ү.К-ний харьцуулсан үр дүн

	РАЭҮ $K_{эфф}$	РАСУ $K_{эфф}$	РАЭҮ Н.Ү.К	РАСУ Н.Ү.К
100 МВт чадалтай тэгш өнцөгт голомт	1.0350±0.0004	1.0007±0.0004	1.0765±0.0007	0.9952±0.0007

100 МВт чадалтай зургаан өнцөгт голомт	1.0350±0.0004	1.0006±0.0004	1.0751±0.0007	0.9946±0.0007
700 МВт чадалтай голомт	1.0459±0.0004	0.9853±0.0004	1.0787±0.0007	0.9639±0.0007

100 МВт чадалтай голомтын кэфф нь хугацааны эхэнд буюу реактор ажиллаж эхлэх үед (РАЭҮ) хоёулаа 1.035 утгад ойролцоо байсан бол 30 жилийн дараа буюу реактор ажиллаж дуусах үед (РАДҮ) тус тус 1.0007±0.0004, 1.0006±0.0004 болж буурсан. Харин загвар реакторын голомтын кэфф нь РАЭҮ-нд 1.0459±0.0004 утгаас 30 жил ажилласны дараа 0.9853±0.0004 болж буурч байна. 100 МВт чадалтай голомтуудын НҮК нь реактор ажиллах хугацааны турш 700 МВт чадалтай загвар реакторын голомтоос өндөр утгатай байна. Тодорхойлбол тэгш өнцөгт голомтын НҮК нь РАЭҮ-д 1.0765±0.0007 байсан ба РАДҮ-д 0.9952±0.0007 болсон бол зургаан өнцөгт голомтынх 1.0751±0.0007 утгаас 0.9946±0.0007 болж буурсан. Загвар реакторын НҮК нь РАЭҮ-д 1.0787±0.0007 байсан ба РАДҮ-д 0.9639±0.0007 болж буурсан. Энэ нь 100 МВт голомтын шаталтын утга загвар реакторын голомтын шаталтаас бага байгаатай холбоотой.

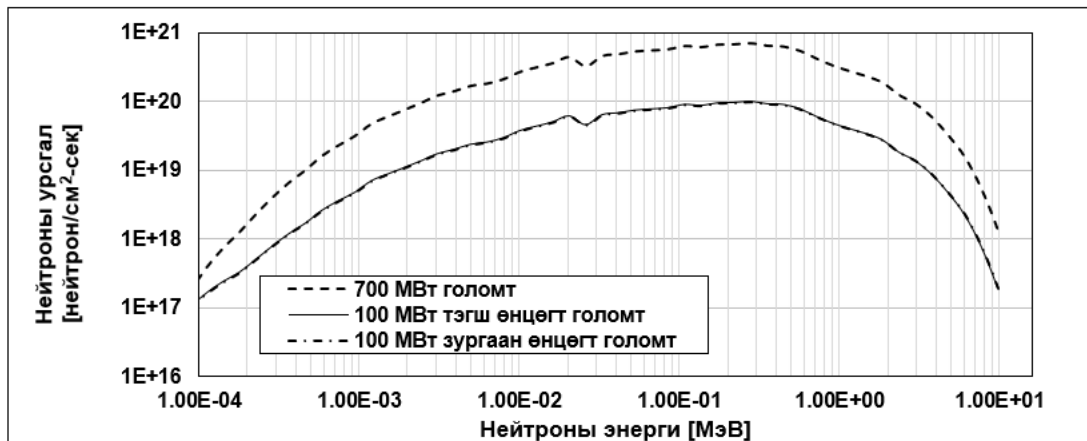
Түлшний шаталтын анализд голомтод тухайн мөчид байгаа түлшний агууламж, үүсэж байгаа хуваагдлын бүтээгдэхүүний хэмжээ болон түүнээс үүсэх дулаан зэргийг хугацааны мужид тодорхойлдог. Уран-Плутони нитрид түлштэй голомтод хамгийн их агуулагдаж байгаа ²³⁸U изотопын (Хүснэгт 1.11) агууламжийн өөрчлөлтийг Зураг 1.35-д, мөн гинжин урвалыг явуулах хуваагдагч изотоп болох ²³⁹Pu-ийн агууламжийн өөрчлөлтийг Зураг 1.36-д авч харьцуулсан.



Зураг 1.33. Хугацаанаас хамаарсан түлшний шаталтын утга

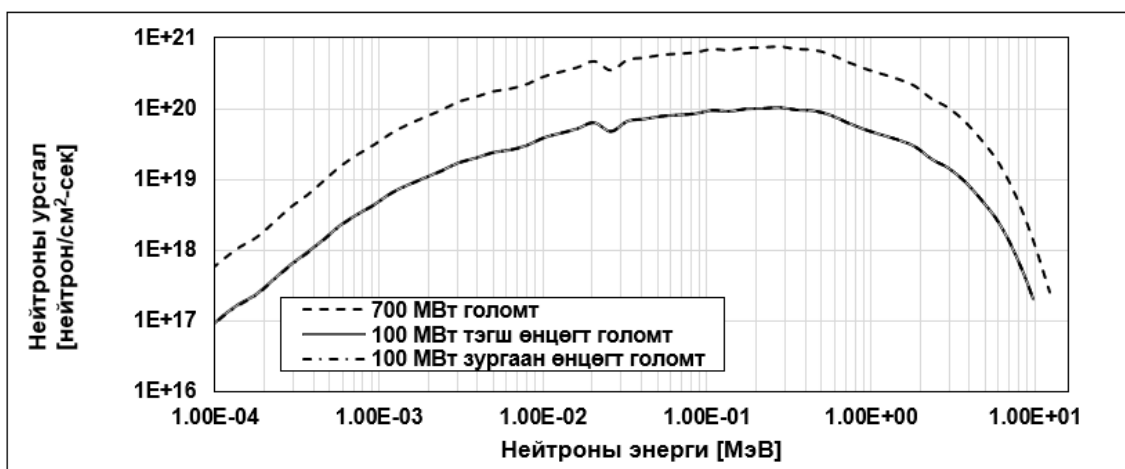
Түлшний шаталтын анализд голомтод тухайн мөчид байгаа түлшний агууламж, үүсэж байгаа хуваагдлын бүтээгдэхүүний хэмжээ болон түүнээс үүсэх дулаан зэргийг хугацааны мужид тодорхойлдог. Уран-Плутони нитрид түлштэй голомтод хамгийн их агуулагдаж байгаа ²³⁸U изотопын (Хүснэгт 1.11) агууламжийн өөрчлөлтийг Зураг 1.35-д, мөн гинжин

урвалыг явуулах хуваагдагч изотоп болох ^{239}Pu -ийн агууламжийн өөрчлөлтийг Зураг 1.36-д авч харьцуулсан.



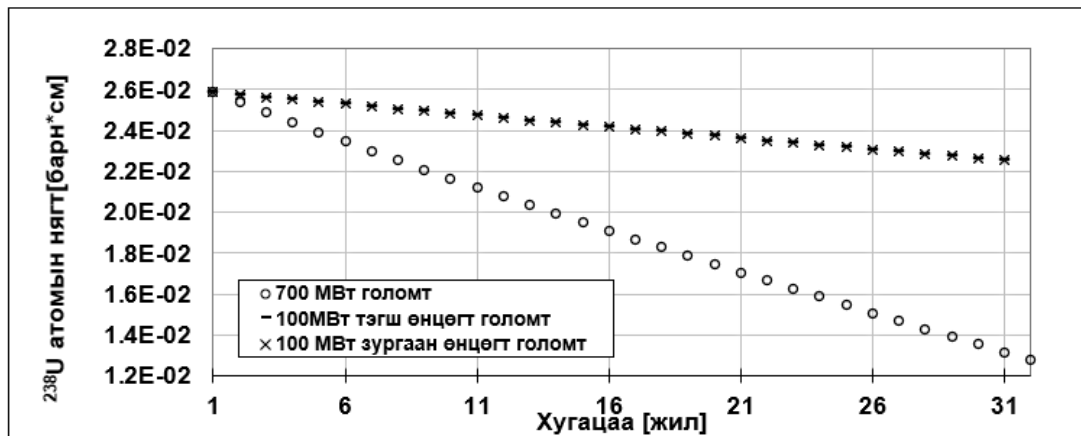
Зураг 1.34а. РАЭУ-ийн 100МВт чадлын тэгш өнцөгт, зургаан өнцөгт голомт болон 700 МВт чадлын голомтын урсгалын харьцуулсан үр дүн

100 МВт чадалтай голомтын 0.1 МэВ буюу хурдан энергитэй нейтроны урсгал бусад энергитэй нейтроной харьцуулахад их байгаа хэдий ч 700 МВт чадалтай голомтын харгалзах урсгалаас бага байна. Энэ нь 700 МВт чадалтай голомтын түлшний хэмжээ харьцангуй их учир хуваагдах урвал их явагдаж нейтрон илүү үүсэж байгаатай холбоотой. Голомт дахь нейтроны урсгал нь голомтын дизайны ялгаанаас үл хамааран реактор ажиллах хугацааны турш төсөөтэй байна. Нейтроник анализын үндсэн параметрууд болох кэфф, НҮК, түлшний шаталт болон нейтроны урсгал зэрэгт түлшний эвлүүлгийн хэлбэрийн нөлөө ажиглагдаагүй. Энэ нь голомтыг хийхдээ Хүснэгт 12-т өгсөн эзлэхүүний харьцааг хадгалсан учир түлшний саваа хоорондын зайны багахан зөрүү дээрх параметруудэд нөлөө үзүүлэхгүй байгааг илтгэж байна.

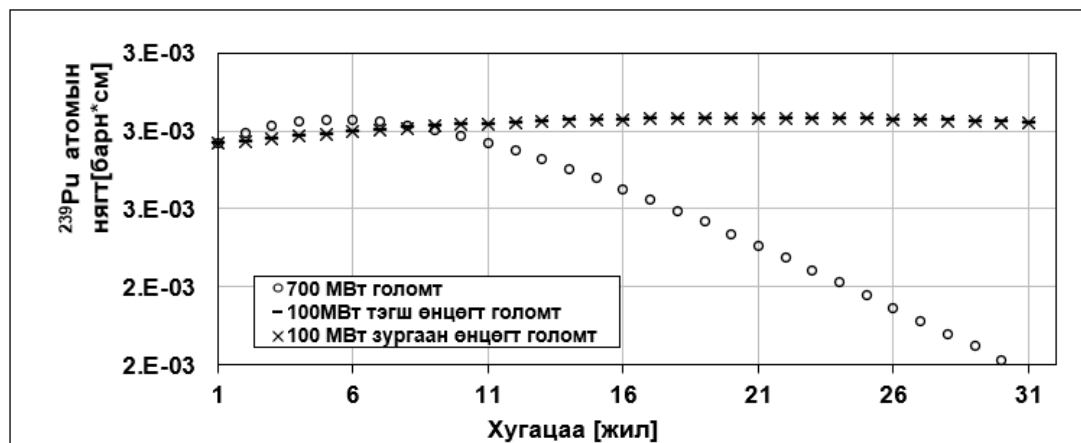


Зураг 1.34б. РАСУ-ийн 100МВт чадлын тэгш өнцөгт, зургаан өнцөгт голомт болон 700 МВт чадлын голомтын урсгалын харьцуулсан үр дүн

100 МВт чадалтай голомтод ^{238}U -ийн агууламж бусад изотопынхоос харьцангуй их байгаа ба ^{239}Pu болж хувирч байгаатай холбоотойгоор ^{238}U агууламж буурч байгаа бол ^{239}Pu -ийн агууламж багахан хэмжээгээр нэмэгдээд тогтворжиж байна. Загвар реакторын голомтын шаталт их учир ^{238}U изотопын хэмжээ 100 МВт чадалтай голомттой харьцуулахад илүү их шатаж нөхөн үйлдвэрлэл явагдаж амжихгүй түлшин дэх ^{239}Pu изотопын хэмжээ хугацааны эхний таван жилд бага зэрэг өсөөд түүнээс цааш шатаад хэмжээ нь багасаж байгаа. 100 МВт чадалтай тэгш өнцөгт болон зургаан өнцөгт түлшний эвлүүлэгтэй голомтын эдгээр нейтроник үзүүлэлтэд эвлүүлгийн хэлбэрийн нөлөө тод ажиглагдаагүй. Үүний шалтгаан нь эзлэхүүний харьцаанууд ижил учир 100 МВт чадалтай хоёр голомтод ачаалсан түлшний хэмжээ болон шаталт адил утгатай байгаатай холбоотой. Харин 700 МВт чадалтай голомтын чадлыг багасгаж 100 МВт чадалтай голомтыг хийхэд кэфф болон НҮК тогтворжиж, шаталт багассан.



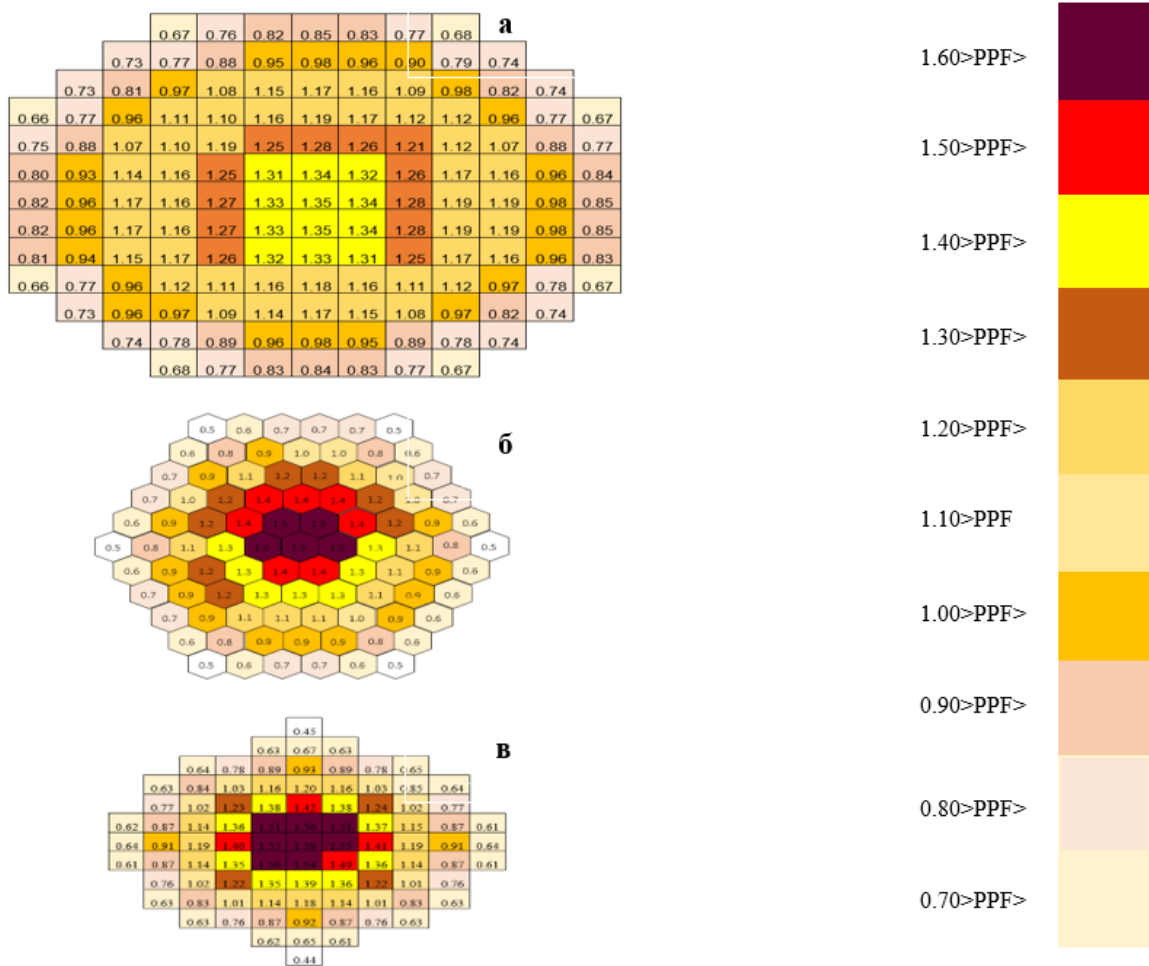
Зураг 1.35. ^{238}U изотопын шаталтын анализ



Зураг 1.36. ^{239}Pu изотопын шаталтын анализ

Цаашлаад голомтын аюулгүй байдлын чухал үзүүлэлт болох голомтын чадлын түгэлтийг 100 МВт чадалтай хоёр өөр хэлбэрийн голомтуудын хувьд тооцоолж харьцуулсныг Зураг 1.37-д дүрслэв. Чадлын түгэлтийг тодорхойлохдоо тухайн түлшний

эвлүүлгийн үйлдвэрлэж байгаа чадлыг голомтын дундаж чадалд харьцуулж уг эвлүүлгийн чадлын пикийн факторыг олно. Тэгш өнцөгт голомтод чадлын пикийн факторын хамгийн их болон хамгийн бага утгууд харгалзан 1.59 ба 0.44, зургаан өнцөгт голомтод 1.56 болон 0.55 байсан. Харин загвар реакторын голомтын чадлын пикийн хамгийн их утга төвдөө 1.35, хамгийн бага утга нь 0.66 байсан. Тэгш өнцөгт голомтод чадлын пикийн факторын хамгийн их болон хамгийн бага утгийн зөрүү зургаан өнцөгт голомттой харьцуулахад их байна. Чадлын пикийн факторын зөрүү их байх тусам голомт даяарх дулааны градиент их байж, түлш болон хийцийн материалуудын эвдрэл үүсгэх үндсэн шалтгаан болдог. Тиймээс чадлын пикийн факторын хамгийн их утга болон хамгийн их ба бага утгын зөрүү бага байх нь аюулгүй байдлын шинж чанарт сайнаар нөлөөлдөг.



Зураг 1.37. а) Загвар реакторын б) 100 МВт чадтай зургаан өнцөгт болон в) 100 МВт чадалтай тэгш өнцөгт голомтын чадлын түгэлт

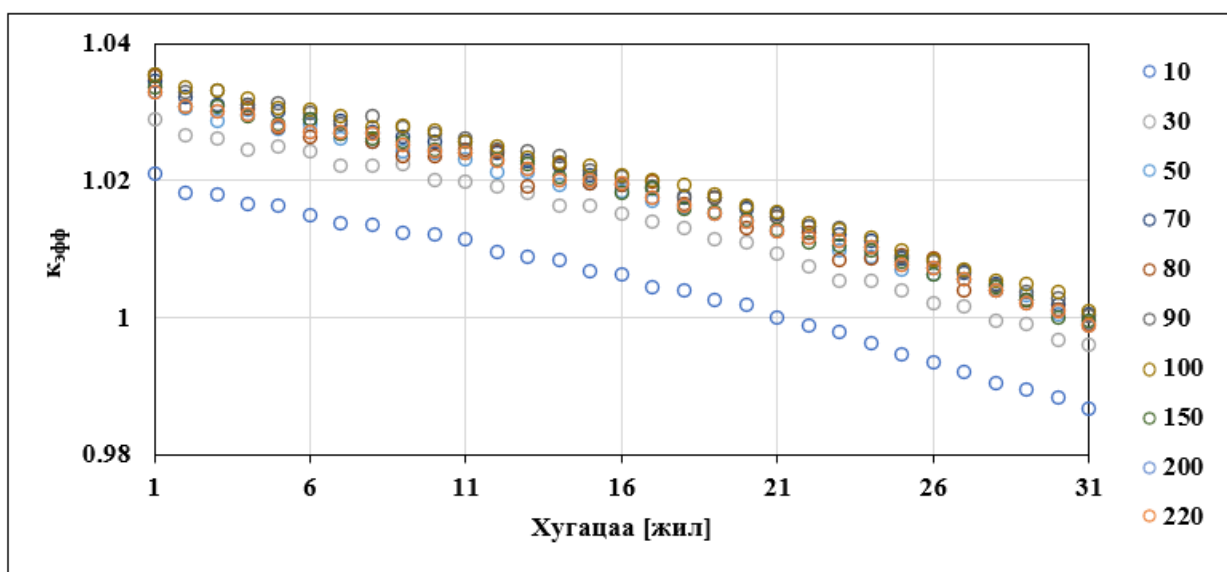
Тэгш өнцөгт болон зургаан өнцөгт 100 МВт чадалтай голомтын дизайныг хийж БРЕСТ-ОД-300 реакторын голомттой харьцуулахад хоёр голомтын дизайны хувьд нейтроник үзүүлэлтүүдэд геометрийн нөлөө бага зэрэг байгаа нь уг голомтуудын

гадаргуугийн талбай болон саваа хоорондын зайны ялгаанаас үүдэлтэй. Харин гадаргуугийн талбай их байх нь гикравликийн үүднээс дулааныг илүү их талбайгаар ашигтай зайлуулах боломж олгодог. Энэ нь бас голомтын идэвхгүйгээр дулаанаа зайлуулах шинж чанарт нөлөөлж аюулгүй байдлын зүгээс давуу талыг олгодог. Тиймээс 100 МВт чадалтай хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын үндсэн дизайнаар зургаан өнцөгт түлшний эвлүүлэгтэй голомтыг сонгон авсан.

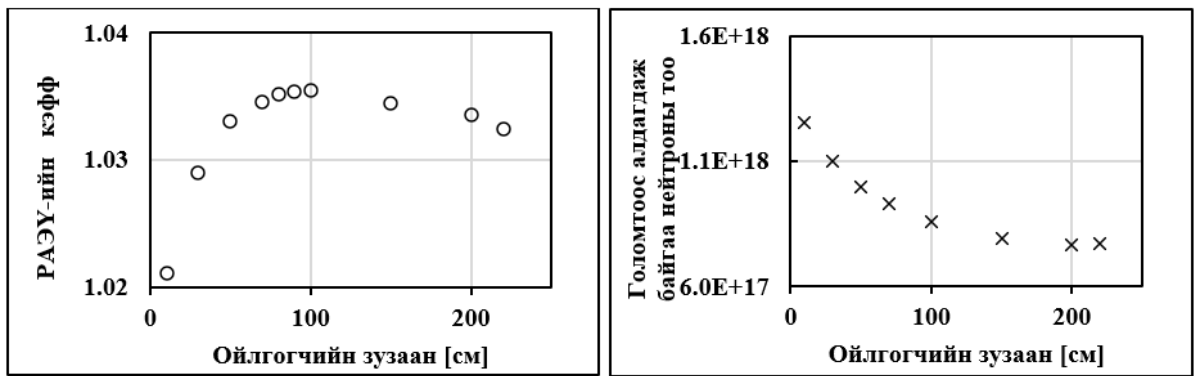
1.3.5 Ойлгогчийн зузааны нөлөө

Голомтын нейтроны эдийн засгийг сайжруулж, алдагдлыг багасгах зорилгоор нейтрон шингээх хөндлөн огтлол багатай ойлгогч материалыг ашигладаг. Хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторт нейтрон шингээх хөндлөн огтлол багатай хар тугалгыг ойлгогч материал болгон ашигладаг. 100 МВт чадалтай голомтын ойлгогчийн зузааныг 10-220 см болгож өөрчлөн нөлөөг судлахад ойлгогчийн зузаан 70 см-ээс ихэсэхэд $K_{эфф}$ -д үзүүлэх нөлөө бага болсон (Зураг 1.38). Мөн тус хэмжээний зузаантай ойлгогчийг нэмэхэд голомтоос алдагдаж байгаа нейтроны тоо тогтворжиж байгааг Зураг 1.39-өөс харж болно.

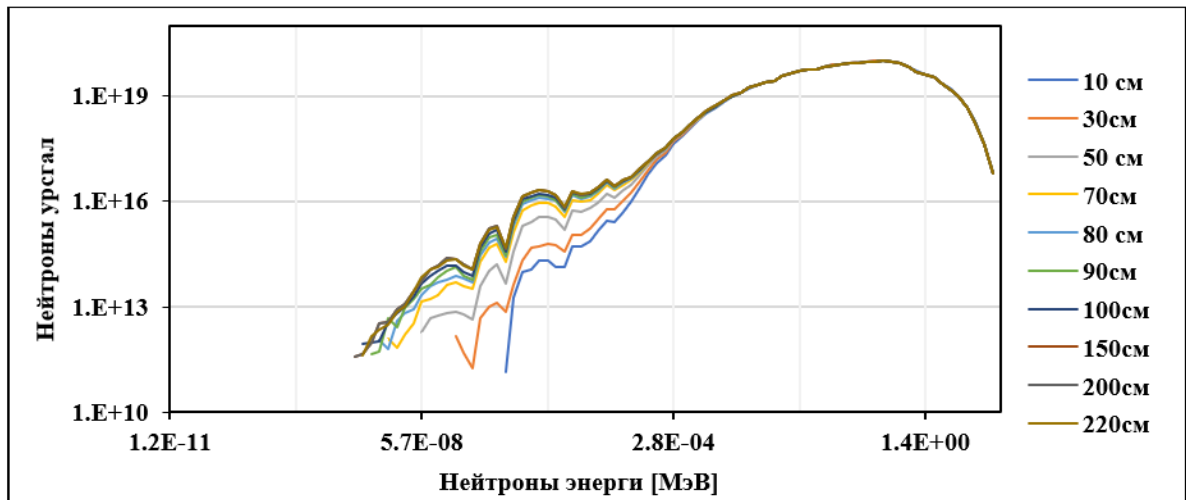
Түүнчлэн урсгалын үр дүнгээс ойлгогчийн зузаан 70 см-ээс эхлэн дулааны энергитэй нейтроны хэмжээ ихэссэн нь алдагдахгүй буцаж ойж голомтод орж ирж байгааг илэрхийлнэ (Зураг 1.40). Эндээс ойлгогчийн зузаан дээрх хэмжээнээс эхлэн голомтын нейтроникт ямар нэгэн нөлөө үзүүлэхгүй байна гэж үзэж болно. Үүнээс гадна бага чадлын реакторын хэмжээ бага байх нь түүний гол онцлогуудын нэг учраас ойлгогчийн зузааныг 75 см байхаар сонгож авав.



Зураг 1.38. Ойлгогчийн зузааны $K_{эфф}$ -д үзүүлэх нөлөө



Зураг 1.39. Түлшийг анх ачаалсан үеийн $k_{эфф}$ болон нейтроны алдагдалд ойлгогчийн зузааны нөлөө



Зураг 1.40 Ойлгогчийн зузаанаас хамаарсан РАЭУ-ийн $k_{эфф}$ болон алдагдаж байгаа нейтроны тоон өөрчлөлт

1.3.6 Түлшний нөлөө

Голомтын хөргүүр болон бусад хийцийн материалуудыг өөрчлөхгүйгээр зөвхөн түлшийг өөрчлөн тэдгээрийн нөлөөг судлах зорилгоор хурдан нейтроны реакторуудад хамгийн өргөн ашиглагддаг 4 түлшийг сонгон тооцооллыг гүйцэтгэсэн. Түлшний нягт болон агуулгыг массын эзлэх хувиар Хүснэгт 1.11-д харуулав. Үүнд байгалийн баяжуулалттай ураныг агуулсан UN болон UZr түлш, Pu 20% баяжуулалттай UPuZr түлш, мөн өмнөх тооцооллуудад ашигласан UPuN түлшийг сонгосон.

Хүснэгт 1.11. Түлшний элементийн агууламж

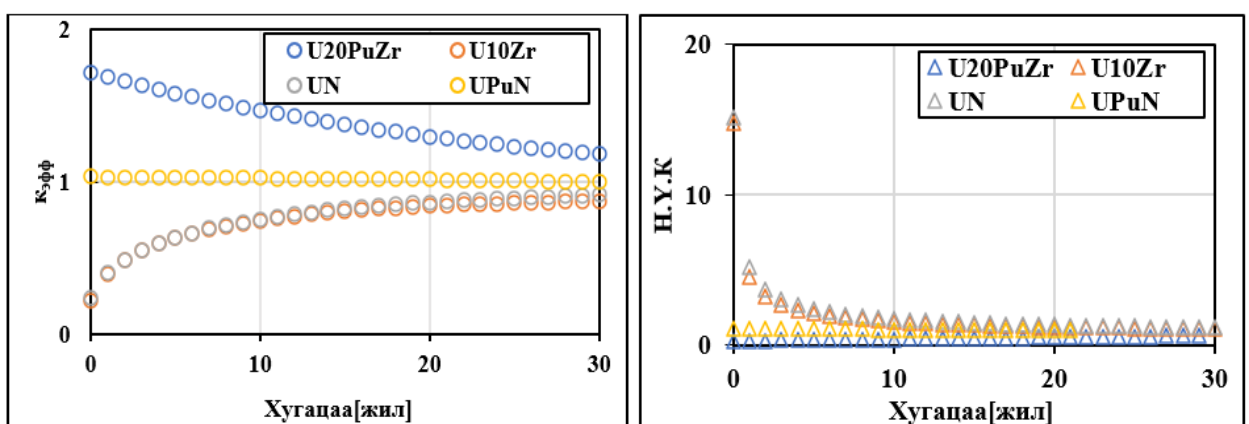
	Нягт [г/см ³]	Түлшний элементийн агууламж (массын эзлэх хувиар)					
		U		Pu		Am	
UPuN[14]	13.585	²³⁴ U	0.000041	²³⁸ Pu	0.00065	²⁴¹ Am	0.0027
		²³⁵ U	0.0054	²³⁹ Pu	0.083	²⁴² Am	0.00014
		²³⁸ U	0.75	²⁴⁰ Pu	0.036	²⁴³ Am	0.0006
				²⁴¹ Pu	0.004	N	
		²⁴² Pu	0.002	¹⁵ N	0.011		
UPuZr[16]	1.18E+01	U		Pu		Zr	

		^{234}U	3.83E-05	^{239}Pu	1.30E-01	^{90}Zr	5.00E-02
		^{235}U	5.11E-03	^{240}Pu	4.60E-02	^{91}Zr	0.011
		^{238}U	7.05E-01	^{241}Pu	1.00E-01	^{92}Zr	0.017
				^{242}Pu	2.40E-02	^{94}Zr	0.017
						^{96}Zr	0.00284
UN [17]	1.43E+01	U		N			
		^{234}U	0.000002				
		^{235}U	0.0002	15N	0.049		
		^{238}U	0.039				
UZr [18]	11.475	U		Zr			
		^{234}U	0.00004	^{90}Zr	0.051		
		^{235}U	0.0064	^{91}Zr	0.11		
		^{238}U	0.89	^{92}Zr	0.017		
				^{94}Zr	0.017		
				^{96}Zr	0.0028		

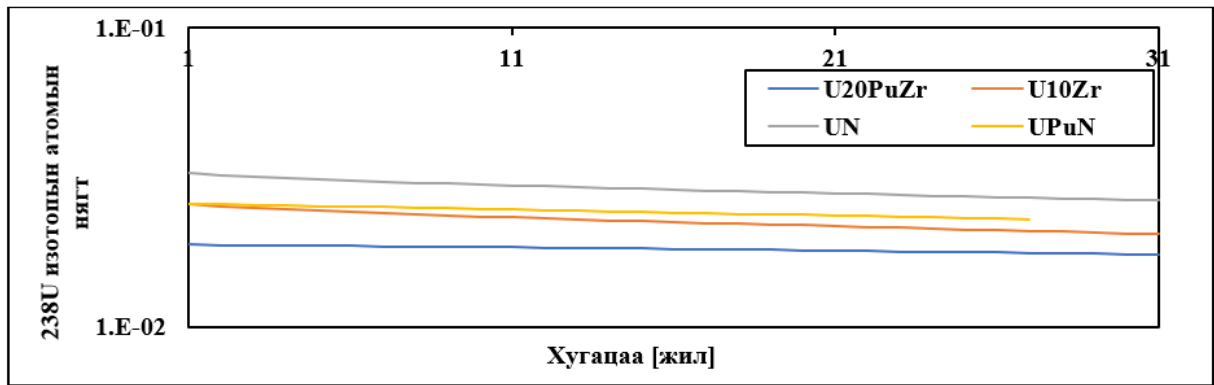
Тооцооллын үр дүнгээс UN болон UZr түлшний $k_{\text{эфф}}$ нь 0.2365 ± 0.001 ба 0.2188 ± 0.001 -ээс 30 жилийн дараа 0.9146 ± 0.0004 ба 0.8724 ± 0.0005 хүртэл харгалзан өсөж, Н.Ү.К нь багасаж байна (Зураг 1.41). Уг өөрчлөлт нь тус түлшнүүд дэх анх ачаалсан ^{238}U изотоп хугацааны турш нейтроныг шингээж ^{239}Pu -ийг буюу хуваагдагч изотопыг нөхөн үйлдвэрлэж голомт дахь хуваагдах урвалын тоо нэмэгдэж байгаагаар тайлбарлагдана.

Харин Pu агуулсан хоёр түлшинд анх ачаалсан ^{238}U -ийн хэмжээ бага учир нөхөн үйлдвэрлэл шаталттай харьцуулахад бага хэмжээгээр явагдаж байгаа нь $k_{\text{эфф}}$ анхны 1.7154 ± 0.0004 болон 1.0352 ± 0.0004 утгуудаас буурах, түүнчлэн Н.Ү.К нь бага зэрэг өсөөд тогтворжиход нөлөөлж байна.

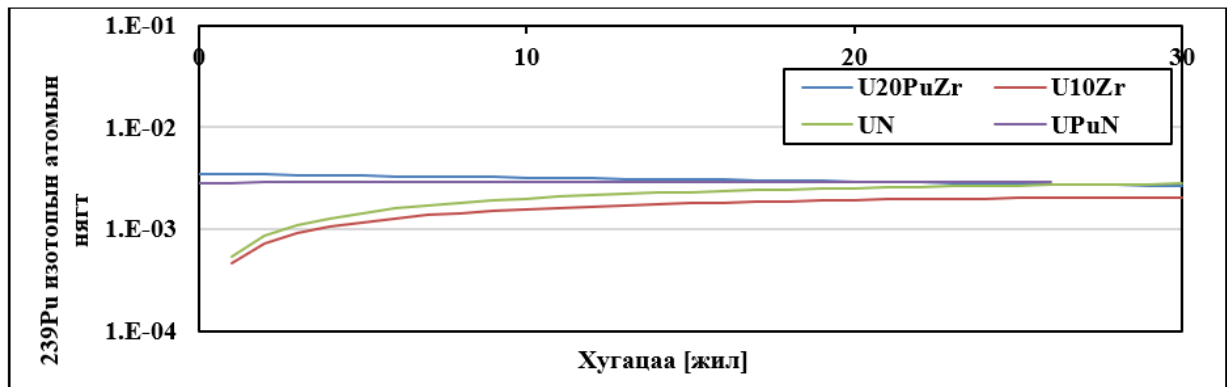
Изотопын шаталтын анализын үр дүнг Зураг 1.42 болон Зураг 1.43-д харуулав. Хэдийгээр UPuN түлшний ^{238}U изотопын агууламж UPuZr түлшнийхтэй харьцуулахад их ч гэсэн нөхөн үйлдвэрлэл явагдахгүй маш тогтвортой шатаагч реактор болж байгаа.



Зураг 1.41. Түлшний тооцооны $k_{\text{эфф}}$ болон Н.Ү.К-ны үр дүн



Зураг 1.42. Түлшин дэх ^{238}U изотопын шаталтын анализ



Зураг 1.43. Түлшин дэх ^{239}Pu изотопын шаталтын анализ

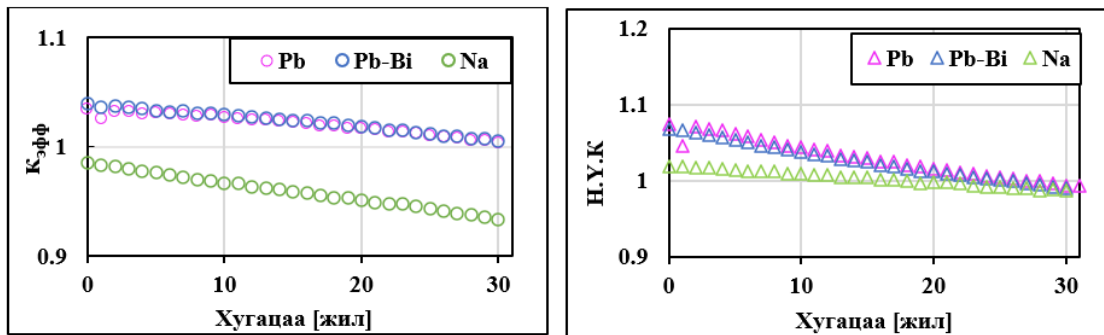
1.3.7 Хөргүүрийн нөлөө

100 МВт чадалтай, UPuN түлштэй голомтод хөргүүр хэрхэн нөлөөлж байгааг судлав. Хүснэгт 17-д гурван өөр шингэн металл хөргүүрийн нягт болон элементийн агууламжийг харуулав. Тооцооллын үр дүнг зураг 1.44-д харуулав. Ингэхэд хар тугалга болон хар тугалга-висмут хөргүүрийн $k_{\text{эфф}}$ болон Н.Ү.К нь натри хөргүүрээс илүү үзүүлэлттэй байна. Өөрөөр хэлбэл уг судалгааны ажлаар хийсэн UPuN түлштэй голомтын конфигурацид дээрх хоёр төрлийн хөргүүр натри хөргүүрээс илүү зохимжтой байна.

Хүснэгт 1.12. Хөргүүрийн нягт болон элементийн агууламж

		Нягт [г/см ³]	Изотопын эзлэх хувь, %
		Pb	
Pb	10.6733	²⁰⁴ Pb	1.4
		²⁰⁶ Pb	24.1
		²⁰⁷ Pb	22.1
		²⁰⁸ Pb	52.4
		Pb	
Pb-Bi	1.03E+01	²⁰⁴ Pb	0.6
		²⁰⁶ Pb	10.7
		²⁰⁷ Pb	9.9
		²⁰⁸ Pb	23.3
		Bi	
		²⁰⁹ Bi	55.5

Na	9.68E-01	Na	
		²³ Na	100



Зураг 1.44. $K_{эфф}$ болон $H.Y.K$ -д үзүүлэх хөргүүрийн нөлөө

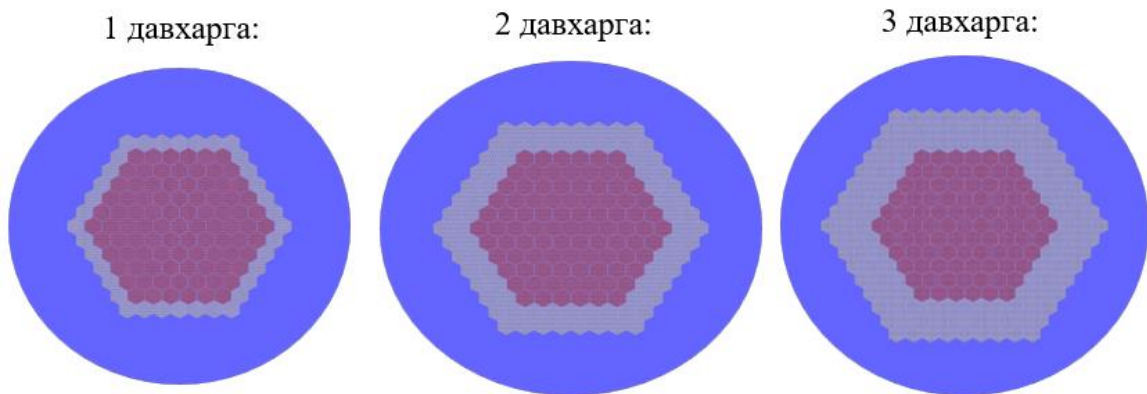
1.3.8 Бланкетын нөлөө

Хурдан нейтроны реакторуудад түлшээ нөхөн үйлдвэрлэх процессыг нэмэгдүүлэхийн тулд үржүүлэгч түлшийг агуулсан бланкет материалыг голомтын гадна давхарладаг. Бланкетын нэмснээр түлшнээс гарч байгаа нейтронууд бланкетын материал дээр тусаж шингээгдээд хуваагдагч материалыг үүсгэдэг. 100МВт голомтод бланкет нэмэхэд $K_{эфф}$ болон $H.Y.K$ -нд хэрхэн нөлөөлөхийг судлахаар байгалийн тори (Th), байгалийн уран (U), ураны нитрид (UN) бланкетын нэмсэн. Хүснэгт 1.13-д эдгээрийн нягт болон элементийн агууламжийг харуулав.

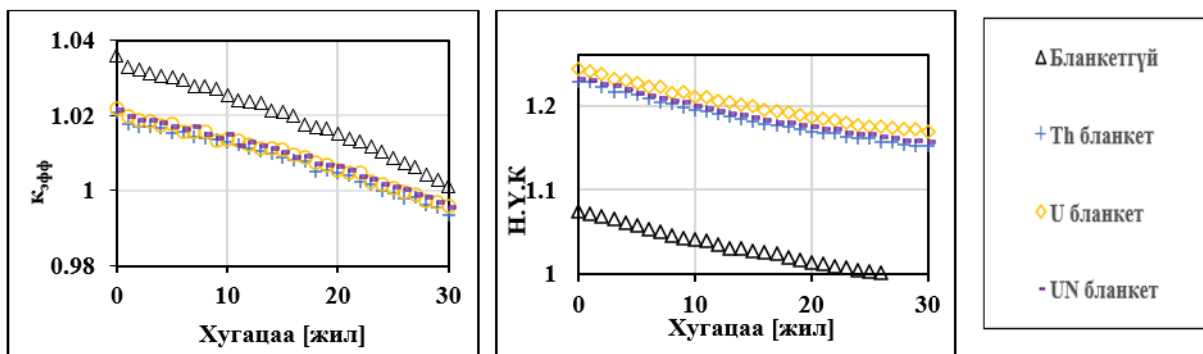
Хүснэгт 1.13. Бланкетын материалын нягт болон элементийн агууламж

Хольцын нягт [г/см ³]		Изотопын эзлэх хувь, %	
Th	11.65	Th	
		²³² Th	100
U	19	U	
		²³⁴ U	0.005
		²³⁵ U	0.072
		²³⁸ U	99.27
UN	14.32	U	
		²³⁴ U	0.003
		²³⁵ U	0.28
		²³⁸ U	39.7
		N	
		¹⁵ N	59.99

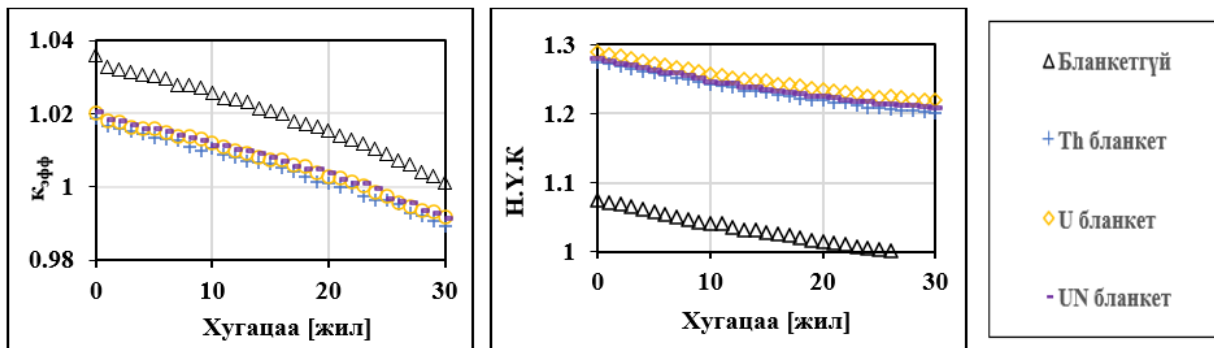
Зураг 1.45-д харуулснаар бланкетын нэг нэгээр гурван давхарга хүртэл нэмж, голомтын $K_{эфф}$ болон $H.Y.K$ -д нөлөөлөх нөлөөллийг авч үзсэн (Зураг 1.46а, Зураг 1.46б болон Зураг 1.46в).



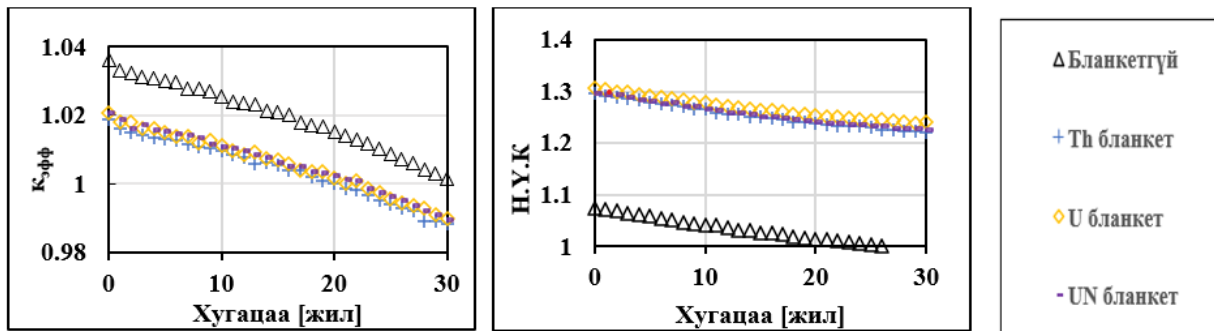
Зураг 1.45. Бланкетыг нэмэх тооцоо



Зураг 1.46а. Нэг давхар бланкет нэмсэн тохиолдол



Зураг 1.47б. Хоёр давхар бланкет нэмсэн тохиолдол

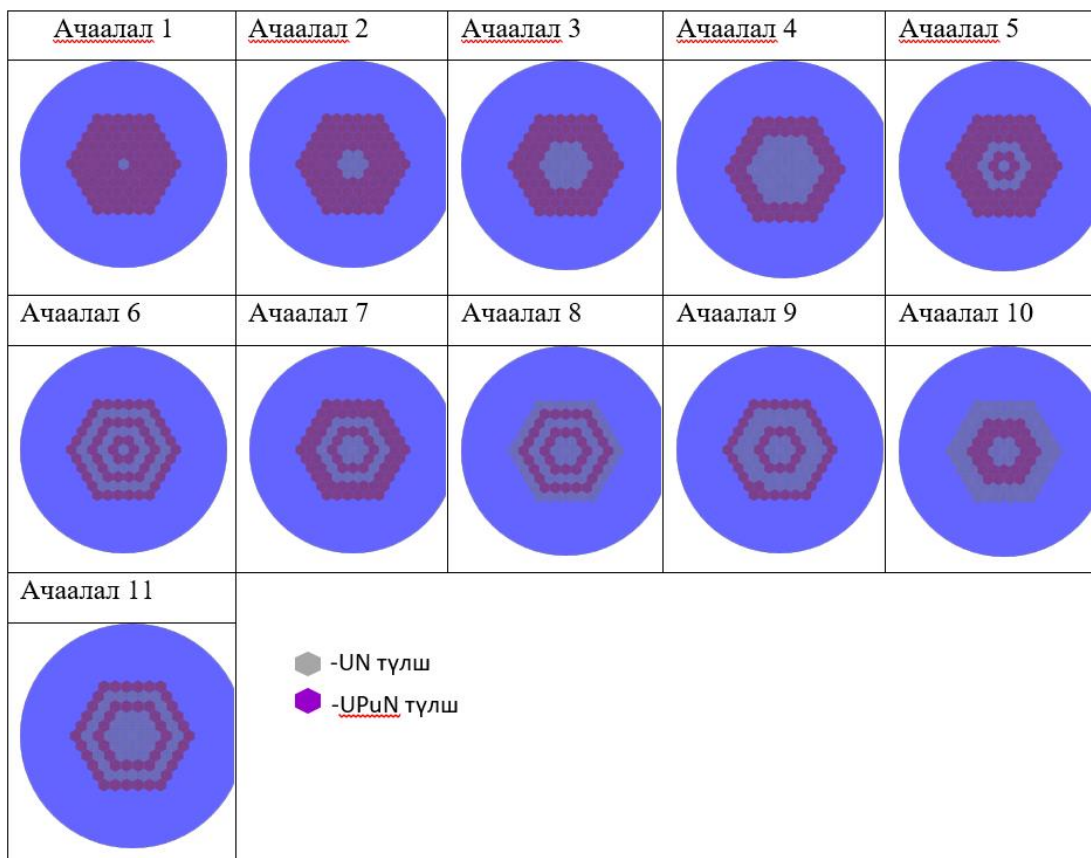


Зураг 1.48в. Гурван давхар бланкет нэмсэн тохиолдол

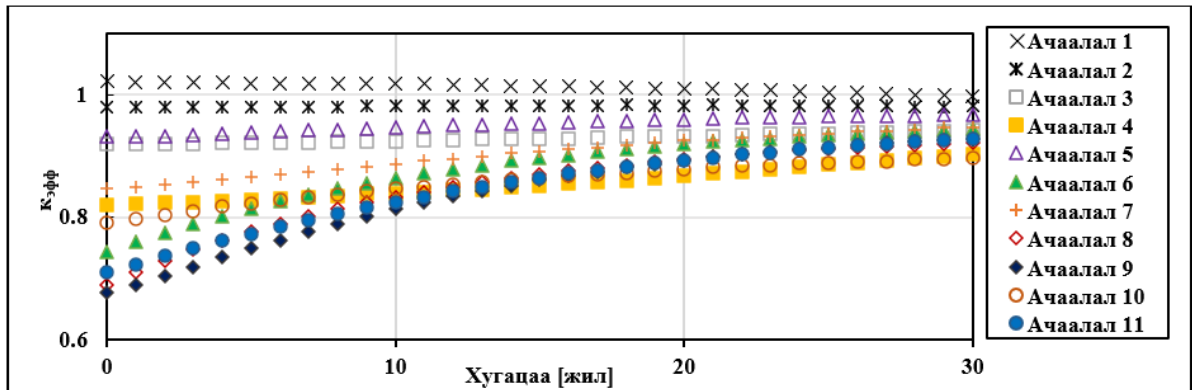
Бланкет нэмэхэд голомтын $k_{эфф}$ бланкетгүй үеийнхээс бага байсан ч Н.Ү.К нь өссөн. Харин бланкетын давхарга нэмэгдэхэд $k_{эфф}$ -ийн утгад нөлөөлөхгүй байгаа ч Н.Ү.К өсөж байгаа. Тухайлбал РАЭҮ-д бланкетгүй үеийн $k_{эфф}$ нь 1.0360 ± 0.0004 -ээс Th бланкетыг нэмэхэд 1.0208 ± 0.0004 болсон. Түүнчлэн бланкетын давхарга нэмэгдэж 2 болоход $k_{эфф}$ нь 1.0188 ± 0.0004 , 3 давхаргатай үед 1.0187 ± 0.0004 буюу маш бага зөрөөтэй байна. Харин Н.Ү.К нь бланкетгүй голомтын хувьд 1.0743 ± 0.0007 ба Th бланкетыг давхарлан нэмэхэд харгалзан 1.2281 ± 0.0007 , 1.2752 ± 0.0007 болон 1.2950 ± 0.0007 тус тус болсон байна. $k_{эфф}$ -ийн бууралт нь голомтод бланкет нэмэхэд үүсэж байгаа нейтроны тоо нэмэгдэхгүй боловч бланкетын материалд шингээгдэж байгаа буюу алдагдаж байгаа нейтроны тоо нэмэгдэж байгаатай холбоотой. Харин бланкетын материалд нейтрон шингээгдэж байгаа учраас түүн дээр нөхөн үйлдвэрлэл явагдаж байгаа.

1.3.9 UN түлш ачаалал

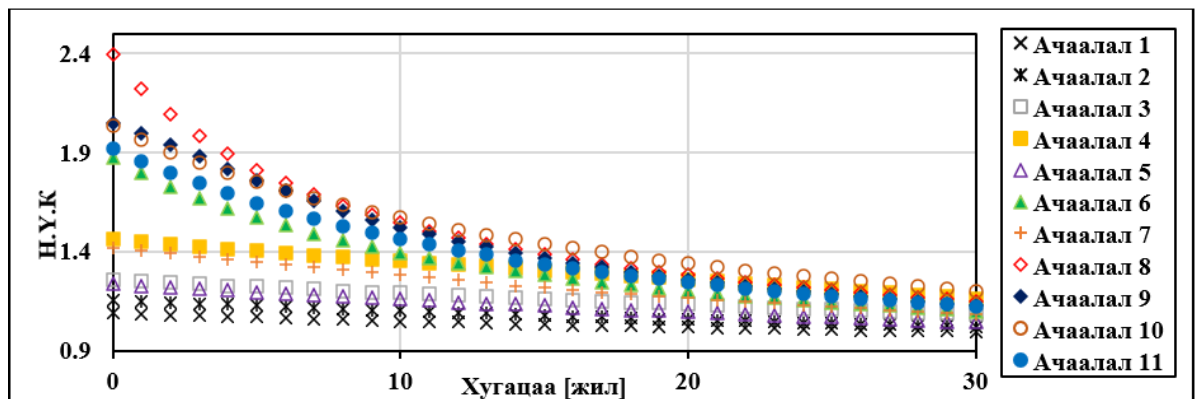
100 МВт чадалтай UPuN түлштэй голомтод бланкет нэмсэн ч үржүүлэгч реактор болоогүй. Тиймээс нэг төрлийн түлш биш үржүүлэгч материалыг агуулсан өөр төрлийн түлшийг нэмж ачаалахад үржүүлэгч реактор болох боломжтой эсэх судалгааг гүйцэтгэв. Ингэхдээ өмнөх түлшний тооцоо болон бланкетын тооцоонд ашигласан UN түлшийг сонгож голомтод UPuN түлштэй хамт дараах 11 хэлбэрээр ачаалсан.



Зураг 1.49-д харуулснаар голомтод ачаалаж байгаа UN түлшний хэмжээ бага үед $k_{эфф}$ нь ~ 1 буюу критик нөхцлийн ойролцоо байгаа ба ажиллуулах хугацааны турш тогтвортой шатаж байна. Харин UN түлшний хэмжээ нэмэгдэхэд $k_{эфф}$ бага утгаас эхлээд хугацааны турш критик утга руу дөхсөн. Гэвч Н.Ү.К үр дүнг харахад дээрх ачаалууд нөхөн үйлдвэрлэл явуулахгүй зөвхөн шатаагч реактор болж байна. Өөрөөр хэлбэл, голомтод ^{238}U -аас ^{239}Pu болж хувирах хур нь шатаж байгаагаа нөхөхгүй байна.



Зураг 1.49. UN түлши ачаалсан голомтын $k_{эфф}$ -ийн өөрчлөлт



Зураг 1.50. UN түлши ачаалсан голомтын Н.Ү.К-ийн өөрчлөлт

1.3.10 Дүгнэлт

“Монголд тохиромжтой дэвшилтэт цөмийн реакторын харьцуулсан судалгаа” сэдэвт суурь судалгааны төслийн хүрээнд хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын судалгааг гүйцэтгэж дараах дүгнэлтүүдэд хүрсэн:

1. Дэлхий даяар судлагдаж байгаа хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын дизайныг харьцуулан судалж аюулгүй шинж чанар, туршилтын мэдээллийн олдоц болон Монголд тохиромжтой зэрэг байдлыг харгалзан ОХУ-ын 300МВт чадалтай, хар тугалган хөргүүртэй БРЕСТ-ОД реакторын дизайныг загвар реактор болгон сонгосон.

2. Монголд тохиромжтой буюу 100 МВт чадалтай, хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын дизайны нейтроник анализыг хийхэд Монте Карло аргад үндэслэсэн цөмийн реакторын тооцоолол хийдэг Финлянд улсын техникийн институтийн эрдэмтдийн хөгжүүлсэн SERPENT кодыг АНУ-ын JEFF цөмийн өгөгдлийн сантай хамт ашиглахаар сонгосон.
3. Хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын түлшний савааны нейтроник тооцооллын үр дүнд түлшний температур, радиус болон өндөр нь савааны эффектив нейтрон үржүүлэх факторт хамгийн их нөлөөтэй байгааг олж тогтоов.
4. Хар тугалган хөргүүртэй реактор нь судалгааны түвшинд явж байгаа учир голомтыг өөрсдийн орны туршлага болон реакторын зорилгоос хамааруулан тэгш өнцөгт эсвэл зургаан өнцөгт хэлбэртэй аль алианаар нь хийсэн байдаг. Тиймээс хэдий бидний сонгосон загвар реакторын голомт нь тэгш өнцөгт хэлбэртэй боловч чадлыг багасгахад аль хэлбэр нь илүү давуу шинж чанартай болохыг судлахаар зургаан өнцөгт болон тэгш өнцөгт хэлбэртэй түлшний эвлүүлгийн дизайн хийж гүйцэтгэсэн. Тэгш өнцөгт болон зургаан өнцөгт түлшний эвлүүлгийн тооцоо хийхэд тэгш өнцөгт түлшний эвлүүлгийн ажиллаж эхлэх үеийн $k_{эфф}=1.1814\pm 0.0004$, $H.Y.K=1.0917\pm 0.0007$, зургаан өнцөгт түлшний эвлүүлгийн хувьд $k_{эфф}=1.1771\pm 0.0004$ $H.Y.K=1.0919\pm 0.0007$ байсан ба критик нөхцөлд ажиллах жил нь хоёр эвлүүлгийн хувьд ~ 22 жил гарсан.
5. Хоёр эвлүүлгийн хувьд эффектив нейтрон үржүүлэх фактор, нөхөн үйлдвэрлэлийн коэффициент болон нейтроны урсгал зэрэг нейтроникийн үндсэн үзүүлэлтүүдэд геометрийн нөлөө ажиглагдаагүй учир хоёр өөр дизайнтай голомтыг хийж харьцуулсан нейтроник анализ гүйцэтгэсэн. 100 МВт чадалтай хоёр өөр дизайнтай голомтуудын нейтроник үзүүлэлтүүд адилхан сайн байгаа боловч зургаан өнцөгт голомтын гадаргуугийн талбай их байх, мөн чадлын түгэлтийн пик бага байх зэрэг нь гидравликийн болон аюулгүй байдлын үүднээс илүү давуу талтай тул 100 МВт чадалтай зургаан өнцөгт түлшний эвлүүлэгтэй голомтыг сонгон авч цаашдын тооцооллыг гүйцэтгэх болсон.
6. Түүнчлэн 100МВт чадалтай голомтын компонент голомтын нейтроник үзүүлэлтэд үзүүлэх нөлөөг судлахаар гадна талын ойлгогчийн зузаан, түлш болон хөргүүрийн материалыг сольж тэдгээрийн нөлөөг судалсан. Ингэхэд голомтод плутони агуулсан түлш ачаалахад шатаагч голомт ($H.Y.K < 0.9$), харин зөвхөн уран ачаалсан голомтууд үржүүлэгч голомт ($H.Y.K > 1.0$) болж байна. Түүнчлэн хар тугалга болон хар тугалга-бисмут хөргүүр нь натри хөргүүрээс илүү UPuN түлштэй зохицож байсан. Реакторыг үржүүлэгч болгох зорилгоор Тори (Th), Байгалийн уран (U),

Ураны нитрид (UN) бланкет материалыг гурав хүртэлх давхаргаар нэмэхэд голомтын түлшээ нөхөн үйлдвэрлэх чадвар нэмэгдэж байгааг олж тогтоов.

Дээрх судалгааны ажлаар “100 МВт чадалтай, хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын нейтроникийн судалгаа” сэдвээр 1 магистрант магистрын судалгааны ажил гүйцэтгэж амжилттай хамгаалсан.

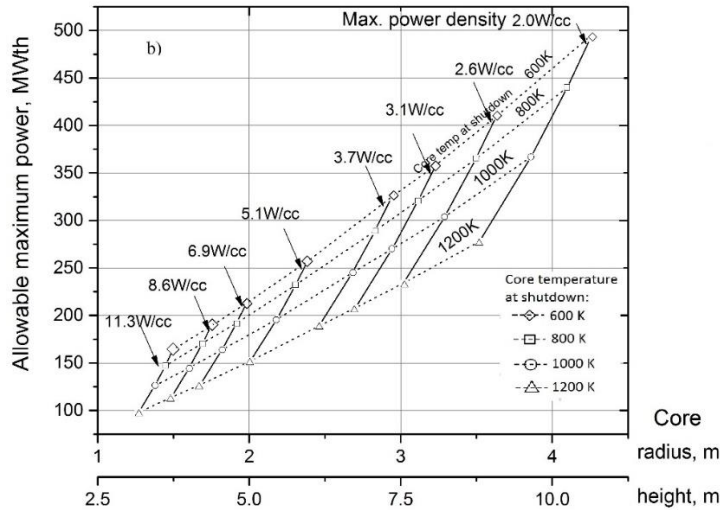
1.4 Өндөр температурын хийн хөргүүртэй призм реакторын дизайны судалгаа

Өндөр температурын хийн хөргүүртэй реактор (ӨТХР)-ийн технологийг сүүлийн жилүүдэд дэлхийн өндөр хөгжилтэй ихэнх орнуудад ирээдүйн эрчим хүчний шинэ сонголт гэж үзэн сонирхон судалж байна. Анхны хийн хөргөлттэй реакторын арилжааны загвар болох Калдер Холл нь (Calder Hall, U.K) 1956 онд гарснаас хойш цөмийн эрчим хүч нь дэлхий нийтийн эрчим хүчний үйлдвэрлэлд чухал оролцоотой болж эхэлсэн гэж үздэг. Шинээр судлагдаж байгаа дизайнууд нь цацраг идэвхт хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг гадагш алдахгүй барих онцгой шинж чанартай TRISO түлшинд тулгуурласан төрөлхийн аюулгүй болон идэвхгүй шинж чанартай ба ашиглаж байгаа түлш нь маш өндөр температурыг (1600°C) тэсвэрлэх чадвартай. ӨТХР нь Брайтон (Brayton) хийн турбин цикл ашигладаг ба ашигт үйлийн коэффициент өндөр байдаг. Уг гарган авсан дулаанаар усны электролиз, термохимийн процессоор уснаас устөрөгч үйлдвэрлэх боломжтой. Дээрх шинж чанарууд нь аж үйлдвэржсэн болон хөгжиж буй орнуудад технологийн дэвшилтэт, тогтвортой эрчим хүчээр тасралтгүй хангах боломжтой, эдийн засгийн хувьд өрсөлдөх чадвар өндөртэй реакторыг сонгон судлахад маш том түлхэц болж байна.

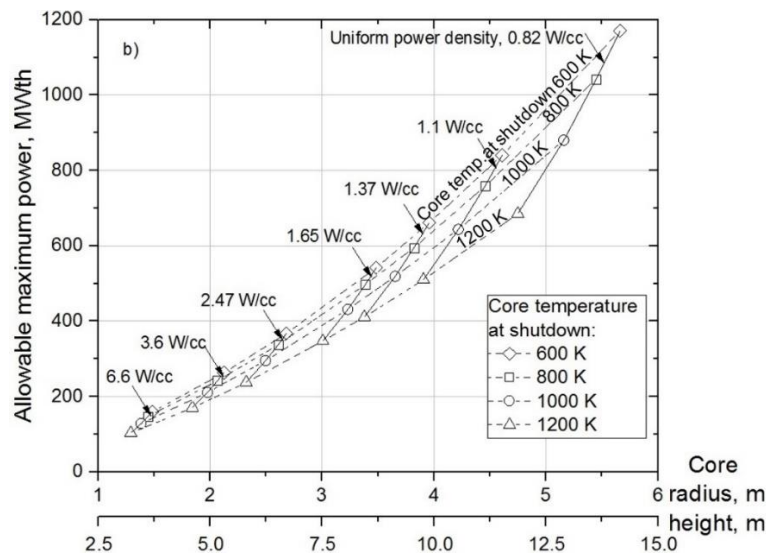
Бидний судалж байгаа ӨТХР гол онцлогууд нь дулааны үр ашиг өндөртэй, аюулгүй байдал сайжирсан, эдийн засгийн өрсөлдөөн сайн, цөмийн зэвсгийг дэлгэрүүлэхээс хамгаалагдсан зэрэг нь цөмийн эрчим хүчний станцад ашиглахад боломжтой гэж үздэг. Реакторын гаралтын температур өндөр учраас эндотермик химийн процессоос дулаан гаргах, нүүрсийг хийжүүлэх, устөрөгч үйлдвэрлэх зэрэг аж үйлдвэрийн хэрэгцээнд ашиглах боломжтой. Аюулгүй байдлын тал дээр том дэвшил авчирсан нөхцөл нь олон давхаргатай, өндөр температурыг тэсвэрлэх чадвартай бүрмэл түлш ашигласан нь хүрээлэн буй орчинд цацраг идэвхт хуваагдлын бүтээгдэхүүн алдагдах боломжийг багасгаж, цөмийн зэвсэг болгон ашиглах боломжийг эрс багасгаж чадсан.

ӨТХР-т үндсэн 2 дизайн байдаг: “призм” төрлийн өндөр температурын хийн реактор, “хайрган үет” төрлийн өндөр температурын хийн реактор. Аль аль дизайн нь үр ашиг өндөртэй, төрөлхийн аюулгүй гэсэн шинж чанартай гэх мэт дээр дурдсан шинж чанаруудыг өөртөө шингээсэн байдаг ба 2 дизайны хувьд хоорондоо хэд хэдэн ялгаатай.

идэвхгүйгээр амжилттай зайлуулах чадвартай реакторын параметруудийн хамаарлыг гарган авахын тулд дулаан дамжууллын тооцооллыг детерминистик аргаар тооцоолдог COMSOL программаар гүйцэтгэсэн. Энэ программд реактор системг бүрдүүлэх хийцийн материалууд, тэдгээрийн физикийн болон дулааны шинж чанарууд болон хэмжээсийг гаднаас оруулж өгөн, дулаан дамжих бүх мужийг жижиг меш хэсгүүд болгон хуваан, хэсэг бүрт дамжих дулааны тооцооллыг дулаан дамжууллын үндсэн аналитик тэгшитгэлээр тооцдог. Гарган авсан параметруудийн хамаарлыг доорх зургуудад харуулав.



Зураг 1.52 Өөр өөр температур, чадлын нягттайгаар ажиллах реакторын хамгийн их чадал болон голомтын хэмжээсийн хамаарал



Зураг 1.53 Өөр өөр температур, жигд чадлын нягттайгаар ажиллах реакторын хамгийн их чадал болон голомтын хэмжээсийн хамаарал

1.4.1 ӨТХР-ын төрөл бүрийн дизайны өөрчлөлтийн харьцуулсан судалгаа

Бид ӨТХР-ийн голомт нь жижиг призм хэлбэрийн 6-н талт блокуудаас бүрдсэн цилиндр хэлбэртэй ба голомт нь төвдөө болон гадуураа ойлгогчоор хүрээлүүлсэн байна.

Төвийн ойлгогчтой голомт хөргүүрийн осол болоход төрөлхийн аюулгүй шинж чанартай буюу реакторыг унтраасны дараа голомтонд үүсэх задралын дулааныг дулаан дамжих механизмаар зайлуулж аюулгүй болж чаддаг онцлогтой. Реакторын голомтын радиус болон өндрийн хэмжээсийг задралын дулаанаа идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай цагираган реакторын дизайны параметрийн хамаарлаас авч тооцоолыг гүйцэтгэсэн. Реакторыг амжилттай унтраасны дараа голомтонд хуримтлагдсан хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийн задралаас үүсэх дулааныг идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай, голомтын төвдөө нэг, 7 болон 19 блокон ойлгогчтой голомт бүхий (Зураг 1.54) газар дээр байрлах призм төрлийн 100 МВт-ийн дулааны чадалтай, 2.49 м голомтын эквивалент радиустай, 6.38 м эффектив өндөртэй, төвийн ойлгогчийн радиус 0.18 м, голомтын дундаж чадлын нягт 0.82 Вт/см^3 байх, 20% баяжуулсан UO_2 бүхий TRISO түлш ашигласан голомтын дизайныг хийж, нэгэн жигд, нэгэн жигд бус үеийн критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэсэн.

Энэ ажлаар өмнө гүйцэтгэсэн төвдөө нэг ойлгогчин блоктой ӨТХР-ийн дизайныг бага зэрэг өөрчлөн төвийн ойлгогчийн тоог 7 болон 19 ойлгогч блоктой болгож голомтын дизайны судалгааг хийж харьцуулсан. Эдгээр голомт бүхий ӨТХР нь 100 МВт дулааны чадалтай, голомтын эзлэхүүн нь адил, түлшний блокны тоо болон хуваагдагч изотопын агууламж ижилхэн болно. Эдгээр голомтын нейтроник анализыг хийж критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэн түлшний баяжуулалт нэгэн жигд түгэлттэй үеийн дизайны хамгийн оновчтой нөхцөлүүдийг тодорхойлсон. Үүний дараа илүүдэл реактивитийг бууруулахын тулд шатдаг хорлолт материалыг бүхий бөөмсийг голомтод жигд нэмж өгөх замаар реактивитийн өөрчлөлтийг нэгэн жигд болгох тооцоолуудыг гүйцэтгэж анализ хийв. Нэгэн жигд түгэлттэй үеийн критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг тасралтгүй энергийн мужийн Монте Карло аргад үндэслэсэн MVP2.0 болон MVPBURN кодуудыг ашиглан гүйцэтгэсэн ба цөмийн урвалын өгөгдлийн сан болох JENDL-4.0 ашиглав.

Төвийн ойлгогч блокны тоог долоо болон арванес болгон нэмсэн ба эдгээр голомтууд нь 100 МВт дулааны чадалтай, голомтын эзлэхүүн, түлшний блокны тоо болон хуваагдагч изотопын агууламжаараа ижилхэн ба эдгээр голомтод нейтроник анализыг хийж, критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэн, голомтын дизайныг оновчтой болгох зорилго тавьсан. Гарган авсан голомтын дизайны нейтроник үзүүлэлтүүдийг хооронд нь харьцуулж, төвийн ойлгогчин блокын зузааны нөлөөг авч үзсэн. Реактор ажиллах үеийн илүүдэл реактивитийг дарахын тулд “шатдаг хорлолт материал-ШХМ” (Burnable poison-BP) бүхий бөөмсийг голомтод жигд нэмж өгөх замаар реактивитийн

хугацааны өөрчлөлтийг нэгэн жигд болгож, түлш болон шатдаг хорлолт материал нэгэн жигд түгэлттэй байх үеийн хамгийн боломжит нөхцөлийг тодорхойлов. Энэ удаа өмнөх ажилд авч үзсэн 100 МВт дулааны чадалтай, төвдөө ойлгогчийн нэг блоктой ӨТХР-ийн голомтын дизайны нейтроник тооцооллыг JENDL-4.0 санг ашиглан дахин гүйцэтгэв.

Голомт нь түлшний эвлүүлгийн болон удирдлагын савааны, ойлгогчийн гэсэн өөр өөр дизайнтай ч ижил хэмжээтэй зургаан өнцөгт призмен блокуудаас бүрдэх ба тэдгээр нь цилиндр хэлбэр үүсгэнэ. Задралын дулаанаа идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай төвдөө 0.18 м радиустай графитан ойлгогчтой (голомтын давхарга бүрд төвдөө ойлгогчийн нэг блок агуулсан) реакторын дизайны параметруудийн хамаарлыг дулаан дамжуулалтын тооцоолол гүйцэтгэн өмнөх ажлуудад гарган авсан. Үүнтэй адил аргаар төвдөө 0.5 м (7 блок) болон 0.82 м (19 блок) радиустай графитан ойлгогчтой 100 МВт чадалтай, 850 °С температурт ажиллах ӨТХР-ийн голомтын хэмжээсийг (радиус болон өндөр) тодорхойлсныг Хүснэгт 1.13-д өгөв.

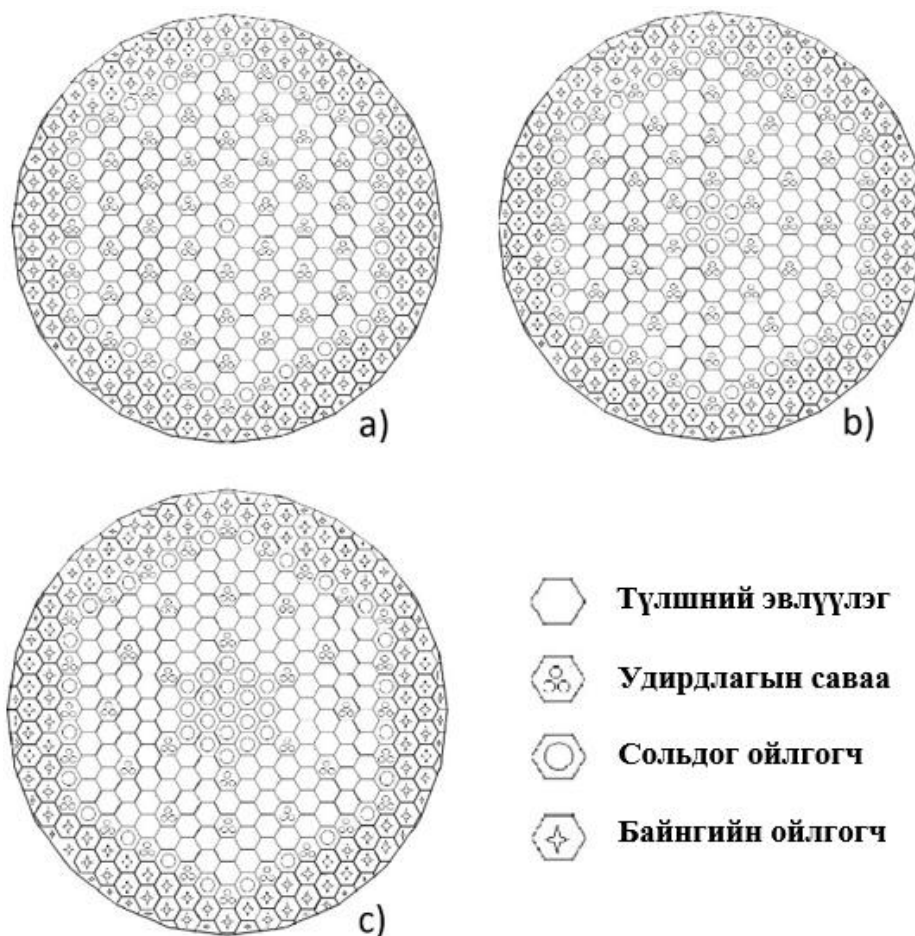
Реакторын голомтыг бүрдүүлж байгаа дээрх гурван төрлийн блокын хэмжээ болон дизайн нь Японы Атомын Энергийн Агентлагт ажиллаж буй Өндөр Температурын Тест Реакторын (ӨТТР) голомтыг бүрдүүлэгч блокуудтай адил 58 см-ийн өндөртэй, 36 см-ийн өргөнтэй болно. Бид голомтын дизайндаа эдгээр блокын хэмжээсийг өөрчлөөгүй тул эдгээрээс бүрдсэн голомтын хэмжээс бага зэрэг өөрчлөгдөж болно. Гэхдээ голомтын жинхэнэ эзлэхүүнтэй адилхан эзлэхүүнтэй байхаар эквивалент хэмжээсийг олсон ба эдгээрийг Хүснэгт 1.13-д мөн харуулав.

Хүснэгт 1.13 Голомтын үндсэн үзүүлэлтүүд

Реакторын дулааны чадал, МВт	100		
Голомтын температур, °С	850		
Төвийн ойлгогчийн радиус/зузаан, м	0.18/0.36	0.5/1.08	0.8/2.52
Дулаан дамжууллын тооцоолоос олсон голомтын радиус/өндөр, м	2.5/6.24	2.53/6.32	2.58/6.45
Голомтын эквивалент радиус/өндөр, м	2.47/6.38	2.47/6.38	2.47/6.38
Дундаж чадлын нягт (Вт/см³)	0.82		
Түлш	UO ₂		
Баяжуулалт (wt%)	20%		
Хөргүүрийн материал	Helium gas		
Ойлгогчийн зузаан, м:			
Дээд, доод	0.58		
Хажуу	0.87		
Түлшний эвлүүлгийн тоо	1452		
Давхаргын тоо	11		
Нэг давхаргад байх удирдлагын савааны тоо:			
Голомт дотор	36	30	18
Ойлгогчинд	24	24	24

Нейтроник анализ

Энэхүү ажилд тасралтгүй энергитэй нейтроны харилцан үйлчлэлийг Монте Карло аргаар тооцоолдог MVP2.0 болон цөмийн урвалын өгөгдлийн сан JENDL-4.0-ийн хамт ашиглан реакторын голомтын критик байдал болон түлшний шаталтын анализыг гүйцэтгэсэн. Эдгээр тооцооллыг бүх удирдлагын савааг голомтоос гарган, үүсэх орон зайг гелийн хийгээр дүүргэсэн тохиолдолд гүйцэтгэсэн. Өөрөөр хэлбэл реактор бүрэн хүчин чадлаараа ажиллаж байна гэж үзсэн. Энэхүү MVP2.0 кодоор реакторын голомт дотор үүссэн нейтонуудын санамсаргүй алхалтуудыг тооцоолохын тулд тэдний мөрийн уртыг үнэлэх, мөргөлдөөний нягтыг үнэлэх болон аналог үнэлэгч гэсэн үндсэн гурван факторыг тооцож хамгийн их магадлалтай утгаар тооцдог. Голомтын тооцооллын хувьд реакторт үүссэн нэг нейтроны харилцан үйлчлэлийн тоог 50000, хуваагдлын нейтрон 100, үүнээс эхний 20-н нейтроны харилцан үйлчлэлийг тооцоогүй болно.



Зураг 1.54. Голомтын хэвтээ зүсмэг. а) төвдөө ойлгогчийн нэг блокторой. б) төвдөө ойлгогчийн 7 блокторой. в) төвдөө ойлгогчийн 19 блокторой

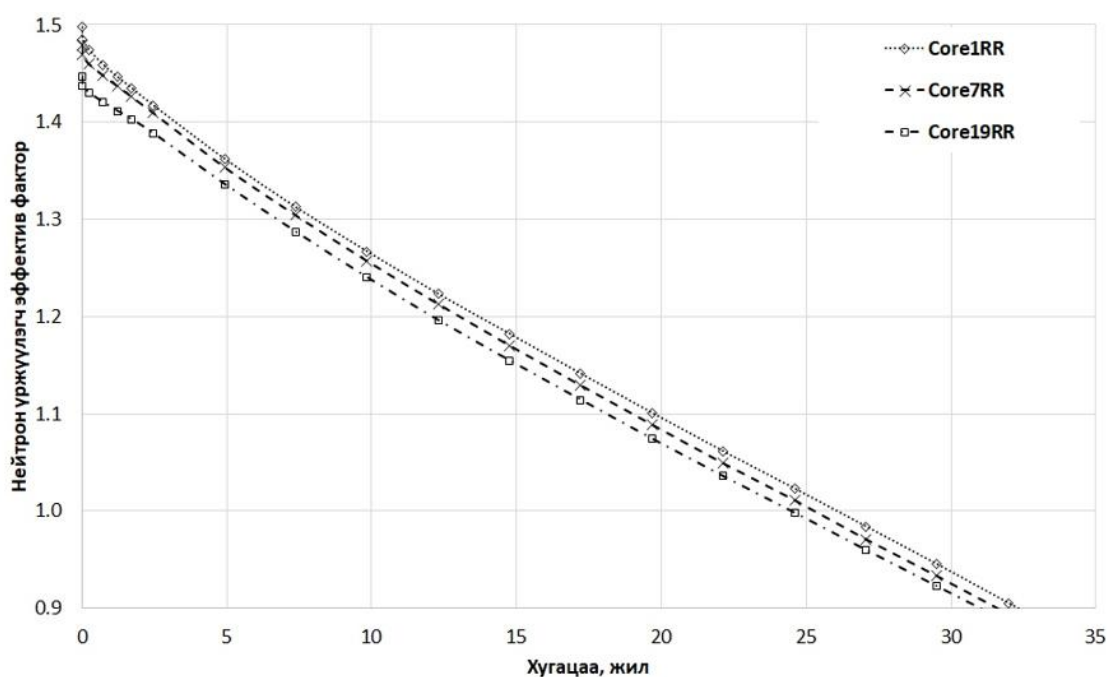
1.4.2 Төвийн ойлгогчийн зузааны нөлөө

Реакторын голомтын төвд ойлгогч байрлуулснаар голомтод нөлөөлөх нөлөөллийг авч үзэхийн тулд энэ ажлаар төвдөө долоо болон арван есөн ойлгогчийн блоктой голомтын дизайныг хийж, нэг ойлгогчин блоктой дизайны хамт цөмийн урвалын өгөгдлийн сан болох JENDL-4.0-ийг ашиглан нейтроник анализыг гүйцэтгэв. Төвдөө гурван өөр зузаантай ойлгогчтой голомтын критик байдал болон түлшний шаталтын үр дүнг харьцуулан Хүснэгт 1.14 болон Зураг 1.55-д харуулав.

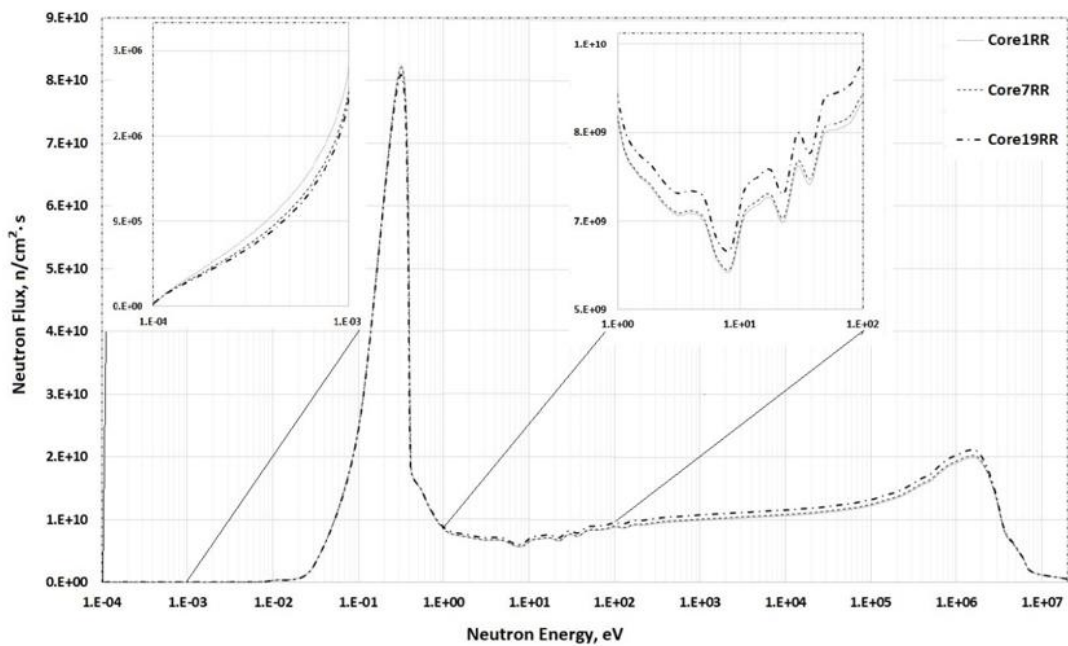
Хүснэгт 1.14. Нэгэн жигд голомтуудын нейтроник анализын үр дүн

N	Төвийн ойлгогчийн радиус, м	$k_{эфф,0}$ (алдаа %)	ХИУ $\Delta k/k$ (%)	$t_{голомт}$ (жил)	$V_{түлш,t}$ (ГВт*өдөр/тн)
1	0.18	1.4977 (0.0183)	33.23	26.4	106.0
7	0.5	1.4789 (0.0182)	32.38	25.3	103.0
19	0.82	1.4467 (0.0215)	30.88	24.7	99.2

Тайлбар:
N Нэг давхаргад байх төвийн сольдог ойлгогчин блокын тоо



Зураг 1.55. Нейтрон үржүүлэх эффектив фактор нь реакторын ажиллах хугацаанаас өөрчлөгдөх нь

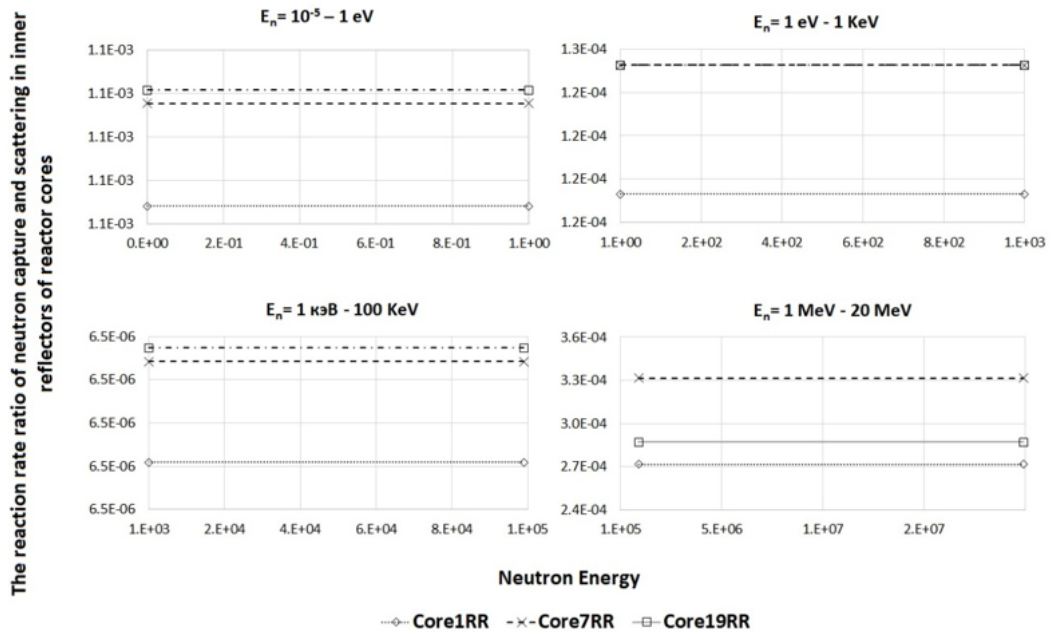


Зураг 1.56 Реактор ажиллаж эхлэх үед төвдөө ялгаатай ойлгогчин блоктой голомтуудын нейтроны спектр

Үр дүнгээс харахад төвийн ойлгогчийн зузаан 0.18 м-ээс 0.5 м ба 0.82 м болж ихсэхэд реактор ажиллаж эхлэх үеийн нейтроныг үржүүлэх эффертив фактор, реактивитийн хамгийн их утга болон болон нэг циклийн төгсгөлд дэх түлшний шаталтын хэмжээ буурсан байна. Төвийн ойлгогчийн зузаан ихсэхэд нейтроник үзүүлэлтүүд буурч байгаагийн шалтгааныг тайлбарлахын тулд эдгээр голомт даяарх нейтроны спектр, төвийн ойлгогчийн муж дахь урвалын хурдуудыг реактор ажиллаж эхлэх үед, харин голомт даяарх урвалын хурдуудыг голомт ажиллаж эхлэх болон дуусах үед авч үзэв.

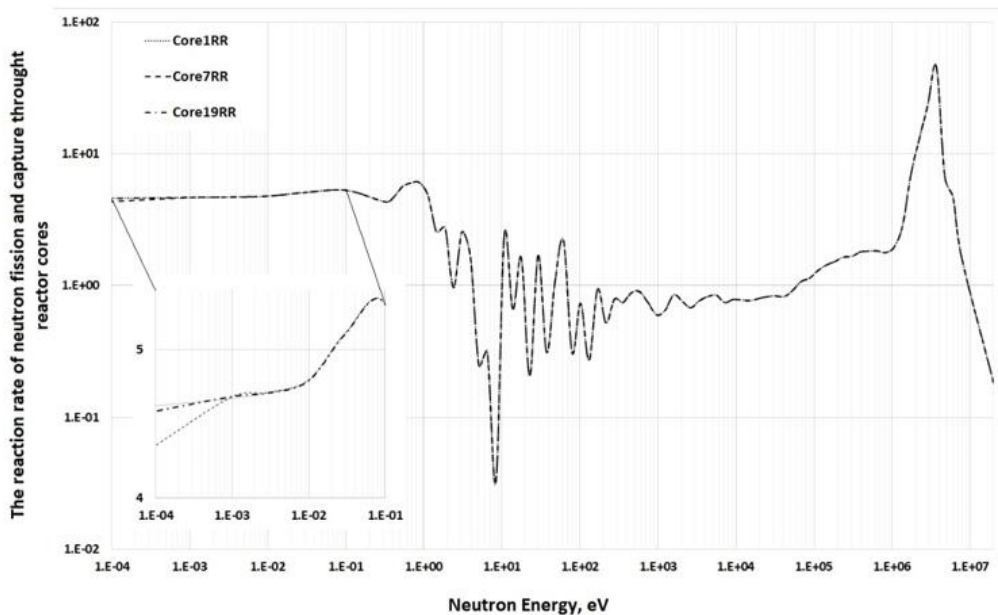
Ялгаатай зузаантай төвийн ойлгогч бүхий голомт дэх нейтроны спектрийг Зураг 1.56-д харуулсан ба реактор ажиллаж эхлэх үед төвдөө нэг ойлгогчтой голомтод илүү олон дулааны нейтронууд (10^{-5} - эВ – 0.1 эВ), төвдөө долоо болон арван есөн ойлгогчтой голомтод харьцангуй олон хурдан нейтронууд (0.1 эВ – 20 МэВ) байна. Ерөнхийдөө 20 °C температурт буй графитад дулааны нейтроны нүүлтийн урт нь ойролцоогоор 62 см байдаг. Дулааны нейтроны диффузын коэффициент нь температураас үл хамаардаг, харин шингээлтийн огтлол нь температураас шугаман хамаардаг байна. Иймд 850°C температурт ажиллаж байгаа манай реакторын голомтын тохиолдолд дулааны нейтроны нүүлтийн урт нь дээрх утгаас ихгүй гэсэн үг. Тэгэхээр төвийн ойлгогчийн зузаан уг материал дэх нүүлтийн уртаас их бол голомтоос энэ мужруу орсон нейтронууд буцаж голомтруу сарниж орох магадлал нь буурна. Зураг 1.57-д харуулснаар реактор ажиллаж эхлэх үед төвийн графитан ойлгогч блокод нейтроны залгигдах болон сарних урвалын хурдны харьцаа нь ойлгогчийн зузаанаас хамааран 10^{-5} эВ – 100 КэВ энергийн мужид ойлгогчийн зузаанаас

хамааран ихэсч байсан боловч 1 МэВ – 20 МэВ энергийн мужид төвийн долоон ойлгогчтой дизайны хувьд хамгийн их байв.



Зураг 1.57 Реактор ажиллаж эхлэх үед ялгаатай ойлгогчин блокуудын нейтрон залгих болон сарних урвалын хурдны харьцаа

Реактор ажиллаж эхлэх үед голомт даяар нейтрон хуваагдах болон залгих урвалын хурдны харьцааг нейтроны энергээс хамааруулан Зураг 1.58-д харуулав.



Зураг 1.58. Реактор ажиллах эхлэх үед голомт даяарх хуваагдах болон залгих урвалын хурдны харьцаа

Зураг 1.57-с харахад голомт даяарх хуваагдах болон залгих урвалын хурд нь (10^{-5} - эВ – 0.1 эВ) энергийн мужид нэг ойлгогчийн блоктой дизайнд хамгийн их байна. Үүний шалтгаан нь Зураг 1.58-д харуулснаар төвийн нэг ойлгогчийн блоктой голомтод бага энергитэй нейтронууд ойлгогчид харьцангуй бага шингээгдэж голомтруу буцаж ойсноор харьцангуй их хуваагдал явагдсан байна. Үүнээс гадна ижил тооны түлшний блоктой байхын тулд голомтын конфигураци өөр өөр болсон тул төвийн ойлгогч блоктой харилцах түлшний блокын гадаргын талбайн харьцаа нь байгааг Хүснэгт 1.15-д харуулав. Хүснэгт 1.15-д харуулснаар нэг ойлгогчийн блоктой голомтын энэ харьцаа нь хамгийн их утгатай байгаа нь түүний нейтроник үзүүлэлт бусад голомттой харьцуулахад өндөр байхад нөлөөлж байна.

Хүснэгт 1.15. Түлшний блок болон төвийн ойлгогч блокны гадаргуугийн талбайн харьцаа

Реакторын голомт	$S_{\text{fuel}}/S_{\text{inner reflector}}$
Core1RR	1
Core7RR	0.67
Core19RR	0.80

Реактор ажиллаж дуусах үеийн хуваагдах болон залгих урвалын хурдны харьцааг Зураг 6-оос харвал төвийн ойлгогчийн зузаан нэмэгдэхэд 10^{-5} – 0.1 эВ энергийн мужид төвдөө нэг ойлгогчин блоктой голомтын дизайнд хуваагдах ихээр явагдснаар түлшийг илүү үр дүнтэй шатааж реакторын ажиллах хугацаа болон түлшний шаталтын хэмжээг ихэсгэж байна. Харин 0.1 эВ – 20 МэВ энергийн мужид төвдөө долоо болон арван есөн ойлгогчтой голомтод харьцангуй олон хурдан нейтронууд байна.

Илүүдэл реактивитийг бууруулах

Өмнөх хэсэгт харуулсан тооцооллын үр дүнгээс харахад реактор ажиллаж эхлэх үеийн илүүдэл реактивити ($\beta k/k$) маш өндөр байна. Үүнийг бууруулах олон арга байдгаас бидний өмнөх ажил болох төвдөө ойлгогчгүй голомтын дизайны тохиолдолд түлшний блокт ШХМ-ын бөөмсийг нэмж өгөх нь үр дүнтэй байдаг. Графит матарцад шигтгэж буй түлшний болон ШХМ-ийн бөөмсийг ялгаж тооцоолоход MVP2.0 кодоод статистик геометрийн загварыг (STGM) хэрэглэсэн байдаг. Энэ загварт өөр өөр материал бүхий олон бөөмсийг голомтод оруулсан тохиолдолд тэдгээрийн радиус адил байх ёстой гэж хязгаарладаг. Хэрэв аль нэг бөөмийн радиус нөгөөгөөсөө бага бол түүнд гадуур нь нэмэлт давхарга нэмж өгнө. Манай голомт дэх бөөмсийн хувьд түлшний матарцад нэмж буй ШХМ-ийн бөөмийн радиус TRISO түлшний радиусаас бага байсан тул гаднах матарцтай ижил материалан давхарга нэмэх замаар ижил хэмжээстэй болгож болно. Энд нэг төрлийн бөөмс ашиглаж болох ч хоёр өөр төрлийн материалын бөөмсийг ашиглах нь реактор ажиллах хугацааны турш илүүдэл реактивитийн өөрчлөлтийг жигдлэхэд илүү үр нөлөөтэй байсан.

Иймд төвдөө ялгаатай ойлгогчтой гурван реакторын илүүдэл реактивитийг бууруулж, ажиллагааны турш реактивитийн өөрчлөлт болон чадлын түгэлтийг жигдлэхийн тулд В₄С болон Gd₂O₃ бөөмсийг түлшний блокын графит матарцанд нэгэн жигд нэмж, эдгээрийн тохиромжтой агууламж болон радиусыг олох тооцооллуудыг гүйцэтгэв. Эдгээр тооцоололд ашигласан бөөмсийн параметрууд болон голомтын нейтроник анализын үр дүнг Хүснэгт 1.16 болон Зураг 1.59-д харуулав.

Хүснэгт 1.16 ШХМ-тай нэгэн жигд голомтуудын нейтроник анализын үр дүн

N	ШХМ-ууд: ШХМ ₁ ШХМ ₂	d _{ШХМ} (см)	V _{түлш} / V _{ШХМ}	Голомт дэх бөөмсийн эзлэх нийт хувь, % (үүнээс түлш ШХМ ₁ ШХМ ₂ -ийн эзлэх хувь)	K _{эфф,0} (алдаа, %)	ХИУ Δk/k (%)	t _{голомт} (жил)	B _{түлш,t} (ГВт*өдөр/тн)
1	байхгүй	-	-	0.3000 (100 0 0)	1.4977 (0.0183)	33.72	26.4	106.0
	В ₄ С	0.02	140	0.3733	1.0337	3.82	20.0	80.8
	Gd ₂ O ₃	0.02	490	(80.37 15.27 4.36)	(0.0312)			
	В ₄ С	0.02	130	0.3813	1.0053	2.49	18.4	74.8
Gd ₂ O ₃	0.02	400	(78.67 16.10 5.23)	(0.0333)				
7	байхгүй	-	-	0.3000 (100 0 0)	1.4789 (0.0182)	32.38	25.3	103.0
	В ₄ С	0.02	140	0.3733	1.0238	3.55	17.2	70.1
	Gd ₂ O ₃	0.02	490	(80.37 15.27 4.36)	(0.0302)			
	В ₄ С	0.02	130	0.3762	1.0047	2.14	15.7	64.0
Gd ₂ O ₃	0.02	540	(79.75 16.32 3.93)	(0.07)				
19	байхгүй	-	-	0.3000 (100 0 0)	1.4470 (0.0151)	30.89	24.5	99.5
	В ₄ С	0.02	140	0.3733	1.0010	0.10	0.02	1.0
	Gd ₂ O ₃	0.02	490	(80.37 15.27 4.36)	(0.0312)			
	В ₄ С	0.02	145	0.3745	1.0051	2.66	16.1	64.4
Gd ₂ O ₃	0.02	410	(80.11 14.69 5.20)	(0.0233)				

Тайлбар:

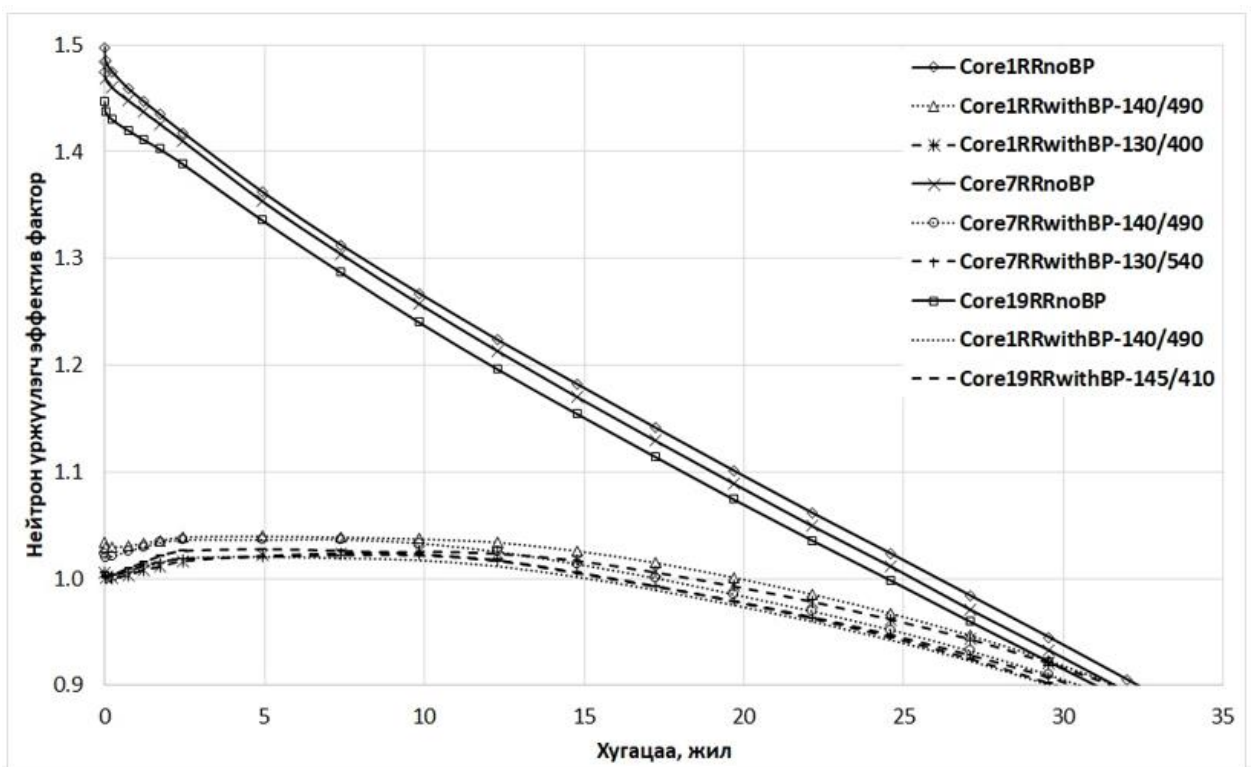
d_{ШХМ}- ШХМ бөөмсийн диаметр

V_{түлш}/V_{ШХМ}- голомт дэх түлш болон ШХМ-ийн эзлэхүүний харьцаа

ШХМ-ийн бөөмсийн диаметр болон тэдний нийт эзлэхүүнийг түлшний нийт эзлэхүүнд харьцуулсан харьцаа гэсэн хоёр параметрийг өөрчлөх замаар тохиромжтой агууламжийг олдог. Төвдөө ойлгогчгүй реакторын тохиолдолд ШХМ-ийн бөөмсийн хамгийн тохиромжтой параметрууд болох В₄С-ийн диаметр 0.02 см, эзлэхүүний харьцаа

140 ба Gd_2O_3 -ийн диаметр 0.02 см, эзлэхүүний харьцаа 490-ийг төвдөө ойлгогчтой реакторуудын анхны параметр болгож үзэхэд ийм агууламжтай ШХМ-ийн бүхий голомтуудын илүүдэл реактивити хангалттай буураагүй. Энэ нь тухайн реакторын дизайн өөр өөр дизайны параметртэй голомтод ШХМ-ийн тохиромжтой агуулга өөр өөр байдгийг харуулна. Иймд эдгээр параметрийг өөрчлөх замаар тухайн гурван реакторт тохирох утгуудыг олохын тулд дахин олон тооцоолол гүйцэтгэн Хүснэгт 4-д хамгийн оновчтойг нь өгөв. Хүснэгт 1.16-ийн тавдугаар баганад голомт дэх нийт бөөмсийн эзлэх хувь болон үүнээс тухайн бөөмсийн эзлэх хувийг харуулсан. Энд өмнөх хэсэгт дурьдсанчлан, бүх дизайнд түлшний бөөмс нь нийт голомтын 30%-ийг эзэлж байгаа болно.

Хүснэгт 1.16 болон Зураг 1.59-д харуулснаар төвдөө ойлгогчийн нэг блоктой голомтод ШХМ-ийн бөөмсийг нэмж өгөхөд реактор ажиллаж эхлэх үеийн илүүдэл реактивити 33.23%-аас 2.48% болтол, төвдөө долоон ойлгогчийн блоктой голомтод 32.38%-аас 2.14%, 19 ойлгогч блоктой голомтын дизайнд 30.89%-өөс 2.66% болтол бууруулж чадсан.



Зураг 1.59 ШХМ-гүй болон ШХМ-тай голомтын нейтрон үржүүлэгч эффектив фактор нь реактор ажиллах хугацаанаас өөрчлөгдөх нь

Энэ нь түлш болон ШХМ-ийн нэгэн төрөл агууламжтай голомтын дизайн хийх нь тийм ч оновчтой биш гэдгийг харуулж байна. Иймд бид цаашдын судалгаандаа голомтын реактивитийн өөрчлөлтийг жигдлэх, улмаар голомт дэх чадлын түгэлтийг нэгэн жигд болгох зорилгоор голомт дэх эдгээр бөөмсийн агууламжийг өөрчлөн оновчтой утгыг олох

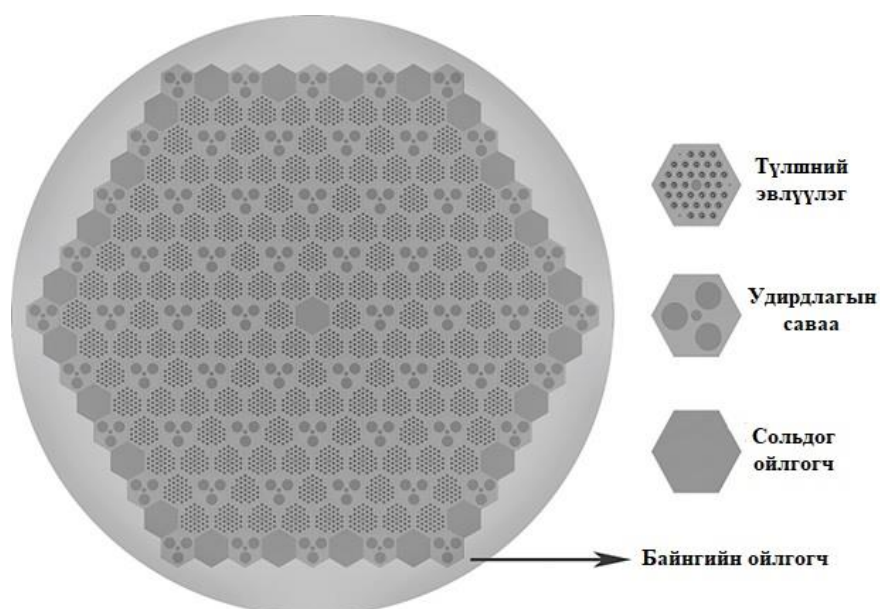
тооцооллуудыг гүйцэтгэх болно. Голомтод ШХМ нэмэгдснээр голомт дэх түлшний нэг циклийн үргэлжлэх хугацаа болон түлшний шаталтын хэмжээ буурч байгаагийн учир нь голомтод үүссэн нейтроны зарим хэсэг нь эдгээр хорлолт материалд шингэж байгаагаас шалтгаална.

1.4.3 Жигд бус голомттой, төвдөө ойлгогчин блоктой ӨТХР-ын нейтроник анализ

Бидний судалж байгаа ӨТХР нь өндөр температурыг (1873 К) даах чадвартай керамик давхаргууд бүхий TRISO түлш, дулаан багтаамж өндөртэй бал чулуун голомт, гели инертийн хийн хөргүүртэй учраас хэвийн бус ажиллагааны үед голомт болон хөргүүрийн температур хурдан ихсэхгүй, осолд хүргэх магадлал бага байдаг. Ялангуяа бал чулуу нь нейтрон шингээлт бага, цацрагийн нөлөөллөөс болж материалын өөрчлөлт нь бага буюу тогтмол, дулаан дамжуулах чадвар сайн, дулаан багтаамж өндөртэй зэрэг онцлогуудтай. Үүнээс гадна бал чулуу нь нейтроны эдийн засгийг сайжруулснаар ажиллах хугацааг уртасгадаг.

ӨТХР-ийн дизайны параметруудийн хамаарлыг гарган авч 100 МВт-ийн дулааны чадалтай, 2.49 м голомтын эквивалент радиустай, 6.38 м эффектив өндөртэй, төвийн ойлгогчийн радиус 0.18 м, голомтын дундаж чадлын нягт 0.82 Вт/см^3 байх, 20% баяжуулсан UO_2 бүхий TRISO түлш ашигласан голомтын дизайныг хийж, критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэсэн. Үүний дараа реактор ажиллаж эхлэх үеийн илүүдэл реактивитийг бууруулахын тулд шатдаг хорлолт материал бүхий бөөмсийг голомтонд жигд агууламжтайгаар нэмж өгөх замаар реактивитийн хугацааны өөрчлөлтийг жигдрүүлэх оролдлогын тооцооллуудыг хийсэн. Голомтыг илүү оновчтой болгож ажиллах хугацааны турш илүүдэл реактивити болон чадлын пикийн факторын түгэлтийг жигд болгохын тулд голомт дахь түлш болон шатдаг хорлолт материалын агууламжийг өөрчлөх замаар тооцоолол хийв. Реактор ажиллах хугацааны турш реактивити бага зэрэг их байсныг бууруулахын тулд голомтонд удирдлагын саваа оруулан реактивитийн өөрчлөлтийг багасган, жигдрүүлсэн болно. Үүний дараа реактивитийн температурын болон чадлын коэффициентийг үнэлэв.

ӨТХР-ын голомтын дизайндаа Японы Атомын Энергийн Агентлагын хөгжүүлсэн 30 МВт дулааны чадалтай Өндөр Температурын Тест Реакторын (ӨТТР) голомтыг бүрдүүлэгч түлшний эвлүүлгийн, удирдлагын савааны болон ойлгогчийн блокуудыг (өргөн = 36 см, өндөр = 58 см) ашигласан ба эдгээр зургаан өнцөгт призмэн блокуудыг давхарлан өрж цагираг хэлбэрийн голомтыг үүсгэнэ.



Зураг 1.60. Голомтын хэвтээ зүсмэг

Тооцоололд эдгээр блокын хэмжээсийг өөрчлөөгүй тул эдгээрээс бүрдсэн голомтын хэмжээс дизайны параметруудийн хамаарлаас үнэлсэн утгуудаас бага зэрэг ялгаатай байж болно. Гэхдээ голомтын жинхэнэ эзлэхүүнтэй адил эзлэхүүнтэй байхаар эквивалент радиус болон эффектив өндрийн хэмжээсийг авсан. Голомтын үндсэн үзүүлэлтүүдийг Хүснэгт 1.17-д, голомтын хөндлөн зүсмэгийг Зураг 1.60-д тус тус харуулав.

Хүснэгт 1.17. Голомтын үндсэн үзүүлэлтүүд

Дулааны чадал, МВт	100
Голомтын температур, К	1123
Төвийн ойлгогчийн радиус/зузаан, м Дулаан дамжууллын тооцооллоос олсон	0.18/0.36
Голомтын радиус/өндөр, м	2.5/6.24
Голомтын эквивалент радиус/өндөр, м	2.47/6.38
Дундаж чадлын нягт (Вт/см ³)	0.82
Түлш	UO ₂
Баяжуулалт (wt%)	20%
Хөргүүрийн материал	Гелийн хий
Ойлгогчийн зузаан: м	
Дээд, доод	0.58
Гадна захын	0.87
Түлшний эвлүүлгийн тоо	1452
Давхаргын тоо	11
Нэг давхаргад байх удирдлагын савааны тоо:	
Голомт	36
Ойлгогч	24
Нэг давхаргад байх төвийн/гаднах сольдог ойлгогчин блокын тоо	1/24

Түлш шатдаг хорлолт материал жигд бус түгэлттэй үеийн тооцоолол

Бидний ашиглаж байгаа MVP2.0 код нь санамсаргүй процессийг тооцдог Монте Карло аргад үндэслэн бөөмсийн харилцан үйлчлэлийн процессуудын санамсаргүй үзэгдлийг үнэлдэг тул бодлого тус бүрт хамгийн оновчтой болгох нөхцлийг тогтоох шаардлагатай байдаг. Манай голомтын тооцооллын хувьд реакторт үүссэн нэг нейтрон 50000 ялгаатай

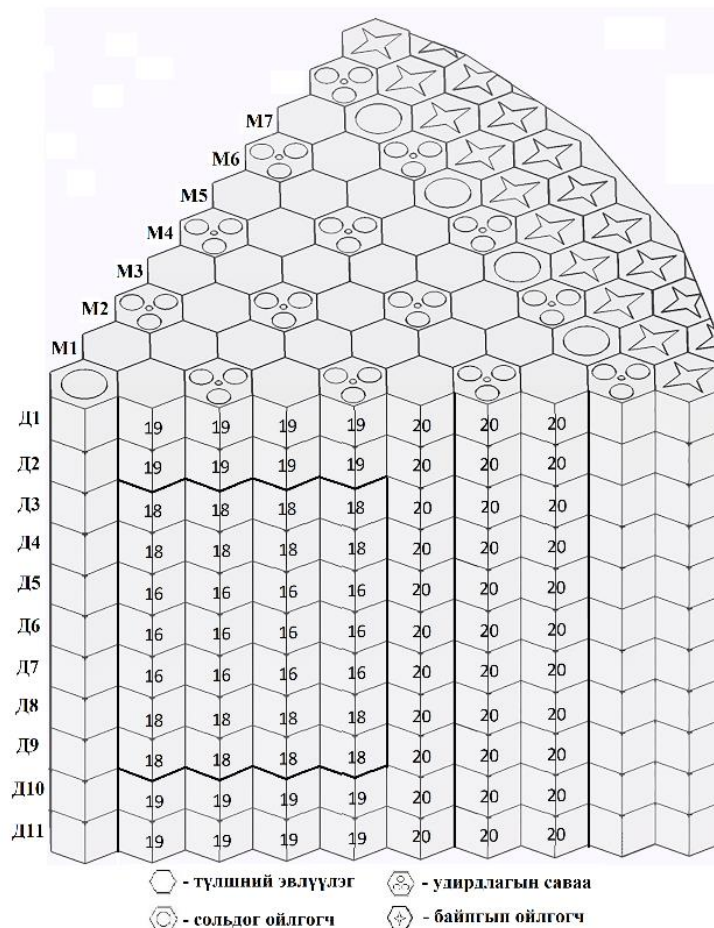
харилцан үйлчлэл хийнэ, нийтдээ хуваагдлын 100 нейтроны санамсаргүй харилцан үйлчлэлийг авч үзэхээр нөхцлийг сонгосон. Статистик боловсруулалтын үр дүнг сайжруулахын тулд эхний 20 нейтроны харилцан үйлчлэлийг тооцоогүй болно. Нейтроник тооцоолол бүрийг бүтэн голомтод гүйцэтгэсэн. Реакторыг ажиллаж байх нийт хугацааны туршид критик төлөвт байх шаардлагатай. Ингэснээр реакторыг аюулгүй ажиллуулах үндсэн нөхцлийг хангаж байна гэж үздэг. Өмнөх ажилд гарган авсан дүнгээс харвал голомт даяар түлш, шатдаг хорлолт материалын агууламж жигд тохиолдолд реактор ажиллаж эхлэх үеийн эффектив нейтрон үржүүлэх фактор ($k_{эфф}$) буурсан хэдий ч, реактор ажиллах нийт хугацааны мужид илүүдэл реактивити үүсч, голомт дахь чадлын пикийн факторын түгэлт нь жигд бус хэвээр байсан.

Тиймээс голомт даяарх түлш, шатдаг хорлолт материалын агууламжийг өөрчлөн реактор ажиллах нийт хугацааны турш голомт даяарх илүүдэл реактивити, чадлын пикийн факторын түгэлтийг жигд болгох шаардлагатай. Чадлын пикийн фактор нь голомтын тухайн хэсгийн үйлдвэрлэх локал чадлын нягтыг дундаж чадлын нягтыг харьцуулсан харьцаагаар тодорхойлогдох ба голомтын хаана байрлаж байгаагаас шалтгаалан түлшний баяжуулалт болон нейтрон шингээгч огтлол өндөртэй материалын агууламжийг өөрчлөх замаар реактор ажиллах хугацааны турш реактивити болон чадлын пикийн факторын түгэлтийг жигдрүүлэх боломжтой.

Хүснэгт 1.18. Голомт даяарх түлшний баяжуулалтын тархалтын хамгийн оновчтой нөхцөл. Д-давхарга, М-муж

Түлшний баяжуулалт (%)							
	М1	М2	М3	М4	М5	М6	М7
Д1	19	19	19	19	20	20	20
Д2	19	19	19	19	20	20	20
Д3	18	18	18	18	20	20	20
Д4	18	18	18	18	20	20	20
Д5	16	16	16	16	20	20	20
Д6	16	16	16	16	20	20	20
Д7	16	16	16	16	20	20	20
Д8	18	18	18	18	20	20	20
Д9	18	18	18	18	20	20	20
Д10	19	19	19	19	20	20	20
Д11	19	19	19	19	20	20	20

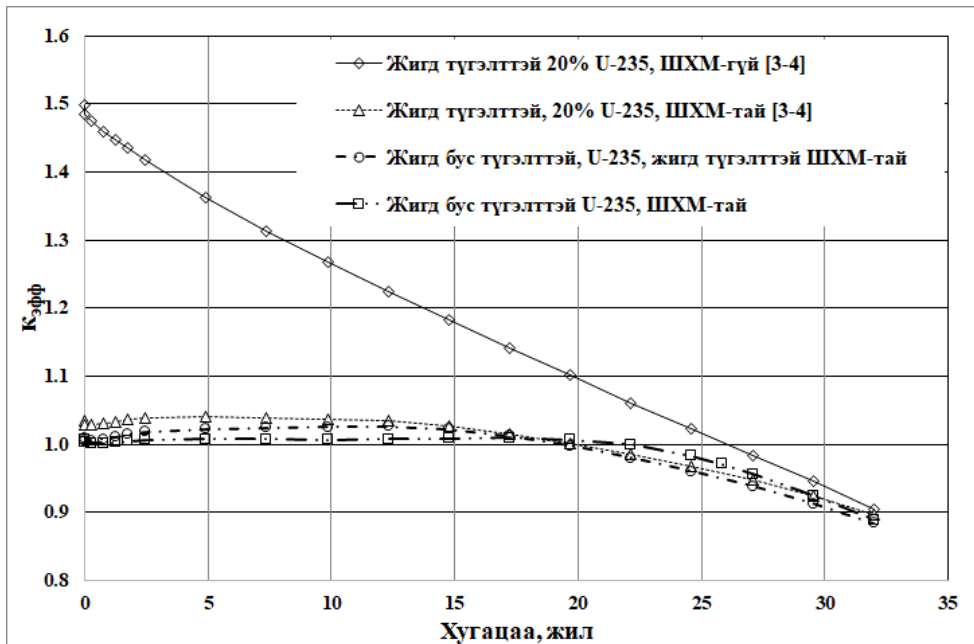
Голомтыг хэвтээ тэнхлэгийн дагуу долоон муж, босоо тэнхлэгийн дагуу арван нэгэн давхарга буюу нийт 77 хэсэгт хуваан тооцооллуудыг гүйцэтгэсэн. Голомт дахь хэсэг тус бүрийн түлшний баяжуулалтын хамгийн оновчтой нөхцлийг Хүснэгт 1.18-д, голомтын зургааны нэг хэсгийн гурван хэмжээст зургийг Зураг 1.60-д харуулав.



Зураг 1.61 1/6 голомтын гурван хэмжээст зураг: Д-давхарга, М-муж

Түлш, шатдаг хорлолт материал голомтод жигд агууламжтай үед голомтын төв хэсэгт чадлын пикийн фактор хамгийн их байгааг бид өмнөх ажилд харуулсан. Учир нь голомтын төвд ойлгогч байрлуулснаар түүн рүү сарнисан нейтронууд голомтруу буцаж ойн хуваагдал нэмж явуулж байгаа тул тухайн хэсгийн дулааны энергитэй нейтроны тоо огцом ихсэж байна. Тиймээс төвийн ойлгогчийн ойролцоо байрлах түлшний баяжуулалтыг бууруулж, шатдаг хорлолт материалын агууламжийг өөрчилснөөр реактор ажиллах хугацааны турш реактивитийн өөрчлөлтийг тогтвортой байлгаж, чадлын пикийн факторын түгэлтийг жигдрүүлсэн. Реакторын голомтыг илүү оновчтой болгох үндсэн зорилго нь реакторыг ажиллах хугацааны туршид критик төлөвт байлгах, чадлын пикийн факторын түгэлтийг жигд байлгах учиртай. Реактор критик төлөвт ажилласнаар агшин зуурын критик ослоос зайлсхийж чадна. Голомт дахь түлш, шатдаг хорлолт материалын жигд бус түгэлттэй үеийн тооцооны үр дүнгээс харвал реактор ажиллаж байгаа хугацааны нийт муж дахь илүүдэл реактивити жигдэрч ХИУ нь $33.23(\Delta k/k\%)$ -аас $0.94(\Delta k/k\%)$ хүртэл буурч голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлт нэгэн жигд болсон. Реактор ажиллах хугацааны туршид $k_{эфф}$ утгын жигд бус түгэлттэй үеийн нейтроник тооцооллын үр дүнг Хүснэгт 1.19 болон

Зураг 1.62-д тус тус өгөв. Голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлтийг хугацаанаас хамааруулан Зураг 1.63-д үзүүлэв.



Зураг .1.62 Реактор ажиллах нийт хугацааны турш дахь эффектив нейтрон үржүүлэх факторын өөрчлөлт

Хүснэгт 1.19. Жигд бус түгэлттэй үеийн нейтроник тооцооллын үр дүн

№	Голомт ын хэсэг	Түлшний баяжуула лт (wt%)	В4С		Gd2O3		кэфф ф, (алда а, %)	Δк/ к- ийн ХИ У (%)	тголо мт (жил)	PPF - ийн ХИ У
			DШХ М (см)	VTүлш/ VШ ХМ	DШХ М (см)	VTүлш/ VШ ХМ				
1	Төвдөө Дундаа Захдаа	20	-	-	-	-	1.497 7 (0.02)	33.2 3	26.4	2.87
2	Төвдөө Дундаа Захдаа	20	0.02	140	0.02	490	1.033 7 (0.03)	3.83	19.9	2.94
3	Төвдөө Дундаа Захдаа	16-18 19-20 20	0.02	140	0.02	490	1.009 6 (0.02)	2.57	19.3	2.23
4	Төвдөө Дундаа Захдаа	16-18 19-20 20	0.02	99 138 171	0.02	400 490 800	1.006 7 (0.03)	0.94	22.0	1.85

Тайлбар:

ШХМ – Шатдаг хорлолт материал

DШХМ- ШХМ бөөмсийн диаметр

VTүлш/VШХМ- голомт дэх түлш болон ШХМ-ийн эзэлхүүний харьцаа

ХИУ-хамгийн их утга

PPF –чадлын пикийн фактор

Голомтруу удирдлагын саваа оруулах замаар илүүдэл реактивитийг бууруулах

Түлш болон шатдаг хорлолт материалын жигд бус түгэлттэй голомтын дизайныг гүйцэтгэсний дараа голомтын нийт ажиллах хугацаанд $k_{эфф}$ буурсан хэдий ч, бага хэмжээний илүүдэл реактиви ($>0.65 \% \Delta k/k$) хугацааны зарим мужид үүссэн хэвээр байна. Тиймээс илүүдэл реактивитийг дарахын тулд голомтод удирдлагын савааг оруулж болно. Удирдлагын савааны блок нь ӨТТР-ийн удирдлагын савааны дизайнтай адилхан. ӨТХР-ийн голомтын дизайны тооцоололд ашиглагдаж байгаа удирдлагын савааны блоконд байх гурван нүх нь нейтрон шингээгч материалаар дүүргэгдсэн байдаг.

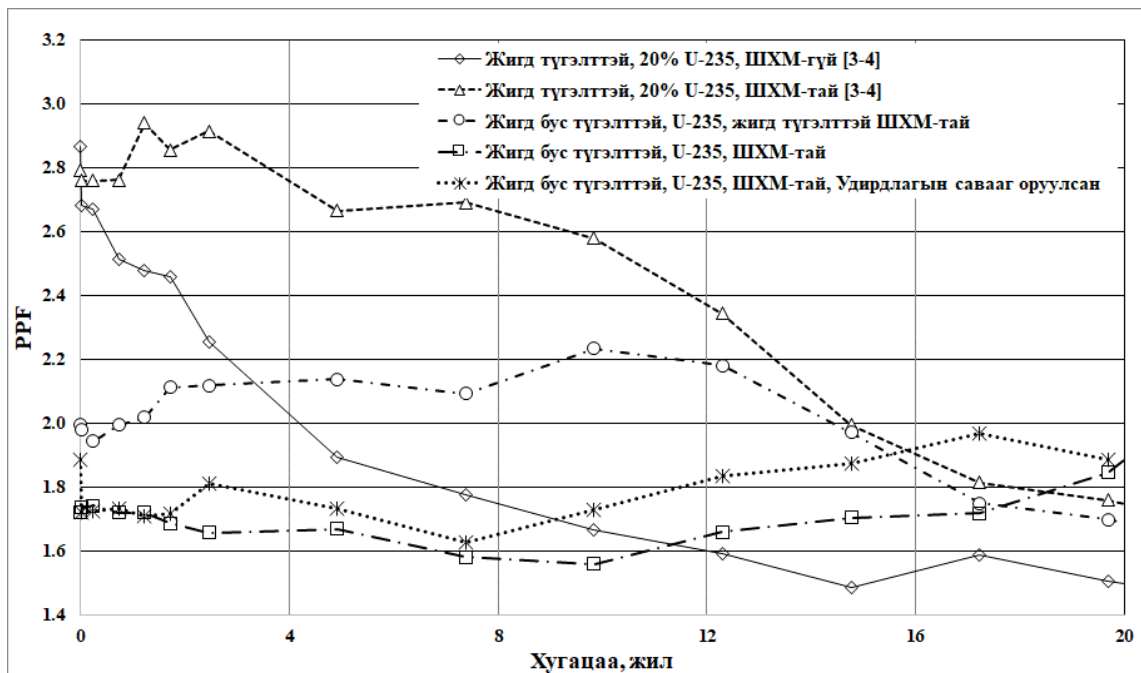
Эхлээд реакторын ажиллах хугацаанд голомт руу удирдлагын савааг ижил хэмжээтэй оруулсан. Дараа нь түлшний шаталтын алхам дахь эффектив нейтрон үржүүлэх факторын утгаас хамаарч голомтод оруулах хэмжээг өөрчлөн тооцоолуудыг явуулж хамгийн оновчтой нөхцлийг олов. Гарган авсан үр дүнг хүснэгт 1.20-д өгөв.

Голомтод удирдлагын савааг оруулахад тухайн хэсгийн нейтроны урсгал бага зэрэг өөрчлөгдөж түүнээс хамаарч тухайн хэсэг дэх чадлын пикийн фактор өөрчлөгддөг. Тиймээс удирдлагын савааг голомтод оруулах үед голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлтийг давхар хянаж байх шаардлагатай. Манай тохиолдолд голомтод удирдлагын савааг оруулсан хэдий ч савааны голомтод орсон хэмжээ бага учраас түүнээс хамаарч чадлын пикийн фактор өөрчлөгдөх хэмжээ маш бага байсан. Удирдлагын савааг голомтод оруулсны дараах голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлтийг Зураг 1.63-д харуулав.

Хүснэгт 1.20. Төвдөө ойлгогчтой реакторын илүүдэл реактивити удирдлагын савааг голомтруу оруулах үеийн хэмжээнээс хамаарч өөрчлөгдөх нь

№	1		2		3		4	
	t	d (см)	d (см)	$\Delta k/k(\%)$	d (см)	$\Delta k/k(\%)$	d (см)	$\Delta k/k(\%)$
0.00	0	0.67	1	0.45	2	0.48	1	0.45
0.02	0	0.28	1	0.11	2	-0.01	0	0.23
0.25	0	0.17	1	-0.07	2	-0.10	0	0.16
0.74	0	0.17	1	-0.06	2	-0.07	0	0.16
1.23	0	0.29	1	0.11	2	0.05	0	0.27
1.72	0	0.43	1	0.24	2	0.24	0	0.36
2.46	0	0.68	1	0.47	2	0.50	1	0.44
4.92	0	0.77	1	0.61	2	0.51	1	0.59
7.38	0	0.70	1	0.48	2	0.49	1	0.49
9.84	0	0.70	1	0.48	2	0.39	1	0.45
12.30	0	0.78	1	0.60	2	0.52	1	0.63
14.76	0	0.88	1	0.72	2	0.62	4	0.61
17.22	0	0.94	1	0.70	2	0.65	3	0.59

Тайлбар: t- реакторын ажилласан хугацаа, d- удирдлагын саваануудыг голомт руу оруулсан гүн



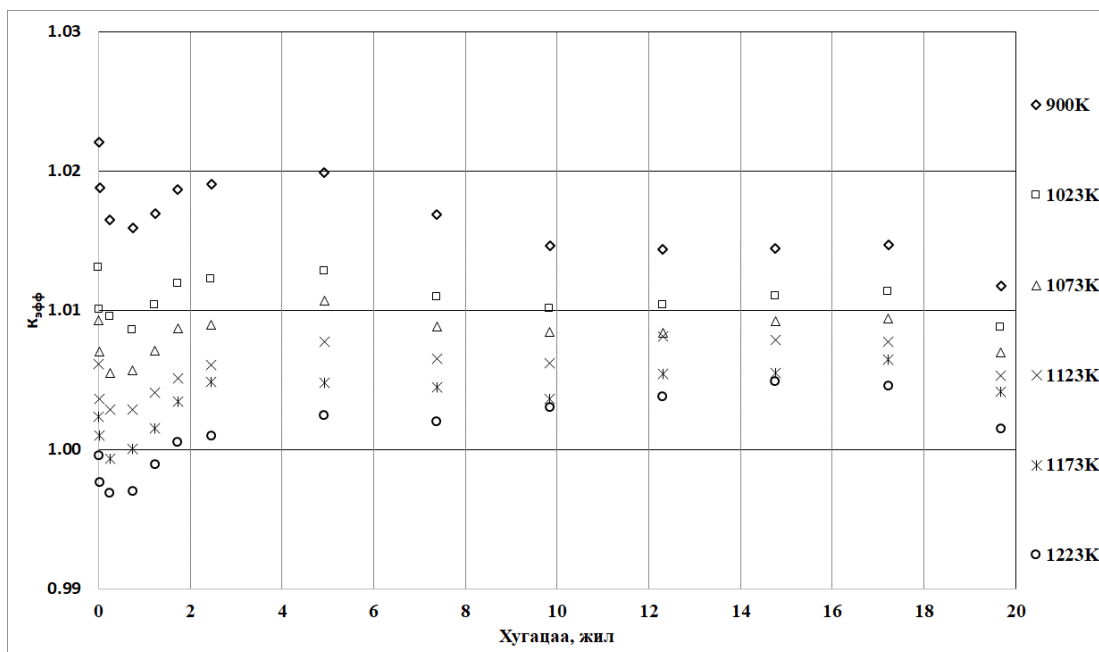
Зураг 1.63 Голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлт хугацаанаас хамаарч өөрчлөгдөх нь

1.4.4 Реактивитийн температурын болон чадлын коэффициент

Реактор ажиллаж байх үед реактивитид нөлөөлөх хүчин зүйлийн нэг нь голомтын температур юм. Голомтын температураас хамаарч реактивити хир зэрэг өөрчлөгдөхийг реактивийн температурын өөрчлөлт харуулдаг. Өөрчлөлтийн хэмжээ, үзүүлэх нөлөөлөл нь реакторын аюулгүй байдал болон хяналтанд чухал ач холбогдолтой байдаг. Реакторын голомтын чадал болон температур өөрчлөгдснөөр эффектив нейтрон үржүүлэх фактор дагаж өөрчлөгддөг. Голомтын температур ихэсч, чадал буурахад $k_{эфф}$ буурах ба үүнийг реактивитийн температурын сөрөг коэффициент гэж нэрлэдэг. Реактивитийн температурын коэффициент нь дараах томъёогоор илэрхийлэгддэг.

$$\alpha_T = \frac{d\rho}{dT}$$

Төвдөө ойлгогчтой 100 МВт чадалтай 1123К температурт ажиллаж байгаа ӨТХР-ийн реактивитийн температурын коэффициентыг үнэлэхийн тулд өмнө гүйцэтгсэн тооцооллын үндсэн нөхцлүүд хэвээр хадгалагдаж, зөвхөн голомтын температурыг 50 К-ээр өөрчилж тооцооллуудыг гүйцэтгэж реактивитийн температурын коэффициентийг олов. Реакторын ажиллах хугацааны турш эффектив нейтрон үржүүлэх фактор температураас хамаарсан хамаарлыг Зураг 1.64-д болон Хүснэгт 1.20-д харуулав.



Зураг 1.64. Эффе́ктив нейтрон үржүүлэх фактор температураас хамаарч өөрчлөгдөх нь

Үр дүнгээс харвал эффе́ктив нейтрон үржүүлэх факторын температурын хамаарал нь эхний 10 жилийн турш өндөр хэлбэлзэлтэй байгаа ба үүнээс хойш илүү тогтвортой болсон байна. Голомтын температураас хамаарч нейтроны энергийн спектр өөрчлөгддөг. Реактор ажиллах тусам голомт дэх U^{238} -аас үүсэх Pu^{239} болон Pu^{241} ихээр хуримтлагдаж дулааны энергитэй нейтроныг шингээх тул хугацааны сүүл үед $k_{эфф}$ үл ялиг буурч тогтвортой болж байна. Реактор ажиллах хугацааны турш реактивитийн коэффициентийн хамгийн их, хамгийн бага болон дундаж утгыг Хүснэгт 1,20-д бас харуулав.

Хүснэгт 1.20 Реактивитийн темпратурын коэффициент

$V_{түлш,t}$ ГВтӨ/тн	α_T (pcm/K)				
	900K	1023K	1073K	1173K	1223K
10	-1.27	-0.54	-0.24	0.09	0.37
40	-0.83	-0.34	-0.19	0.20	0.23
80	-0.64	-0.30	-0.14	0.09	0.28
ХИУ	-0.61	-0.19	-0.02	0.29	0.48
ХБУ	-1.56	-0.60	-0.30	0.09	0.22
ДУ	-1.06	-0.43	-0.19	0.18	0.34

Тайлбар:

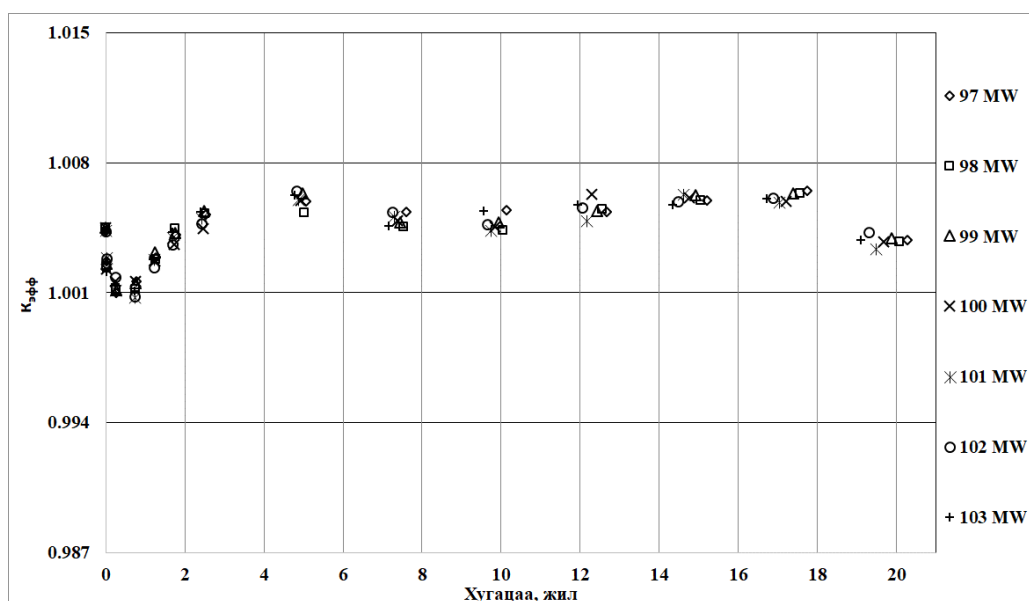
$V_{түлш,t}$	Түлшний шаталт
ХИУ	Хамгийн их утга
ХБУ	Хамгийн бага утга
ДУ	Дундаж утга

Үүнээс гадна реакторын аюулгүй байдлыг илэрхийлдэг өөр нэг коэффициент нь реактивитийн чадлын коэффициент юм. Энэ нь реакторын чадал нэгж хэмжээгээр

өөрчлөгдөхөд реактивити хир зэрэг өөрчлөгдөхийг харуулах ба дараах байдлаар илэрхийлдэг.

$$\alpha_p = \frac{d\rho}{dP}$$

ӨТХР-ийн чадлыг 97 МВт-аас 103 МВт-ийн хооронд өөрчлөн, үндсэн нөхцлийг хэвээр хадгалан тооцооллуудыг явуулж реактивитийн чадлын коэффициентыг тодорхойлсон. Реакторын чадлаас хамаарч эффертив нейтрон үржүүлэх факторын хугацаанаас хамаарсан хамаарлыг Зураг 1.65-д, реактивитийн чадлын коэффициентийг Хүснэгт 1.21-д өгөв. Үр дүнгээс харахад чадлын өөрчлөлт эффертив нейтрон үржүүлэх факторт нэгэн утгатай өөрчлөлт үзүүлэхгүй байна. Реакторын чадлыг ихэсгэснээр агшин зуур түлшний температур нэмэгдэж үүний үр дүнд хөргүүрийн температур ч дагаж ихэсдэг. Эдгээр температурын өөрчлөлтөөс нейтроны спектр, хөргүүрийн нягт, урвалын огтлол өөрчлөгдсөнөөр голомтын реактивити өөрчлөгддөг. Дээрх өөрчлөлтүүд нь реактивитид эерэг, сөрөг нөлөө үзүүлдэг.



Зураг 1.65. Реакторын чадлын өөр өөр утганд эффертив нейтрон үржүүлэх факторын хугацааны өөрчлөлт

Хүснэгт 1.21. Реактивитийн чадлын коэффициент

В _{түлш,т} ГВтӨ/гн	α _T (pcm/MВт)					
	97 MW	98 MW	99 MW	101 MW	102 MW	103 MW
10	-0.80	-0.84	-0.97	-0.55	-0.28	-0.88
40	-0.90	0.17	-0.25	0.21	-0.14	-0.83
80	-0.09	0.03	-0.16	0.43	-0.51	-0.08
ХИУ	0.98	0.84	0.91	1.45	0.77	0.56
ХБУ	-0.90	-0.89	-0.97	-0.59	-0.55	-0.88
ДУ	-0.15	0.04	-0.16	0.12	-0.05	-0.06

1.4.5 ӨТХР-ын голомт дахь шатан шингээгч материалын нөлөө

Цөмийн эрчим хүчний реакторын голомтод явагдаж байгаа цөмийн гинжин урвал нь тухайн реактор ажиллах хугацаанд тогтвортой байх ёстой. Энгийнээр тайлбарлавал, реакторын голомт дэх нейтроны тоог байнга хянаж, аюулгүй, тогтвортой ажиллуулах шаардлагатай. Үүний тулд нейтроныг шингээх хөндлөн огтлол өндөртэй материалыг агуулсан удирдлагын саваа болон шатан шингээгч материалыг ихэвчлэн ашигладаг.

Бидний өмнөх судалгааны ажлуудад 100 МВт дулааны чадалтай ӨТХР-ын голомтод ажиллаж эхлэх үед үүссэн их хэмжээний илүүдэл нейтроныг (реактивити) багасгахын тулд бөөрөнхий хэлбэртэй “шатан шингээгч материал” (ШШМ)-ыг ашигласан. Энд хоёр өөр материалын бөөмсийг зэрэг ашиглах нь илүү үр дүнтэй учраас B_4C болон Gd_2O_3 бүхий ШШМ бөөмсийг түлшний үүрийн графит матрицад нэгэн жигд агуулгатайгаар нэмж өгөх замаар хугацааны эхэн үеийн реактивитийг дарж, реакторын ажиллах хугацааны турш реактивити болон чадлын түгэлтийг амжилттайгаар жигдрүүлсэн. Энэ хэсэгт нэг төрлийн ШШМ (B_4C)-ыг сонгон авч геометр хэлбэрийг өөрчлөн цилиндр хэлбэртэй болгоход ӨТХР-ын голомтын нейтроник үзүүлэлтэд хэрхэн нөлөөлөхийг судалж, үр дүнг авч хэлэлцэх юм.

Энэхүү хэсгийн тооцооллын геомер нь өмнөх ажилд ашигласан B_4C бүхий бөөрөнхий ШШМ-ын бөөмсийн нийт эзлэхүүнийг түлшний нийт эзлэхүүнд харьцуулсан харьцаа ($V_{ШШМ}/V_{түлш}$)-ийг өөрчлөхгүйгээр (1) гадаргуугийн талбай эсвэл (2) эзлэхүүн нь адил байхаар цилиндр хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсийг түлшний матрицад нэмж оруулан нейтроник тооцооллыг гүйцэтгэв.

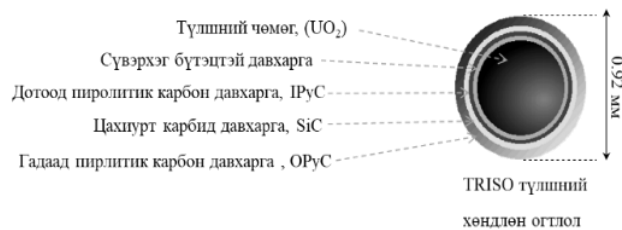
Графит матрицад шигтгэж буй TRISO түлшний болон ШШМ-ын бөөмсийг ялгаж тооцоолоход MVP/GMVP:II -ын статистик геометр загварыг ашигладаг ба энэ загвараар голомтод санамсаргүй түгсэн, өөр өөр материалын бөөмсийг нэгэн зэрэг тооцож болдог. Ялгаатай гурван өөр хэлбэр, хэмжээтэй ШШМ-ын бөөмс бүхий реактор бүрийн голомт дахь нийт түлшний эвлүүлгийн тоо, нэг түлшний эвлүүлэг дэх түлшний эзлэхүүн болон түлшний баяжуулалт, ШШМ-ын эзлэхүүний харьцаа зэрэг параметрууд адил. Харин уг голомтод ачаалсан ШШМ-ын бөөмсийн геометр хэлбэр, гадаргуун талбай болон эзлэхүүний хувьд ялгаатай байна. Голомтын дизайны үндсэн үзүүлэлт болон ШШМ-ын геометр хэмжээсийг Хүснэгт 122-д өгөв.

Хүснэгт 1.22 Голомтын дизайны болон ШШМ-ын үзүүлэлтүүд

Реакторын дулааны чадал, МВт	100
Түлшний эвлүүлгийн тоо	1452
Түлшний баяжуулалт, wt%	20%

Радиус, см	Өндөр, см	Нэг бөөмийн гадаргуун талбай, см ²	Нэг бөөмийн эзлэхүүн, см ³	Түлшний үүр дэх ШШМ-ын эзлэх хувь
Бөөрөнхий				
0.01	-	1.26E-03	4.19E-06	5.7
Цилиндр /бөөрөнхий бөөмтэй адил гадаргуун талбайтай/				
0.01	0.01	1.26E-03	3.14E-06	7.6
Цилиндр /бөөрөнхий бөөмтэй адил эзлэхүүнтэй/				
0.011	0.011	1.52E-03	4.19E-06	5.7

Төвдөө ойлгогчин блоктой, 100 МВт дулааны чадалтай, ӨТХР-ын голомтын дизайн нь нийт 11 давхаргаас бүрдэх ба давхарга тус бүр төвийн нэг ойлгогч, 132 түлшний эвлүүлэг, түүнийг тойрсон сольдог ойлгогчин блокоос бүрдэнэ. Нэг түлшний эвлүүлгийн блок нь 33 түлшний саваатай ба түлшний саваа бүр нь ²³⁵U-ыг 20wt% хүртэл баяжуулсан ураны исэл (UO₂) агуулсан TRISO түлшнээс гадна, 90%wt хүртэл баяжуулсан ¹⁰B изотоптой В₄С бүхий бөөрөнхий эсвэл цилиндр хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсийг агуулсан. Голомтын дизайны хөндлөн зүсмэгийг Зураг 1.60-д, түлшний эвлүүлэг, Зураг 1.67-д TRISO бөөм түлш болон ШШМ-ын бөөмийн хөндлөн зүсмэгийг Зураг 1.68-д үзүүлэв.



Зураг 1.67 TRISO түлшний хөндлөн зүсмэг



Зураг 1.68 Түлшний эвлүүлэг, ШШМ-ын өөр өөр дизайн

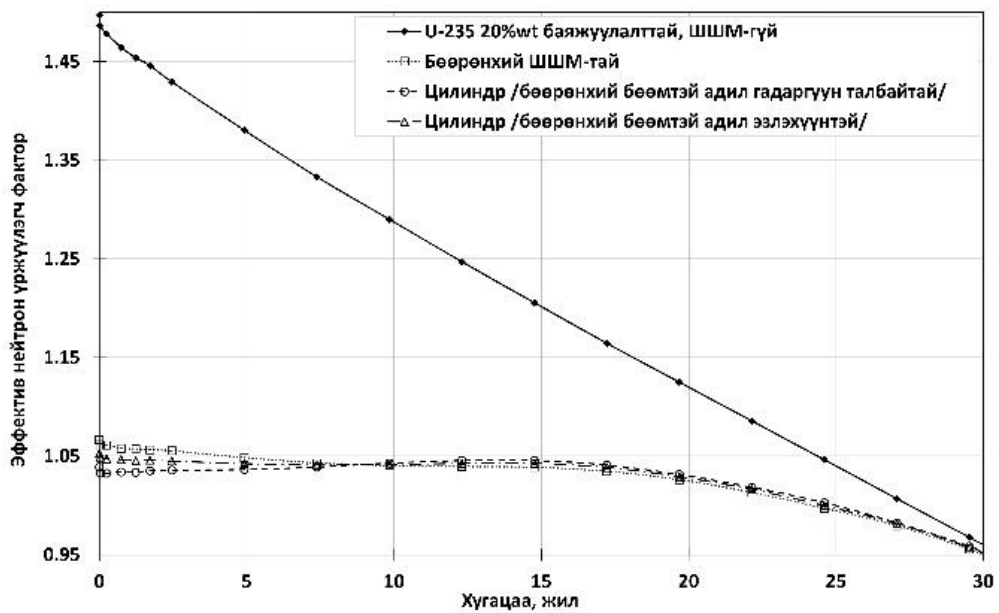
Тооцоололд тасралтгүй энергитэй нейтроны харилцан үйлчлэлийг Монте Карло аргаар тооцоолдог MVP/GMVP:2.0 болон MVPBURN кодоор голомтын нейтроник

тооцооллыг гүйцэтгэсэн. Тооцоололд JENDL-4.0 цөмийн өгөгдлийн санг ашиглав. Энэ кодоор реакторын голомт дахь эффектив нейтрон үржүүлэх фактор ($k_{эфф}$)-ыг тооцоолохдоо голомтод үүссэн нейтроннуудын харилцан үйлчлэлцэх процессийн санамсаргүй үзэгдлийг магадлалын аргаар үнэлж тооцоолсон. Нейтроник тооцооллыг реакторын голомтод үүссэн нэг нейтрон 20000 ялгаатай харилцан үйлчлэл хийнэ гэж үзээд нийтдээ хуваагдлын 100 нейтроны санамсаргүй харилцан үйлчлэлийг авч үзсэн ба үр дүнгийн статистик нарийвчлалыг сайжруулахын тулд эхний 20 нейтроны харилцан үйлчлэлийг тооцоогүй болно. Өмнөх ажлуудад реактор ажиллаж эхлэх үеийн илүүдэл реактивитийг бууруулж, ажиллагааны турш реактивитийн өөрчлөлт болон чадлын түгэлтийг жигд болгохын тулд бөөрөнхий хэлбэртэй, хоёр өөр төрлийн ШШМ-ын (B_4C болон Gd_2O_3) бөөмсийг ашигласан. Энэ ажилд ялгаатай хэмжээ, хэлбэртэй, нэг төрлийн (B_4C) ШШМ-ын бөөмс бүхий голомтын дизайныг хийн, нейтроник анализыг гүйцэтгэн үр дүнд нөлөөлөх нөлөөллийг авч үзэв. Гадаргуугийн талбай эсвэл эзлэхүүнээрээ адил байх бөөрөнхий ба цилиндр хэлбэртэй ШШМ-ийн бөөмс агуулсан голомтын нейтроник анализын үр дүнг Хүснэгт 1.23 болон Зураг 1.69-д өгөв.

Хүснэгт 1.23. Ялгаатай хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсийн ӨТХР-ын голомтын нейтроник анализын үр дүн

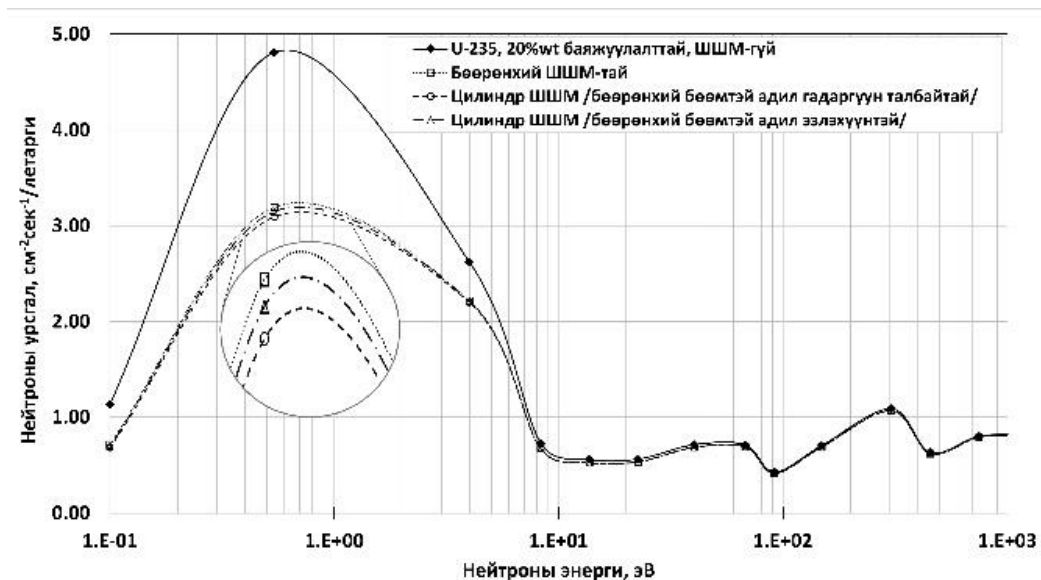
$k_{эфф,0}$ (алдаа %)	ХИУ $\Delta k/k$ (%)	$t_{голомт}$ (жил)	$V_{түлш,t}$ (ГВт*хоног/тн)
^{235}U, 20%wt баяжуулалттай, ШШМ-гүй			
1.4977 (0.02)	33.23	26.4	106.0
Бөөрөнхий ШШМ-тай			
1.0666 (0.0460)	6.24	24.2	98.3
Цилиндр /бөөрөнхий бөөмтэй адил гадаргуун талбайтай/ ШШМ-тай			
1.0389 (0.0451)	4.36	25.0	101.5
Цилиндр /бөөрөнхий бөөмтэй адил эзлэхүүнтэй/ ШШМ-тай			
1.0527 (0.0472)	5.01	24.6	99.9
Тайлбар:			
$k_{эфф,0}$ алдаа	Реактор ажиллаж эхлэх үеийн $k_{эфф}$ статистик хазайлт		
ХИУ $\Delta k/k$	Реактивитийн хамгийн их утга		
$t_{голомт}$	Голомт дэх түлшний нэг циклийн үргэлжлэх хугацаа		
$V_{түлш,t}$	Нэг циклийн төгсгөлд түлшний шаталт		

Ялгаатай хэлбэр, хэмжээтэй ШШМ-ын бөөмсийг агуулсан голомтын нейтроник тооцооллын дүнгээс харвал бөөрөнхий хэлбэртэй ШШМ агуулсан голомтын дизайны хувьд реактор ажиллаж эхлэх үеийн эффектив нейтрон үржүүлэх фактор ($k_{эфф,0}$) болон реактивитийн хамгийн их утга нь цилиндр хэлбэрийн ШШМ агуулсан үр дүнтэй харьцуулахад их гарсан боловч голомтын нэг циклийн үргэлжлэх хугацаа болон түлшний шаталтын хэмжээ бага байна.



Зураг 1.69 ӨТХР-ын голомтын нейтрон үржүүлэх эффектив факторын өөрчлөлтөд ялгаатай хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсийн нөлөө

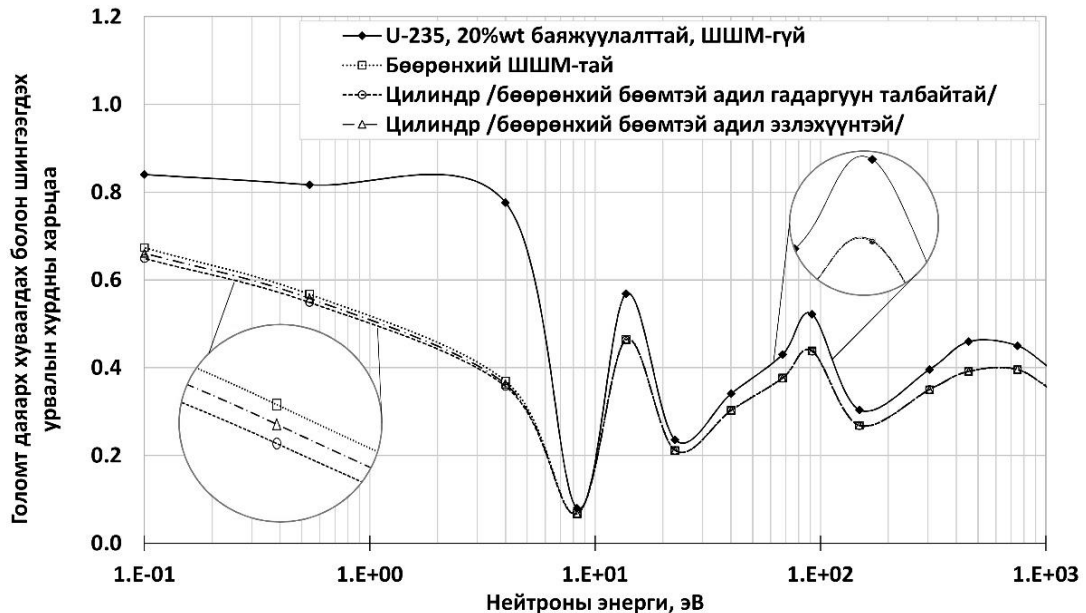
Өөрөөр хэлбэл, цилиндр хэлбэрийн ШШМ-ын бөөмс хэрэглэхэд голомтын нейтроник үзүүлэлтүүд сайжирсан байна. Үүний шалтгааныг тайлбарлахын тулд реакторын ажиллагааны эхэн үед ялгаатай хэлбэр, хэмжээтэй ШШМ-ын бөөмсийг агуулсан реакторын голомт даяарх нейтроны спектр (Зураг 1.70), хуваагдах болон шингээгдэх урвалын хурдны харьцааг (Зураг 1.71) авч үзье.



Зураг 1.70 Реактор ажиллаж эхлэх үеийн голомт даяарх нейтроны спектрт ялгаатай хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсийн нөлөө

Зураг 1.70 дахь реактор ажиллаж эхлэх үеийн реакторын голомт даяарх нейтроны спектрээс харахад, бөөрөнхий хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсийг агуулсан голомтын хувьд 0.1 эВ – 5 эВ энергитэй нейтроны урсгал нь цилиндр ШШМ-тай тохиолдлынхоос арай өндөр

байна. Харин зураг 1.70-аас харахад нейтроны 0.1 эВ – 6 эВ энергитэй мужид цилиндр хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсийг ашигласан голомтуудад нейтроныг шингээх (= $(n,f)+(n,\alpha)+(n,\gamma)+(n,2n)+(n,p)+\dots$) урвалд харгалзах хуваагдлын хувь нь бөөрөнхий ШШМ-ын бөөмсийг ашигласан голомтынхоос бага байна. Өөрөөр хэлбэл, реактор ажиллаж эхлэх үед бөөрөнхий ШШМ-тай голомтод нейтрон шингээгдээд хуваагдал явагдах нь цилиндр ШШМ-тэй голомтуудаас илүү магадлалтай байна.

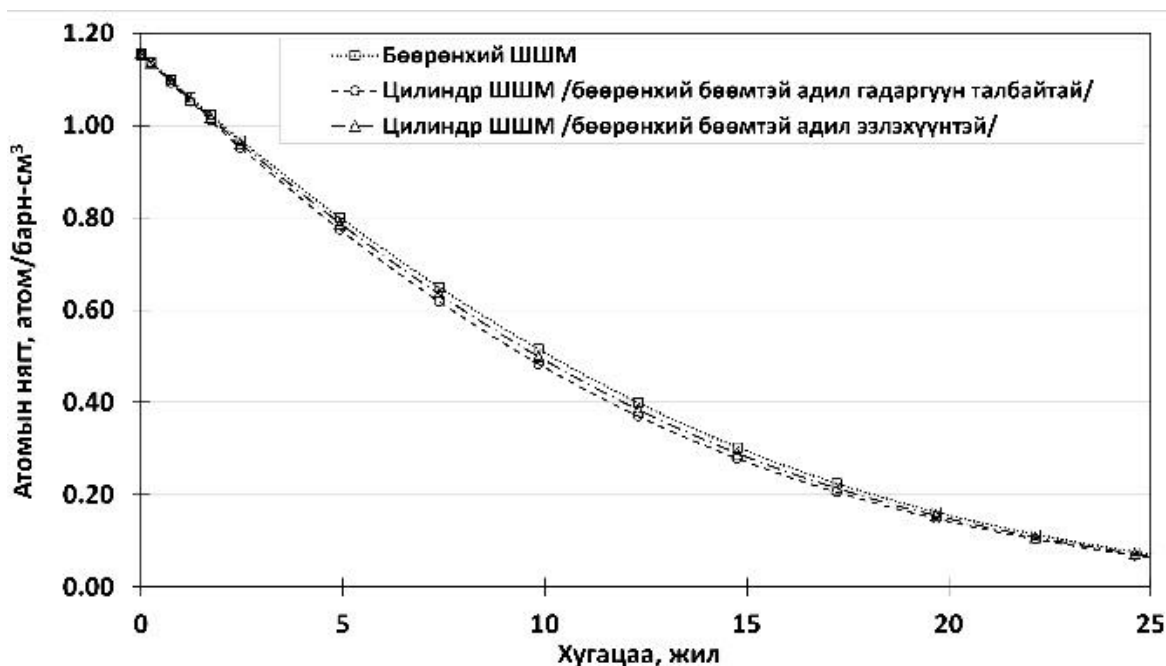


Зураг 1.71. Реактор ажиллаж эхлэх үеийн голомт даяарх хуваагдах болон шингээгдэх урвалын хурдны харьцаа

Хүснэгт 1.22-д харуулсанчлан, ШШМ-ын бөөмс нь голомтод ялгаатай хэмжээгээр буюу цилиндр (бөөрөнхий бөөмтэй адил гадаргуун талбайтай) тохиолдолд түлшний үүрийн эзлэхүүний 7.6% бол бөөрөнхий болон цилиндр (бөөрөнхий бөөмтэй адил эзлэхүүнтэй) хэлбэртэй тохиолдлуудад түлшний үүрийн эзлэхүүний 5.7% эзэлж байхаар тооцсон. Үүнийг ашиглан нэг түлшний үүрэнд байх ШШМ-ын бөөмсийн тоо, тэдгээрийн гадаргуугийн нийт талбай болон эзлэхүүнийг тооцож Хүснэгт 1.24-т өгөв.

Адил гадаргуугийн талбайтай бөөрөнхий болон цилиндр бөөмийн эзлэхүүн ялгаатай байх учраас түлшний үүрэнд цашилбал голомтод байх нийт бөөмсийн тоо нь ялгаатай болно. Харин адил эзлэхүүнтэй бөөрөнхий болон цилиндр бөөм ашиглах үед түлшний үүр дэх нийт бөөмийн тоо нь адилхан боловч нэгж бөөмийн гадаргуун талбай өөр учраас харилцан үйлчлэлцэх нийт гадаргуун талбай ялгаатай байна. Хүснэгт 1.24-өөс харвал бөөрөнхий хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмс агуулсан голомтын хувьд түлшний үүрэнд байгаа бөөмсийн тоо болон нийт гадаргуун талбай нь цилиндр тохиолдлуудтай харьцуулахад бага байна.

Иймд бөөрөнхий ШШМ-ын бөөмс бүхий голомтод үүссэн нейтрон ШШМ-д шингээгдэх урвал харьцангуй цөөн, харин хуваагдагч цөмтэй харилцан үйлчилцэж хуваагдал явуулах тул хурд харьцангуй өндөр байна. Энэ нь уг реакторын ажиллаж эхлэх үеийн $k_{эф.0}$ -ийн утга цилиндр ШШМ-тэй голомтын тохиолдлуудаас өндөр байх нөхцөл болж байна. Зураг 1.72-д эдгээр голомтын ШШМ-ын бөөмс дэх ^{10}B изотопын атомын нягтын өөрчлөлтийг харуулав. Зураг 6-аас харвал бөөрөнхий ШШМ-тай голомтын B_4C бөөмсд нейтроны шингээлт бага явагдсан тул энэ голомт дэх ^{10}B изотопын зарцуулагдсан хувь хэмжээ болон зарцуулагдах хурд нь цилиндр хэлбэрийн ШШМ-ын бөөмс агуулсан голомтынхтой харьцуулахад бага байна.



Зураг 1.72. Реактор ажиллаж байх хугацааны туршид ^{10}B -ийн атомын нягтын өөрчлөлтөд ялгаатай хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсийн нөлөө

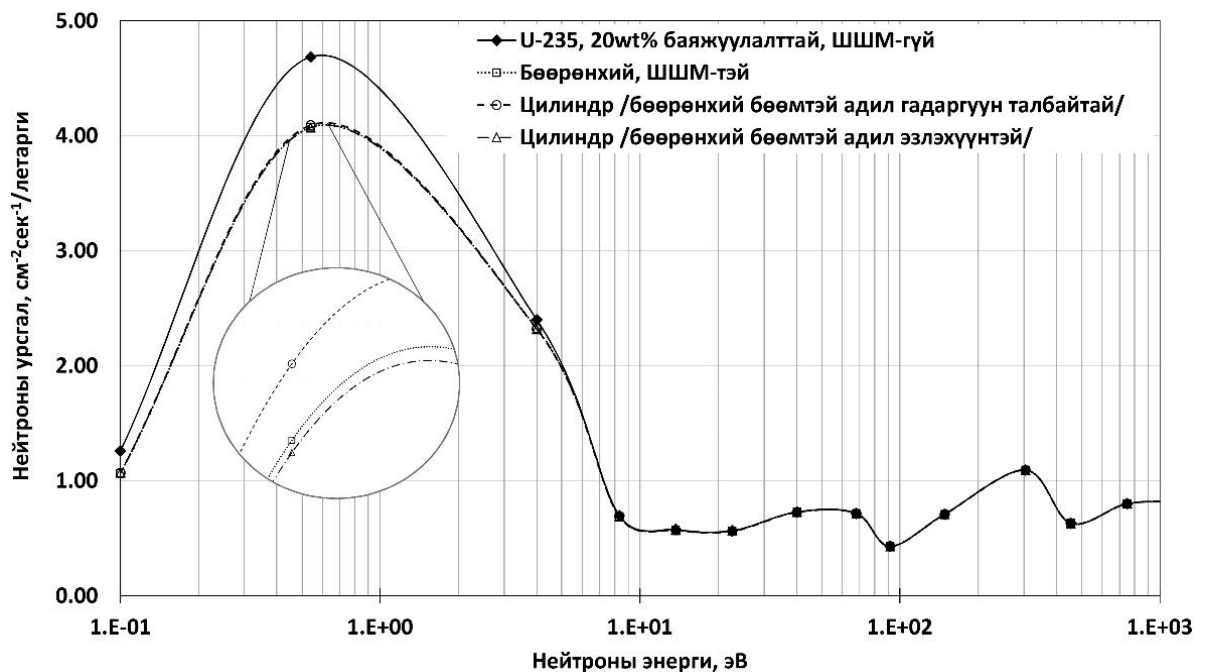
Хүснэгт 1.24 Түлшний үүр дэх ШШМ-ын хэмжээ

Түлшний үүр дэх ШШМ-ын нийт эзлэхүүн, см^3	Нийт бөөмсийн тоо	Нийт гадаргуун талбай, см^2
Бөөрөнхий ШШМ		
14.08	3360800	4.22E+03
Цилиндр /бөөрөнхий бөөмтэй адил гадаргуун талбайтай/ ШШМ		
18.77	5974755	7.50E+03
Цилиндр /бөөрөнхий бөөмтэй адил эзлэхүүнтэй/ ШШМ		
14.08	3360800	5.12E+03

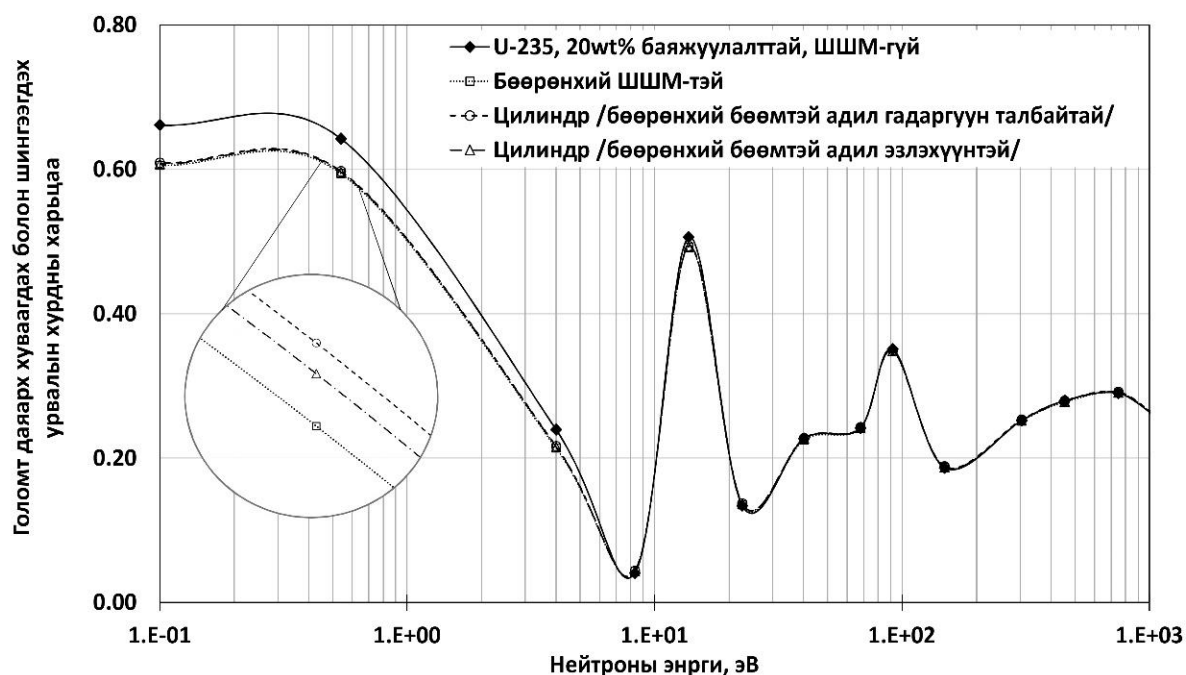
Ингэснээр дараагийн хуваагдлыг явуулах учиртай дулааны энергитэй нейтонуудыг бөөрөнхий ШШМ харьцангуй бага шингээж, харин хуваагдагч изотопд шингээгдэж хуваагдал явуулснаар илүү олон нейтрон үүсгэсэн тул Зураг 1.70-д харуулснаар удаан нейтроны урсгал арай их байж, мөн Хүснэгт 1.23 ба Зураг 1.69-д харуулснаар $k_{эфф,0}$ их гарсан байна.

Түүнчлэн, цилиндр хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмстэй үед тэдний эзлэхүүн болон гадаргуугийн нийт талбай нь арай их байх тул бөөрөнхий тохиолдолтой харьцуулахад ^{10}B изотоп арай их хурдаар зарцуулагдсан байна. Цилиндр хэлбэрийн ШШМ-тай тохиолдлуудаас, бөөрөнхий хэлбэртэй, адил нэгж гадаргуугийн талбайтай үед нийт бөөмсийн тоо олон байж, эзлэхүүн болон гадаргуугийн нийт талбай их байгаа тул ^{10}B изотопын зарцуулагдсан хувь хэмжээ болон зарцуулагдах хурд нь их байна. Тиймээс энэ тохиолдолд удаан нейтроны урсгал болон реактор ажиллаж эхлэх үеийн $k_{эфф,0}$ бусад тохиолдолтой харьцуулахад бага байна.

Одоо реактор ажиллаж дуусах үеийн голомт даяарх нейтроны спектр (Зураг 1.73), хуваагдах болон шингээгдэх урвалын хурдны харьцааг (Зураг 1.74) авч үзье.



Зураг 1.73. Реактор ажиллаж дуусах үеийн голомт даяарх нейтроны спектр ялгаатай хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсийн нөлөө



Зураг 1.74. Реактор ажиллаж дуусах үеийн голомт даяарх хуваагдах болон шингээгдэх урвалын хурдны харьцаа

Зураг 1.73-аас харахад реактор ажиллаж дуусах үеийн голомт даяарх нейтроны спектр нь цилиндр (бөөрөнхий бөөмтэй адил гадаргуун талбайтай) хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмс агуулсан голомтын хувьд 0.1 эВ – 5 эВ энергитэй мужид нейтроны урсгал нь бөөрөнхий болон цилиндр (бөөрөнхий бөөмтэй адил эзлэхүүнтэй) ШШМ-тай голомтуудынхаас үл ялиг өндөр байна. Харин Зураг 1.74-өөс харахад нейтроны 0.1 эВ – 6 эВ энергитэй мужид цилиндр хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсийг ашигласан голомтуудад нейтроныг шингээх болон хуваагдах урвалын хурдны харьцаа нь бөөрөнхий хэлбэртэй ШШМ-тай бөөмс агуулсан голомтынхоос мөн их байна.

Энэ нь цилиндр голомтуудын хувьд ШШМ-тай бөөмсийн тоо болон эзлэхүүн, гадаргуун талбайн хэмжээ нь бөөрөнхий хэлбэртэй ШШМ агуулсан голомтынхоос их учраас хугацааны эхэн үед нейтронтой илүү их харилцан үйлчлэл хийж шатан хорогдсоноор хугацаа өнгөрөх тусам голомтод байх нийт ШШМ-ын хэмжээ буурсан нь Зураг 6-аас харагдаж байна. Тиймээс голомтод байх цилиндр (бөөрөнхий бөөмтэй адил гадаргуун талбайтай) хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсийн хэмжээ буурснаас хамаарч илүү олон хуваагдал явагдсан тул Зураг 1.73 болон Зураг 1.74-д харуулснаар цилиндр голомтын нейтроны урсгал, хуваагдах болон шингээгдэх урвалын хурдны харьцаа үл ялиг их байж, Зураг 1.69-д харуулснаар $k_{эфф}$ ихэсч, бөөрөнхий хэлбэртэй ШШМ агуулсан голомтынхоос реакторын ажиллах хугацаа 0.8 жил, түлшний шаталтын хэмжээ 3.2 ГВт·хоног/тн ихэссэн байна.

Реактор ажиллах хугацааны туршид голомт дахь ^{235}U изотопын хэмжээ хугацаа өнгөрөх тусам буурах ба реактор ажиллаж эхлэх үед 20% баяжуулалттай ^{235}U изотопын атомын нягтыг 0.05166 (атом/барн-см³) буюу үүнийг 100% гэж үзвэл хугацаа өнгөрөх тусам түлш шатсанаар нэгж эзлэхүүнд байх хуваагдагч изотопын атомын тоо буурах ба Хүснэгт 1.25-д ШШМ-гүй, ШШМ-тай голомт дэх ^{235}U изотопын атомын нягтын өөрчлөлтийг харьцуулав.

Хүснэгт 1.25 ^{235}U изотопын атомын нягт

Хугацаа, жил				
0	5	10	15	20
Атомын нягт, атом/барн-см³				
^{235}U 20%wt баяжуулалттай, ШШМ-гүй				
0.05166	0.045277	0.03935	0.03379	0.02856
100%	87.64%	76.18%	65.41%	55.28%
Бөөрөнхий ШШМ-тай				
0.05166	0.045253	0.039429	0.03405	0.02905
100%	87.599%	76.32%	65.92%	56.23%
Цилиндр /бөөрөнхийтэй ижилхэн гадаргуун талбайтай/				
0.05166	0.045252	0.039443	0.03409	0.02909
100%	87.597%	76.35%	65.99%	56.32%
Цилиндр /бөөрөнхийтэй ижилхэн эзлэхүүнтэй/				
0.05166	0.045253	0.039432	0.03407	0.02907
100%	87.598%	76.33%	65.94%	56.27%

Хүснэгт 1.25-аас харахад бөөрөнхий хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмс ашигласан голомтын хувьд эхний таван жилийн хугацаанд ^{235}U изотопын зарцуулагдаад үлдсэн хэмжээ нь цилиндр ШШМ-ын бөөмс агуулсан голомттой харьцуулахад арай бага байгаа бол үүнээс хойших хугацааны туршид цилиндр хэлбэртэй ШШМ-тай бөөмс агуулсан голомтуудад их байна. Үүний шалтгаан нь түлшний үүрэнд байгаа бөөрөнхий ШШМ-ын бөөмсийн тоо болон гадаргуун талбайн хэмжээ нь цилиндр ШШМ-ын бөөмс агуулсан голомтуудтай харьцуулахад бага байгаатай холбоотой. Үүнээс гадна реактор ажиллаж эхэлснээс хойш эхний 10-н жил хүртэлх хугацаанд ШШМ-ын зарцуулагдах хурд нь бөөмсийн тоо болон гадаргуун талбайн хэмжээнээс хамаарч байсан учраас реактор ажиллаж эхлэх үеийн нейтроны спектр, хуваагдах болон шингээгдэх урвалын хурдны харьцаа их гарсан. Үүнээс хойших хугацааны туршид бөөрөнхий хэлбэртэй ШШМ-тай бөөмс агуулсан голомт болон цилиндр хэлбэртэй ШШМ-тай бөөмс агуулсан голомтууд дахь атомын нягтын зөрүү ихэссэн ба цилиндр (*бөөрөнхий бөөмтэй адил гадаргуун талбайтай*) хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмс эхэндээ их хурдтай хорогдсноор шатан шингээх хурд буурсан. Тиймээс реактор ажиллаж дуусах үеийн нейтроник үзүүлэлтүүд бусад голомтуудтаас харьцангуй их гарсан боловч ^{235}U изотопын зарцуулагдсан хэмжээ нь бөөрөнхий болон цилиндр (*бөөрөнхий бөөмтэй адил эзлэхүүнтэй*) голомтуудтай харьцуулахад бага байгаа нь Хүснэгт 1.25-д харуулсан ^{235}U изотопын атомын нягтын өөрчлөлтөөс харагдаж байна.

Дүгнэлт

1. Энэ ажилд бөөрөнхий болон цилиндр хэлбэртэй нэг төрлийн, шатан шингээгч материал (V_4C) агуулсан 100 МВт дулааны чадалтай, төвдөө ойлгогчтой, ӨТХР-ын голомтын критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэв.
2. Цилиндр хэлбэртэй, ШШМ-тай бөөмсүүд нь бөмбөрцөг хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсүүдтэй харьцуулахад реакторын ажиллах хугацааны эхэн үед үүссэн илүүдэл реактивитиг сайн дарж, реакторын нийт ажиллах хугацаа болон түлшний шаталт ихэсч байна.
3. Бөөрөнхий хэлбэртэй харьцуулахад адил гадаргуун талбайтай, ялгаатай эзлэхүүнтэй цилиндр хэлбэрийн ШШМ хэрэглэхэд голомтын нейтроник үзүүлэлтүүд сайжирч байгаа нь ШШМ-ын бөөмсийн тоо болон нийт гадаргуун талбайн хэмжээ, эзлэхүүн ихэссэнтэй холбоотой байна.

1.5 Түлшээ үржүүлэн шатаадаг хурдан реакторын нейтроны тооны тэнцвэрийн шинж чанар

Цөмийн эрчим хүчний станцын хөгжил 80 гаруй жил болж байгаа бөгөөд эдгээрийн дийлэнх нь баяжуулсан уран түлштэй дулааны нейтроноор ажиллах реактор байна. Иймд маш их хэмжээний ядуурсан уран хуримтлагдаж, хадгалагдсан байна. Түлшээ үржүүлэн шатаах горимд ажиллах хурдан реактор нь ашигласан цөмийн түлшийг хадгалах байгууламжийн хэрэгцээг багасгах, цаашилбал ураны нөөцийг илүү ашигтай хэрэглэхийг нэмэгдүүлэх үр дүнтэй арга замуудын нэг юм. Түлшээ үржүүлэн шатаах горимыг хангах нь голомтын материалын сонголтоос хамаардаг. Иймд нейтроны тэнцвэрийн анализыг гүйцэтгэж голомтын түлш болон хөргүүрийн материалын хамгийн тохиромжтой хослолыг тодорхойлох анализ хийв. Энэ хүрээнд голомтоос нейтрон алдагдах хэмжээ болон хөргүүрийн дулаан зайлуулах чадамжид үндэслэн түлшээ үржүүлэн шатаах горимд ажиллах реакторын голомтын шинж чанарыг тодорхойлно. Ингээд метал түлштэй, том хэмжээний натри хөргүүртэй хурдан реактор (SFR)-ийн голомт нь гинжин урвалыг тэтгэж, түлшээ үржүүлэн шатаах горимд ажиллаж чадахыг тогтоов. Харин ийм шинж чанартай бага оврын голомтын түлш нь баяжуулсан нитрид түлштэй байх хэрэгтэйг олов.

1.5.1 Оршил

Одоогоор дэлхийн нийт цахилгаан эрчим хүчний ойролцоогоор 10%-ийг дэлхийн 30 оронд ажиллаж буй цөмийн эрчим хүчний 440 реактораас үйлдвэрлэж байна. Эдгээрийн ердөө гурав нь хурдан, үржүүлэгч реактор байгаа ба бусад нь баяжуулсан түлш шатаадаг дулааны реактор болно. Иймээс, түлш баяжуулах үйлдвэрт дайвар бүтээгдэхүүн байдлаар болон цөмийн реактор ажиллуулсны дараа ихээхэн хэмжээний ядуурсан уран үүсч хуримтлагдсан. Хуваагдагч болон үржүүлэгч цөмүүдийг түлшний бүрээс болон хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдээс салгахын тулд энэ ашигласан цөмийн түлшийг дахин боловсруулалт хийх арга зам бий. Гэхдээ иймэрхүү байгууламж нь өртөг зардал ихтэй, цөмийн зэвсэг үл дэлгэрүүлэх талын асуудалтай тул цөмийн эрчим хүч ашигладаг орон бүрт байдаггүй.

Ашигласан цөмийн түлший хэмжээг бууруулангаа байгалийн ураныг баяжуулахгүйгээр ашиглах, цаашилбал ураны нөөцийг илүү үр ашигтай ашиглах өөр нэг арга нь түлшээ үржүүлэнгээ шатаадаг хурдан реактор хөгжүүлэх юм. Энд түлшээ шатаангаа, үүсэх ядуурсан уран дэх үржигч изотопоос хуваагдагч изотопыг үржүүлэн гарган авдаг. Бага оврын В&В реакторын концепт нь дараах хэд хэдэн давуу талтай: систем бүхэлдээ хөрөнгө оруулалт бага шаардана, цөмийн зэвсэг үл дэлгэрүүлэх шинж чанартай, бага түвшний цацраг идэвхт цөмийн хаягдлын хэмжээ багасах зэрэг болно. Үнэндээ цөмийн инженерүүд 1950-иад оноос энэ санааг санаачилж байсан ба хэд хэдэн өөр загвараар

хөгжүүлж, судалж ирсэн. Загвар бүрт голомт хоёр бүсээс тогтоно: баяжуулсан түлшнээс тогтох эхлүүлэгч буюу шатаж буй бүс, болон ядуурсан эсвэл байгалийн уранаас тогтох үржүүлэгч бүс. Загварын жишээ нь CANDLE ба TWR болно. CANDLE реакторт шатагч муж нь реакторын ёроолоос орой хүртэл шилждэг ба энэ үед голомт даяар аксиал чиглэлийн дагуух нейтроны урсгалын хэлбэр, цөмийн нягт, чадлын нягтын түгэлт адил байдаг. Эдгээр параметрийн хэлбэр голомтын амьдралын турш тогтмол хурдтай шилжиж хөдөлдөг. Харин TWR нь зогсонги долгионы реактор бөгөөд энэ реакторын голомтын өөр өөр бүсд түлш шатаж, үрждэг ба үрждэг мужид хуваагдагч изотоп үржсэний дараа нейтроны урсгал ихтэй мужид дахин сэлгэлт хийх шаардлагатай.

Нөгөө талаас, түлшний шаталт шаардагдах хамгийн бага утганд (метал түлштэй SFR-т дунджаар 20% FIMA- хүнд металын анхны атом бүрт тохиосон хуваагдлын тоо) хүрэхэд түлшээ үржүүлэнгээ шатаах ажиллагааны горим тогтож эхэлдэг. Гэхдээ өөр өөр түлш (метал, нитрид, исэл) болон хөргүүр (Na, Pb, Pb-Bi, He) материалиас бүрдэх голомтын нейтроникийн болон дулааны гидравликийн шинж чанар ялгаатай байна. CANDLE шаталтын шинж чанарыг ойлгохын тулд өөр өөр түлш болон хөргүүр материал бүхий түлшний үүрийн нейтроникийн зарим шинж чанарыг судалсан байдаг, гэсэн хэдий ч эдгээр судалгаанд түлшээ үржүүлэнгээ шатаах горимыг хангахад шаардлагатай нейтроны тооны тэнцвэр болон шаардагдах хамгийн бага түлшний шаталт зэрэг үзүүлэлтийг авч үзээгүй байна. TWR загварын хувьд иймэрхүү судалгаа хараахан хийгдээгүй болно. Иймд нейтроникийн болон дулааны гидравликийн шинж чанарын үүднээс түлшээ үржүүлэнгээ шатаах хурдан реакторын голомтын материалын хамгийн сайн хослохыг олох нь энэ ажлын зорилго юм.

1.5.2 Жишиг хязгааргүй геометрт нейтроникийн үзүүлэлт

Нейтроны тооны тэнцвэр (NB)-ийн аргын анализд түлшээ үржүүлэнгээ шатаадаг реакторын түлшний шаталтын турш голомтоос нейтрон алдагдах зэргийг тооцон үүссэн болон шингээгдсэн нейтроны нийт тоо болон голомт дэх түлшний шаталтын хязгаарын хоорондох харьцаагаар NB-ийн утгыг үнэлдэг. Энэ аргыг Greenspan-ийн судалгааны баг хөгжүүлсэн бөгөөд тэд систем дэх NB-ийн утгыг үнэлэх Тэг.1-ийг гарган авсан:

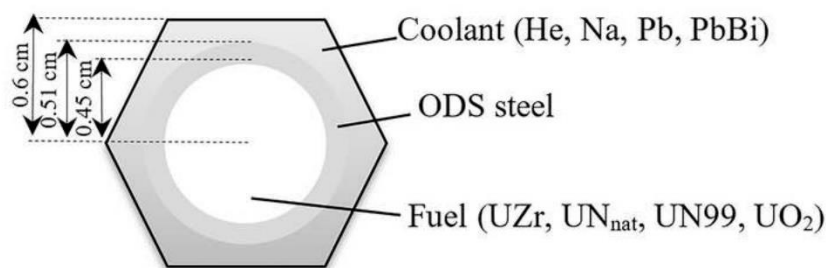
$$Neutron\ balance = \int_0^{Bu} \bar{\nu} \left[1 - \frac{1}{k(1-L)} \right] dBu, \quad (1)$$

энд $\bar{\nu}$ нь хуваагдах урвалаар үүсэх нейтроны дундаж тоо, Bu голомт дэх түлшний шаталтын хамгийн их утга, L системээс нейтрон алдагдах хувь (энэ нь хязгааргүй системд

тэг утгатай), k нь хязгааргүй системд нейтрон үржүүлэх хязгааргүй фактор эсвэл төгсгөлөг системд нейтрон үржүүлэх эффектив фактор.

Энэ хэсэгт түлшээ үржүүлэнгээ шатах горимыг хангах, ойлгогч хилийн нөхцөлтэй, хязгааргүй түлшний үүрийн NB анализийг гүйцэтгэв. Түлшний үүрийн хэмжээ нь өөрчлөгдөхгүй ч, түлш болон хөргүүрийн материал ялгаатай ба түлшний бүрээс материалаар исэл дисперслэн хүчжүүлсэн (ODS) ганг ашигласан. Энэ анализын зорилго нь ижил геометр хэмжээстэй ч өөр өөр материалаас тогтох түлшний үүрийн нейтроник шинж чанарын ялгааг тогтоох юм.

Түлшний материалд метал (75%-ийн smeared нягттай U+10%Zr), байгалийн нитрид (UN_{nat}), 99 at.% хүртэл баяжуулсан ^{15}N бүхий нитрид (UN99) ба исэл (UO_2)-ийг ашигласан. Нитрид түлшний хувьд, онолын нягт 14.32 g/cm^3 (Ref.8)-ын 90%-ийг smear нягт болгон авсан. Харин хөргүүр материалд He хий, шингэн натри, шингэн хар тугалга, шингэн хар тугалга-висмутын хайлшийг ашигласан. Зураг 1.75-д түлшний үүрийн хэвтээ зүсмэгийг схемчилсэн дүрслэлийг харуулав.

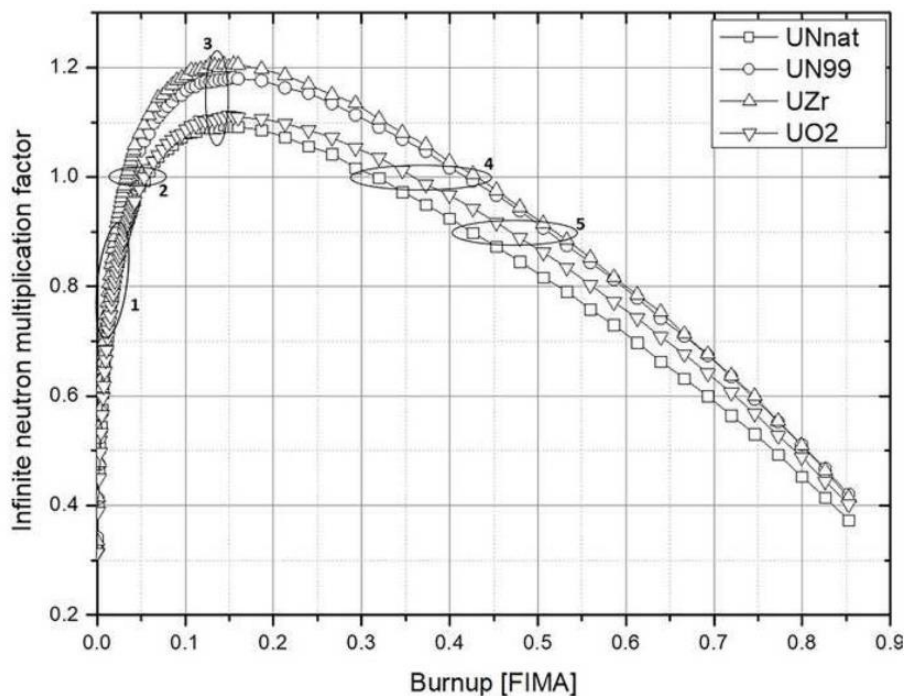


Зураг 1.75. Түлшний үүрийн хэвтээ зүсмэг

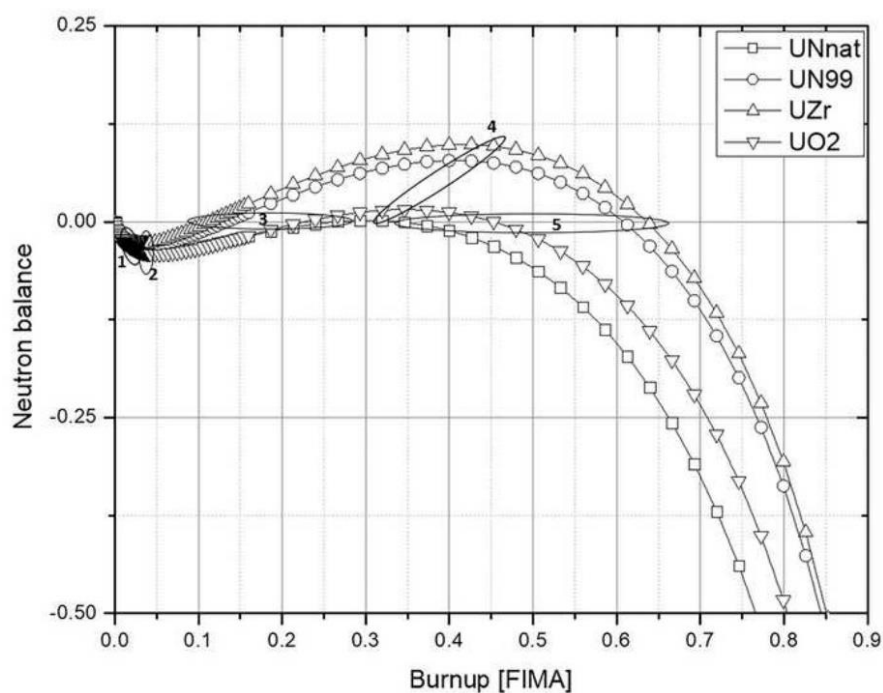
Түлшний үүрийн нейтроник тооцооллыг цөмийн өгөгдлийн ENDF-B/VII сан бүхий Монте Карло аргаар статистик тооцоолол гүйцэтгэх Serpent нейтроникийн кодоор гүйцэтгэсэн. Нейтроник тооцооллын нөхцөл нь бүх тооцоололд адил байсан ба тооцооллын нэг цикл дэх үүсгүүрийн нейтрон тоо 100000 ба нийтдээ идэвхтэй 100 циклийн тооцоолол гүйцэтгэснээс эхний 20 циклийн үр дүнг статистик боловсруулалтын алдааг багасгах зорилгоор үл хэрэгсэв. Реакторын ажиллагааны нөхцөлд түлш, бүрээс, хөргүүрийн температурыг харгалзан 800, 700 ба 700 К гэж үзсэн. Шаталтын турш түлшний үүрт үүсэх нейтрон урсгалыг $10^{15} \text{ n/cm}^2\text{s}$ утгад нормчлов.

Гелий хийн хөргүүртэй өөр өөр түлшний материалтай түлшний үүрийн нейтрон үржүүлэх хязгааргүй фактор болон харгалзах NB утгын муруйн түлшний шаталтаас хамаарах хамаарлыг жишээ болгон Зураг 1.76 ба 1.77-д харуулав. NB утгыг Тэг.1-ийг ашиглан тооцоолсон. Зураг 1.76 ба 1.76 дэх тав хүртэлх дугаарласан муж нь дараах утгатай:

1. Энэ мужид нейтрон үржүүлэх хязгааргүй факторын утга нэг хүртэл өсөх ба NB-ийн утга маш хурдан буурна. Энэ нь системд үүсч байгаа нейтроны тоо нь шингэж байгаагаас бага байгааг илтгэнэ. Энэ мужийг *үржүүлэгч төлөв* гэдэг. Энэ мужид түлш шатсанаар систем дэх хуваагдагч материал үржүүлэгч материалаас үржиж үүсэх ба k_{∞} гэнэт өсдөг.
2. Энэ мужид нейтрон үржүүлэх хязгааргүй факторын утга нэгтэй тэнцүү болох ба NB нь эхний хамгийн бага утгандаа хүрнэ. Энэ нь системд шингээгдсэнээсээ илүү олон нейтрон үүссэн гэсэн үг. Энэ мужийг *нейтрон үйлдвэрлэх төлөв* гэдэг.
3. Түлшний шаталтын шаардагдах хамгийн бага утга гэдэг нь системд нейтрон үүсэх хурдны өөрчлөлт нь шингэх хурдны өөрчлөлттэй тэнцэх үеийн түлшний шаталт юм. Энэ судалгаанд энэ утгыг эхний NB-ийн цэг буюу FNBP гэж нэрлэв.
4. Энэ мужид нейтрон үржүүлэх хязгааргүй факторын утга дахин нэгтэй тэнцүү болох ба NB нь хамгийн их утгандаа хүрнэ. Энэ судалгаанд энэ үед харгалзах шаталтыг хамгийн их NB цэг буюу MNBP гэв. Түлш шатахын хэрээр хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүд хуримтлагдах учраас нейтрон үүсэх хурд буурч, нейтрон шингээгдэх хурд нэмэгддэг. Энэ мужийг *нейтрон шингээх төлөв* гэдэг.
5. Энэ мужид нейтроны тоо дахин тэнвэрт орно. Энэ судалгаанд энэ мужийг хоёр дахь NB цэг буюу SNBP гэж нэрлэв.



Зураг 1.76. Түлш ба хөргүүрээс тогтох хязгааргүй түлшний үүрт харгалзах нейтрон үржүүлэх эффектив фактор



Зураг 1.77. Түлш ба хөргүүрээс тогтох хязгааргүй түлшний үүрт харгалзах нейтроны тэнцвэр

Хүснэгт 1.26. Түлш ба хөргүүрээс тогтох хязгааргүй түлшний үүрт харгалзах FNBP, MNBP, SNBP ба MNBP дэх NB утгууд

Fuel	Coolant	FNBP	MNBP	SNBP	NB at MNBP	Coolant	FNBP	MNBP	SNBP	NB at MNBP
		(FIMA)					(FIMA)			
UN _{nat}	He	0.262	0.310	0.340	0.002	Pb	NA ^a			
UN99		0.133	0.406	0.608	0.078		0.162	0.384	0.555	0.048
UZr		0.113	0.420	0.636	0.099		0.14	0.390	0.584	0.068
UO ₂		0.226	0.346	0.453	0.016		NA ^a			
UN _{nat}	Na	NA ^a				PbBi	NA ^a			
UN99		0.164	0.373	0.550	0.049		0.160	0.385	0.558	0.052
UZr		0.142	0.400	0.582	0.066		0.136	0.397	0.589	0.071
UO ₂		NA ^a					NA ^a			

^aNA = not available; the B&B operating condition was not achieved.

Түлшээ үржүүлэнгээ шатаах ажиллагааны горим нь зөвхөн нейтроны тоо эерэг утгатай байх 3 ба 5-дугаар мужийн хооронд тохиож байна. Хүснэгт 1.26-д энэ хэсгийн анализаар гарган авсан янз бүрийн түлш ба хөргүүрээс тогтох хязгааргүй түлшний үүрт харгалзах FNBP, MNBP, SNBP ба MNBP дэх NB утгуудыг өгөв. Хүснэгт 1.26 дэх NA гэдэг нь шаталтын турш NB утга үргэлж сөрөг утгатай байсныг төлөөлнө.

Хүснэгт 1.26 дэх үр дүнгээс харвал, ийм геометр хэмжээстэй түлшний үүрт гелий хий ашиглавал түлшээ үржүүлэн шатаах ажиллагааны горим хангагдах нь харагдаж байна. Учир нь түлшний материал нь адил байхад бусад хөргүүртэй үүрийг бодвол гелий хөргүүртэй үүрт FNBP-ийн утга хамгийн бага ба MNBP дэх NB-ийн утга хамгийн өндөр, SNBP-ийн

утга хамгийн их байна. Гелий хөргүүртэй голомтууд дотроод метал түлштэй нь хамгийн тохиромжтой байгаа нь харгалзах FNBP-ийн утга хамгийн бага ба NB-ийн утга хамгийн өндөр байгаагаас харагдана. Ерөнхийдөө, нитрид болон исэл түлштэй голомтын нейтроны спектр метал түлштэй голомтынхоос “илүү зөөлөн” байдаг. Түүнчлэн, N^{14} изотопын нейтрон залгих хөндлөн огтлол нь N^{15} изотопынхоос их байдаг. Тиймээс, байгалийн нитрид болон исэл түлштэй голомт түлшээ үржүүлэнгээ шатаах горимыг дэмжин ажиллаж чадахгүй байна. Харин байгалийн нитрид түлшний оронд N^{15} -аар баяжуулсан нитрид түлш ашиглан нейтроны тоог нэмэгдүүлэх шаардлагатай байна. Байгалийн нитрид болон исэл түлштэй голомтын хувьд түлшээ үржүүлэнгээ шатдаг горимд ажиллахын тулд хөргүүр нь зөвхөн гелий байх шаардлагатай байна. Цаашилбал шингэн натри, хар тугалга, хар тугалга-висмут хайлшин хөргүүртэй, янз бүрийн түлштэй голомтуудын харгалзах FNBP, MNBP, SNBP, ба MNBP дэх NB-ийн утгууд хоорондоо ихээр ялгагдахгүй байна.

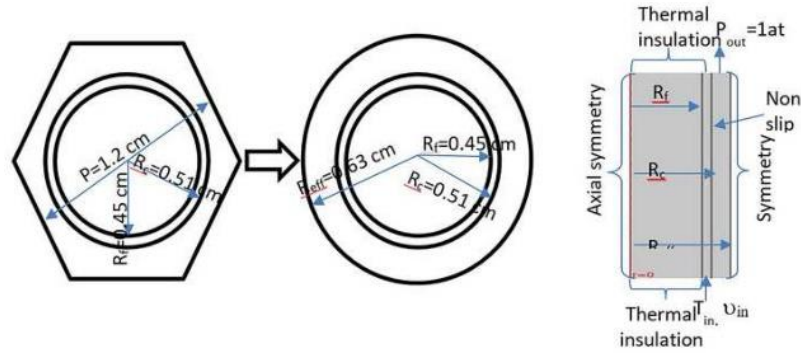
1.5.3 Дулаан зайлуулах чадамжид тохирох алхамтай түлшний үүрийн нейтроник үзүүлэлтүүд

Дулаан зайлуулах анализаар түлшний үүрийн хамгийн бага алхмыг тодорхойлох нь

Өмнөх хэсэгт түлшний үүрийн алхмыг өөрчлөхгүйгээр өөр өөр материалтай түлшний үүрийн нейтроник анализыг гүйцэтгэсэн. Үнэн хэрэгтээ янз бүрийн хөргүүрийн дулаан зайлуулах чадамж ялгаатай байдгаас түлшний үүрийн боломжит алхмын хэмжээ өөр байж болно. Энэ хэсэгт, тогтвортой төлөвт дулаан дамжуулах тооцооллыг гүйцэтгэн түлшний үүрийн алхмын хамгийн бага утгыг олоод, ийм алхамтай түлшний үүрийн NB-ийг тооцоолно.

Энэхүү анализыг зөвхөн шингэн хөргүүртэй түлшний үүрт гүйцэтгэсэн. Энэ тохиолдолд ослын нөхцөлд ч байгалийн эргэлтээр дулааныг идэвхгүйгээр зайлуулах боломжтой гэж таамагласан. Физикийн олон бодлогыг бодох модулиуд бүхий COMSOL 5.4 программын ламинар (үелсэн) урсгалаар дулаан дамжих хавсарсан модулийн хоёр хэмжээст тэнхлэгийн симметр геометрт дулаан зайлуулах анализыг гүйцэтгэсэн.

Хоёр хэмжээст тэнхлэгийн симметр геометрт анализ хийхийн тулд зөв зургаан өнцөгт хэлбэртэй түлшний үүрийг цилиндр хэлбэрт хувиргах шаардлагатай, ингэхдээ уг хоёр хэлбэрийн түлшний үүр адил эзэлхүүнтэй байхаар цилиндрийн эффектив радиусыг тооцож олно. Дулаан зайлуулах анализын тооцооллын геометр болон хилийн нөхцлийг Зураг 1.77-д харуулав.



Зураг 1.77. Дулаан зайлуулах анализын тооцооллын геометр

Нэг үүрийн үйлдвэрлэх чадлыг SFR-ийн дулааны дундаж шугаман хурдын утгыг (23 кВт/м (Ref. 17)) ашиглан Тэг.2-оор үнэлсэн.

$$P_{pin.ave.lin} H_f = P_{pin.tot} \quad (2)$$

Түлшний үүрийн чадлын нягтын хамгийн их утгыг олохын тулд үүрийн босоо тэнхлэгийн дагуу чадал косинус хуулиар, харин радиал тэнхлэгийн дагуу Бессел функцаар түгэхийг ашиглан Тэг.3-7-оор үнэлэв. Энд, тооцооллыг хялбарчлахын тулд реакторын голомтын экстраполяци хийгдсэн зайг үл тооцов.

$$P_{den}(r, z) = P_{den.max} J_0 \left(\frac{2.4046r}{R_f} \right) \cos \left(\frac{\pi z}{H_f} \right) \quad (3)$$

$$P_{pin.tot} = \int_{V_{pin}} P_{den}(r, z) dV = \int_0^{R_f} P_{den.max} J_0 \left(\frac{2.4046r}{R_f} \right) r dr \int_{-H/2}^{H/2} \cos \left(\frac{\pi z}{H_f} \right) dz \int_0^{2\pi} d\varphi =$$

$$4H_f R_f^2 P_{max} J_1(2.4046) / 2.4046 \quad (4)$$

$$P_{pin.ave.lin} H_f = 4H_f R_f^2 P_{den.max} J_1(2.4046) / 2.4046 \quad (5)$$

$$P_{den.max} = \frac{2.4046 P_{pin.ave.lin}}{4R_f^2 J_1(2.4046)} \quad (6)$$

$$P_{den.max} = \frac{2.4046 \cdot 23 \text{ kW/m}}{4(0.45 \text{ cm})^2 J_1(2.4046)} = 1315 \frac{W}{cc} \quad (7)$$

Түлшний үүр дэх чадлын нягтын хамгийн их утгыг ашиглан Тэг.8-аар илэрхийлэгдэх чадлын нягтын түгэлтийг дулаан дамжуулах анализын дулааны үүсгүүр болгон ашигласан:

$$P_{den}(r, z) = 1315 \cdot J_0 \left(\frac{2.4046r}{R_f} \right) \cos \left(\frac{\pi z}{H_f} \right); \quad [W/cc] \quad (8)$$

Түлшний үүрийн өндөр 200 см болно. Түлш, ODS бүрээс, хөргүүр материалын дулааны физикийн шинж чанаруудыг өмнөх судалгаанаас[12,18,19] авсан. 1 атм гадаад даралттай Na, Pb, Pb-Bi хөргүүртэй түлшний үүрийн дулаан зайлуулах анализыг гүйцэтгэв.

Хүснэгт 1.27-д дулаан дамжуулах анализын тооцооллын нөхцлийг харуулав. Энд, T_{in} ба v_{in} нь хөргүүрийн оролтын температур болон хурд болно.

Хүснэгт 1.27. Дулаан дамжих анализын тооцооллын нөхцөл

Coolant	T_{in} (K)	v_{in} (m/s)
Pb	673	2
PbBi	573	2
Na	640	10

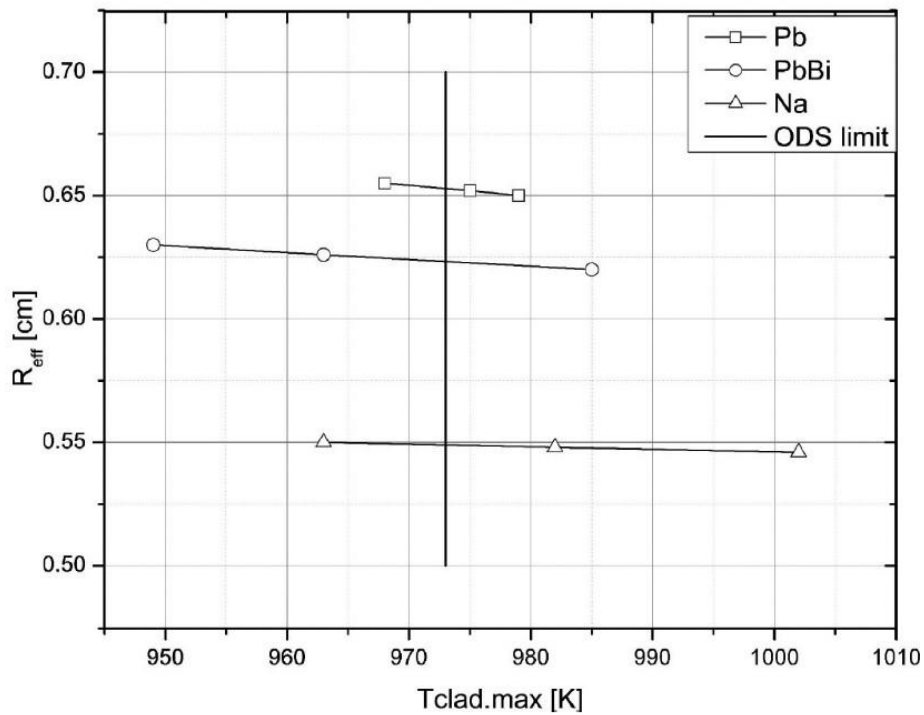
Бүрээсийн хамгийн их температурыг олох дулаан зайлуулах тооцоолол бүрт түлшний үүрийн эффектив радиусыг өөрчлөнө. Түлш болон хөргүүрийн өөр өөр хослолоос тогтсон түлшний үүрт дулаан дамжуулах анализ гүйцэтгэн өөр өөр эффектив радиустай түлшний үүрийн бүрээсийн хамгийн их температурын утгыг гарган авсныг Хүснэгт 1.28-д харуулав. Бүрээсийн хамгийн их температур ($T_{clad,max}$) нь ижил хөргүүртэй үүрийн түлшний материалаас хамаарахгүй байна; харин, энэ нь хөргүүрээс хамаарч байна.

Энэ хамгийн их температурын утга болон үүрийн эффектив радиусын хоорондох холбоог ашиглан, ODS гангийн хамгийн их температур 973 К-д хязгаарлагдахыг тооцон түлшний үүрийн хамгийн бага эффектив радиусыг тодорхойлсон (Зураг 1.78). Үр дүнгээс харвал, натри нь Pb, Pb-Bi материалаас илүү дулаан зайлуулах чадвартай тул Na хөргүүртэй түлшний үүрийн алхам нь хамгийн бага байна. Бүрээсийн хамгийн их температур нь түлшний ижил дулааны үүсгүүртэй түлшний материалаас үл хамаарч байна. Гэхдээ, бүрээсийн хамгийн их температур нь хөргүүр материалаас хамаарч байна, учир нь тэдний дулаан зайлуулах чадвар нь ялгаатай юм.

Хүснэгт 1.28. Өөр өөр эффектив радиустай түлшний үүрийн бүрээсийн хамгийн их температурын утга

Coolant	Pb			Coolant	PbBi			Coolant	Na		
	Fuel	UN	UZr		UO ₂	Fuel	UN		UZr	UO ₂	Fuel
R_{eff}^a (cm)	$T_{clad,max}$ (K)			R_{eff}^a (cm)	$T_{clad,max}$ (K)			R_{eff}^a (cm)	$T_{clad,max}$ (K)		
0.650	979	979	979	0.620	985	985	985	0.546	1002	1002	1002
0.652	975	975	975	0.626	963	963	963	0.548	982	982	981
0.655	968	968	968	0.630	949	949	949	0.550	963	963	962
Minimum effective fuel cell radius (cm) (from Fig. 5)											
0.653				0.623				0.549			
Minimum fuel pin pitch (cm)											
1.244				1.187				1.046			

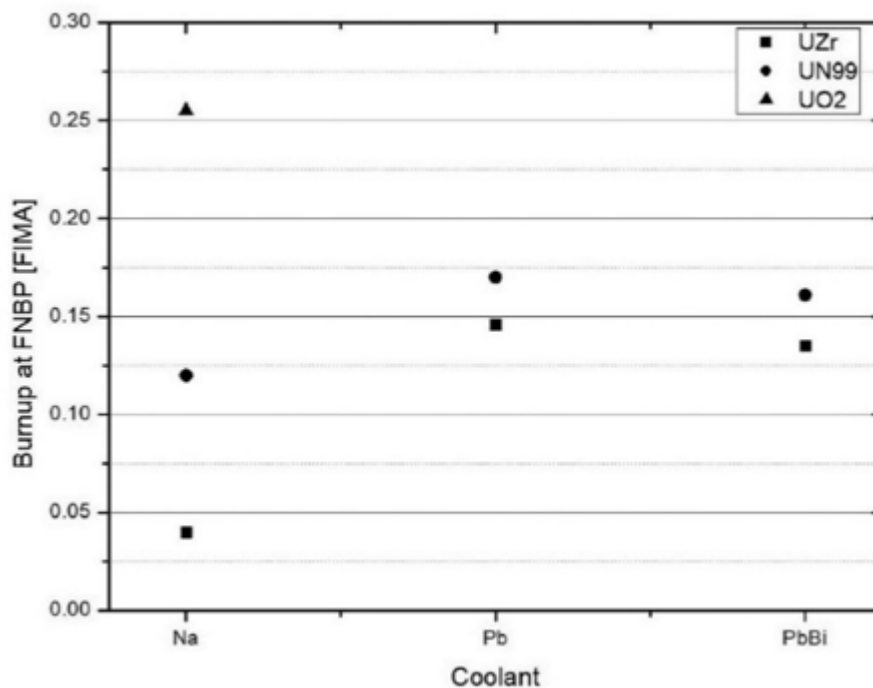
^a R_{eff} = Effective pin radius.



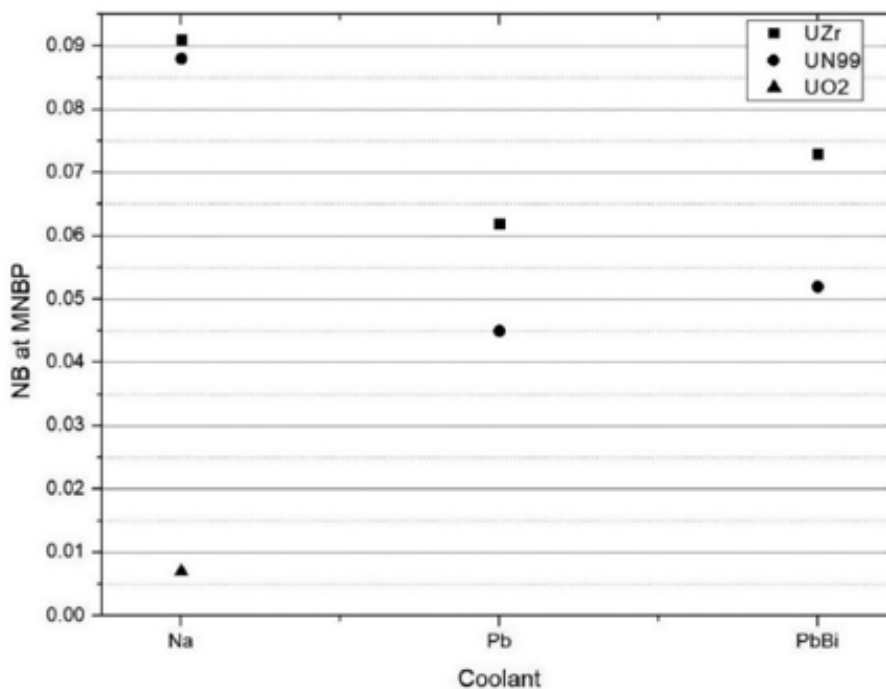
Зураг 1.78. Түлшний үүрийн хамгийн бага эффектив радиус

Тохиромжтой алхамтай түлшний үүрийн нейтроны тооны тэнцвэрийн анализ

Энэ хэсэгт, өмнөх 1.5.1 хэсэгт гарган авсан хамгийн бага алхамтай түлшний үүрийн нейтроны тооны тэнцвэрийн анализыг гүйцэтгэж, түлшээ үржүүлэн шатаах горимыг хангах түлш болон хөргүүрийн хамгийн сайн хослолыг олно. Нейтроник анализын тооцооллын нөхцөл болон үүрийн геометр хэмжээ нь өмнөх хэсэг II-т тайлбарласантай адил болно. Гол ялгаа нь түлшний үүрийн алхам хамгийн бага тохиромжтой утгатай болно. Энд гелий хий хөргүүртэй түлшний үүрт дулаан зайлуулах анализыг гүйцэтгээгүй учраас хамгийн бага алхамтай түлшний үүрийн NB анализыг Na, Pb, Pb-Bi гэсэн гурван өөр хөргүүртэй, ялгаатай түлштэй, хязгааргүй түлшний үүрт гүйцэтгэсэн. Үр дүнг боловсруулах процедур нь хэсэг өмнө нь өгүүлсэнтэй адил ба хамгийн бага шаталт эсвэл FNBP ба MNBP дэх NB-ийн утгыг Зураг 1.79 ба 1.80-д харуулав. Зураг 1.79-д хамгийн бага алхамтай метал түлштэй үүрийн хамгийн бага шаталт нь бусад хослол бүхий түлшний үүртэй харьцуулахад хамгийн бага байна. Түүнчлэн, янз бүрийн хөргүүртэй метал түлштэй үүрийн NB утга үргэлж өндөр байна. Эдгээр үр дүн нь метал түлштэй үүрийн нейтроны спектр “хатуу” байдгаас шалтгаална. Тохиромжтой алхамтай исэл түлштэй үүрийн хувьд түлшээ үржүүлэнгээ шатаах горим нь зөвхөн натри хөргүүртэй тохиолдолд хангагдаж байна. Өмнөх хэсэг II-т хязгааргүй үүр бүрийн түлш-хөргүүрийн эзлэхүүний харьцаа адил байсан. Харин, энэ хэсэгт түлшний үүрийн алхам нь өмнөх хэсэг гарган авсан үр дүнд үндэслэн ялгаатай юм.



Зураг 1.79 бага шаталт эсвэл FNBP дэх NB-ийн утга



Зураг 1.80 бага шаталт эсвэл MNBP дэх NB-ийн утга

Энэ нь түлш-хөргүүрийн эзлэхүүний харьцаа нь хамгийн бага алхамтай натри хөргүүртэй үүрт хамгийн их утгатай байна. Түлшээ үржүүлэнгээ шатаах ажиллагааны горимыг хангахын тулд натри хөргүүртэй метал түлш нь хамгийн сайн сонголт байна. Учир нь энэ тохиолдолд хамгийн бага шаталт болон хамгийн өндөр NB утгатай байна. Түүнчлэн, түлшээ үржүүлэнгээ шатаах горим хангах том оврын SFR-ууд дотроос исэл түлштэй нь хамгийн сүүлийн сонголт байх нь ээ. Том голомттой реакторын хувьд, голомтоос алдагдах

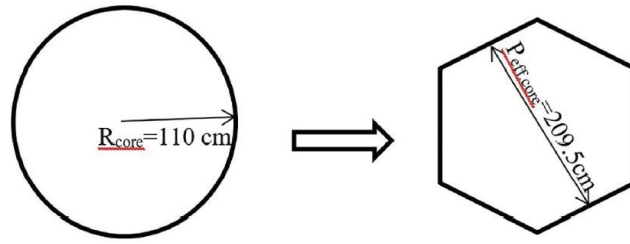
нейтроны алдагдлыг үл тооцож болно. Иймд метал түлштэй, Na хөргүүрийн хослол нь том оврын, түлшээ үржүүлэн шатаах реакторын хувьд хамгийн сайн нь байна. Харин NB-ийн утгад үндэслэн дараагийн сонголтуудыг авч үзвэл метал түлштэй Pb-Bi хөргүүртэй болон баяжуулсан нитрид түлштэй Na хөргүүртэй голомтууд байна.

1.5.4 Нейтроны алдагдалтай голомтын нейтроник үзүүлэлтүүд

Өмнөх бүх NB анализыг хязгааргүй түлшний үүрт гүйцэтгэсэн ба энд нейтроны алдагдлыг тооцоогүй ба Тэг.1-д $L = 0$ гэж авсан. Эдгээр үр дүн нь нейтроны алдагдлыг үл тооцох том оврын реакторт харгалзана. Харин жижиг модулар реакторт нейтроны алдагдал нилээд нөлөөтэй. Иймд энэ хэсэгт нейтроны алдагдлыг тооцон нейтроник шинж чанарыг харьцуулах зорилт тавив.

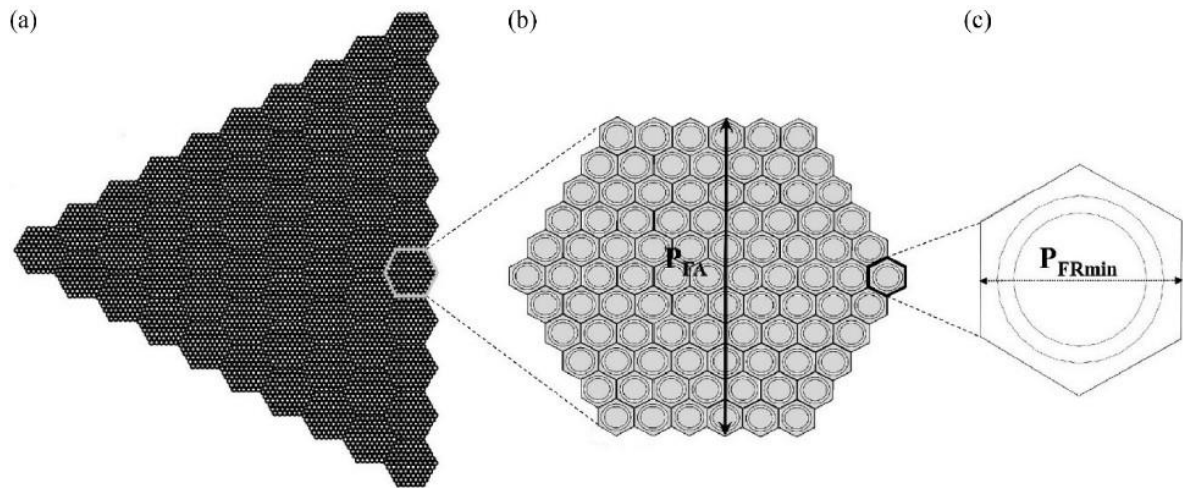
Эхлээд хамгийн бага алхамтай, өөр өөр хөргүүртэй, 200 см өндөртэй түлшний үүрээс тогтсон нүцгэн голомтын дизайныг хийсэн. Голомтын радиусыг $R/H=0.55$ харьцаанаас үнэлэхэд 110 см байна. Ийм харьцаа бүхий цилиндр нь хамгийн бага эзлэхүүнтэй байх ба голомтын хамгийн их температурын утга хамгийн бага[24] байдаг. Энэ харьцаа нь идэвхгүй аюулгүй өндөр температурын хийн хөргүүртэй реакторын голомтын дизайнд мөн хамгийн тохиромжтой болохыг олсон байдаг. Түүнчлэн, голомтын эффектив алхамыг 110 см голомтын радиусаас үнэлэхэд 209.5 см байна. Зураг 1.81-д цилиндр болон зөв зургаан өнцөгт голомтын хөндлөн огтлолыг харуулав. Голомтын эффектив алхам болон түлшний үүрийн хамгийн бага алхамын утгыг ашиглан голомтын түлшний эвлүүлгийн латтисийн хэмжээ болон үүний алхамыг тодорхойлсон. Эхлээд, латтисын хэмжээг сонгон голомтын эффектив алхам ашиглан түлшний эвлүүлгийн алхамыг олно. Тэгээд түлшний эвлүүлийн латтисийн хэмжээг эвлүүлгийн алхам болон түлшний үүрийн хамгийн бага алхамд үндэслэн тодорхойлно.

Хэрэв түлшний эвлүүлгийн хэмжээ тэгш тоогоор тодорхойлогдвол анх сонгосон тоогоо дахин өөрөөр сонгож дээрх үйлдлийг давтан гүйцэтгэнэ. Эвлүүлгийн хэмжээ сондгой тоогоор тодорхойлогдсон ч хэрэв голомтын латтис дэх түлшний эвлүүлгүүд хаа нэгтээ давхцах бол дээрх үйлдлийг дахин шинээр гүйцэтгэн голомтын латтисийн хэмжээг дахин өөрөөр сонгох шаардлагатай. Энэ мэтээр голомтын латтисийн хэмжээг хэд хэдэн удаа сонгосны дараа хамгийн тохиромжтой хэмжээг олсныг Хүснэгт 1.29-д харуулав. Голомт, түлшний эвлүүлэг, түлшний үүрийн геометрийн хөндлөн огтлолыг Зураг 1.82-д харуулав. Түлшний үүрийн хамгийн бага алхам натри хөргүүртэй төгсгөлөг голомтод хамгийн бага учраас голомт дэх түлш, хөргүүрийн харьцаа хамгийн өндөр буюу 4.28 байна.



Зураг 1.81-д цилиндр болон зөв зургаан өнцөгт голомтын хөндлөн огтлол
Хүснэгт 1.29. Голомтын латтисийн хэмжээг хэд хэдэн удаа сонгосны дараа хамгийн
тохиромжтой хэмжээ

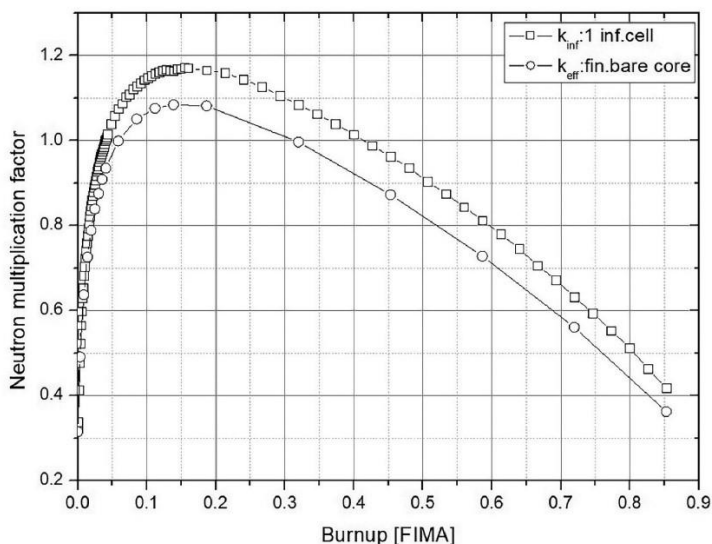
$H_{core} = 200 \text{ cm}$ $R_{core}/H_{core} = 0.55, R_{core} = 110 \text{ cm}$ Effective core pitch, $P_{eff,core} = 209.5 \text{ cm}$			
Coolant	Na	Pb	PbBi
FA array in core	21×21	15×15	21×21
Minimum fuel pin pitch (cm)	1.046	1.244	1.187
Rod array in FA	13×13	15×15	11×11
FA pitch (cm)	11.9	16.22	11.4
Pin pitch/pin diameter	1.16	1.38	1.32
$V_{fuel}/V_{coolant}$	4.28	1.19	1.51



Зураг 1.82. Голомт, түлшний эвлүүлэг, түлшний үүрийн геометрийн хөндлөн огтлол

Хэд хэдэн янзын шаталттай хязгааргүй түлшний үүр дэх түлшний материалын найрлагыг ашиглан нүцгэн төгсгөлөг голомтын критик байдлын тооцооллыг гүйцэтгэсэн. Жишээ болгоод ийм критик байдлын тооцооллоос олсон нейтрон үржүүлэгч фактор, нейтрон алдагдахгүй байх магадлал (P_{NL}) ба NB-ийн муруйг хязгааргүй түлшний үүрийнхтэй харьцуулж Зураг 1.83-1.86-д харуулав. Түлш болон хөргүүрийн материалын төрөл бүрийн хослолоос бүрдэх түлшний үүр бүрд P_{NL} -ийг төгсгөлөг голомтын нейтрон үржүүлэх эффектив факторыг хязгааргүй түлшний үүрийн нейтрон үржүүлэх хязгааргүй факторт харьцуулсан харьцаагаар тооцоолно. Дээр харуулсан баяжуулсан нитрид түлш болон натри хөргүүрээс тогтох түлшний үүр бүхий нүцгэн төгсгөлөг реакторын голомтын

нейтрон үржүүлэх факторын түлшний шаталтаас хамаарч өөрчлөгдөх өөрчлөлтийг хязгааргүй үүрийнхтэй харьцуулжээ. Түлш болон хөргүүрийн бусад хослолоос тогтох тохиолдлуудад нейтрон үржүүлэх факторын бусад харьцуулалтыг мөн гарган авсан. Эдгээр үр дүн нь нейтроны алдагдлын улмаас төгсгөлөг голомтод нейтроны тоо буурдгийг батлан харуулна.



Зураг 1.83 Өөр өөр хөргүүртэй, баяжуулсан нитрид түлштэй нүцгэн төгсгөлөг голомтын P_{NL} -ийн шаталтаас хамаарч өөрчлөгдөх өөрчлөлт

Зураг 1.83-д өөр өөр хөргүүртэй, баяжуулсан нитрид түлштэй нүцгэн төгсгөлөг голомтын P_{NL} -ийн шаталтаас хамаарч өөрчлөгдөх өөрчлөлтийг харьцуулан харуулжээ. Нейтроны алдагдлыг харуулах олон төстэй графикийг харуулахаас зайлсхийхийн тулд ижил шаталттай нүцгэн төгсгөлөг голомтуудын P_{NL} -ийн утгуудыг харьцуулах нь илүү дээр болно. Түлш шатахын хэрээр хүнд металын хэмжээ буурч, хуваагдлын бүтээгдэхүүн хуримтлагдах учраас нейтроны алдагдлын хэмжээ хугацаа өнгөрөх тусам алгуур ихэсч байна. Хэдийгээр бусад голомтын тохиолдолд P_{NL} -ийн үр дүнг харуулаагүй ч ерөнхий хандлага нь адил, түлшний төрлөөс үл хамаарч байсан. Түүнчлэн, хуваагдахыг шингээх урвалын хурдны харьцаа илүү хатуу спектртэй голомтод нэмэгддэг.

2 БҮЛЭГ. УСТӨРӨГЧИЙН ТЕХНОЛОГИД СУУРИЛСАН НОГООН ХӨГЖЛИЙН БОДЛОГЫН НЭГЭН ШИЙДЭЛ

2.1 Ногоон хөгжлийн бодлогын шийдэл-устөрөгчийн эрчим хүч

Экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн эрчим хүч нь дэлхийн дулаарлын эх үүсвэр нүүрстөрөгч ялгаруулахгүй ногоон хөгжлийн бодлогыг хэрэгжүүлэх үндэс болж, монгол хүн экологийн тэнцвэртэй аюулгүй орчинд амьдарч, ажиллах нөхцөлийг бүрдүүлэх шаардлагатай. Манай улсын түүхий нүүрсэнд тулгуурласан эрчим хүчний салбарыг экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн эрчим хүчинд шилжүүлснээр хот суурини газрын агаарын бохирдол утааны асуудлыг бүрэн шийдвэрлэх. Өндөр температурын гелийн модуль реакторын завсрын дулаан солилцуурын 900° температуртай гели хийг ашиглан термохимийн аргаар усыг задлах эсвэл нүүрсийг уурын хувиргалтад оруулж устөрөгч үйлдвэрлэнэ.

Цөмийн энерги ашиглан ус ба нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэх судалгаа нь ойрын ирээдүйн манай улсад түүхий нүүрсний хэрэглээг халах устөрөгчийн түлшний элементийн технологи бүхий хүрээлэн буй орчинд зөвхөн ус ялгарах экологийн үнэмлэхүй цэвэр альтернатив устөрөгчийн эрчим хүч буюу устөрөгчийн эдийн засгийг хөгжүүлэх ногоон хөгжлийн бодлогын нэгэн шийдлийг дэвшүүлж байгаа юм.

Устөрөгчийн эрчим хүч нь цөмийн болон нарны энергийг ашиглан ус, нүүрс зэрэг устөрөгч агуулсан байгалийн түүхий эдээс устөрөгч гарган авах, түүнийг хадгалах, түлш болгон ашиглах, энерги дамжуулах технологиудын цогцолбор юм. Иймээс устөрөгчийн эрчим хүч нь устөрөгчийг үйлдвэрлэх, хадгалах, тээвэрлэх, хүмүүсийн ахуй, тээврийн дэд бүтэц, төрөл бүрийн үйлдвэрлэлийн чиглэлээрх энергийн хэрэглээнд зориулсан хэрэгсэл шиг ашиглахад үндэслэсэн хүн төрөлхтний эрчим хүчний үйлдвэрлэл, хэрэглээний эдийн засаг, экологийн чиглэл юм. Энерги агуулагчийг гарган авах альтернатив аргуудын нэг бол устөрөгчийн эрчим хүч юм. Устөрөгчийн түлш олборлох хувилбаруудыг боловсруулах ажлыг эрдэмтэд идэвхтэй эрхэлж байна. Устөрөгчийн эрчим хүчний үндсэн шийдэх асуудал нь устөрөгчийг гарган авахад бусад энерги агуулагч газрын тос, цахилгаан, хий зарцуулах шаардлагатай байдагт оршино. Мэргэжилтнүүд эдгээр шийдэх асуудлын чиглэлүүдийг арилгах боломжийг олохоор зүтгэж байна. Жишээ нь уснаас устөрөгч гарган авах асуудалд анхаарлаа хандуулж байна. Дэлхийн далай тэрбум тонноор хэмжигдэх устай гэдгийг тооцвол устөрөгчийн түлш гаргахад зориулсан усны нөөц хязгааргүй юм. Устөрөгчийн эрчим хүчний давуу тал бол энергийн альтернатив эх үүсвэрийг гарган авах зам дахь бэрхшээлийг давах боломж, энерги агуулагчийн ашиглалтын болон технологийн өндөр

үзүүлэлт юм. Зуурамтгай чанар багатай учраас устөрөгчийг дамжуулах хоолойгоор ямар ч асуудалгүй тээвэрлэнэ. Түүнийг шингэрүүлсэн болон хий төлөв байдалд хадгалж болно. Тэр нь хөнгөн, удаан хадгална.

Устөрөгчийн эрчим хүч ($\text{Ус} + \text{цөмийн энерги} \rightarrow \text{H}_2$; $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{цэвэр энерги} + \text{Ус}$)



Зураг 2.1. Устөрөгчийн эрчим хүчний үзэл баримтлал

Устөрөгч альтернатив энерги зөөгч, түгээмэл түлш болох нь дараах учир шалтгаантай.

Үүнд:

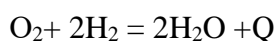
- **Нэгдүгээрт**, устөрөгч дулаан ялгаруулах чадамж ихтэй: 1кг устөрөгчийг шатаахад 120 МЖ дулааны энерги гарган авах бол харин 1 кг бензин шатаахад зөвхөн 47 МЖ, 1кг Багануурын нүүрс шатаахад 14 МЖ дулааны энерги ялгарна;
- **Хоёрдугаарт**, Түлшний элементийн АҮК цахилгааны энерги үйлдвэрлэхэд 75% хүрнэ. Мөн дулаан ялгарахыг тооцвол түлшний элементтэй системийн нийт АҮК 90-95 % болно. Дулааны цахилгаан станцын АҮК -40%, цөмийн цахилгаан станцын АҮК- 33% байдаг;
- **Гуравдугаарт**, устөрөгч орчлон ертөнц, Дэлхий дээр хамгийн их тархсан элемент;
- **Дөрөвдүгээрт**, устөрөгчийн түлшний элемент экологийн цэвэр. Устөрөгч шатах үед цэвэр ус ялгарах ба ямар нэг хортой хаягдал агаар мандалд хаягдахгүй.
- **Тавдугаарт**, устөрөгчийг дамжуулах хоолойгоор харьцангуй хялбар тээвэрлэх, мөн хадгалах, хуримтлуулах (хий буюу шингэн төлөвт) боломжтой. Устөрөгчийг дамжуулах үндсэн хоолойгоор тээвэрлэх нь цахилгаан дамжуулахаас 3-5 дахин бага зардалтай.

- **Зургаадугаарт**, Түлшний элементийг өргөн ашиглах нь өндөр өртөгтэй цахилгаан дамжуулах шугамаас хамааралгүй болгоно.
- **Долоодугаарт**, устөрөгч эрчим хүчинд зөвхөн энерги зөөгчөөр ашиглагдах биш металлурги, химийн болон нефтхимийн үйлдвэр зэрэг үйлдвэрийн бусад салбарт өргөн хэрэглэгдэнэ.

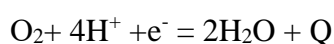
Устөрөгч ашиглалтын дутагдалтай талуудтай. Ердийн нөхцөлд устөрөгчийн нягт маш бага – 0,09 кг/м³. Энэ нь байгалийн хийн нягтаас 8 дахин бага, шингэн устөрөгчийн нягт бага 70 кг/м³, буцлах температур бас бага 20° К байдаг. Устөрөгчийн агуулалтын маш өргөн завсарт агаартай тэсрэх аюултай холимог (холимог дахь устөрөгчийн эзлэхүүний агуулалт 4 %-оос 75% хүртэл)үүсгэнэ. Агаарын даралтын үед устөрөгчийг шингэрүүлэхэд маш нам температур (-252°С) шаардлагатай. Иймд устөрөгчийг шингэрүүлэхийн тулд энерги их зарцуулагдах ба харин түүнийг үнэтэй, нарийн хийцтэй криостатад хадгална.

Устөрөгчийг дотоод шаталтат хөдөлгүүр, дулааны цахилгаан станцын зууханд шууд шатааж болох ба мөн түлшний элементийн тусламжтай шатаана.

Устөрөгчийг шууд шатаах үед шатах химийн урвалын үр дүнд ус үүснэ:



Түлшний элемент нь *цахилгаан химийн урвалын энергийг цахилгаан энергид шууд хувиргадаг* төхөөрөмж юм. Түлшний элементийн катод дээр гаднаас өгөх хүчилтөрөгч ба мембранаар нэвтрэх протоноос ус үүсэх урвалыг катод дээр катализаторын оролцоотой гүйдэл үүсгэх электронууд явуулах боломжийг олгоно:



Үүнд: Q-урвалын дулааны эффект.

Ийнхүү устөрөгчийг шууд шатаасан ч устөрөгчийн түлшний элементэд ашигласан ч агаар мандалд ус л хаягдах учраас устөрөгчийн эрчим хүч байгаль орчинд үнэмлэхүй цэвэр эрчим хүч юм.

Устөрөгч ашиглалтын дутагдалтай талууд. Үүнд:

- Ердийн нөхцөлд устөрөгчийн нягт маш бага – 0,09 кг/м³. Энэ нь байгалийн хийн нягтаас 8 дахин бага, шингэн устөрөгчийн нягт бага 70 кг/м³,
- Буцлах температур бас бага 20° К байдаг.
- Устөрөгчийн агуулалтын маш өргөн завсарт агаартай тэсрэх аюултай холимог (холимог дахь устөрөгчийн эзлэхүүний агуулалт 4 %-оос 75% хүртэл) үүсгэнэ.

- Агаарын даралтын үед устөрөгчийг шингэрүүлэхэд маш нам температур (-252°C) шаардлагатай. Иймд устөрөгчийг шингэрүүлэхийн тулд энерги их зарцуулагдах ба харин түүнийг үнэтэй, нарийн хийцтэй криостатад хадгална.

Өнөөдөр нүүр сүстөрөгчийн түүхий эд-дэлхийн эдийн засгийн үндэсэн эрчим хүчний нөөц байна. Нүүрс устөрөгчийг шатаахад үндэслэсэн эдийн засагт тэдгээрийн хязгаарлагдмал нөөц, геополитикийн хүчин зүйлээс хүчтэй хамааралтай, хүрээлэн буй орчны бохирдол, техногенны сүйрэл, энерги зөөгчийн өндөр үнэ зэрэгтэй холбоотой олон дутагдал байна. Олборлож байгаа нүүр сүстөрөгчийн ихэнх хэсэг энергийн багтаамж ихтэй өндөр температурын технологийн процесст ашиглах дулаан гарган авахад болон төрөл бүрийн тээврийн хэрэгслийн түлшинд зарцуулагдаж байна.

Цөмийн эрчим хүчний альтернатив шийдэл юм [1, 2, 3, 4, 6, 11,12,13]. Олон оронд цахилгаан эрчим хүчний үйлдвэрлэлд цөмийн эрчим хүчний эзлэх хувь хэдэн аравт хүрчээ. Дэлхийн хамтын нийгэмлэгийн техникийн хөгжлийн өөр ирээдүйтэй стратегийн чиглэл нь устөрөгчийг ашигтай, экологийн цэвэр энергийн үүсгүүр болгон өргөн ашиглах шилжилт юм. Устөрөгчийн дэлхийн хэрэглээний урьдчилсан үнэлгээ 2050 онд жилд 200-300 сая тонн, харин 2100 онд устөрөгчийн зах зээлийн цар хэмжээ жилд 800-1000 сая тонн болно.

Цөмийн эрчим хүчний шинэ чиглэл бол өндөр температурын хийн реакторыг энергийн багтаамж ихтэй технологийн процессыг хангахад ашиглах ба устөрөгч үйлдвэрлэж амьдрал дээр устөрөгчийн шавхагдашгүй эх үүсвэр бий болно. Энэ нь дэлхий дахины эрчим хүчний аюулгүй байдал, эрүүл мэндийг бататгах, бүх хүний амьдралын нөхцөл, сайн сайхан аж байдлыг сайжруулахад зохих ёсны хувь нэмэр оруулна. Геополитикийн хүчин зүйлсийн нөлөөг бууруулах, эрчим хүчний нөөцийн хангалтын бүс нутгийн тэгш биш үр дагаврыг даван туулах боломж олгох, гараг дээрх уур амьсгалын өөрчлөлтөд нөлөөлөх энерги зөөгчийн үүргийг бууруулах боломж олгоно. Устөрөгчийн эрчим хүчний хөгжил нийгмийн эдийн засгийн хэв маягийг өөрчлөж, инновацийн хөгжлийн энэ чиглэл нь устөрөгчийн эдийн засаг гэсэн хамгийн ерөнхий тодорхойлолт авсан болно.

2016 онд Парисын хэлэлцээр албан ёсоор хүчин төгөлдөр болов. Уг хэлэлцээр нь уур амьсгалын өөрчлөлтийн нөлөөг сааруулж, хүлэмжийн хийн ялгарал багатай хөгжлийг бий болгох, дэлхийн дулаарлыг аж үйлдвэржилтийн өмнөх үетэй харьцуулахад хоёр хэмээс хэтрүүлэхгүй байж 1,5 хэмд хязгаарлах амлалтыг дэвшүүлсэн түүхэн ач холбогдолтой олон улсын хэмжээний баримт бичиг юм. Энэ хэлэлцээр нь Киотогийн протоколын дараах дэлхийн цаг уурын хууль ёсны хоёр дахь хэлэлцээр болсон билээ. Шинэ хэлэлцээрт 2020 оноос хойших дэлхийн цаг уурын өөрчлөлтийн үйл ажиллагааны зохицуулалтыг

хамруулсан бөгөөд хэлэлцээрийн хүрээнд дэлхий даяар хүлэмжийн хийн ялгаралтыг богино хугацаанд бууруулж, XXI зууны сүүлийн хагас гэхэд хүлэмжийн хийн ялгаралтыг тэглэх зорилттой.

Устөрөгчийн эрчим хүч буюу устөрөгчийн цогцолборт цөмийн болон нарны энергийг ашиглан ус, нүүрс зэрэг устөрөгч агуулсан байгалийн түүхий эдээс устөрөгч гарган авах, түүнийг хадгалах, түлш болгон ашиглах, энерги дамжуулах технологиуд багтана.

Устөрөгчийн технологийн эдийн засгийн хамтын ажиллагааны олон улсын удирдах хороо 2008 оны 4-р сард Дэлхийн хөгжингүй орнуудын устөрөгчийн технологийн ОУ-ын хоёрдугаар хуралдааныг зохион байгуулав. Хуралдаанд оролцогчид өнөөдөр эрчим хүчний хэрэглээ байнга өсөн нэмэгдэж байгаатай нэгэн зэрэг байгаль орчинд сөрөг нөлөөг багасгах, дэлхийн эдийн засгийн тогтвортой хөгжлийг хангах шаардлагатай өнөө үед устөрөгчийн технологи бол “ эрчим хүчний хэтийн хөгжлийн нэг чиг хандлага мөн” гэж тодорхойлсон. Эрчим хүч, тээврийн салбарт устөрөгчийн технологийг нэвтрүүлж байгаа олон арван томоохон үзүүлэх төслүүдийг дурдаад ойрын жилүүдэд тэдгээр бараанууд зах зээлд гарч эхэлнэ гэж мэдээлж байна. Энэ хуралдаанд АНУ, ОХУ бусад олон орны төлөөлөгчид устөрөгчийн технологийг хөнжүүлэх чиглэлээр хийж байгаа ажлын талаар мэдээлэл хийж, зөвхөн нэг хэсгийн хуралдаан дээр 36 илтгэл тавьсан байна. Хуралдаанд тавьсан илтгэлүүдэд устөрөгчийг үйлдвэрлэх, цэвэрлэх, хадгалах улмаар устөрөгчийн технологийг тээвэр, эрчим хүчний салбарт хэрэглэх, мөн түүнчлэн үйлдвэрлэлийн чиглэлээр мөрдөх аюулгүй ажиллагааны асуудал зэрэг өргөн хүрээтэй олон зүйлийг хөндсөн байна. Устөрөгчийн цахилгаан станцыг барихад Абу-Даби 15 тэрбумыг зарцуулна (“Эрчим хүч & engineering” 2008,¹²). Абу_Дабигийн Эмират сэргээгдэх эрчим хүчний төсөлд 15 тэрбум ам.доллар зарцуулахаар шийджээ. Төсөл нь дэлхийн хамгийн том устөрөгчийн цахилгаан станцыг барих тухай юм. Зөвхөн экологийн цэвэр эрчим хүчээр ажиллах Масдар хотын төслийн нэг хэсэг нь тэр цахилгаан санц болох ёстой. Абу-Дабигийн эмиратын жонон шейх Мохаммед бин Зайед аль Нахаяны мэдэгдсэнээр станцыг энэ жилийн хоёрдугаар сараас эхэн бариулна. Харин ашиглалтад орох хугацаа нь тодорхойгүй. Төслийг Эмиртын улсын Nasdar компани Brithish Petroleum, Rio Tinto компанийн хамт хэрэгжүүлнэ. Шинэ хотын хүн ам нь 15 мянга орчим байхаар төлөвлөжээ. Энэ төслийг хэрэгжүүлэхээр Арабын нэгдсэн Эмират экологийн цэвэр эрчим хүч хэрэглэх талаараа дэлхийн лидер болох ёстой юм байна.

Хөгжилтэй болон хөгжиж буй орнууд дэлхий дахиныг хамарсан дулаарлыг бий болгодог хүлэмжийн нүүрсхүчлийн хий CO₂-г ялгаруулдаггүй, зөвхөн усны уур гаргах экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн эрчим хүчийг хөгжүүлэх үндэсний хөтөлбөр

боловсруулан эрчимтэй хэрэгжүүлж байна. АНУ 2003 онд “Устөрөгчийн ирээдүйн тухай” хууль баталсан, Япон улс 2020 он хүртэл 4 миллиард доллар зарцуулах устөрөгчийн хөтөлбөр амжилттай хэрэгжүүлж устөрөгчийн хөдөлгүүртэй 10 мянган автомашин зах зээлд гаргаж байна. Японы “Тойота”, “Хонда”, “Нисан”, “Мицубиси моторс”, “Судзуки” болон АНУ-ын “Женерал моторс”, “Даймлер Крайслер” зэрэг томоохон автомашин үйлдвэрлэгчид устөрөгчийг гарган авах янз бүрийн арга ашигласан шатахууны станцын төсөлд хамтран ажиллаж байна. Өмнөд солонгос улсын худалдаа, аж үйлдвэр, эдийн засгийн яам 2040 он хүртэл устөрөгчийн эдийн засаг байгуулах төлөвлөгөө 2005 онд батлаж, 2040 онд ДНБ-ийн 8%-ийг устөрөгчийн технологийн тусламжтай үйлдвэрлэхээр тусгажээ. Энэтхэг улс 2005 онд “Устөрөгчийн эрчим хүчний үндэсний төлөвлөгөө” боловсруулж 2020 он хүртэл 5,6 тэрбум долларын хөрөнгө оруулалт хийхээр төлөвлөсөн бөгөөд 2020 он гэхэд 1 сая авто тээврийн хэрэгсэл замд гарч, 1000 МВт чадалтай устөрөгчийн цахилгаан станц байгуулах ажээ. ОХУ 2021 онд ОХУ-д устөрөгчийн эрчим хүчний хөгжлийн үзэл баримтлалаа батлав. Устөрөгчийн эрчим хөгжил үе шаттай. I үе шат (2021-2024 он) устөрөгчийн кластер бий болно. 2024 онд дотоод зах зээлд устөрөгчийн энерги зөөгчийг ашиглахаас гадна устөрөгчийн экспорт 0,2 сая тонн хүрнэ. II үе шат (2025-2035 он) устөрөгч үйлдвэрлэх анхны худалдаан төслийг ашиглалтад оруулж 2035 онд устөрөгчийн экспорт 2—12 сая тонн хүрнэ. Энэ үе шатанд дотоод зах зээлд устөрөгч хэрэглэх лабораторид туршихад зориулсан төслүүдийг хэрэгжүүлж, эдийн засгийн төрөл бүрийн салбар (нефтхими, цахилгаан эрчим хүч, хими ба төмөрлөгийн үйлдвэрлэл, орон сууц нийтийн аж ахуй, тээвэр)-т устөрөгчийг өргөн хэрэглэнэ. III үе шат (2035-2050 он) устөрөгчийн эрчим хүчний дэлхийн зах зээлийн хөгжил өргөн хэмжээтэй болно. 2050 онд дэлхийн зах зээл дэх устөрөгчийн нийлүүлэлт 15-50 сая тонн болно. Сэргээгдэх эрчим хүчний үүсгүүр дээр үйлдвэрлэх үнэ малтмал түүхий эдээс устөрөгч үйлдвэрлэх үнэтэй ойролцоо болно. Ийнхүү устөрөгчийн эрчим хүчний дэлхийн хөгжлийн хандлага нь:

-2020 онд өрсөлдөх чадвартай устөрөгчийн автомашин,

-2030 онд устөрөгчийн удаан хадгалах төхөөрөмж гарч, гэрийн түлшний элементээр цахилгаан үйлдвэрлэх болно.

-2040 онд устөрөгчийн эрчим хүч зонхилох,

-2050 онд устөрөгчийн нисэх онгоц бий болох төлөвтэй байна.

Манай улс ч гэсэн эрчим хүчний энэ альтернатив чиглэлийг сонгон хөгжүүлж, дэлхийн тэргүүлэх орнуудын хөгжлийг угтаж гүйцэх боломжтой.

Манай улс байгалийн хийн нөөцгүй тул нүүрсээ гүн боловсруулан устөрөгч үйлдвэрлэж эрчим хүч, автомашин, газрын тос боловсруулах, хими, хүнсний үйлдвэрийг хангах болон ураны нөөцөө ашигласан ногоон хөгжлийн бодлогыг төгс шийдэх шаардлага гарч байна. Дэлхий нийтээр устөрөгчийн эрчим хүч буюу устөрөгчийн эдийн засагт шилжиж байгаа үйл явдалтай мөр зэрэгзэн орох нь цаг хугацаа хэмнэж, эдийн засгийн алдагдалтай, экологийн хортой түүхий нүүрсний эдийн засгаас устөрөгчийн эдийн засагт шилжих боломж олдох юм. Устөрөгчийн түлшний элемент бүхий автомашины цэнэглэх станц болон цахилгаан, дулаан хангамжийн зориулалттай станцыг хангах устөрөгчийн үйлдвэрлэл, тээвэрлэлт, хадгалалт, хэрэглээний дэд бүтцийг хөгжүүлэх шаардлага гарч байна.

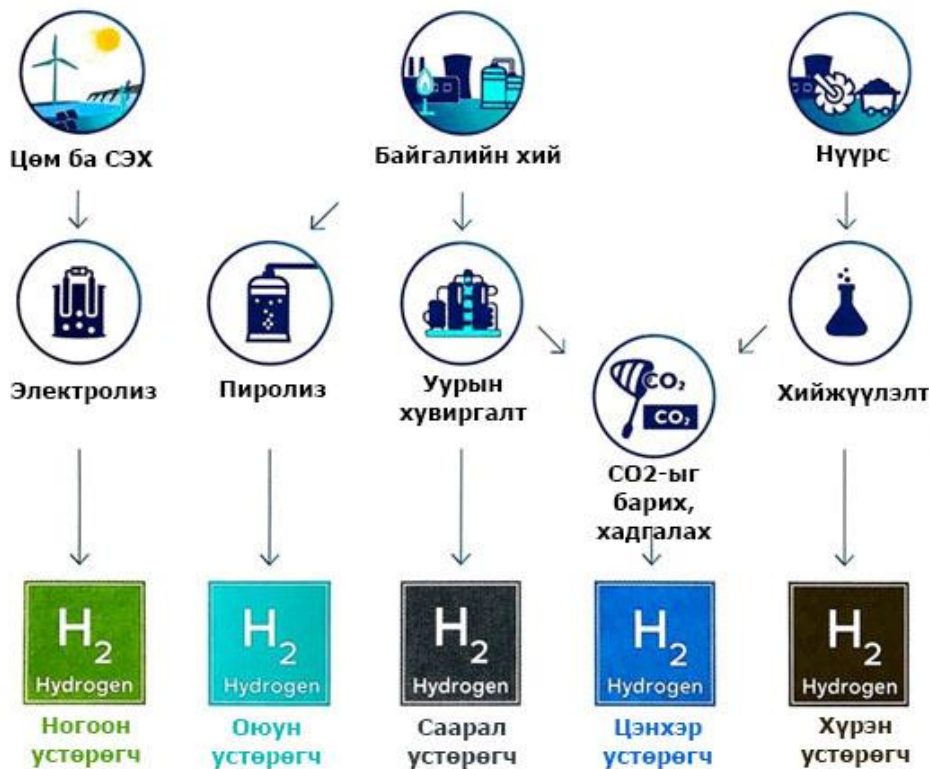
Цөмийн энерги ашиглан үйлдвэрлэх 1 кг устөрөгчийн үнэ 2,3\$ байхад цахилгаан эрчим хүчний сүлжээний цахилгаан ашиглан усны электролизын аргаар үйлдвэрлэх 1 кг устөрөгчийн үнэ 6-7\$, ирээдүйд 4\$ болж буурах, нарны цахилгаан станц ашиглан үйлдвэрлэх 1 кг устөрөгчийн үнэ 10-30\$, ирээдүйд 3-4\$ болж буурах төлөвтэй байна.

Цахилгаан эрчим хүч ашиглан усыг электролизийн аргаар задалж устөрөгч үйлдвэрлэхээс нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэх нь хямд үнэтэй байна. Иймээс нүүрсний нөөцтэй манай улс цөмийн реактороос их температуртай гарах гелийн хийгээр нүүрсний уурын хувиргалт хийж устөрөгч үйлдвэрлэх нь чухал.

Ойрын 10 жилд устөрөгчийн үндсэн үйлдвэрлэгч газрын тос, хийн компаниуд байх төлөвтэй. Гэвч экологийн үүднээс ирээдүй устөрөгч нь нүүрстөрөгч ялгаруулдаггүй цахилгаан эрчим хүчээр үйлдвэрлэгдэх болно. Устөрөгч үндсэндээ аммиак, газрын тосны хүхэргүйжүүлэлт, газрын тосны хөнгөн бүтээгдэхүүн гарган авхад ашиглагдаж байна. Дэлхийн зах зээл дээрх устөрөгчийн эрэлт хэрэгцээ жилд 80 сая тонн орчим байна. Гэвч одоо устөрөгчийг тээвэр, үйлдвэрлэл, халаалтын шинэ энерги агуулагчаар авч үзэж байгаа тул энэ эрэлт хэрэгцээ нэмэгдэх болно. Эдгээр салбарууд саяхныг болтол нүүрстөрөгчгүйжүүлэх асуудал гарцаагүй шаардлагатай биш байв.

Сэргээгдэх эрчим хүчний үүсгүүрийг хялбар өсөлтөөр нүүрстөрөгчийн ул мөрийг багасахгүй гэдэг нь ойлгомжтой болж дэлхийн эрчим хүчний хэлэлцэх асуудалд устөрөгч орох болсон юм. Энэ үед “эрчим хүчний шилжилт” гэдэг ойлголт үүсэв. Үүнийг малтмал түлшний үүсгүүрээс сэргээгдэх эрчим хүчний үүсгүүрт шилжих гэж ойлгож болохгүй. Түлш эрчим хүчний цогцолборын хувирал 30 жилийн дараа хаягдал тэг байх тухай ярих зөв юм. Одоо “устөрөгчийн өнгө”-ний тухай ойлголтыг авч үзье. Нүүрстөрөгчийн хийг барьж авахгүй хийн хувиргалтаар “саарал устөрөгч” үйлдвэрлэх үед 1 кг устөрөгчид CO₂ хаягдал янз бүрийн үнэлгээгээр 9-15 кг (9-15 кг CO₂ /кг H₂) байна. CO₂ –ийг барьж авах хийн

хувиргалтаар “цэнхэр устөрөгч” үйлдвэрлэх үед 1 кг CO₂/ 1 кг H₂ байна. Пиролизоор “оюун устөрөгч” үйлдвэрлэх үед урвалын бүтээгдэхүүн устөрөгч ба хатуу нүүрстөрөгч байна. Сэргээгдэх эрчим хүч ба цөмийн эрчим хүчээр ажиллах төхөөрөмж дээр электролизээр үйлдвэрлэх үед хаягдал (CO₂) байхгүй.

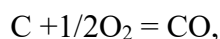


Зураг 2.2. Үйлдвэрлэх аргаас хамаарсан устөрөгчийн өнгө

Манай улсын аж ахуйд чухал хэрэгцээтэй үйлдвэрийн бүтээгдэхүүнийг үйлдвэрлэх өндөр чадамжтай дулаан шаардагдах технологийн процессууд:

Технологийн процесс	Хамгийн тохиромжтой температур, °C
Нефтийн хүнд фракцийг сэргээх, нефтийн элснээс нефтийг ялгах	750
Нефтийн тунгаалт, цэвэрлэлт	850
Хүрэн нүүрсийг уураар хийжүүлэх	800
Чулуун нүүрснээс уураар хийжүүлэх.....	900
Төмрийн хүдрийг шууд сэргээх	900
Усыг термохимийн аргаар задлаж устөрөгч гаргах	900
Метаны уурын хувиргалт.....	830

Хүрэн нүүрснээс устөрөгч үйлдэрлэх энергийн эх үүсвэрт цөмийн станцаас гарах 850°C температуртай гарах гелийн хийг ашиглана. Энэ процесс хоёр үе шаттай явагдана. Эхлээд нүүрсийг хийжүүлнэ (исэлдүүлнэ):



Дараа нь нүүрстөрөгчийн оксидыг нүүрстөрөгчийн диоксид хүртэл усаар исэлдүүлж $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ устөрөгч гарган авна.

Жишээ нь: Багануурын нүүрснээс үйлдвэрлэсэн устөрөгчийг дулаан дамжуулах хоолойгоор тээвэрлэн Улаанбаатар хотын дулаан хангамжийг шийдэх, устөрөгчийн түлшний элемент бүхий автомашиныг цэнэглэх станцуудыг устөрөгчөөр хангах болно.

2.2 Устөрөгчийн шинж чанар.

Элементүүдийн үелэх системийн нэгдүгээр элемент устөрөгчийн атом масс 1.00797 бөгөөд түүнийг анх 1766 онд Г.Кавендыш судалсан. Устөрөгч нь орчлон ертөнцөд хамгийн их тархсан элемент бөгөөд Дэлхийн жингийн 1%-ийг эзэлнэ. Нарны массын 90%-ийг устөрөгч бүрдүүлнэ. Агаар мандлын давхраа, галт уул, газрын гүний хийн найрлагад устөрөгч хий байдалтай дангаар байхаас гадна ус, органик бодис, зарим эрдэс бодисын найрлагад химийн нэгдэл хэлбэртэй оршино. Устөрөгчийн нэгдлүүдээс ус хамгийн их тохиолдоно. Устөрөгчийн атом 1, 2, 3 масс бүхий гурван изотоптой. Хөнгөн устөрөгчийн атом нэг протон, нэг электроноос тогтоно. Устөрөгчийн молекул нь ковалентийн холбоотой хоёр атомаас тогтдог. Нэгдлүүдэд устөрөгч нэмэх ба хасах нэг валенттэй. Шүлтийн металлын нэг адил устөрөгч нь электроноо алдаж протон (H^+)-д шилжих чадвартай. Устөрөгч нь галогены нэг адил электрон нэгдүүлж, H^- анион үүсгэнэ. Иймээс устөрөгч нь исэлдүүлэгч, ангижруулагчийн аль алиных нь шинжийг үзүүлдэг учир шүлтийн металл ба галогены дэд бүлэгт оруулдаг. Жирийн температурт устөрөгч идэвх султай, зөвхөн фтор, хлор мэтийн идэвхтэй металлоидтай нэгдэх урвалд ордог. Харин халаахад устөрөгч ихэнх элементтэй урвалд ордог. Жирийн нөхцөлд фтортой тэсрэлттэй нэгдэнэ. Халаахад буюу нарны гэрлийн нөлөөнд хлор, бромтой нэгдэх урвалд ордог. Катализаторын нөлөөгөөр азоттой нэгдэж аммиакийг үүсгэдэг. Устөрөгч, нүүрстөрөгчийн исэлтэй харилцан үйлчлэхдээ нүүрсустөрөгч, спирт, альдегидыг үүсгэдэг учир эдгээр урвал практикийн их ач холбогдолтой. Устөрөгч шүлтэт ба газрын шүлтэт металлуудтай урвалд орж металлын гидрид($NaNH_2$, CaH_2 зэрэг)-ийг үүсгэдэг. Устөрөгчийг аммиак, хлорт устөрөгч, метанолыг нийлэгжүүлэх, металлыг огтлох, гагнах, хатуу шингэн түлш, тос, органик нэгдлийг гидрогенжүүлэхэд өргөн хэрэглэнэ. Дейтери ба тритийг цөмийн үйлдвэрлэлд хэрэглэнэ.

Физик шинж : Устөрөгч амт, өнгө, үнэргүй хий. Усанд муу, зарим нэг металлууд (Ni, Pd, Pt)-д сайн уусна. Хайлах температур -259.1 °С, Буцлах температур -252.6 °С

Дэлхий дахины санаа бодолд нийцсэн цэвэр илүү ашигтай устөрөгчийн технологи буюу тогтвортой энергийн их үүсвэрийг нэгтгэн уламжлалт технологид нэмэлтээр эсвэл түүний оронд ашиглах боломжтой аргыг хөгжүүлэхийг зорьж байна. Устөрөгч бол цэвэр энерги зөөгч учир нь маш бага нүүрстөрөгч үүсгэдэг ба зарим тохиолдолд огт үүсгэдэггүй (цөм, ус, биомасс, нар).

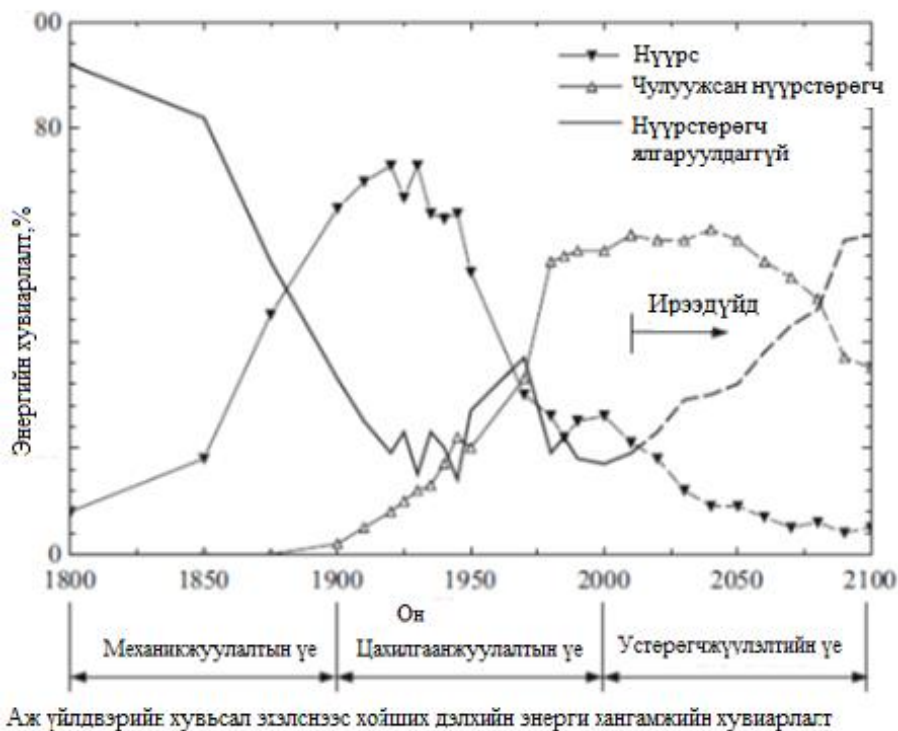
Устөрөгчийг гадаад орчин бохирдуулахгүйгээр эсвэл маш бага бохирдуулан цахилгаан, синтетик түлш, дулаан болгон ашигладаг. Нэмж хэлэхэд устөрөгч нь үйлдвэрлэл ба олон нийтэд өргөн хэрэглэгддэг пластик, хоол хүнс, эм зүй, бордоо, металл материалууд, барилгын материал гэх мэт маш олон материалд оролцдог маш чухал химийн элемент юм. Түүнчлэн устөрөгч нь одоо өргөн хэрэглэгдэж байгаа чулуужсан түлш (нүүрс, тос, байгалийн)-ний оронд хэрэглэж болох ирээдүйн маш чухал түүхий эд гэдэг нь сүүлийн үед харагдаж байгаа.

Цэвэр эрчим хүчний эх үүсвэр болох устөрөгчийн түүхэн хувьсалыг авч үзэх болно. Устөрөгчийг 16-р зуунд нээсэн ба хүхрийн хүчилтэй төмрийг урвалд оруулахад устөрөгч дангаар ялгарч байсан ба үүнийг “шатамхай агаар” гэж нэрлэж байсан. 1766 онд Кабендиш устөрөгчийн шаталт нь зөвхөн ус үүсгэж байгааг судалсан. 1783 онд Лабойсор, Лаплас, Мейнейр нар ус нь устөрөгч ба хүчилтөрөгч гэсэн хоёр хэсгээс тогтож байгаа болохыг харуулсан. Устөрөгч гэсэн нэрийг Лабойсор усыг бүрдүүлэгч хэсэг гэсэн утгаар өгсөн.

18-р зууны сүүл үед устөрөгчийн үйлдвэрлэл болон хэрэглээний талаар маш олон судалгаанууд хийгдэж байсан. 1783 онд Чарлиз анхны устөрөгчийн хөөрдөг бөмбөлөгийг танилцуулсан. 1803 онд Парисд 40-60% устөрөгч агуулсан нийлэг хий хэрэглэдэг шөнийн гэрэлтүүлэгийн системийг суурилуулсан. 19-р зуунаас 20-р зууны дунд үе хүртэл олон хотуудад худалдааны зориулалт бүхий устөрөгчийг боловсруулж байсан. Энэ бол цэвэр энергийн хэрэглээнд устөрөгчийг ашиглаж байсан анхны хэрэглээ юм. Нийгмийн технологийн хөгжил нь энергийн чиглэл болох устөрөгчийн хувьсалтай хамтдаа даган явагдаж байдаг.

Нийтийн хэрэгцээг хангахад шаардагдах энергийн түүхийг авч үзье. Энд 3 төрлийн эрчим хүчний эх үүсвэр байна: нүүрс, чулуужсан нүүрстөрөгч(газрын тос, шатдаг занар, нефть агуулсан элс ба байгалийн хий гэх мэт) ба сэргээгдэх тогтвортой энергийн эх үүсвэр. Сэргээгдэх тогтвортой энерги нь хүлэмжийн хий ялгаруулдаггүй.

Нүүрстөрөгчгүй энергийн ердийн жишээ бол биомасс, усан цахилгаан, салхины энерги, нар, цөм ба бусад. 1800 оноос өнөөдрийг хүртэлх дэлхий дахины нүүрстөрөгчгүй энерги ба нүүрс, чулуужсан түлшнээс гаргаж авах энергийн хувиарлалтыг 2.3 -р зурагт харуулав.



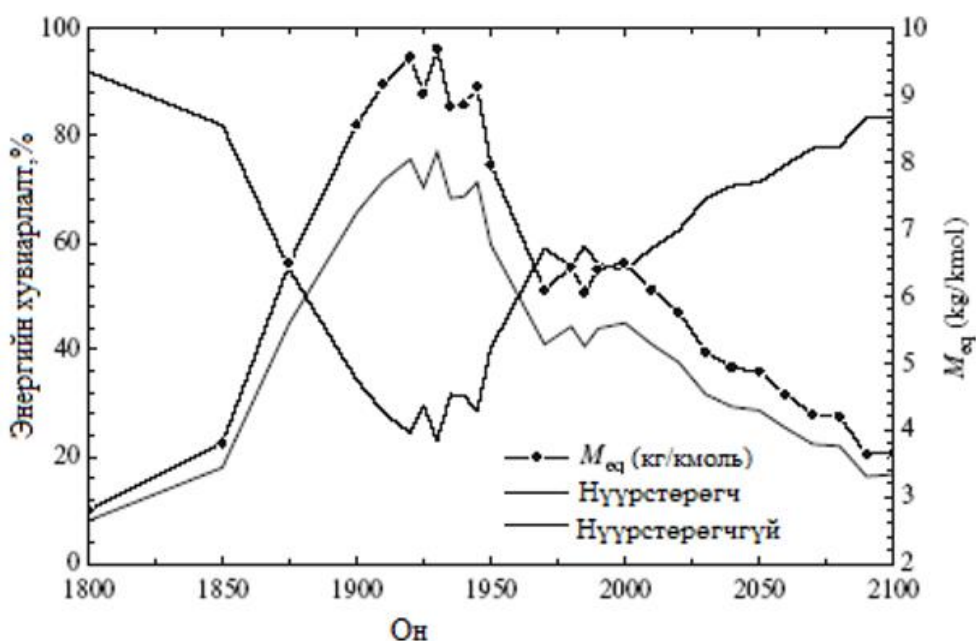
Зураг 2.3. Аж үйлдвэрийн хувьсалаас хойших дэлхийн энерги хангамжийн хувиарлалт

Диаграм 2100 он хүртэлх урьдчилсан прогнозын харуулсан. Аж үйлдвэрийн хувьсгалаас өмнө дэлхийн энергийг нүүрстөрөгчгүй (мод, ус, амьтан) үүсгүүрээс хангаж байсан нь маш сонирхолтой байна. Аж үйлдвэрийн хувьсал эхэлж уурын машиныг танилцуулж эхлэхэд нүүрсний хэрэглээ асар хурдтай нэмэгдсэн. Энэ үед ялангуяа англи францид шинжлэх ухаан ба техникийн маш онцгой үйл явдлууд болсон. Эдгээрээс устөрөгчтэй хамааралтай нь гэвэл 1800онд Николсон усны электролизыг нээсэн мөн 1839 онд Гробе устөрөгчийн түлшний элементийн зохион бүтээсэн. 19-р зууны төгсгөлд Бровлебский устөрөгчийг шингэрүүлэх процессыг хэрэгжүүлсэн ба Дебар сайжруулж Клоуд худалдаанд гаргасан. 20-зууны эхэн үед Германы Рихр мужид нүүрсний олборлолт ба металлургийн хөгжил өндөр түвшинд хүрсэн. Металлургийн салбарт устөрөгч маш их хэрэгтэй байсан. Иймээс 1938 оноос 240км устөрөгч дамжуулах хоолойг суурилуулан жилд $250 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ устөрөгчийг нүүрснээс гарган авч дамжуулж байсан. Орчин үед европод 1500км, АНУ-д 900км устөрөгчийн хоолой байна. 20-р зууны эхний хагасд геополитикийн нөхцөл байдал нь тээвэрлэлтийн түлш, хөдөлгүүрийн хөгжлийг дэмжсэн. Бензин нь өндөр октаны хэмжээ, энергийн нягт ба түүхий нефтьнээс хямд гаргаж авах хямд процессын улмаас

тэнцүү ашиг олдог. Орчин үед авто тээвэрлэлтийн салбарт ихэвчлэн бензин ба дизелийг ашиглаж байгаа ба далайн тээвэрлэлтийн үйлдвэрт хүнд нефть ба дизелийг ашиглаж байна. Тээвэрлэлтийн орон зайд устөрөгч буюу шингэрүүлсэн чулуун түлш хэрэглэх боломжийг олсон. Энэ нь 20-р зууны сүүлч үед судлагдаж байсан ба энэ үед шинжлэх ухаан ниймгийн хөгжилд нөлөөлдөг гол хөдөлгөгч хүч болсон. Чулуужсан түлшний эрчим хүчний нөөцийн тогтвортой бус ашиглалттай холбоотой хүний ухамсартайгаар хийж болох сүйрлийн хувилбаруудын гарсан ирсэн.

Оюун ухааны үйл ажиллагаа ба техник болон шинжлэх ухааны мэдлэг олж авах шинэ эрин үе механикжуулалт ба цахилгаанжуулалтын үед эхэлсэн.

2.3-р зурагт үзүүлснээр дараагийн 100 жил бол нүүрстөрөгчгүй энергийн эх үүсвэрийн хэрэглээ өсөн нэмэгдсэн устөрөгчийн соёл иргэншлийн үе бий болж байна. 2.2 дугаар зургийн үндсэн дүгнэлт нь устөрөгч ба нүүрстөрөгчид үндэслэсэн дэлхийн энергийн нөөцийн нүүрстөрөгчийн хүчил ба нүүрстөрөгчийн оксидыг хэрхэн арилгахыг урьдчилан таамаглан харуулж байна. Дэлхийн энергийн нөөцөд дэлхий даяар устөрөгчийг хэрэглэх хувьсал болж байгаа нь устөрөгчийн хэрэглээний чиг хандлагыг тодорхойлж байна. Чулуужсан нүүрс устөрөгч(байгалийн хий ба нефть)-ийн устөрөгчийн агуулга 2/3 байхад нүүрстөрөгчийн агуулга нь 1/3 байна гэсэн схемийн дагуу хийгдэнэ. 2.4-р зурагт дэлхийн энерги хангамжинд нүүрстөрөгчтэй болон нүүрстөрөгчгүй эх үүсвэрийн эзлэх хувийн түүхэн үзүүлэлтийг харуулав.



Зураг 2.4. Нүүрстөрөгчтэй ба нүүрстөрөгчгүй эх үүсвэрийн эзлэх хувь, дэлхийн энерги хангамжийн эквивалент молекул масс

Нүүртөрөгчгүй энергийн эзлэх хувь нь чулуужсан нүүрс устөрөгчийн хэсэг болон бусад тогтвортой эх үүсвэрийн устөрөгч, мөн цахилгаанаар тайлбарлагдана. Устөрөгч ба цахилгааны эрчим хүчний вектор нэг нь нөгөөдөө шилжин харгалзаж байна.

2.4-р зураг дээр босоо тэнхлэгийн дагуу дэлхийн энерги хангамжийн эквивалент молекул масс (C ба H –ын атом массын хамаарлын жинлэсэн нийлбэр)-ын түүхэн чиг хандлагыг харуулсан байна. Энэ муруй Meq-ын тухай сонирхолтой шинж чанаруудыг харуулж байна: нүүрснээс хамаарсан механикжуулалтын үед огцом өссөн бол харин цахилгаанжуулалтын үед хэлбэлзэлтэйгээр буурсан, харин ирээдүйд буюу устөрөгчжүүлэлтийн үед тогтмол буурахаар харагдаж байна.

Технологийн зураглал нь ирээдүйн цөмийн цахилгаан станцын худалдааны гол бүтээгдэхүүн болох устөрөгчийн үр дүнг дэмжиж хөгжүүлэх юм. 1980 оноос төгсгөлд устөрөгчийн эдийн засгийн ойлголт сайжирсан. Орос улс Цөм-устөрөгчийн энергийн технологи гэсэн цөмийн эрчим хүчнээс устөрөгчийн эрчим хүчийг хөгжүүлэхэд системчилсэн шинжлэх ухааны дэмжлэг болох хэвлэлийг ажиллуулж эхэлсэн. 1990 оны сүүлчээр устөрөгчийн үйлдвэрлэл, тээвэрлэлт, түгээлт, хадгалалт, хэрэглээ материал аюулгүй байдал зэрэг үндсэн асуудлууд шийдэгдсэн.

Эдгээр нь маш олон амжилтыг дагуулсан ба заримаас нь дурьдвал: 1988 онд Москва-д Туполев-155 том хэмжээний устөрөгчийн зорчигч тээврийн онгоц анхны нислэгээ үзүүлсэн, 2001 онд Westinhouse 70%-ын ашигтай 1МВт-ын SOFC-ын анхны худалдаа, Бойнг ба Локхээд –ын тойрог замаар нисэх агаарын хөлөг онгоц “ Venture star” –н хөдөлгүүрт зориулсан шингэн – хатуу устөрөгчийн холимог.

Японы устөрөгчийн шумбагч Урашима-600г түлшний элементээр цэнэглэж 2000 онд худалдаанд гарсан. Францад 300кВт-ийн суурилагдсан чадалтай устөрөгч ба түлшний элементтэй шумбагчийг ойрын жилүүдэд барьж байгаа ба 1,8 т түлш агуулах метал гидрид FeTi –д устөрөгчийг хадгалдаг. Нэг ирээдүйтэй сонголт бол цөмийн устөрөгчийн үйлдвэрлэл юм. Гэвч зарим орнууд цөмийн энергийг хориглосон байгаа ч цөмийн энергийн үндсэн болон техник, эдийн засаг нийгмийн давуу талууд байгаа. Европд, Германд салхи нар ба биомасс гэх мэт сэргээгдэх үүсгүүрээс устөрөгч үйлдвэрлэж цөмийн энергиэс ангид дэд бүтцийг хөгжүүлэхийг оролдлого голлож байна. Салхин цахилгаан станц нь цөмийн цахилгаан станцаас 100 дахин том талбайг эзэлдэг гэсэн тэмдэглэл байдаг. Нөгөө талаас Францын энергийн хангамж нь цөмийн цахилгаан станц дээр суурилдаг. Франц зөвхөн худалдааны үржүүлэгч реакторыг боловсруулж байгаа. Цөмийн устөрөгчийн үйлдвэрлэлийг хэрэгжүүлэх боломжтой арга замуудыг анх 1970 оноос хөгжүүлсэн. Цөмийн

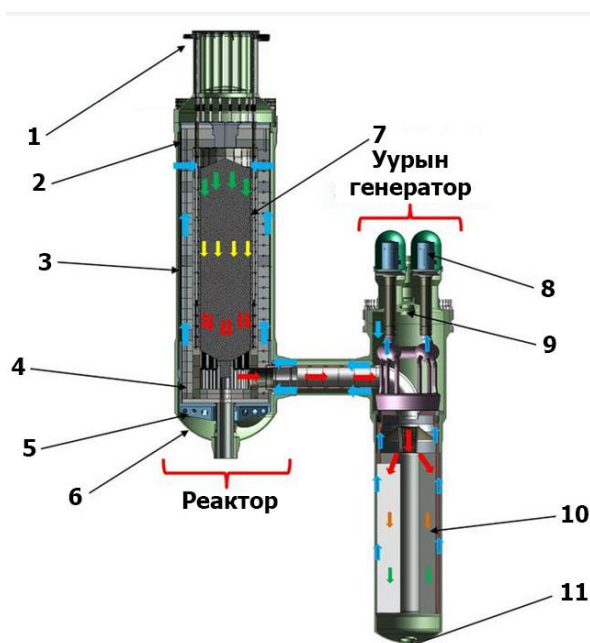
реактор ба устөрөгч үйлдвэрлэх хосолсон ус задлах термохимийн циклийг USA-ийн General Atomics ба хийн судалгааны төв хамтран тогтоосон. 2003 онд Аргетиний үндэсний лаборатори термохимийн циклийг шинэчлэсэн. IV үеийн цөмийн реактортай хослох зэс-хлорын цикл бий болгох томоохон хэмжээний олон улсын хөтөлбөр явагдаж байна. Энэ хөтөлбөрт Канад, Америк, Аргентин, Чех, Румин, Словен зэрэг улсуудын Ontario технологийн институтын удирдлага доорх хамтын ажиллагаа, Atomic Energy of Canada Limited –ын Generation IV олон улсын форумтай хамтарсан хамтын ажиллагаанууд ордог.

2.3 Өндөр температурын гелийн модуль реакторын төслүүд

Устөрөгч үйлдвэрлэх зориулалттай үрлэн түлштэй Xe-100 (X-energy) реакторын төсөл АНУ-д [16], RBMR модуль реакторын төсөл ӨАБНУ-д [18], призм түлшний блок бүхий голомттой GTHTR-300 реакторын төсөл Японд хийгдэж байна [5,7,8,9,10]. Эдгээр төслийн талаар товч авч үзье.

2.3.1 Xe-100 реакторын төсөл (X-energy, АНУ)

Xe-100 нь 100МВт дулааны чадалтай үрлэн түлштэй өндөр температурын хийн реактор юм. Энэ нь бага баяжуулсан буюу 10% баяжуулалттай үрлэн түлшийг реакторын дээд хэсгээс реакторын голомт руу оруулж 80000 МВт·хоног/т шаталтын гүн хүргэх зориулалттай аж. Ийм харьцангуй өндөр шаталтын шалтгаан нь Pu-ыг газар дээр нь ашигласнаар ашигласан түлшийг үр ашигтайгаар зарцуулахад хүргэнэ.



Зураг 2.5. Xe-100 реакторын бүдүүвч [X-energy]

1-реактор; 2-даралтат их бие; 3-голомтын хязгаарлалт; 4-доод бал чулуун ойлгогч; 5-хажуугийн бал чулуун ойлгогч; 6-дээд талын бал чулуун ойлгогч; 7-хяналтын саваа; 8-үрлэн түлш; 9-уурын генератор; 10-хий үлээгч; 11-уур цуглуулах хоолойн систем; 12- хоолойн эргэсэн ороомог.

Хе-100 нь алслагдсан сүлжээнд цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх зориулалттай. Түүнчлэн нефт-химийн процесс зэргийг үйлдвэрийн уураар хангах боломжтой. 2013 оноос энэ загварын хөгжүүлж эхлэсэн бөгөөд одоо суурь загварыг буй болгоод байна. Энэхүү загварын гол зорилго нь системийг хялбарчлах, бүрэлдэхүүн хэсгүүдийг модульчлах, барилга угсралтын хугацааг багасгах, байгууламжийг тасралтгүй түлшээр хангах замаар эдийн засгийг сайжруулахад оршино[5].

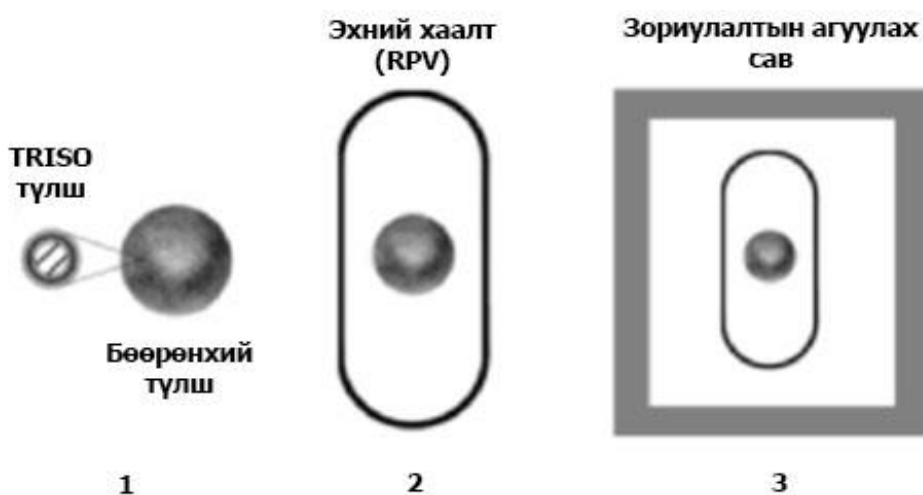
Голомтын ёроолд хүрсэн үрлэн түлшний түлшний шаталт нь Cs-137 зэрэг хагас задралын үе урттай изотопыг гамма спектрометрээр хэмжих замаар тодорхойлогддог. Түлшний элемент голомтоор нэг удаа туулах (OTTO-One through then out) түлшний цикл нь тэгш бус тэнхлэгийн урсгалтай ч гэсэн загварчлахад хамгийн хялбар байдаг. Энэ нь түлш цэнэглэх/түлшийг салгах зэрэг нарийн төвөгтэй системийг харьцангуй энгийн системээр сольж байгаа тул энэ систем илүү ирээдүйтэй. Түлшний хувьд ердийн UO₂ (500 мкм)-тай харьцуулбал арай бага диаметртэй UCO (425 мкм)-түлшний чөмөгтэй TRISO түлш ашиглана.

Хүснэгт 2.1. Хе-100 реакторын техникийн үзүүлэлтүүд

Параметр	Утга
Технологий хөгжүүлэгч	X-energy LLC
Улс	АНУ
Реакторын төрөл	Модуль Өндөр температурын хийн модуль реактор
Цахилгааны чадал, МВт	35
Дулааны чадал, МВт	100
Ажиллах хугацаа, жил	40
Байгууламжийн хэмжээ, м ²	100000 (1 турбинтэй 4 реакторын модуль) 160000 (2 турбинтэй 8 реакторын модуль)
Хөргүүр/Удаашруулагч	Гели/Бал чулуу
Үндсэн цикл	Гели-голомтын дээрээс доош урсгалтай
Системийн даралт, МПа	4
Голомтын оролт/гаралтын температур, °C	260/750
Үндсэн реактивитийн хяналтын механизм	Хэсэг 1-9 саваа, Хэсэг 2-9 саваа
Реакторын байгууламжийн өндөр, м	15
Реакторын байгууламжийн диаметр, м	5.15
Реакторын хөргүүрийн системийн хийц	Хэлхээ
Энерги хувиргах процесс	Шууд бус Ранкиний цикл
Түлшний төрөл	Үрлэн
Голомтын эзлэхүүн, м ³	27.7
Түлшний баяжуулалт, %	10.61
Түлшний шаталтын гүн, ГВт·хоног/г	79.7
Түлшний цикл, сар	Онлайн дахин цэнэглэлт
Инженерийн аюулгүй систем	Идэвхтэй болон идэвхгүй холимог
Онцлог зүйл	Онлайн түлш цэнэглэлт, голомт хайлахгүй, түлшний гэмтэл бага, хуваагдлын

	бүтээгдэхүүнийн тусгай хязгаарлагч, дэвшилтэт түлшний циклийн боломж
ЦЦС дахь модулийн тоо	2-8
Барилга байгууламжийн хугацаа, сар	24-36
Голомт гэмтэх давтамж, реакторын жил бүр	Голомт хайлах боломжгүй
Дизайны төлөв	Дизайны урьдчилсан хөгжүүлэлт

Хе-100 үрлэн түлштэй ӨТХР нь сайн материал, эд ангиудыг ашигладаг хялбаршуулсан загвар юм. Сайтар гүйцэтгэсэн параметртэй учраас эрчим хүчний хэмжээ болон түлшний шаталтыг огцом сайжруулдаг. Цаашлаад Хе-100 нь уран болон торийн аль ч дэвшилтэт түлшний цикл дээр суурилагдах боломжтой байдлаар загварчлагдсан. Эдгээр олон төрөл дизайн нь аль ч түлшний циклээр ажиллах боломжтой. Байгууламжийн аюулгүй байдлын үндсэн шинж чанар нь харьцангуй бага 3.7 МВт/м^3 чадлын нягт, реактивитийн температурын сөрөг коэффициентоор баталгааждаг. Энэ онцлог нь цаашлаад хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг хязгаарлах онцгой системийг сайжруулдаг.



Зураг 2.6. Хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг хязгаарлах онцгой систем

Хе-100 загвар тогтвортой байдлын дараах 4 зарчим дээр суурилдаг. TRISO түлшний өндөр температурыг даах чадвар нь реакторын хэвгийн ажиллагааны үед голомт хайлах, голомтод ноцтой гэмтэл учруулахгүй аюулгүй байдлыг хангана.

1. Цөмийн тогтвортой байдал -цөмийн шилжилт үүсэх боломжгүй (Түлш хэт халахгүй)
2. Дулааны тогтвортой байдал- голомт хайлахгүй
3. Химийн тогтвортой байдал- түлш их хэмжээгээр зэврэхгүй
4. Механикийн тогтвортой байдал-голомт хэлбэрээ алдахгүй

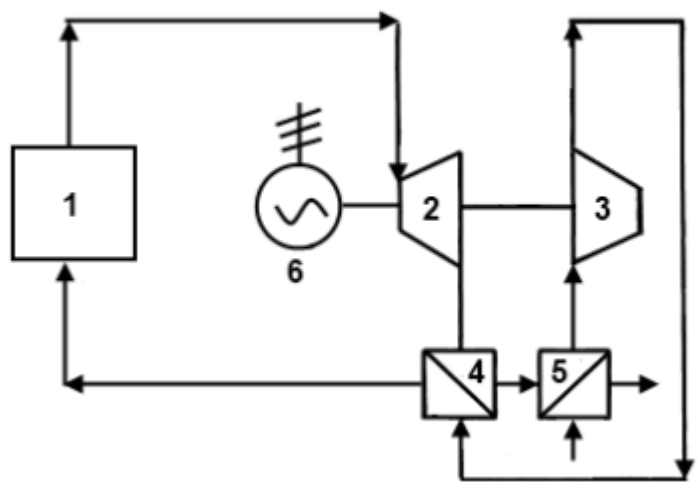
2.3.2 RBMR модуль реакторын төсөл (ӨАБНУ)

Ирээдүйн шинэ цөмийн энергийн төхөөрөмжид үрлэн түлштэй реакторуудыг дэвшүүлж байгаа. Тэдгээр нь жижиг, модуляр, байгалийн хамгаалалттай, уян хатан загвар

ба үйл ажиллагаатай мөн чулуужсан түлштэй өрсөлдөж чадахуйц цөмийг технологийн хэрэглээг харуулдаг реактор юм. Үрлэн түлштэй реакторууд нь жижиг теннисний бөмбөг хэлбэрийн 9гр-ын ураны үрлэн түлш хэрэглэдэг гелийн хөргөлтэй бага чадлын нягттай. Энэ бага чадлын нягт ба жижиг графит голомт нь осол болон санамсаргүй хохирлын температурыг бүрэн хамарч хянадгаараа төрөлхийн хамгаалалтын хангаж өгдөг. Энэ онцлог шинж нь цөмийн технологийн тухай олон нийтийн итгэлийг нэмэгдүүлэх ёстой. Дэвшилтэт модуляр зарчмаар тодорхойлсон цөмийн төхөөрөмжийн барилга байгууламж чанарыг нэмэгдүүлдэг.[15]

Өмнөд Африк болон дэлхий ертөнцийн өмнө карбонгүй, найдвартай, хүртээмжтэй, нэвтрүүлэхэд хялбар дөхөм, аюулгүй, байгаль орчинд ээлтэй эрчим хүчний эх үүсвэрийг хайх хэрэгцээ шаардлагатай байгаа. RBMR (Pebble Bed Modular Reactor) нь эдгээр бүх шаардлагыг бүхэлд нь хангаж байгаа болно. RBMR-ийн худалдааны загварын мэдээдлэл амархан олон нийтэд танигдсан. RBMR- бол HTGR-ийн орчин үеийн нэг хэлбэр юм.

RBMR-ын голомтын дулааны энергийн хувиргалт 2.7-р зурагт харуулсан бүрэлдэхүүн бүхий хийн турбины төхөөрөмжид Брайтоны нэг хэлхээт бүдүүвчээр явагдана. Хийн дулаан зөөгч гели реакторын голомтын дулааны энергийг хийн турбин, цахилгаан генератор, компрессор, хийн хөргүүр, рекуператороос бүрдэх системд шууд дамжуулан дулааны энергийг механик, цахилгааны энергид хувиргана. Гелийн турбогенераторын системийн бүрэн төслийг японы компани МНИ (“Mitsubishi Heavy Industries”) гүйцэтгэж байна.



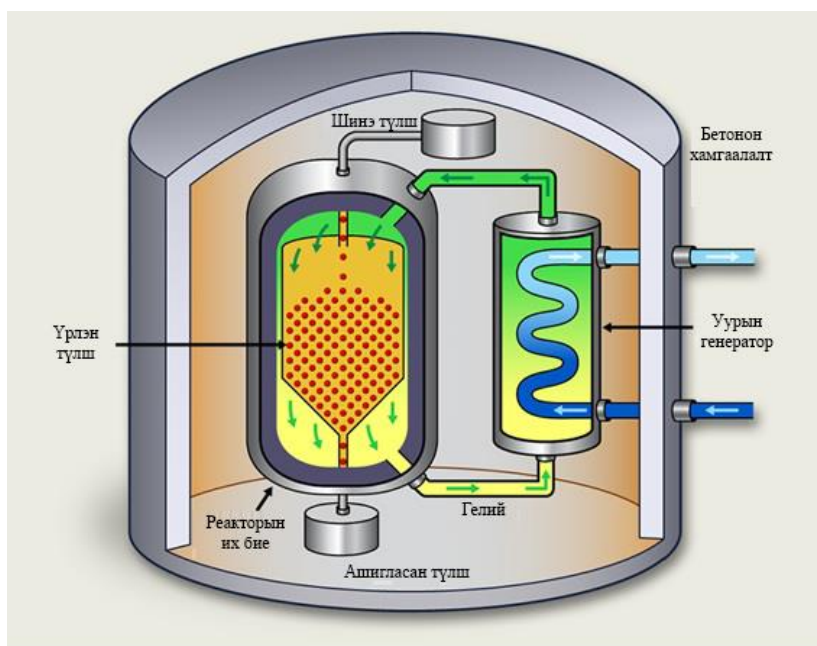
Зураг 2.7. Хийн турбинтэй цөмийн эрчим хүчний төхөөрөмжийн нэг хэлхээт бүдүүвч

1-цөмийн реактор, 2-хийн турбин, 3-компрессор (циркулятор), 4-регенеративийн дулаан солилцуур, 5-сүүлийн хөргүүр, 6-цахилгаан генератор.

PBMR-ын голомтод орох гелийн температур 500°C , харин реактороос гарах гелийн температур -900°C . Реакторын голомтоос 9 МПа даралт, 185 кг/с зарцуулалттай гарах халуун дулаан зөөгч турбогенератор ба хоёр босоо компрессорыг хөдөлгөөнд оруулна.

Турбинээс гарах гели рекуператороор нэвтрэн хөргүүр ба компрессорыг дамжин даралт дор рекуператорт орж турбинээс ирэх халуун хийгээр халж реакторын голомт руу буцна. PBMR-ын төсөл нь дотоод угийн байдаг идэвхгүй аюулгүй байдал, Цөмийн станцын модуль барилга байгуулалт, эрчим хүчний төхөөрөмжийн дундаж чадал 300 -700 МВт(цах) хэмжээнд эдийн засгийн өсөлдөх чадвартай бүтээгдэхүүнийг үйлдвэрлэх системийн уян хатан байрлуулалт, Өндөр температурын хийн реактор PBMR ба хийн турбины төхөөрөмжөөс бүрдэх систем нь орчин үеийн худалдааны цөмийн эрчим хүчний төхөөрөмж бөгөөд тэдгээрийн параметр, үзүүлэлтүүд IV үеийн реакторт тавигдах шаардлагыг хангана. Ийм төхөөрөмж нь устөрөгч үйлдвэрлэх болон бусад үйлдвэрийн процесст зориулсан өндөр температуртай дулааны энергийн эх үүсвэр болно.

Хэдийгээр бидний авч үзсэн призм түлштэй өндөр температурын хийн реактор гэх мэт өөр загварууд байдаг ч гэлээ PBMR(Pebble-bed modular reactor)нь өнөөдрийн байдлаар дэлхий түвшинд хүлээн зөвшөөрөгдөөд байгаа дэвшилтэт өндөр температурын реактор юм. Герман улсын Засгийн газар 1990 онд өндөр температурын реакторыг хөгжүүлэх хөтөлбөр (Siemens, ABB)-ийг зогсоох шийдвэр гаргасан нь Өмнөд Африкийн (Eskom, PBMR Co компани) хувьд түүхэн боломж нээгджээ. Техникийн лицензийг Areva (Siemens-т зориулж), Westinghouse (ABB-д зориулж) эзэмшдэг [14,15,18].



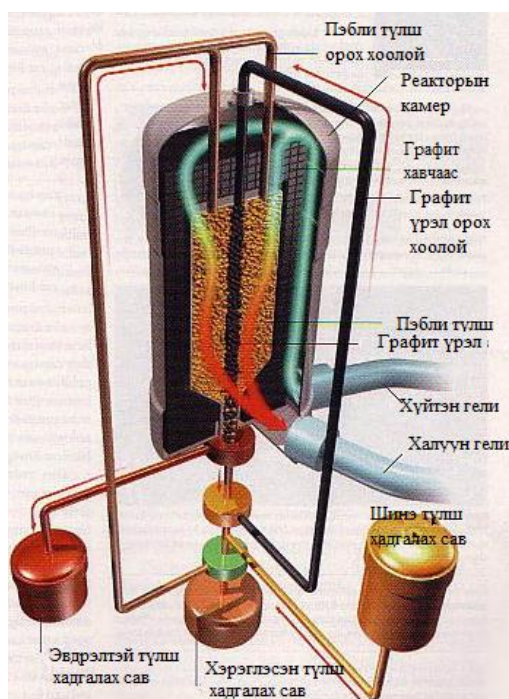
Зураг 2.8. PBMR реакторын системийн бүдүүвч

Үрлэн түштэй RBMR реакторын өрсөлдөх давуу талууд:

- Дотоод аюулгүй байдал (реакторын голомт хайлах аваар гарахболомжгүй)
- Бага талбай эзэлдэг
- Өндөр бүтээмж (> 44% АҮК)
- Реакторыг зогсоохгүй дахин цэнэглэх
- Байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөлөл бага
- Угсралтын хугацаа богино
- Угсралтын үеийн өртөг бага
- Бага овортой тул тараан байршуулах боломжтой
- Модуль нэмэх замаар хүчин чадлыг өсгөх боломжтой
- RBMR нь чадлаа сэлгэх горим(маневэрлэх)-д ажиллана
- RBMR-г өндөр температурын дулаан үйлдвэрлэхэд хэрэглэнэ
- RBMR нь ердийн ашиглалтын үед харьцангуй бага хэмжээний ус шаардагдана.
- RBMR реакторын системийг хэрэглэгчийн ойр байрлуулах боломжтой

20 м өндөр, 6м диаметр бүхий босоо гангаар хаалт хийсэн реакторын камер дотор цөмийн урвалыг явуулдаг. Реакторын голомтын хэсгийг 2.9-р зурагт үзүүлэв.

Ган хаалт нь урвал болон идэвхгүй дулаан хувиргагч механизмаар нейтрон үүсэхэд гадаад ойлгогчийн үүрэг гүйцэтгэх бал чулуун тоосгон үеүүдтэй шууд холбогддог. Энэ холбоос нь хяналтын саваануудыг оруулахад зориулсан босоо нүхийг үүсгэдэг.



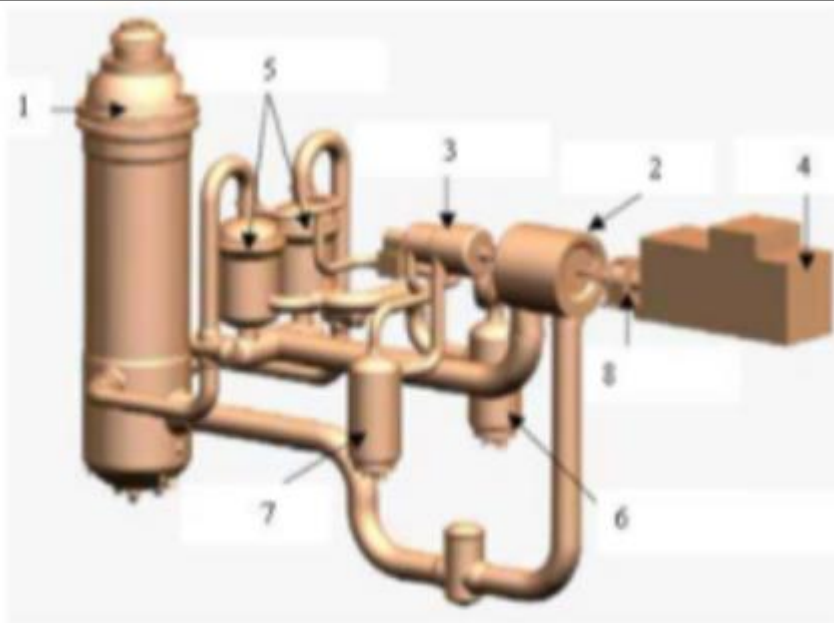
Зураг 2.9. Реакторын голомтын хэсэг

Реакторын голомтын диаметр 3,7м, өндөр 9м бөгөөд 2 бүсээс тогтно (улаан ба цэнхэр үрлээр үлгэрчилсэн). Цэнхэр буюу дотоод бүс нь ойролцоогоор 185,000 бал чулуун үрэл, улаан буюу гадна бүс нь ойролцоогоор 370,000 түлшний үрлээс тус тус тогтно. Бал чулуун удаашруулагч нь реакторын голомтод тасралтгүй явагдах цөмийн урвалаар үүсэх хурдан нейтроныг удаашруулна.

PBMR (Pebble Bed Modular Reactor)-реакторын үндсэн үзүүлэлтийг 2.2-р хүснэгтэд харуулав.

Хүснэгт 2.2. PBMR реакторын үндсэн үзүүлэлтүүд

Үзүүлэлтүүд	Утга
Реакторын дулааны чадал, МВт	400
Реакторын цахилгааны чадал, МВт	165
Голомтын төрөл	Овоолсон үрлэн түлш
Түлшний элементийн төрөл	60 мм диаметртэй бөмбөлөг
Голомтын дундаж энерги ялгаралт, МВт/м ³	4,78
Нэгдүгээр хэлхээний дулаан зөөгч	гели
Нэгдүгээр хэлхээн дэх дулаан зөөгчийн даралт, МПа	9
Голомтод орох дулаан зөөгчийн температур, °С	488
Голомтоос гарах дулаан зөөгчийн температур, °С	900
Дулаан зөөгчийн зарцуулалт, кг/с	184,8



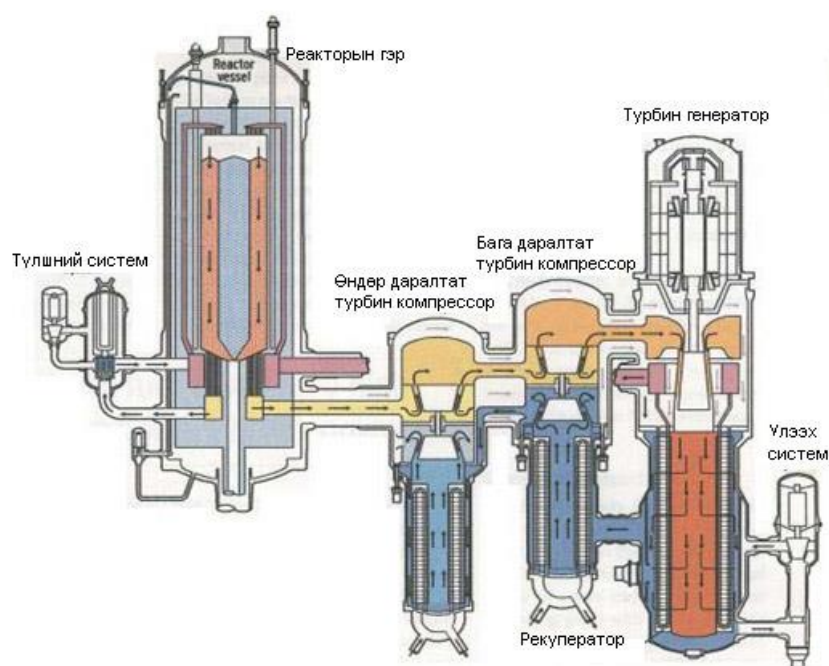
Зураг 2.10. PBMR реакторын бүдүүвч

1-реактор; 2-турбин; 3-компрессор; 4-генератор; 5-рекуператор;

6-завсрын хөргүүр; 7-урьчилсан хөргүүр; 8-редуктор.

PBMR реактор ба энерги хувиргагчийн хөндлөн огтлолыг 2.10-р зураг үзүүлэв. Түүнчлэн PBMR нь 2 хэсгээс бүрддэг. Нэгдүгээрт нь дулааны үүсгэгч хэсэг “реакторын камер” гэж нэрлэгдэх, хоёрдугаарт нь эрчим хүч хувиргах хэсэг буюу “өндөр даралтын турбокомпероссор” “нам даралтын турбокомпероссор” “хөдөлгүүрийн цахилгаан үүсгэгч

” гэж нэрлэгдэх хэсгүүдээс бүрдэнэ. 2.11-р зурагт сумаар заасны дагуу дулаан зөөгч гели үрлэн түлшин дундуур урсаж халаад өндөр, нам даралтын компрессоор дамжин хийн турбиныг ажиллуулна. Түүнчлэн гели нь реакторын голомтын хөргүүр болно.



Зураг 2.11. Үрлэн түлштэй реактор (PВМR)-ын хөндлөн огтлолын зураг

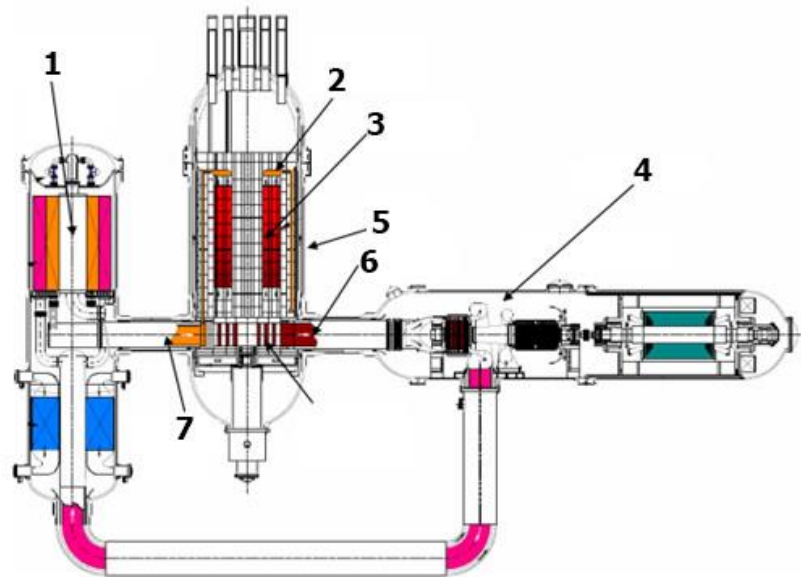
2.3.3 GTHTR-300 реактор (Япон, ЯАЭА)

GTHTR300 (Gas turbine High Temperature Reactor 300 МВт(цах)) реактор нь идэвхгүй аюулгүй байдал нь идэвхгүй хангагдах IV үеийн реакторын загвар бөгөөд цахилгаан, устөрөгч, үйлдвэрлэлийн дулааныг хамт үйлдвэрлэх боломжийг олгодог. Энэ нь реактор тус бүр нь 600 МВт хүртэл хүчин чадалтай модульчлагдсан МӨТХР (маш өндөр температурт реактор), цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх үр ашигтай шууд эргэлттэй хийн турбин, хамтран үйлдвэрлэхэд устөрөгч болон дулааныг өндөр температурт дулаанаар хангах завсрын дулаан дамжуулах гогцооноос бүрдэнэ. процессын уур үүсгэх. ЯАЭА хэд хэдэн урт хугацааны судалгаа, хөгжлийн хөтөлбөрөөр дамжуулан GTHTR300-ийн дизайны үндэслэлийг бий болгож байна. 30МВт-ын дулааны хүчин чадалтай, хөргөлтийн шингэний гаралтын температур 950°C-ийн өндөр температурт инженерийн туршилтын реактор (HTTR)-ийн бүтээн байгуулалт, ашиглалтын баталгаатай хөтөлбөрийн үр дүнд МӨТХР-ийн дизайн, ашиглалт, засвар үйлчилгээний томоохон мэдээллийн санг бий болгосон. МӨТХР нь одоогоор дэлхийн хамгийн том VHTR технологийн туршилтын реактор юм. Энэ нь 950°C-ийн температурт удаан хугацаанд тогтвортой ажиллаж, хөргөлтийн шингэний эргэлтийн алдагдлаас хамгаалах идэвхгүй реакторын аюулгүй ажиллагааг харуулсан. GTHTR300-ийн өндөр үр ашигтай цахилгаан эрчим хүчийг хувиргах системийг зохион

бүтээх, хөгжүүлэх хөтөлбөрийг хэрэгжүүлэв. Энэхүү хөтөлбөрт гелий хийн турбины төхөөрөмжийн гуравны нэгийн хэмжээний туршилтыг багтаасан бөгөөд гелий компрессорын технологийн өндөр аэродинамик үр ашгийг баталгаажуулсан. Үүний зэрэгцээ термохимийн иод-хүхрийн (IS) процессоор устөрөгч үйлдвэрлэх судалгааны хөтөлбөрийг явуулсан. IS процессыг VHTR дулааны эх үүсвэртэй хослуулснаар CO₂ ялгаруулалтгүйгээр их хэмжээний төвлөрсөн устөрөгчийн үйлдвэрлэлийг санал болгож байна. Дээр дурдсан хөтөлбөрүүдийн хүрээнд олж авсан реактор, хэрэглээний технологид үндэслэн JAЕА болон дотоодын цөмийн үйлдвэрүүдийн хамтын хүчин чармайлтаар GTHTR300 нь уян хатан үйлдвэрлэлийг хангах зорилгоор бүтээгдсэн.

Байгаль орчныг дэлхийн дулаарал гэх мэтээс хамгаалахын зэрэгцээ устөрөгчийн түлш, цахилгаан эрчим хүчний цэвэр, хэмнэлттэй эх үүсвэр юм. GTHTR300 нь шууд эргэлтийн хийн турбины цахилгаан хувиргах системээр 45-50%-ийн дулааны үр ашигтай 300 МВт хүртэл цахилгаан, IS процессоор өдөрт 1.4 сая Нм³ устөрөгчийг 45%-ийн үр ашигтайгаар үйлдвэрлэдэг, эсвэл цахилгаан ба устөрөгчийг хоёуланг нь нийлүүлдэг. Эдгээр мужууд. Эдгээр үйлдвэрлэлийн хүчин чадлыг хэмнэлттэй гэж үнэлдэг бөгөөд Японд 2030 оноос хойшхи цахилгаан, устөрөгчийн дотоодын хэрэгцээг хангах боломжтой. Суурь систем нь хийн турбины хүчийг хувиргах систем бүхий реакторын системийг багтаасан 1-р зурагт үзүүлсэн реакторын цахилгаан станц юм. Реактор нь 600 МВт дулааны хүчин чадалтай, реакторын гаралтын температур 850~950°C байна. Дулаан зөөвөрлөх завсрын гогцоогоор өндөр температурт реакторын дулааны тодорхой хэсгийг ойролцоох устөрөгчийн үйлдвэрт өндөр температурт процессын дулаан болгон дамжуулах хоолойд хүргэдэг. Устөрөгчийн үйлдвэрлэлийн цахилгаан эрчим хүчний хэрэгцээг хийн турбины эрчим хүчний үр ашигтай когенерацаас гэрт нь хангадаг. GTHTR300 загвар, үйлдвэрлэлийн үзүүлэлтүүдийг 2.3-р хүснэгтэд нэгтгэн харуулав [5, 18].

Өндөр температурын гелийн модуль реактортой эрчим хүчний төхөөрөмжийн энерги хувиргах нэгжийн босоо буюу хэвтээ бүрэлдүүллийн сонголтын хандлага янз бүр байж болно. Годотгох жишээ болгож интеграль төрлийн босоо нэгж GT-HTR төслийн бүрдэлүүллийн бүдүүвч (2.12-р зураг) ба генератор-турбокомпрессорын хэвтээ модуль, их диаметртэй дамжуулах хоолойгоор хобогдсон хоёр их биед байрласан энерги хувиргах системийн дулаан солилцуурын төхөөрөмжийн босоо модуль бүхий Японы GTHTR-300 төслийг авч үзье. GTHTR-300 реактор нь 300 МВт цахилгааны чадалтай хийн турбинтэй өндөр температурын реактор юм GT-HTR ба GTHTR-300 төслийн цөмийн станцийн баргилгын харьцуусан үр дүн энерги хувиргах нэгжийн босоо бүрдүүлэл давуу болох нь харагдаж байна.



Зураг 2.12. GTNTR-300 реакторын дулаан зөөгчийн урсгалын бүдүүвч

1-түгээх коллектор; 2-цагариг голомт; 3-реакторын их бие; 4-урсгал татах суваг;
5-генератор-турбокомпрессорын модуль; 6-генератор; 7-компрессор; 8-турбин; 9-цуглуулах
коллектор; 10- гели өгөх суваг; 11-урьдчилсан хөргүүр; 12-рекуператор; 13-дулаан солилцуур

GTNTR300 реакторын аюулгүй байдал нь зохиомжийн дараах гурван онцлогоор хангагдана. Үүнд:

- Керамик бүрээст бөөм түлш нь 1600°C-ийн тооцооны температурын хязгаарт бүрэн бүтэн байдлаа хадгална.
- Реакторын гели дулаан зөөгч нь химийн идэвхгүй тул тэсрэх хий үүсгэхгүй, фазын өөрчлөлт болохгүй.
- Бал чулуун удаашруулагчтай реакторын голомт нь реактивитийн хасах коэффициент, энерги ялгаралт бага, дулаан нэвтрүүлэлт их болохыг тооцон бүтээгдсэн.

Эдгээр шинж чанаруудын үр дүнд реакторын голомтын задралын үлдэгдэл дулааныг реакторын их биеийн гаднаас хэдэн өдөр, хэдэн сарын турш агаарын байгалийн солилцоогоор хөргөх замаар ямар ч төхөөрөмж, операторын арга хэмжээ авахгүйгээр, тэр ч байтугай дулаан зөөгч алдагдах эсвэл станцын цахилгаан тасрах гэх мэт ослын ноцтой тохиолдлуудад ч зайлуулах боломжтой. Тэр үед түлшний температур түлшний төслийн хягаараас доогуур байх болно. GTNTR300 реакторын техникийн үндсэн параметрийг 2.3-р хүснэгтэд харуулав.

Хүснэгт 2.3. GTNTR300 зохиомж ба үндсэн техникийн параметр

Параметр	Цахилгаан эрчим хүч ба H ₂ хамт үйлдвэрлэх станц
Реакторын дулааны чадал, МВт	600 модуль
Реакторыг ашиглах хугацаа, жил	60

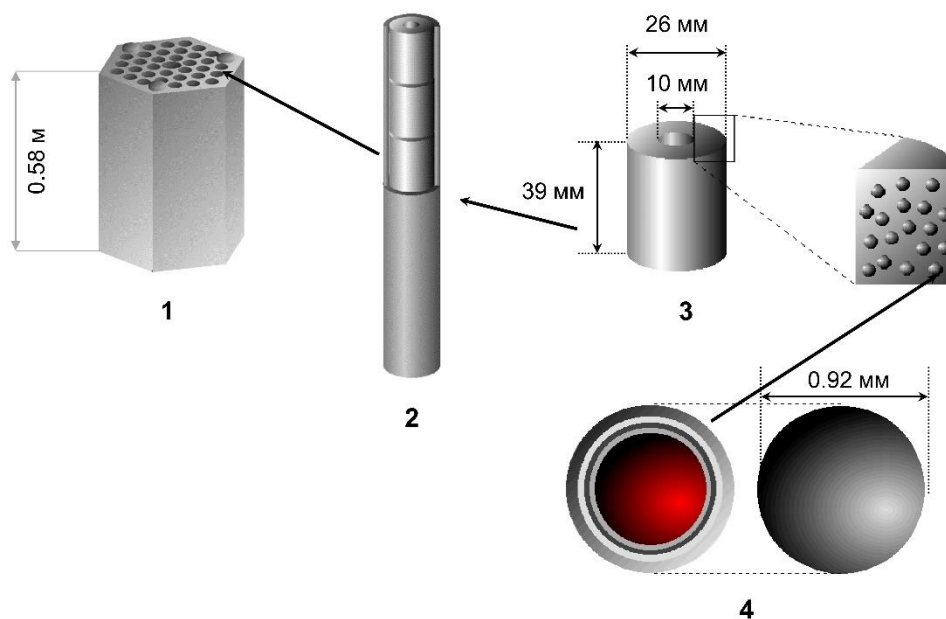
Реакторын түлшний цикл	Бага баяжуулалттай уран, МОХ, бусад
Реакторын түлшний загвар	TRISO керамик бүрээст бөөм
Реакторын даралтат их бие	SA508/SA533 ган
Реакторын голомтын хөргүүр	Гелийн хий
Голомтын хөргүүрийн урсгал, кг/с	324
Реакторын даралтат их биеийн өндөр, м	23
Реакторын даралтат их биеийн диаметр, м	8
Гелийн голомтод орох температур, °C	591
Гелийн голомтоос гарах температур, °C	950
Голомт дахь хөргүүрийн даралт, МПа	5,1
Голомтын жнерги ялгаралтын нягт, Вт/см ³	5,4
Түлшний шаталтын гүний дундаж, ГВт·хоног/т	120
Энерги хувиргах процесс	Шууд Брайтоны цикл
Түлш цэнэглэх завсар, сар	18
ГТ хувиргалтын цикл	Шууд цикл
ГТ циклын даралт	2,0
Цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх АҮК, %	47
Цахилгаан үйлдвэрлэх цэвэр чадал, МВт(цах)	174
Н ₂ үйлдвэрлэх чадал, МВт(дул)	220
Н ₂ хувиргах процесс	Дулаан химийн S-I цикл
Н ₂ хувиргах АҮК, %	43
Н ₂ үйлдвэрлэл	58 т/өдөр
Станцын нийт АҮК, %	45

Түлшний загвар. Түлшний загварыг 2.13-р зурагт үзүүлэв. 1 мм-ээс бага диаметртэй бүрээст түлшний бөөм бүр нь бага ба өндөр нягтралтай пирокарбон болон цахиурын карбидын дөрвөн давхаргаар бүрсэн UO₂ чөмгөөс бүрдэнэ. Бүх төрлийн керамик түлш нь 1600°C хүртэл халуунд тэсвэртэй. Бүрээст түлшний бөөмийг бал чулуунд жигд суулган цилиндр хэлбэртэй түлшний шахмал бэлдэнэ. Түлшний шахмалын диаметр 2,6 см, өндөр 8,3 см, доторх нүхний диаметр 8,5 мм юм. Түлшний шахмалыг бал чулуун бүрээст угсарч түлшний саваа бэлдэж, 1 м орчим урт, 41 см диаметртэй зургаан өнцөгт бал чулуун түлшний блоккийн нүхнүүдэд байрлуулна. Түлшний саваа ба өрөмдсөн нүхний хооронд үүссэн цагираг орон зайн нь дулаан зөөгчийн урсгалын хувьд хөргөлтийн суваг болно. Түлшний блокуудыг реакторын голомтод ачаална. Реакторын голомтод түлшний блок их байрлуулах тусам реакторын чадал өснө. GTHTR-300 реакторын түлшний техникийн тодорхойлолтыг 2.4-р хүснэгтэд харуулав.

Хүснэгт 2.4. GTHTR-300 реакторын түлшний техникийн тодорхойлолт

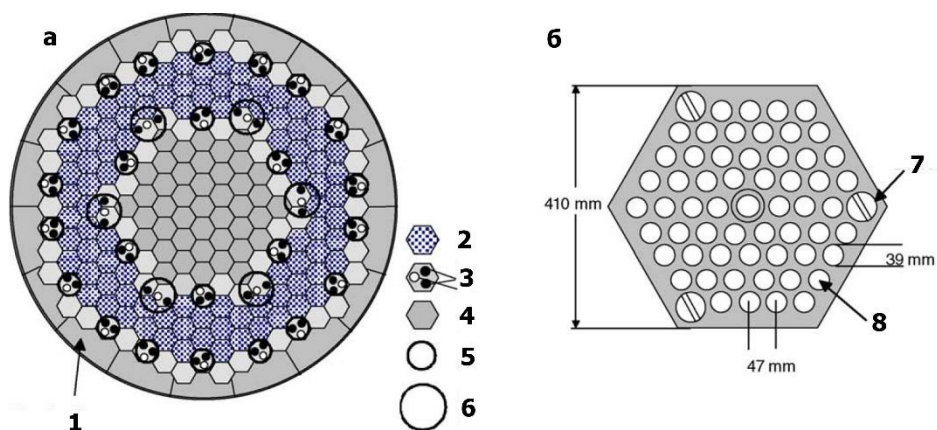
Түлшний савааны урт, мм	1000
Хөргүүрийн сувгийн диаметр, мм	39
Түлшний шахмал	
Урт, м	1
Дотоод даймерт, мм	9
Гадаад диаметр, мм	24
Бүрээсийн зузаан, мм	1
	29
Бүрээст түлшний бөөм	
Бүрээсийн төрөл	TRISO
Диаметр, мкм	1010
Түлшний шөмөг	
Материал	UO ₂

Баяжуулалт, %	14
Диаметр, мкм	550
Нягт, г/см ³	10,80
Сүвэрхэг карбон хамгаалалтын давхарга	
Зузаан, мкм	140
Нягт, г/см ³	1,15
Дотоод пиролирик карбон (Pус) давхарга	
Зузаан, мкм	25
Нягт, г/см ³	1,85
Цахиурын карбид SiC давхарга	
Зузаан, мкм	40
Нягт, г/см ³	3,20
Пиролирик карбон (OPус) давхарга	
Зузаан, мкм	25
Нягт, г/см ³	1,85



Зураг 2.13. Түлшний загварын онцлог

GTHTR300 реакторын голомт цагираг хэлбэртэй хөдий дэх 90 түлшний баганаас бүрдэх бөгөөд түүний гадаад диаметр ойролцоогоор 5,5 м, дотоод диаметр 3,6м, өндөр 8м орчим байна. Дотор болон гадна ойлгогч бүсүүд тус тус 73 багана, 48 баганаас (хяналтын саваа багана орно) бүрдэнэ. Үл хөдлөх ойлгогчийн бүсийг хүрээлдэг бүсэд түлшний багана нь зургаан өнцөгт түлшний блокуудын 8 давхарга, дээд, доод ойлгогч хэлбэртэй байрлуулсан бал чулуун блокуудын 2 давхаргаас бүрдэнэ. Түлшний блок бүр 0,41 м өргөн, 1м орчим өндөртэй бөгөөд хөргүүрт зориулсан нүхэнд 57 ширхэг түлшний саваа агуулна. Түлшний блокуудыг бэхлэх зориулалттай шаантаг ба үүрийг дээд болон доод хэсэгт байрлуулна. Түлшний элементийг тойрсон цагираг орон зайд гели доош урсана.



Зураг 2.14. GTHTHR300 реакторын голомт ба түлшний элементийн хөндлөн зүсэлт

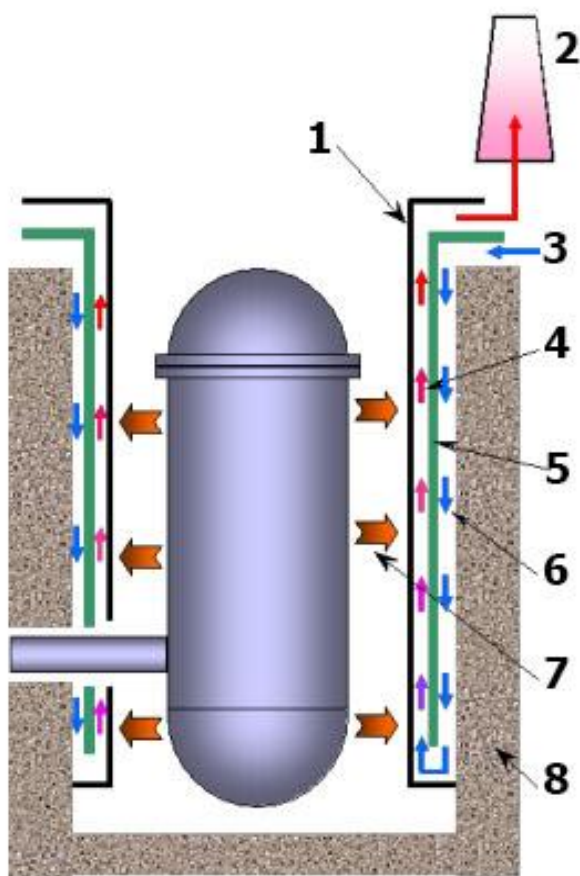
GTHTHR300 реакторын голомтын үндсэн үзүүлэлтийг 2.5-р хүснэгтэд харуулав.

Хүснэгт 2.5. GTHTHR300 реакторын голомтийн зохиомжийн техникийн үзүүлэлт

Үзүүлэлт	Цахилгаан эрчим хүч ба H ₂ хамт үйлдвэрлэх станц
Реакторын чадал, МВт	600
Голомтын зохиомж	Призм
Түлшний бөөм	TRISO UO ₂
Түлшний блокын загвар	Блок дахь түлшний элемент саваа
Голомтын физик зохиомж	
Түлшний багана	90 ш
Дотоод ойлгогч багана	73 ш
Гадаад ойлгогч багана	48 ш
Голомтын өндөр, м	8,4
Дундаж энерги ялгаралт, Вт/см ³	5,4
Түлшний шаралтын гүний дундаж, ГВт·хоног/т	120
Түлшний блокын өндөр/ , мм	1050/410
Түлшний блок дахь түлшний саваа	57 ш
Түлшний савааны диаметр, см	2,6
Голомтын	8
Дундаж баяжуулалт, %	1483
Шатан шингээгч	6
Түлш цэнэглэх завсар, сар	24
	1,16
Голомтын дулаан гидравликийн зохиомж	
Хөргүүр гелийн урсгал, кг/с	322
Гелийн реакторт орох температур, °C	594
Гелийн реактороос гарах температур, °C	950
Гелийн орох даралт, МПа	5,1
Голомт дахь хөгүүрийн даралтын бууралт, кПа	35
Түлшний хамгийн их температур, °C	1244
Түлшний хамгийн их температур (LOCA), °C	1535

Реакторын их биеийн хөргөлтийн систем. Реакторын их биеийн хөргөлтийн систем нь битүүмж алдагдах ослын үед албадмал хөргөлтийн бүрэн алдагдалд зориулж үлдэгдэл дулааныг зайлуулах систем юм. Реакторын их биеийн хөргөлтийн системийг зөвхөн реакторын даралтат их биеийн гаднаас байрлуулсан хөргөлтийн хавтан дахь агаарын

байгалийн эргэлтээр дулаан зайлуулах идэвхгүй систем болгон зохион бүтээсэн. Реакторын даралтат их биеийн гадна талд суурилуулсан хөргөлтийн хавтан дахь агаарын байгалийн эргэлтийг 2.15-р зурагт үзүүлэв. Реакторын голомт дах үлдэгдэл дулааныг реакторын гаднах гадаргаас цацрагаар хөргөлтийн хавтан руу шилжүүлдэг. Реакторын даралтат их бие болон хөргөлтийн хавтангийн хоорондох хөндий дэх агаарын байгалийн солилцоо нь голомтын түлш болон реакторын даралтат их биеийн температурыг идэвхгүй байдлаар температурын хязгаарлалтаас бага байлгахаар бүтээгдсэн бөгөөд ослын үед реакторын даралтат их биеээс ялгарах дулааныг зайлуулах аюулгүй байдлын үндсэн зарчим юм.



Зураг 2.15. GTNTR300 реакторын задралын дулааныг идэвхгүй зайлуулах арга

1-хөргөлтийн хавтан; 2-градарн (халуун агаарыг хөргөх төхөөрөмж); 3-агаарын оролт;
4- дээшлэх агаарын урсгал (байгалийн эргэлт); 5-тусгаарлагч; 6- доошлох агаарын
урсгал (байгалийн эргэлт); 7- дулааны цацаргалт ба байгалийн эргэлт; 8-бетон хана.

GTNTR300 реакторын үйлдвэрийн процесс нь 600 МВт хүчин чадалтай цөмийн реактор, энерги хувиргах шууд циклийн хийн турбин, устөрөгч үйлдвэрлэх термохимийн иод-хүхрийн (IS) процессоос бүрдэхийг 2.16-р зурагт харуулав. Хийн турбин нь цахилгаан генераторыг жолоодох үед реакторын хөргүүрийг эргэлдүүлдэг. Цахилгаан эрчим хүч ба устөрөгч хамт үйлдвэрлэхэд реактор ба хийн турбин хоёрын хооронд цуваа байрлах завсрын дулаан солилцуурыг ашиглана. 170 МВт чадалтай завсрын дулаан солилцуурын

ашигтай хоолойн багц нь 4.5 м диаметртэй, 3 м орчим урттай. Мөн 390 МВт чадалтай завсрын дулаан солилцуурыг зохион бүтээжээ. Хаалттай завсрын хэлхээ нь завсрын дулаан солилцуураас халуун гелийг алслагдсан устөрөгчийн үйлдвэр рүү эргэлдүүлж, цөмийн болон химийн үйлдвэрүүдийн хоорондох материалыг хүрээлэн буй орчноос зайлшгүй тусгаарлах үүрэг гүйцэтгэнэ.

IS процесс нь усны молекулыг устөрөгч ба хүчилтөрөгчийн хийн бүтээгдэхүүн болгон задлах гурван цикл хоорондын термо-химийн урвалыг агуулдаг. Энэ процесс нь зөвхөн түүхий эд болох усыг зарцуулдаг бөгөөд бусад бүх материал нь химийн урвалжууд юм. Уг процесс нь завсрын дулаан солилцуураас нийлүүлэх гол дулаан, бага хэмжээний цахилгаан эрчим хүчний оролт шаардлагатай.. Халуун гелий хий хэлбэрээр нийлүүлсэн дулааныг эндотермик задралын урвалыг дэмжихэд ашигладаг бөгөөд цахилгаан энерги нь электролизер, хийн эргэлт, насос болон бусад тоноглолд ашиглагдана.

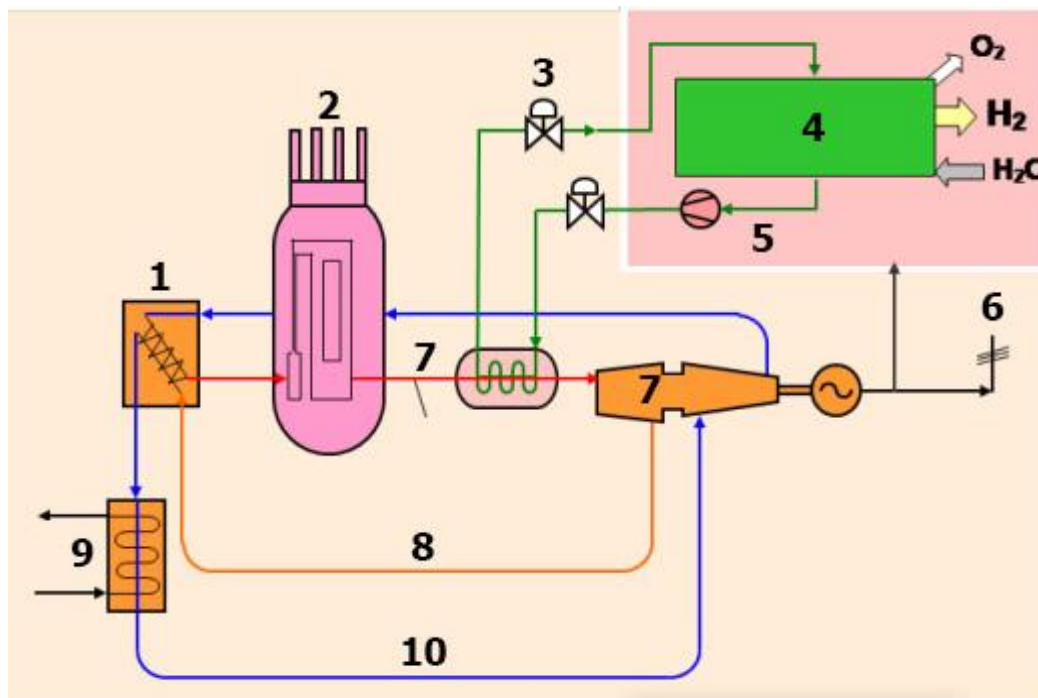
Цөмийн энергийг ашиглан устөрөгчийн үйлдвэрлэлийн хэд хэдэн хувилбараас Японы атомын энергийн агентлаг IS процессыг арилжааны цөмийн устөрөгчийн үйлдвэрлэлийн үндэс болгон сонгохдоо дараах зүйлүүдийг харгалзан үзсэн байна. Үүнд:.

1. IS процесс нь ердөө гурван үндсэн химийн урвалаас бүрдэх ба процессын өндөр температур нь дулааны өндөр үр ашигтай байх үндэс суурь болно. АҮК нь 40-50% -ийн хүрээнд байна.

2. IS процесс нь үндсэндээ дулаан зөөгчийн процесс бөгөөд тасралтгүй горимд ажиллах боломжийг олгодог бөгөөд процесс нь талбайгаар биш эзлэхүүнээр хураангуйлсан хэмжээ тул цөмийн эрчим хүчээр устөрөгчийг их хэмжээгээр үйлдвэрлэхэд хэмнэлттэй болно

Цахилгаан эрчим хүч ба устөрөгч хамт үйлдвэрлэх ердийн горимд реактороос гарсан 950°C температуртай дулаан зөөгч гели завсрын дулаан солилцуурын анхдагч хэсэгт орж, устөрөгч үйлдвэрлэх процессын хоёрдогч гелийг 900°C хүртэл халаана. Ойролцоогоор 170 МВт дулааныг завсрын дулаан солилцуурт шилжүүлж, завсрын хэлхээгээр устөрөгчийн процесс руу зөөдөг бөгөөд энэ процессоор өдөрт 0.64 сая Нм³ (58 тонн/хоног) устөрөгч үйлдвэрлэнэ. Реакторын үлдсэн дулааны чадлыг шууд циклтэй хийн турбины төхөөрөмжид цахилгаан эрчим хүч болгон хувиргана. Завсрын дулаан солилцуурын анхдагч талаас гарч буй 850°C температуртай гелийн хий нь хийн турбин руу орж дулааныг цахилгаан эрчим хүч болгон хувиргадаг. Нийт 202 МВт цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх бөгөөд үүний 12 орчим хувийг цөмийн цахилгаан станц болон устөрөгчийн станцын өөрийн хэрэглээг

хангахад ашигладаг. Цахилгаан шугам сүлжээнд нийлүүлэх цэвэр эрчим хүч нь 178 МВт болно (2.16-р зураг).



Зураг 2.16. GTHTR300 реактор дээр цахилгаан эрчим хүч, устөрөгч хамт үйлдвэрлэх бүдүүвч

1-рекуператор; 2-реактор; 3-тусгаарлах хаалт; 4-гелийн эргэлт; 5-шугаи сүлжээнд очих цахилгаан эрчим хүч; 6-хийн турбин; 7-завсрын дулаан солилцуур; 8- Халуун хөргүүрийн дотоод урсгал; 9- засрын хөргүүр; 10- Анхдагч даралтын хил дээрх хүйтэн урсгал.

2.4 Маш өндөр температурын хийн реакторын голомтын дизайны судалгаа

2.4.1 МӨТХР-ын голомтын дизайны судалгаа

Сүүлийн жилүүдэд дэвшилтэт дизайнтай, аюулгүй ажиллагаатай цөмийн эрчим хүчний реакторуудын голомтын дизайныг олон улсын судалгааны төвүүд болон их сургуулиудын эрдэмтэд ихэд сонирхон хийж байна. 2011 онд Японы Фүкүшима Дайчий цөмийн станцад гарсан ослоос үүдэж төрөлхийн аюулгүй шинж чанартай реакторын дизайн эрчимтэй судлагдах болсон.

Маш өндөр температурын хийн-хөргүүртэй реактор (МӨТХР) нь IV үеийн реакторын нэг төрөл болон судлагдаж байгаа ба үүнд голомтын дизайны хийцийн материалууд чухал ач холбогдолтой. МӨТХР нь өндөр температурт аюулгүй ажиллагаатай сайжруулсан олон давхаргат TRISO түлш, дулаан багтаамж өндөртэй бал чулуун голомт болон гелийн инертийн хийн хөргүүртэй учраас ердийн бус ажиллагааны үед голомт ба хөргүүрийн температур хурдан ихсэхгүй тул осолд хүргэх магадлал багатай байдаг. TRISO түлш нь

түлшний чөмөг болон хуваагдлын хатуу болон хий хэлбэртэй бүтээгдэхүүнийг гадагш алдахгүй барих олон давхаргуудаас бүрдэнэ. (Зураг 2.17) Энэ нь 1600° хүртэлх өндөр температурыг даах чадвартай.[19]



Зураг 2.17. TRISO бөөм, түүний давхаргууд

Бид өмнөх судалгааны ажлуудаар реакторыг амжилттай унтраасны дараа голомтод хуримтлагдсан хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийн задралаас үүсэх задралын дулааныг идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай, голомтын төвдөө ойлгогчтой нэг блоктой, газар дээр байрлах призман ӨТХР-ийн голомтын дизайны параметруудийн хамаарлыг гарган авсан.[20]

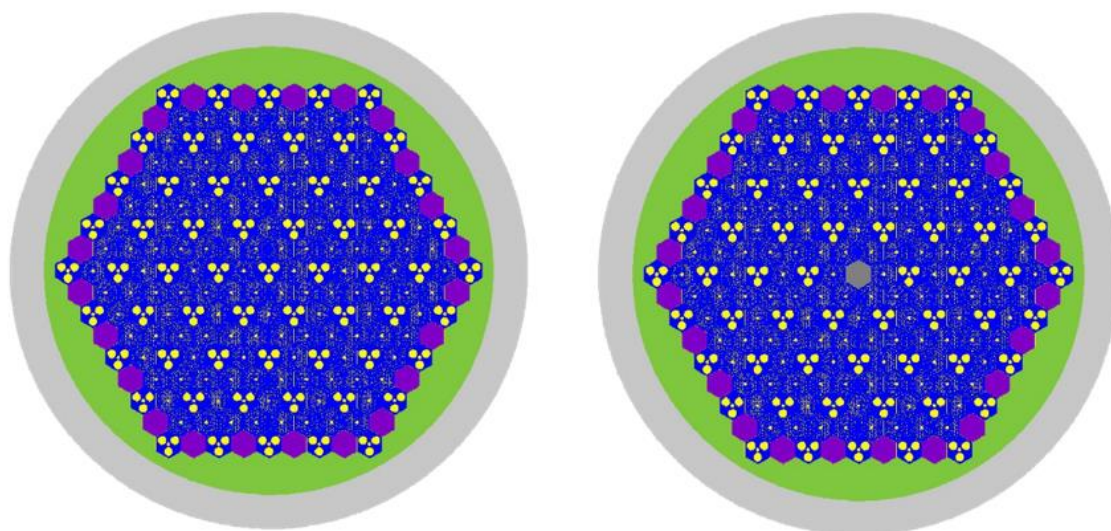
Энэ ажилд 100 МВт чадлын, маш өндөр температурын хийн хөргүүртэй реакторын голомтын дизайныг гүйцэтгэн, нейтроник анализ хийж критик байдлын болон түлшний шаталтыг тодорхойлох зорилго тавив. Голомтын дизайныг төвдөө ойлгогчтой болон төвдөө ойлгогчгүй дизайнаар гүйцэтгэж, сайжруулсан TRISO түлш ашигласан. Энэ нь түлшний чөмгийг бүрхсэн ZrC нэмэлт давхаргатай. Ингэснээр түлшний механик шинж чанар маш өндөр температурт өөрчлөгдөхгүй, цацраг идэвхт хуваагдлын бүтээгдэхүүн түлшнээс болон голомтоос цаашилбал реактораас гадагш алдахгүй байх нөхцлийг бүрдүүлнэ. Гарган авсан үр дүнгээ уламжлалт TRISO түлштэй ӨТХР-ийн голомтын дизайнтай харьцуулж, түлшний ZrC давхаргын нөлөөг авч хэлэлцэв.

2.4.2 Голомтын дизайн

Цилиндр голомтын хэмжээ болон дизайн нь Японы Атомын Энергийн Агентлагт ажиллаж буй өндөр температурын тест реакторын голомтыг бүрдүүлэх блокуудтай адил болно. Энэ удаа өмнөх гүйцэтгэсэн цагираган болон цилиндр голомтын дизайн дээр суурилж ZrC нэмэлт давхаргатай сайжруулсан түлш ашиглаж үр дүнгүүдээ гаргаж авав [20]. Хүснэгт 2.6-д төвдөө ойлгогчтой болон ойлгогчгүй голомтын дизайны үндсэн үзүүлэлтүүдийг, Зураг 2.18-д голомтын хөндлөн зүсмэгийг харуулав.

Хүснэгт 2.6. Голомтын үндсэн үзүүлэлтүүд

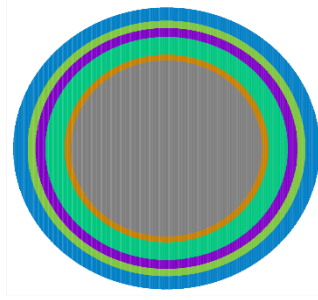
Үзүүлэлт	Төвдөө ойлгогчгүй дизайн	Төвдөө ойлгогчтой дизайн
Реакторын дулааны чадал, МВт	100	100
Голомтын температур, оС	850	850
Голомтын эффектив өндөр, м	6.38	6.38
Голомтын эквивалент радиус	2.46	2.49
Реакторын ойлгогчийн материал	Бал чулуу	Бал чулуу
Реакторын хөргүүрийн материал	Гелийн хий	Гелийн хий
Түлш	UO ₂	UO ₂
Түлшний баяжуулалт(wt%)	20	20



Зураг 2.18. Голомтын хэвтээ зүсмэг а) Төвдөө ойлгогчгүй голомтын дизайн б) Төвдөө ойлгогчийн нэг блокторой дизайн

2.4.3 Түлшний дизайн

IV үеийн реакторын ажиллагааны гол хүчин зүйл бол түлш юм. МӨТХР-ийн түлш нь сайжруулсан буюу ZrC агуулсан түлш ба нийт түлшний чөмгийг бүрхсэн 5 давхаргатай. Үүнд: түлшний чөмөг-119.4 μm диаметртэй, түлшний чөмгийн гадуур ZrC давхарга байрласан бөгөөд 20 μm зузаантай, сүвэрхэг давхарга нь 60 μm зузаантай, дотоод пиролизитик карбон давхаргын зузаан 30 μm , цахиурт карбид давхаргын зузаан 25 μm , гадаад пиролизитик карбон давхарга нь 45 μm зузаантайгаар тус тус байрласан. (Зураг 2.19) Уг түлшний дизайн нь 1173K-д 500 өдөр шарагдахад хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийг алдалгүй механикийн болоод аюулгүй шинж чанарыг багтаасан дэвшилтэт дизайн юм [19].



Зураг 2.19. Сайжруулсан TRISO түлшний хэвтээ зүсмэг

Нейтроник анализ

Энэхүү ажилд нейтроник анализ хийх тооцооллыг тасралтгүй энергитэй нейтроны харилцан үйлчлэлийг Монте Карло аргаар тооцоолдог, Японы атомын энергийн Агентлагийн хөгжүүлсэн компьютерийн код болох MVP2.0 [21], MVPBURN [22]-ийг цөмийн урвалын өгөгдлийн сан JENDL4.0 [23]-ийн хамт ашиглан гүйцэтэв. Тооцооллыг бүх удирдлагын савааг голомтоос гарган, үүсэх орон зайг гелийн хийгээр дүүргэсэн тохиолдолд хийсэн. Өөрөөр хэлбэл реактор бүрэн чадлаар ажиллаж байна гэж үзсэн. MVP 2.0 [21] кодоор реакторын голомт дэхь нейтрон үржилтийн коэффициентийг тооцоолохдоо голомт дотор үүссэн нейтронуудын санамсаргүй алхамтуудыг тооцоолохын тулд тэдний мөрийн уртыг үнэлэх, мөргөлдөөний нягтыг үнэлэх, аналог үнэлэгчүүдийг ашиглан үр дүнг гаргана.

2.4.4 Үр дүн ба хэлэлцүүлэг

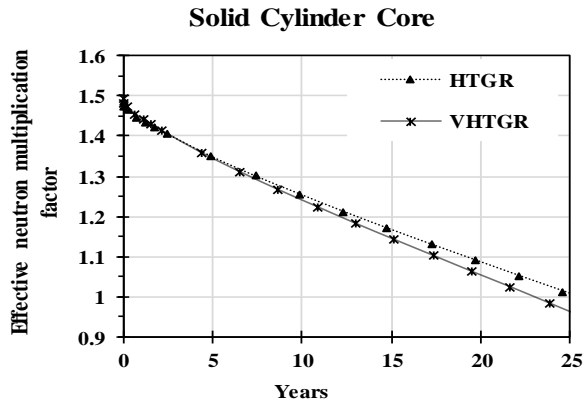
ZrC нэмэлт давхарга агуулсан TRISO түлштэй төвдөө ойлгогчгүй болон төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ийн дизайны нейтроник анализийн үр дүнг ӨТХР голомтын нейтроник анализийн үр дүнтэй харьцуулан Зураг 2.20-23 болон Хүснэгт 2.7-г харуулав.

Хүснэгт 2.7. Бүрэн чадлаар ажиллах голомтуудын нейтроник анализийн үр дүн

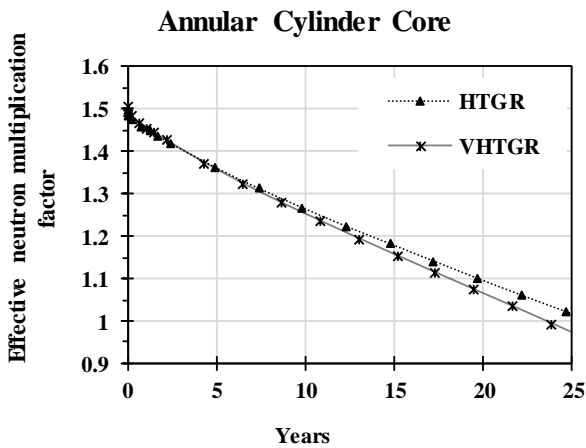
Реакторын дизайн	Кэфф,0 (алдаа%)	T _{голомт} (жил)	В _{түлшт} (ГВт*өдөр/тн)
Цилиндр ӨТХР	1.4862(0.0205)	25.4	100.0
Цилиндр МӨТХР	1.4941(0.0232)	22.9	106.0
Цагираган ӨТХР	1.4977(0.0183)	26.4	106.0
Цагираган МӨТХР	1.5056(0.0203)	23.4	108.5

Эдгээр реактор нь ижил чадалтай, голомтын эзэлхүүн адил, хуваагдагч изотопын агууламж ижил болно. Ялгаа нь МӨТХР нь сайжруулсан буюу ZrC нэмэлт давхаргатай TRISO түлштэй, ӨТХР-ийн хувьд уламжлалт TRISO түлш агуулсан. Үр дүнгээс харвал ZrC

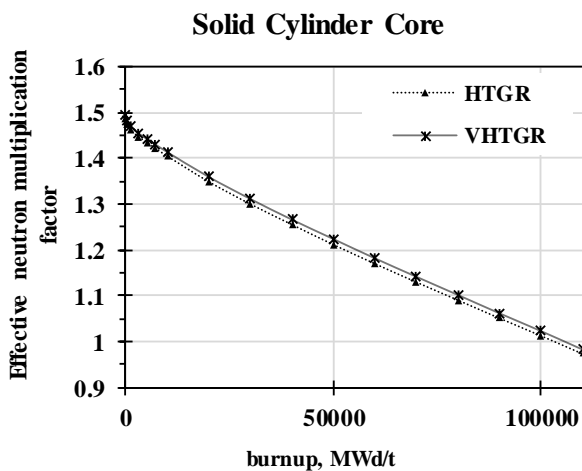
давхаргын нөлөөгөөр түлшний шаталт ихэсч, реакторын голомт дэхь нэг циклийн үргэлжлэх хугацаа багассан байна. Үр дүнгийн дэлгэрэнгүйг дараах зургуудад харуулсан.



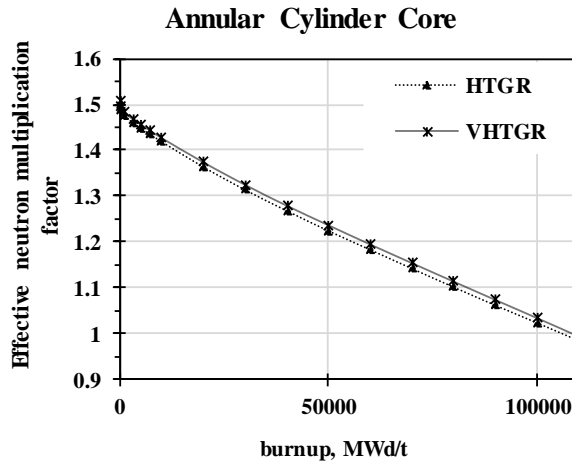
Зураг 2.20 Төвдөө ойлгогчгүй реакторын хувьд Θ ТХР болон М Θ ТХР-ийн нейтрон үржилтийн коэффициентийн хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт



Зураг 2.21 Төвдөө ойлгогчтой реакторын хувьд Θ ТХР болон М Θ ТХР-ийн нейтрон үржилтийн коэффициентийн хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт

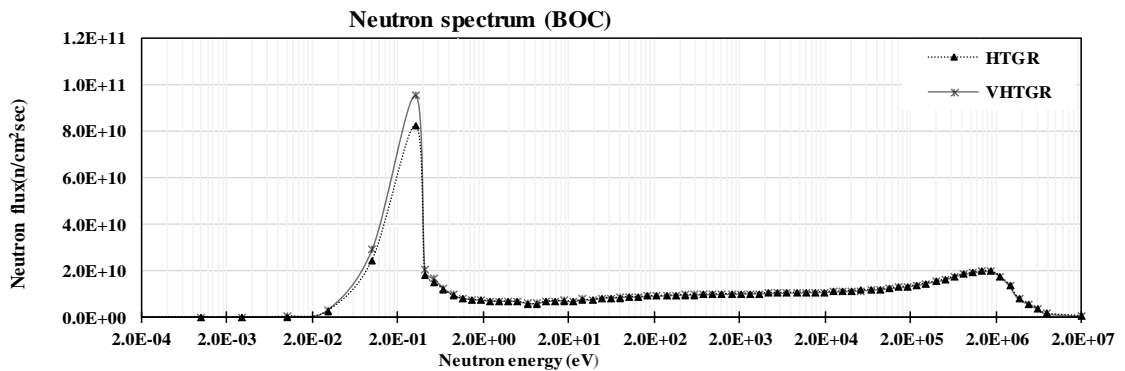


Зураг 2.22. Төвдөө ойлгогчгүй реакторын хувьд Θ ТХР болон М Θ ТХР-ийн түлшний шаталтын хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт

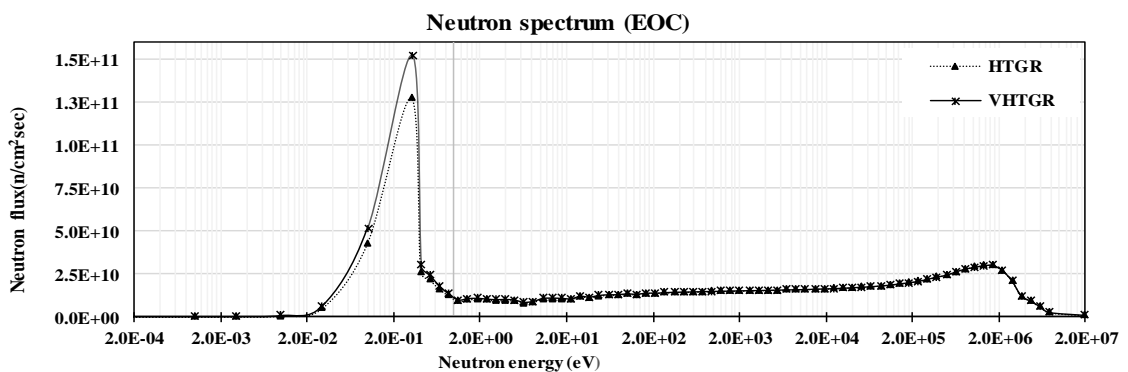


Зураг 2.23. Төвдөө ойлгогчтой реакторын хувьд ӨТХР болон МӨТХР-ийн түлшний шаталтын хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт

Түлшний ZrC нэмэлт давхаргын нөлөөгөөр реакторын ажиллах жил багасч, түлшний шаталт ихэссэн шалгааныг тайлбарлахын тулд төвдөө ойлгогчтой реакторын МӨТХР болон ӨТХР-ийн голомтоорх хугацааны эхэн ба сүүл үеийн нейтроны спектр болон урвалын хурдуудыг харьцуулан Зураг 2.24 болон Зураг 2.25-д харуулав.

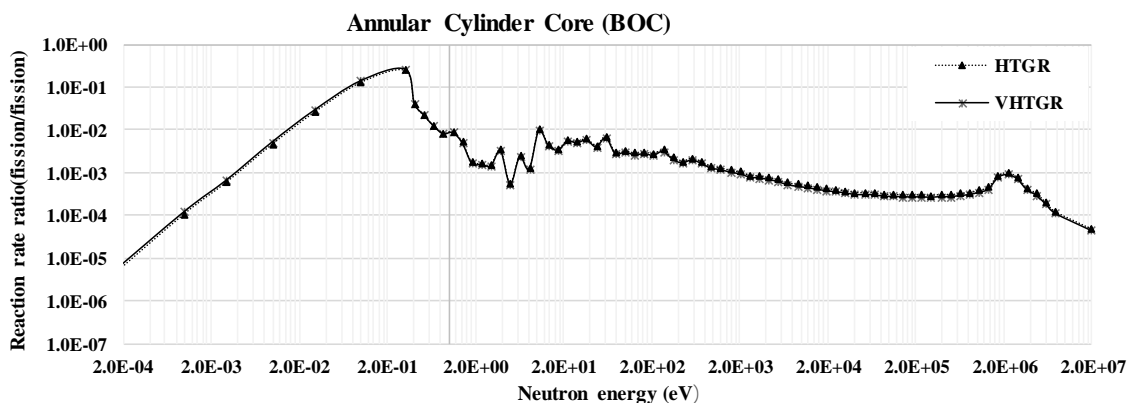


Зураг 2.24. Төвдөө ойлгогчтой реакторын ажиллагааны эхэн үеийн ӨТХР болон МӨТХР-ийн нейтроны спектрийн харьцуулалт

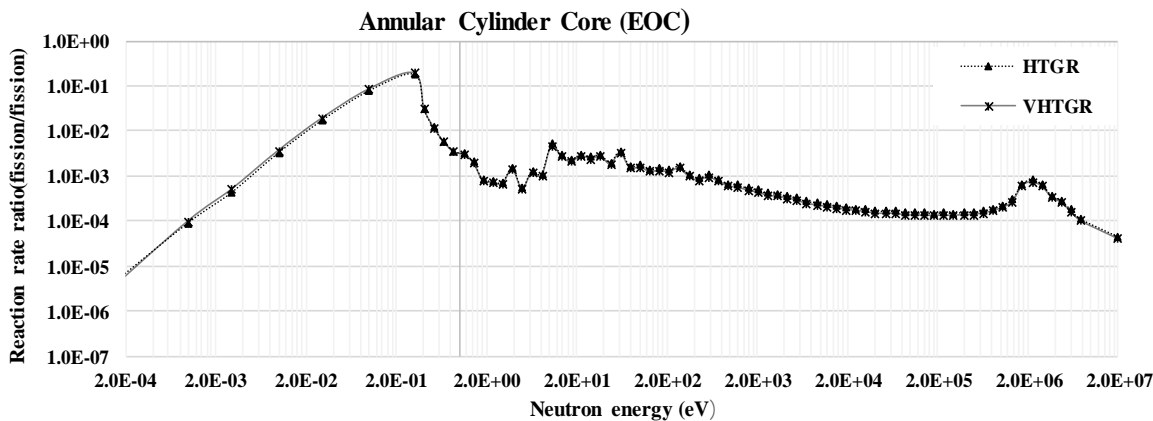


Зураг 2.25. Төвдөө ойлгогчтой реакторын ажиллагааны сүүл үеийн ӨТХР болон МӨТХР-ийн нейтроны спектрийн харьцуулалт

Үр дүнгээс харахад бүх энергийн мужид МӨТХР-ийн нейтроны урсгал их байна. ZrC давхаргын Zr нь нейтрон шингээх хөндлөн огтлол багатай учир хуваагдах урвалаас үүсэх хурдан энергийн нейтроны спектр их байна. Нөгөө талаас уг давхаргын C нь нейтрон сарниулагч буюу удаашруулагчийн үүрэг гүйцэтгэдэг учир дулааны энергийн нейтроны урсгал ӨТХР-тэй харьцуулбал арай илүү өндөр байна. Дээрх үр дүнг илүү нарийвчлан тодорхойлохын тулд төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ийн хуваагдах урвалын хурдыг адил дизайнтай ӨТХР-ийн хуваагдах урвалын хурдтай харьцуулсан харьцааг тооцоолов. (Зураг 2.26-27).



Зураг 2.26. Төвдөө ойлгогчтой реакторын ажиллагааны эхэн үеийн ӨТХР болон МӨТХР-ийн хуваагдах урвалын хурдны харьцаа

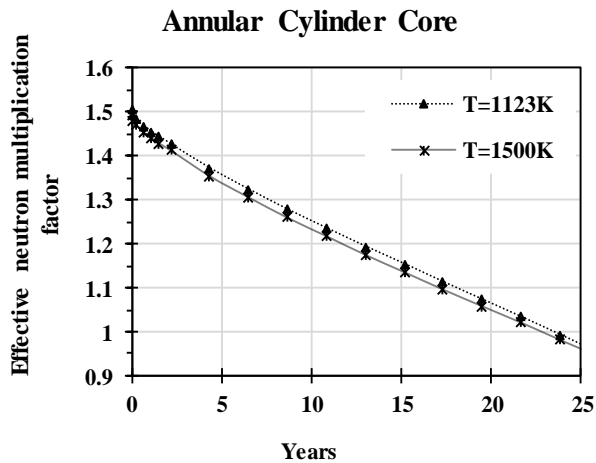


Зураг 2.27. Төвдөө ойлгогчтой реакторын ажиллагааны сүүл үеийн ӨТХР болон МӨТХР-ийн хуваагдах урвалын хурдны харьцаа

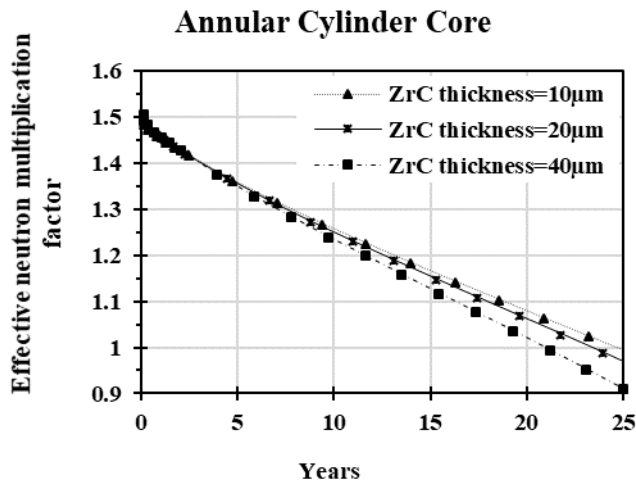
Нийт гаргасан үр дүнгээс харахад ZrC давхаргын нөлөөгөөр реакторын ажиллагааны эхний үед нейтрон үржилтийн коэффициент их байсан. Үүнд ZrC нь SiC давхаргыг бодвол нейтрон илүү шингээдэг мөн C нь ойлгогчийн үүрэг гүйцэтгэснээр дулааны энергитэй нейтрон олширч, урвалыг эрчимжүүлсэн. Хугацаа өнгөрөх тусам урвал эрчимтэй явагдаж, шаталт их явагдсанаар хуваагдагч изотопууд төдийчинээ хорогдон реакторын ажиллагааны төгсгөлд нейтрон үржилтийн коэффициент буурсан. Голомт даяарх МӨТХР-ийн хуваагдах

урвалыг ӨТХР-ийн хуваагдах урвалтай харьцуулахад реакторын ажиллаганы эхэн үед дээрх дурдсан шалтгаанаар МӨТХР-ийн хуваагдах урвалын хурд дулааны энергиний мужид их явагдаж, харин реакторын ажиллагааны төгсгөл хэсэгт эсэргээрээ болж буурсан.

Үүний дараа реакторын ажиллах горимын температурыг ихэсгэж 1500К температурт $k_{эф}$ -ийг тодорхойлоход Допплерийн нөлөөнөөс болж реакторын ажиллах жил болон түлшний шаталт бага зэрэг багасч байсан. (Зураг 2.28)



Зураг 2.28. Төвдөө ойлгогчтой реакторын хувьд температур ихсэхэд нейтрон үржилтийн коэффициентийн өөрчлөлт



Зураг 2.29. Төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ийн ZrC давхаргын зузаануудыг нэмэхэд нейтрон үржилтийн коэффициентийн өөрчлөлт

МӨТХР-ийн түлшний ZrC давхаргын нөлөөг судлахын тулд ZrC давхаргын зузаануудыг 10 мкм, 20 мкм, 40 мкм болгон өөрчилж тооцооллыг гүйцэтгэж, түүний нейтроник анализийн үр дүнг Зураг 2.29-т харуулав. Үр дүнгээс харахад түлшний ZrC нэмэлт давхаргын зузаан нэмэгдэх тусам голомт дэхь түлшний нэг циклийн үргэлжлэх

хугацаа багасч байсан хэдий ч реактор ажиллаж эхлэх үеийн нейтрон үржилтийн коэффициент болон түлшний шаталт ихэсч байсан.

Дүгнэлт

1. Энэ ажилд 100МВт чадлын төвдөө ойлгогчтой болон төвдөө ойлгогчгүй сайжруулсан түлш ашигласан МӨТХР-ийн голомтын дизайныг хийж, реакторын нейтроник анализ гүйцэтгэн критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэв.

2. МӨТХР-ийн нейтроник анализийн үр дүнг ӨТХР-ийн үр дүнтэй харьцуулахад реакторын ажиллах жил багассаг хэдий ч түлшний шаталт ихэсч байгааг олж тайлбарлав.

3. Мөн TRISO түлшний ZrC нэмэлт давхаргын зузаан нейтроник анализийн үр дүнд хэрхэн нөлөөлөхийг олж тогтоов.

2.4.5 МӨТХР-ын голомтын түлшний дизайны судалгаа

Дэлхий нийтэд тулгамдаж буй байгаль, орчинд сөргөөр нөлөөлж байгаа олон асуудлууд дундаас цаг агаарын өөрчлөлтийг бууруулахын тулд, дэлхийн дулаарлыг зогсоохын тулд үр дүнтэй арга хэмжээ авах шаардлагатай байна. Нүүрс, байгалийн хий, газрын тос зэрэг шатах түлшийг ашиглан цахилгаан эрчим хүчийг үйлдвэрлэх үйл ажиллагаа нь хүлэмжийн хийг ихээр ялгаруулж, дэлхийн дулаарлыг үүсгэх гол шалтгаан болдог ба үүнийг зогсоон, эрчим хүчээ найдвартай, тогтвортой хангах арга зам нь цөмийн эрчим хүчийг хэрэглэх юм. Цөмийн эрчим хүчний реактор систем нь I, II, III гэсэн үе шаттайгаар хөгжиж ирсэн ба одоо хөгжлийн IV үеийн реакторуудын дизайны судалгаа хийгдэж байна. Энэ үед хамаарах реакторууд нь аюулгүй ажиллагаатай, эдийн засгийн үр ашигтай, ашигласан түлшний хаягдал багатай, цөмийн зэвсэг үл дэлгэрүүлэх бодлогод нийцэхээр загварчлагдах ба үүнд дэлхийн улс орнуудын гаргасан реакторын загваруудаас зургаан технологийг сонгон судалж байна. Эдгээр дэвшилтэт реакторын нэг болох Маш өндөр температурын хийн-хөргүүртэй реактор (МӨТХР) нь бал чулуун удаашруулагчтай, гелийн хийн хөргүүртэй дулааны реактор юм. Бусад дэвшилтэт реактортай харьцуулбал МӨТХР-ын давуу тал нь хийн гаралтын температур маш өндөр буюу 1000°C хүрдэг тул эрчим хүч үйлдвэрлэхээс гадна устөрөгчийг үйлдвэрлэх, төрөл бүрийн процессийг дулаанаар хангах боломжтойд оршино. Ийм өндөр температурт хүрэхэд түлшний дизайн чухал үүрэг гүйцэтгэнэ. Түүнчлэн реакторыг ажиллах температурт хүргэх түлшний зайлшгүй шаардлага нь аюулгүй байдлыг хангах явдал юм. TRISO гэгдэх олон давхар бөмбөлөг түлш нь өндөр температурт бүрэн бүтэн байдлаа алдахгүй, аюулгүй ажиллагаатай болох нь туршилтаар батлагдсан. Энэ түлшний хамгийн төв хэсэг байх жижиг бөмбөлгийг

түлшний чөмөг гэх ба түүний гадуур бал чулуун (Buffer, IPyC, OPyC) болон цахиурт карбид (SiC) материал бүхий дөрвөн давхарга бүрхэн байрладаг. Эдгээр давхарга нь ямар ч нөхцөлд хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг гадагш алдахгүй, тогтоон барих үүрэгтэй. МӨТХР-ын түлшний хөгжлийн эхэн үеийн шатанд BISO түлшийг ашиглаж байсан ба энэ нь хуваагдагч түлшний чөмгийн гадуурх бал чулуун давхаргуудаас бүрдэнэ. Хэдий давхарган бүтэцтэй ч гэлээ эдгээр давхаргууд нь хуваагдах урвалаас үүсэх хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийг хангалттай барьж чадахгүй байсны улмаас одоогийн TRISO түлш болон хөгжсөн. TRISO түлшний хувьд SiC давхарга нь өндөр нягттай бал чулуун давхаргуудын завсарт байрладаг. Реакторын хөгжлийн үе шаттай зэрэгцэн олон улсын эрдэмтэн судлаач нар уг түлшийг маш өндөр температурт аюулгүй ажиллуулах талаар олон төрлийн судалгаа хийж байгаа ба үүнд үндсэн TRISO түлшний SiC давхаргын механик үзүүлэлтүүд 1500°C-ийн маш өндөр температурт муудаж байсан учраас уг түлшний илүү дэвшилтэт технологийг эрэлхийлж байна. Иймд уг түлшийг маш өндөр температурт аюулгүй ажиллуулахын тулд түлшин дэхь SiC материалыг өөр тохирох материалаар солих шаардлага тулгарч, дэвшилтэт түлшний хэд хэдэн санааг дэвшүүлэн, тэдгээрийг цөмийн цацрагаар шарж аюулгүй байдлын судалгааг хийж байна. Эдгээр дэвшилтэт дизайнд нэмэлт ZrC болон SiC агуулсан түлшнүүд хамаарах ба цацрагаар шарсан үр дүнг харьцуулахад ZrC агуулсан TRISO түлшний үзүүлэлт сайн байсан. Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд янз бүрийн нэмэлт давхаргатай дэвшилтэт түлштэй МӨТХР-ын голомтын нейтроник тооцооллыг гүйцэтгэн, тэдгээр үзүүлэлтүүдийг харьцуулан судлах зорилго тавив. Ингэснээр МӨТХР-д тохирох аюулгүй ажиллагаатай, нейтроник үзүүлэлт сайтай түлшний боломжит хувилбарыг сонгох боломжтой юм.

2.4.6 Судалгааны арга зүй

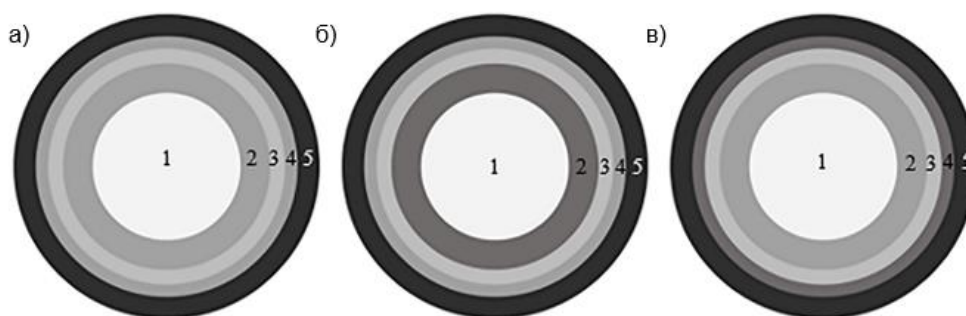
Дэвшилтэт түлш бүхий МӨТХР-ын нейтроник үзүүлэлтийг судлахын тулд тасралтгүй энергитэй нейтроны харилцан үйлчлэлийг Монте Карло аргаар тооцоолдог Японы Атомын Энергийн агентлагаас хөгжүүлсэн компьютерийн код болох MVP2.0 [21], MVPBURN [22]-ийг цөмийн өгөгдлийн сан JENDL-4.0[23]-ийн хамт ашиглан гүйцэтгэв. Бид өмнөх судалгааны ажлаараа TRISO түлштэй төвдөө ойлгогчтой болон төвдөө ойлгогчгүй МӨТХР-ын голомтын нейтроник анализийг хийсэн [20]. Энэ ажилд төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтод янз бүрийн дэвшилтэт түлшийг ачаалан, голомтуудын нейтроник үзүүлэлтийг судлав. Үүнд голомтын геометрийн үзүүлэлт болон тооцооллын нөхцөл нь өмнөх судалгааны ажилтай ижил болно. MVP 2.0 [21] кодоор реакторын голомтын нейтроник үзүүлэлтийг тооцоолохдоо голомт дотор үүссэн нейтроннуудын санамсаргүй алхамыг мөрийн урт, мөргөлдөөний нягт, болон бусад аналог үнэлэгчүүдийг ашиглан статистикээр үнэлдэг. Тооцоолол хийхдээ реакторт үүссэн нейтрон бүр 50000 ялгаатай

харилцан үйлчлэл хийнэ гээд хуваагдлын 100 нейтроны нийт 5000000 санамсаргүй харилцан үйлчлэлийг авч үзсэн. Статистик боловсруулалтын үр дүнг сайжруулахын тулд эхний 20 нейтроны харилцан үйлчлэлийг тооцоогүй болно. Төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ийн голомтын үндсэн үзүүлэлтийг ашиглан төвдөө ойлгогчтой, 100 МВт дулааны чадалтай МӨТХР-ын нейтроник анализийг гүйцэтгэхдээ түлшний хийцийн загвараас хамааруулан 3 хэсэгт хуваан, үр дүнг харьцуулав. Нэгдүгээр хэсэг нь адил диаметртэй сайжруулсан TRISO түлштэй, төвдөө ойлгогчтой голомтын тооцооллоос бүрдэнэ. Хоёрдугаар хэсэгт, нэмэлт ZrC давхарга агуулсан TRIZO түлштэй, харин гуравдугаар хэсэгт, нэмэлт SiC давхаргатай TRISO түлштэй, төвдөө ойлгогчтой голомтын тооцооллыг гүйцэтгэсэн.

2.4.7 Түлшний дизайн

а. Адил диаметртэй, сайжруулсан TRISO түлшний дизайн

Энэ хэсэгт уламжлалт TRISO түлшнээс гадна хоёр өөр дизайн хамаарах ба түлшний бүтцийг Зураг 2.30-т харуулав. Зураг 2.30-т харуулсанчлан ZrC агуулсан TRIZO түлшнүүдийн давхаргын тоо, давхаргын зузаан харгалзан адил болно. Хүснэгт 2.8-т адил диаметртэй, сайжруулсан түлшний геометр хэмжээсийг өгөв.



Зураг 2.30. Адил диаметртэй, сайжруулсан TRISO түлшний бөөмийн зүсмэг

- а) Түлш-1
- б) Түлш-2
- в) Түлш-3

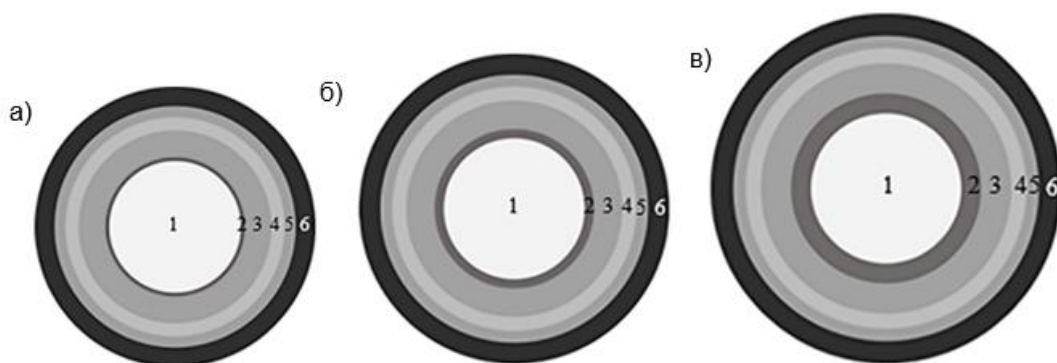
Хүснэгт 2.8. Адил диаметртэй сайжруулсан TRISO түлшний геометр хэмжээс

Хэмжээ	Радиус, мкм	Зузаан, мкм			
		60	30	25	45
Түлш	298.5				
Түлш-1	Түлшний чөмөг	Buffer	IPyC	SiC	OPyC
Түлш-2		ZrC бүхий Buffer			
Түлш-3		Buffer	ZrC		

Түлш-1 нь үндсэн TRISO түлшний дизайн, Түлш-2-д сүвэрхэг бүтэцтэй Buffer давхаргын эзлэхүүний 40 %-ийг эзэлж байхаар ZrC материалыг жигд тархалттайгаар нэмж өгсөн [19], Түлш-3 нь SiC давхаргыг ZrC-ээр сольсон дизайн юм. Түлш-2-ыг 1500°C-ийн өндөр температурт, 12000 цаг орчим цөмийн цацрагаар шарахад Ag болон Eu зэрэг хуваагдлын бүтээгдэхүүн тодорхой хэмжээгээр алдагдаж байсан [19].

б. Нэмэлт ZrC агуулсан TRIZO түлшний дизайн

Ердийн TRISO түлш өмнө дурдсанчлан 5 давхаргатай ч маш өндөр температурт (>1700 °C) механик шинж чанар муудаж, бүрэн бүтэн байдал нь алдагддаг [19]. Тиймээс TRISO бүрмэл түлшний маш өндөр температурт ажиллах чадварыг дээшлүүлэхийн тулд SiC давхаргаас илүү үзүүлэлттэй материалын шаардлага гарсан ба ZrC материалыг түлшний чөмгийн гадуур буюу сүвэрхэг давхаргын дотуур бүрж 1500°C температурт 500 өдрийн турш цөмийн цацрагаар шарах үед ямар ч хуваагдлын бүтээгдэхүүн алдагдахгүй байсан [19]. Тийм ч учраас уг нэмэлт ZrC агуулсан TRIZO түлш нь аюулгүй байдлын шинж чанараараа дэвшилтэт түлшний нэг гэж үзэж болно. Энэ түлшний дизайнд нэмэлт ZrC давхаргыг түлшний чөмгийн гадуур бүрсэн байдлаар загварчилсан ба Зураг 2.31-т харуулснаар тооцоололд нэмэлт ZrC зузааныг 10 мкм (Түлш-4), 20 мкм (Түлш-5), эсвэл 40 мкм (Түлш-6) гэж сонгосон. Хүснэгт 2.9, Зураг 2.31-т харуулсанчлан ZrC нэмэлт давхаргаас бусад давхаргын материал, зузааныг өөрчлөөгүй.



Зураг 2.31. Нэмэлт ZrC давхарга бүхий сайжруулсан TRIZO түлшний зүсмэг

- а) Түлш-4
- б) Түлш-5
- в) Түлш-6

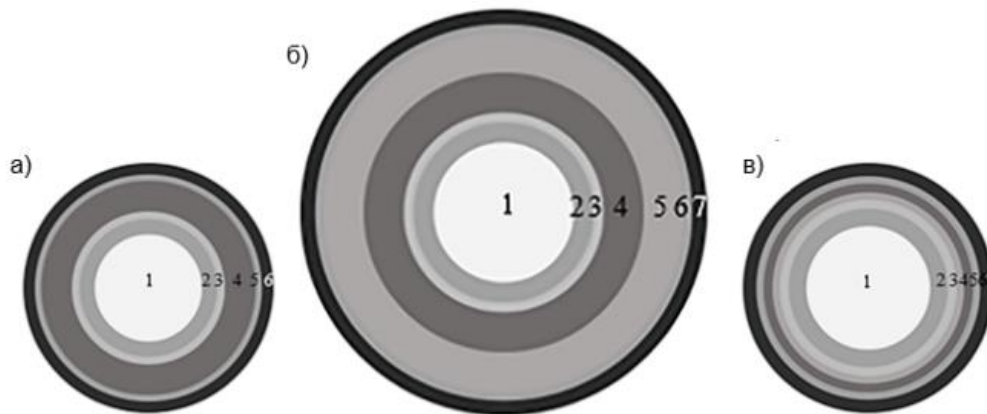
Хүснэгт 2.9. Нэмэлт ZrC агуулсан сайжруулсан TRIZO түлшний геометр хэмжээс

Хэмжээ	Радиус, мкм	Зузаан, мкм				
	Түлшний чөмөг	ZrC	Buffer	IPyC	SiC	OPyC

Түлш						
Түлш-4	298.5	10	60	30	25	45
Түлш-5		20				
Түлш-6		40				

в. SiC агуулсан TRISO түлшний дизайн

Уламжлалт TRISO түлшин дэх SiC давхарга нь түлшний бат бөх байдлыг хангах үндсэн үүрэгтэй ч хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдтэй харилцан үйлчлэлд ордог. Үүнээс үүдэх эвдрэл гэмтлээс урьдчилан сэргийлэхийн тулд нэмэлт SiC давхаргуудтай дэвшилтэт түлшний загвар бий болсон. Зураг 2.32-г эдгээр түлшний бүтцийг Хүснэгт 2.10-г геометр хэмжээсийг тус тус харуулав. Түлш-7 нь нэмэлт 120 мкм зузаантай SiC+PyC давхаргатай бөгөөд үндсэн SiC давхаргын дотор талд байрлана. Түлш-8-ын загвар нь өмнөх загвартай ижил боловч 120 мкм зузаантай нягт PyC давхарга нь SiC+PyC болон SiC давхаргын хооронд нэмэлтээр байрлана. Түлш-9-ын хувьд нэмэлт SiC давхарга орсон болно. Эдгээр SiC агуулсан дэвшилтэт түлшинд нэг цагийн турш 1500°C температурт цөмийн цацрагийн шарлагаас шалтгаалсан гэмтэл үүсээгүй болно [19].



Зураг 2.32. Нэмэлт SiC агуулсан сайжруулсан TRISO түлшний зүсмэг

- а) Түлш-7
- б) Түлш-8
- в) Түлш-9

Хүснэгт 2.10. SiC агуулсан TRISO түлшний геометр хэмжээс

№	Давхарга/Түлш	Түлш-7	Түлш-8	Түлш-9
1	Түлшний чөмөг	298.5		
2	Buffer	60		
3	PyC	30		
4	SiC+PyC _{a,b} SiC _c	120	120	25
5	SiC _a PyC _{b,c}	25	120	30

6	ОРyC _a SiC _{b,c}	45	25	25
7	ОРyC	-	45	45

2.4.8 Үр дүн ба хэлэлцүүлэг

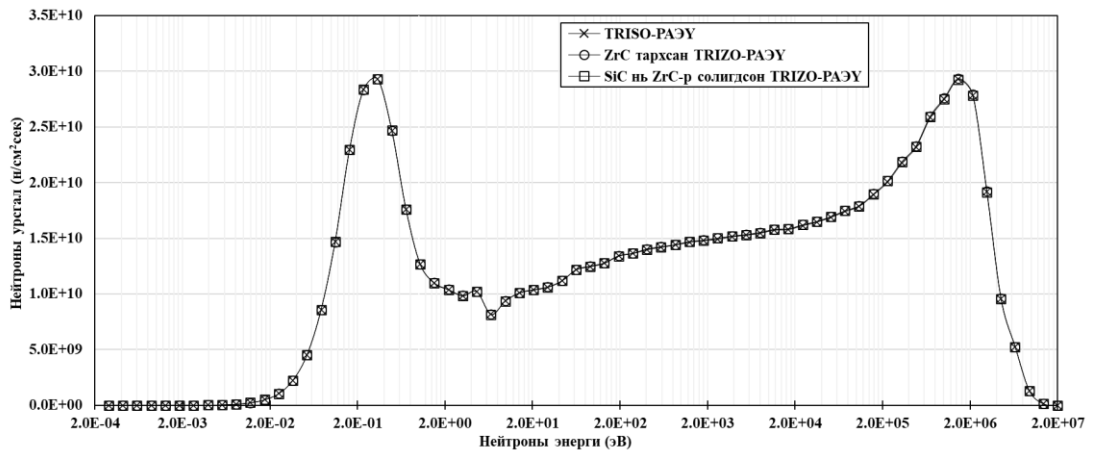
а. Төвдөө ойлгогчтой, ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голомт

Энэ хэсэгт нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлштэй МӨТХР-ын голомтын нейтроник тооцооллыг гүйцэтгэн нейтроник үр дүнг Хүснэгт 2.11-д харуулав. Үр дүнгээс харвал, үндсэн TRISO түлштэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын эффектив нейтрон үржүүлэх фактор ($k_{эфф}$) 1.4977 (0.02%) түлшний шаталт 106 ГВт*өдөр/тн, реакторын ажиллах жил 26 жил орчим байхад сүвэрхэг бүтэцтэй buffer давхаргад ZrC материал жигд тархсан TRIZO түлштэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын $k_{эфф}=1.4962$ (0.02%) түлшний шаталт 106 ГВт*өдөр/тн реакторын ажиллах жил 26 жил, SiC давхаргыг ZrC-аар сольсон TRIZO түлштэй МӨТХР-ын голомтын хувьд $k_{эфф}=1.4962$ (0.02%) түлшний шаталт 106 ГВт*өдөр/тн, реакторын ажиллах жил 26 жил тус тус байна. Нейтроник үзүүлэлт ойролцоо гарсан энэ үр дүнг тайлбарлахын тулд МӨТХР-ын голомт даяарх реакторын ажиллагааны эхэн (РАЭҮ) болон сүүл (РАСҮ) үеийн нейтроны урсгал болон нейтрон үүсэх хурдыг харгалзан Зураг 2.33-2.35-д харуулав. Янз бүрийн түлшний дизайнтай МӨТХР-ын голомт тус бүр адил тооны буюу нийтдээ 29 тэрбум орчим TRIZO бөөм агуулсан байна. Энэ нь түлшний эзлэхүүн болон түлшний эзлэх хувь нь адил учраас юм.

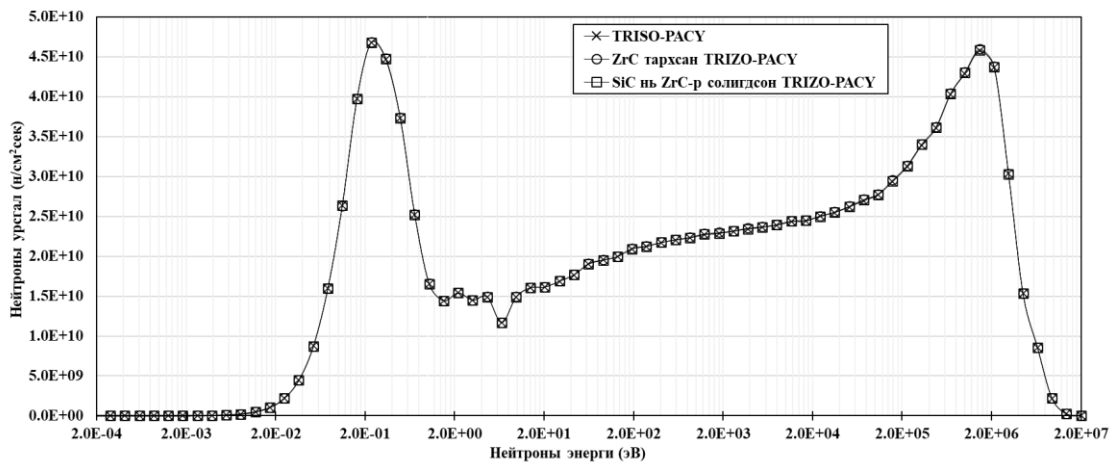
Хүснэгт 2.11. Төвдөө ойлгогчтой ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын нейтроник анализын үр дүн

Түлшний төрөл	$k_{эфф,0}$ (алдаа %)	Голомтын ажиллах хугацаа (жил)	Түлшний шаталт (ГВт*өдөр/тн)
Түлш-1	1.4977(0.02)	~26	106
Түлш-2	1.4962 (0.02)	~26	105
Түлш-3	1.4942(0.02)	~26	105

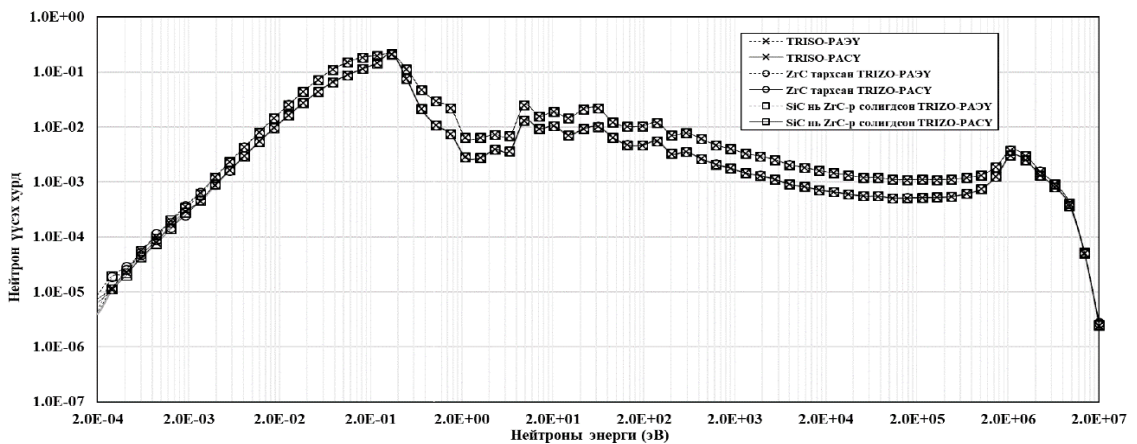
Зураг 2.33 болон 2.34-д өгөгдсөн үр дүнгээс харвал голомт даяарх нейтроны урсгал бүх энергийн туршид ялгаагүй байгаа нь Хүснэгт 2.11-д байгаа нейтроник үр дүнгүүд ойролцоо байгаагийн шалтгаан болно. Мөн адил хуваагдагч цөмүүд ижил хэмжээгээр голомтод ачаалсантай холбоотойгоор голомт тус бүрт нейтрон үүсэх хурдууд ижил байна (Зураг 2.35).



Зураг 2.33. Төвдөө ойлгогчтой ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түли бүхий МӨТХР-ын голомт даяарх PAЭУ-ийн энергиэс хамаарсан нейтроны урсгалын өөрчлөлт



Зураг 2.34. Төвдөө ойлгогчтой ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түли бүхий МӨТХР-ы голомт даяарх PACУ-ийн энергиэс хамаарсан нейтрон нейтроны урсгалын өөрчлөлт



Зураг 2.35. Төвдөө ойлгогчтой ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түли бүхий МӨТХР-ы голомт даяарх энергиэс хамаарсан нейтрон үүсэх хурдын өөрчлөлт

б. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түли бүхий МӨТХР-ын голомт

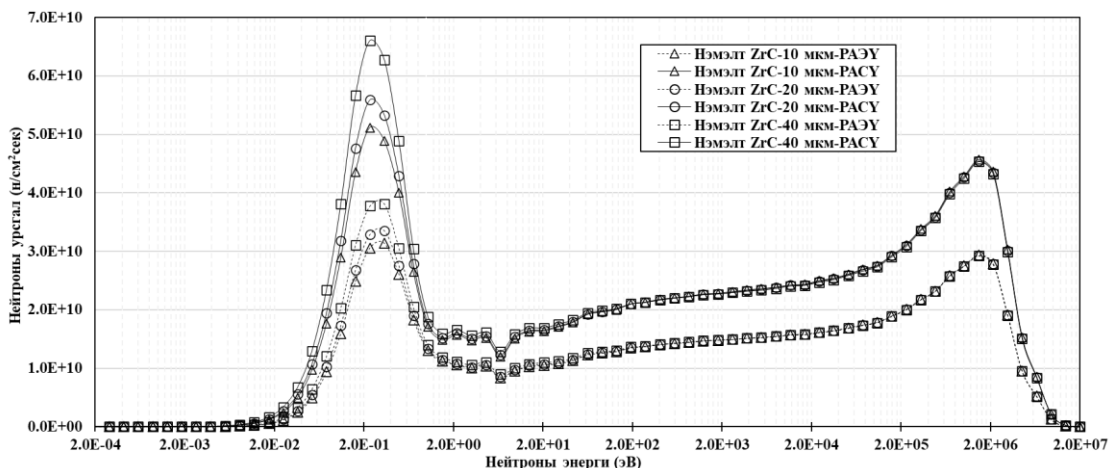
Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC давхаргатай дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын нейтроник анализын үр дүнг энэ хэсэгт авч үзэв. Үр дүнгээс харахад нэмэлт ZrC давхаргын зузаан нэмэгдэх тусам $k_{эфф}$ болон түлшний шаталт ихсэн, реакторын ажиллах жил буурч байна. Энэ үр дүнг тайлбарлахын тулд голомт даяарх нейтроны урсгал, ^{235}U изотопын хорогдох хэмжээ, харимхай сарнилын хурдыг авч үзэн Зураг 2.36-39-т тус тус харуулав.

Хүснэгт 2.12. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын нейтроник анализын үр дүн

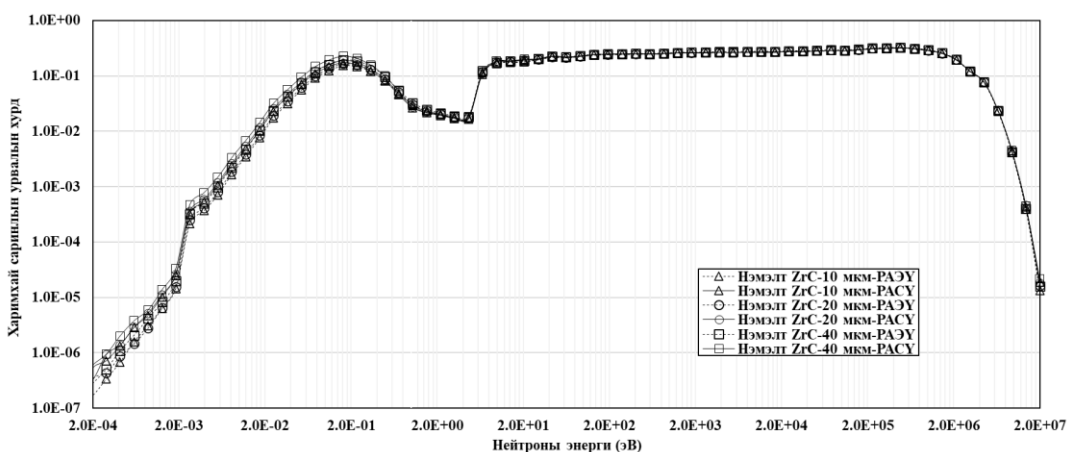
Түлшний төрөл	ZrC давхаргын зузаан	$k_{эфф,0}$ (алдаа%)	Голомтын ажиллах хугацаа (жил)	Түлшний шаталт (ГВт*өдөр/тн)
Түлш-4	10 мкм	1.4995(0.02)	~25	107
Түлш-5	20 мкм	1.5039(0.02)	~23	108
Түлш-6	40 мкм	1.5068(0.02)	~21	109

Зураг 2.36-д голомт даяарх нейтроны урсгалыг энергиэс нь хамааруулан харуулсан бөгөөд түлшин дэх ZrC-ын давхаргын зузаан 40 мкм байхад нейтроны урсгал реакторын ажиллагааны туршид хамгийн их байна. Нейтроны урсгал өндөр байна гэдэг нь цөмийн гинжин урвал эрчимтэй явагдаж, түлшний шаталт ихсэхийг илэрхийлэх ба Хүснэгт 2.12-д харуулсан $k_{эфф}$ болон түлшний шаталт их байхын шалтгаан юм. Мөн реакторын ажиллах жил багассан нь түлшний шаталт их байгаатай холбоотой. Илүү нарийвчлан харвал нейтроны спектр улам зөөлөрсөн байх нь харагдаж байна. Нейтроны спектр зөөлөрсөн байна гэдэг нь дулааны энергитэй нейтроны тоо ихэсч, хурдан нейтроны тоо багассаныг илэрхийлэх ба дулааны энергитэй нейтроны тоо ихсэх нь хуваагдлыг ихэсгэж, үүнтэй зэрэгцээгээр $k_{эфф}$ болон түлшний шаталт их байх өөр нэг үндэс болно. Үүнтэй зэрэгцээгээр Зураг 2.39-т харуулснаар ZrC давхаргын зузаан 40 мкм байх тохиолдолд хуваагдагч изотоп болох ^{235}U изотопын хорогдох хувь бусад тохиолдлуудаас их байна. Энэ нь гинжин урвал эрчимжиж, түлшний шаталт тэр хэмжээгээр ихэссэний баталгаа болж байна. Зураг 2.37 болон 2.38-т харуулсан үр дүнгээс реакторын ажиллагааны бүх үед нэмэлт ZrC давхаргын зузаан хамгийн ихтэй дэвшилтэт TRIZO бүхий төвдөө ойлгогчтой голомтын харимхай сарнилын урвалын хурд болон хуваагдах урвалын хурдууд хамгийн их байна. Харимхай сарнилын урвалын хурд их байна гэдэг нь урвалаас үүсэх хурдан нейтроныг удаашруулах процесс хурдан явагдахыг илэрхийлнэ. Удаашрах процесс хурдан явагдах нь хуваагдах урвалын хурд ихсэх шалтгаан болно. Тийм ч учраас ZrC давхаргын зузаан ихсэх тусам нейтрон хурдан удааширч, хуваагдах урвал эрчимтэй явагдаж, $k_{эфф}$ болон түлшний шаталт

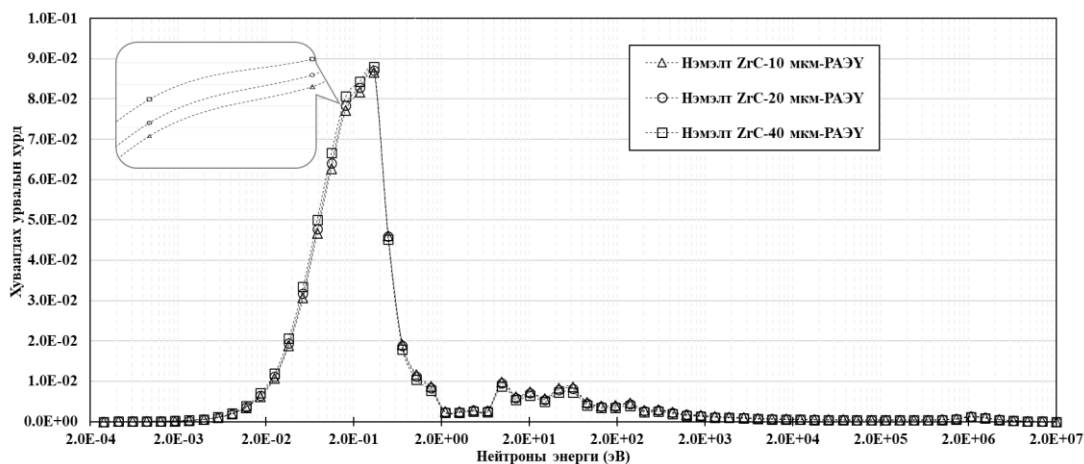
ихэсч, түлш эрчимтэй шатах тусам голomt дахь хуваагдагч изотопыг хувь хэмжээ буурч, реакторын ажиллах жил багасахад хүргэж байна.



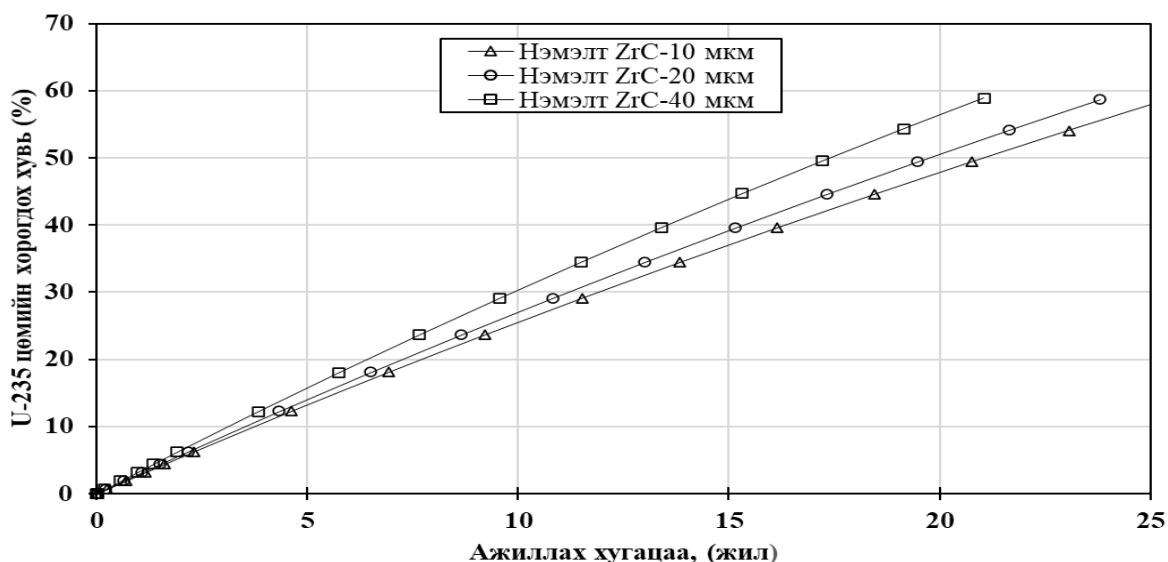
Зураг 2.36. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голomt даяарх энергиэс хамаарсан нейтроны урсгалын өөрчлөлт



Зураг 2.37. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голomt даяарх энергиэс хамаарсан харимхай сарнилын урвалын хурд



Зураг 2.38. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голomt даяарх энергиэс хамаарсан хуваагдах урвалын хурд



Зураг 2.39. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRISO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын U-235 изотопын хугацаанаас хамаарсан хорогдох хувь

в. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт SiC агуулсан дэвшилтэт TRISO түлш бүхий МӨТХР-ын голомт

Уламжлалт TRISO түлшний дизайныг ZrC материал ашиглан дэвшилтэт болгохоос гадна бас дахин SiC давхаргыг нэмж агуулсан дэвшилтэт дизайн материал талаасаа судлагдсан байдгийг өмнө дурдсан. Ийм гурван төрлийн дэвшилтэт түлштэй, төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын нейтроник анализыг энэ хэсэгт авч үзэв. Хэсэг в-д өгүүлснээр ийм түлшний нэмэлт SiC давхаргын зузаан ялгаатай тул голомт даяарх нийт бөмбөлөг түлшний эзлэх хувь өөр болох тул нийт түлшний тоо өөр байхыг Хүснэгт 2.13-д харуулав. Хүснэгт 2.14-д эдгээр голомтын нейтроник анализын үр дүнг, Зураг 2.40-д голомт тус бүрийн хугацаанаас хамаарсан хүнд цөмүүдийн хэмжээг харуулав. Хүснэгт 2.13-д харуулсанчлан хамгийн зузаан буюу SiC+PyC, PyC давхаргатай TRISO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтонд хамгийн бага тооны түлш ачаалсан байна.

Хүснэгт 2.13. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт SiC агуулсан дэвшилтэт TRISO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын түлшний дизайнаас хамаарсан голомтонд ачаалсан түлшний тоо

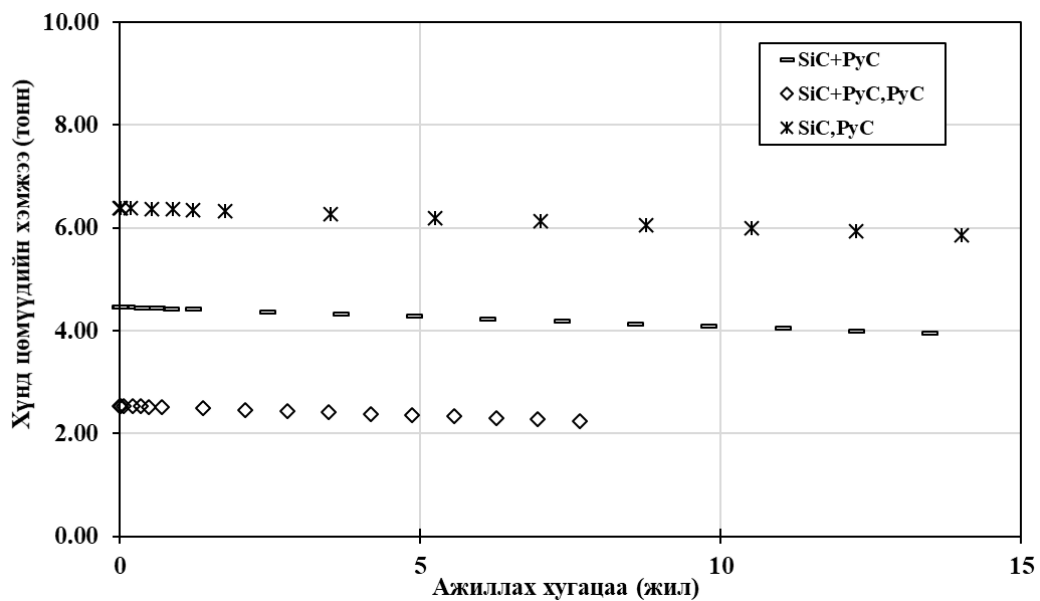
Түлшний дизайн	Нэмэлт SiC+PyC давхаргатай TRISO түлш бүхий голомт	Нэмэлт SiC+PyC, PyC давхаргудтай TRISO түлш бүхий голомт	Нэмэлт SiC, PyC давхаруудтай TRISO түлш бүхий голомт
Түлшний тоо	~15 тэрбум	~9 тэрбум	~21 тэрбум

Хүснэгт 2.14. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт SiC агуулсан дэвшилтэт TRISO түлш бүхий

Түлш-ний төрөл	Нэмэлт давхарга	Кэфф (алдаа%)	Голомтын ажиллах хугацаа (жил)	Түлшний шаталт (ГВт*өдөр/тн)

Түлш-7	SiC+PyC	1.5161(0.02)	~13	110
Түлш-8	SiC+PyC, PyC	1.4699 (0.02)	~6.5	90
Түлш-9	SiC, PyC	1.5111(0.02)	~19	110

Энэ нь хэрэв нэмэлт давхаргын зузаан их байх тусам нэгж түлшний эзэлхүүн томсоно. Түлшний эзлэхүүн томсох тусам бага тооны түлш голомтонд ачаалсантай холбоотой. Тиймээс голомтын нейтроник анализын үр дүн тухайн нэмэлт давхаргын зузаанаас буюу голомтонд ачаалсан хуваагдагч изотопын хэмжээнээс хамааран SiC+PyC, PyC нэмэлт давхаргатай тохиолдолд реакторын ажиллганааы эхэн үеийн кэфф, голомтын ажиллах хугацаа, түлшний шаталт тус бүр хамгийн бага үзүүлэлттэй байна.



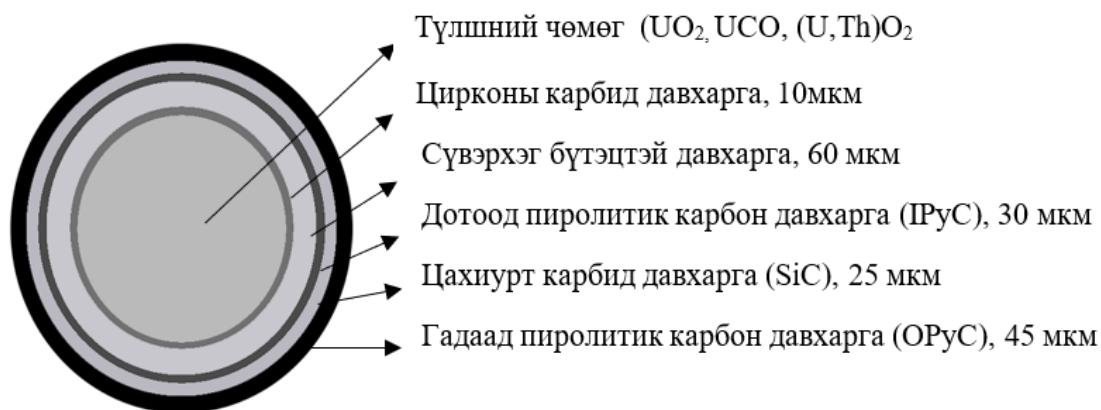
Зураг 2.40. Төвдөө ойлгогтой нэмэлт SiC агуулсан дэвшилтэт TRISO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын хүнд цөмүүдийн хэмжээний хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт

Зураг 2.40-т мөн адил анх ачаалсан түлшний хэмжээнээс болж, хамгийн их түлш ачаалсан SiC,PyC давхаргатай TRISO түлш бүхий голомтонд реакторын ажилллагааны туршид хүнд цөмүүдийн хэмжээ хамгийн их байхад эсэргээрээ хамгийн бага тооны түлштэй (SiC+PyC, PyC давхаргай) голомтын хувьд тэр хэмжээний бага хүнд цөмүүд үүсжээ.

Цаашлаад бид нэмэлт ZrC давхаргатай түлшний чөмгийг өөр, өөр (UCO, (U,Th)O₂) түлшний чөмгөөр сольж, нейтроник анализид нөлөөлөх нөлөөллийг судлан судалгааны ажлаа дэлгэрүүлэв. Ураны карбид түлшний хувьд ураны диоксид дээр карбидыг нэмснээр түлшний чөмгийн нүүлтийг багасгаж, шарлагын үед хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийн алдагдлыг бууруулдаг. Карбид түлш нь метал түлштэй адилхан шинж чанартай байх бөгөөд дулаан дамжуулах чадвар өндөртэй, температурын өөрчлөлтөнд бүтцийн өөрчлөлт багатай, энгийн ажилллагааны үед гелийн хийн хөргүүртэй үл исэлдэх шаталт сайтай түлш юм.

Реакторын ажиллагааны явцад ураны диоксид түлш нь хуваагдлын хийнээс гадна илүүдэл хүчилтөрөгч ялгаруулдаг. Энэхүү илүүдэл хүчилтөрөгч нь TRISO түлшний сүвэрхэг бүтэцтэй давхаргатай урвалд орж, CO хий үүсгэдэг. Ийм шалтгаанаар АНУ-ын эрчим хүчний удирдах газар ураны карбид түлшийг дараагийн үеийн цөмийн цахилгаан станцын эх үүсвэр хэмээн сонгосон.

Торийн оксид түлш нь мөн адил дулаан дамжуулах чадвар өндөртэй, өндөр хайлах температуртай, химийн тогтвортой, транс-ураны элементийг үйлдвэрлэдэггүй түлш юм. Үүнээс гадна урантай харьцуулбал байгаль дээрх тархалт нь 3 дахин илүү энергийн эх үүсвэр юм. Дээрх үзүүлэлтүүдийг харгалзан эдгээр түлшний чөмгийн дизайнуудыг TRISO түлшинд сонгон тооцоолуудыг гүйцэтгэв. Дэвшилтэт түлшний хөндлөн зүсмэгийн зургыг Зураг 2.41-д, түлшний чөмгийн физик шинж чанарын үзүүлэлтийг Хүснэгт 2.15-д харуулав.



Зураг 2.41. TRISO түлшний хөндлөн огтлол

Хүснэгт 2.15. Түлшний чөмгийн физик шинж чанар

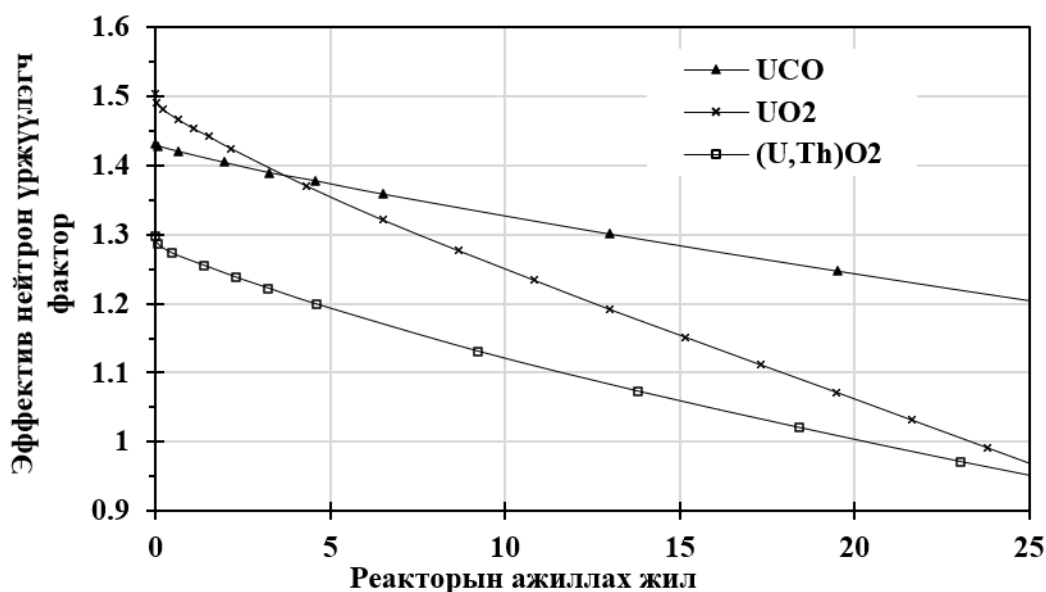
	Массын харьцаа	U235 баяжуулалт, w/o	Нягт, гр /cc
UO_2	100%	20	10.4 [12,13]
UO_2-UC_2-UC	67.9%-0.4%-31.7% [14]	20	10.16 [14]
UO_2-ThO_2	25%-75% [15]	20	11.03 [15]

Өөр өөр түлшний чөмөгтэй, төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын нейтрониз анализын харьцуулсан үр дүнг Хүснэгт 2.16 болон Зураг 2.42, 2.43-т харуулав.

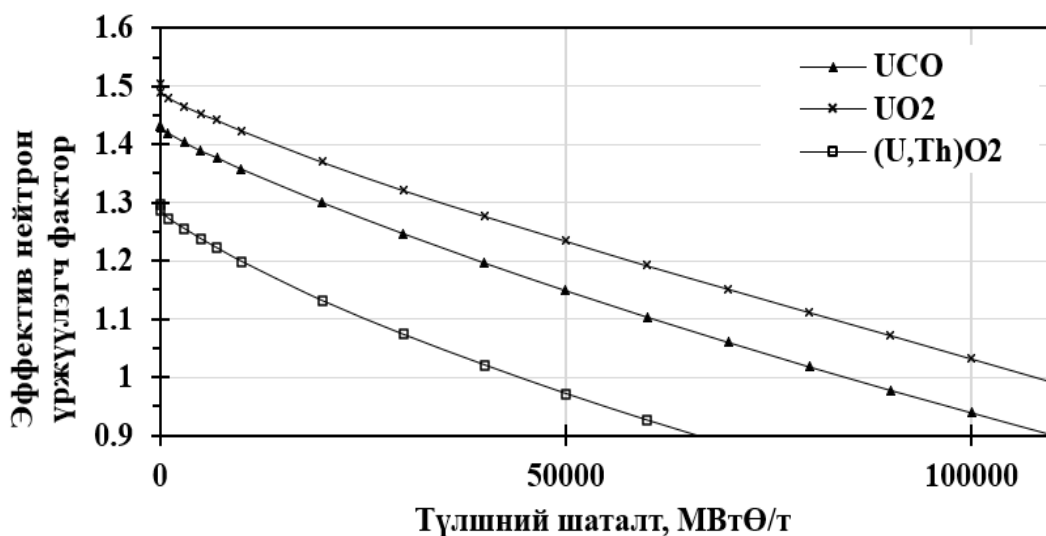
Үр дүнгээс эдгээр түлшний чөмгүүд нь реакторын ажиллагааны эхэн үеийн эффектив нейтрон үржүүлэгч фактор, илүүдэл реактивити, реакторын ажиллах жил болон түлшний нөлөө үзүүлж буйг харж болно. Түлшний чөмгийн гурван сонголтоос уран болон торийн оксидын түлш нь бусад түлшний сонголтуудтай харьцуулахад реакторын ажиллах жил болон түлшний шаталтаар бага байгаа ч реакторын ажиллагааны үеийн илүүдэл реактивити нь бага байгаа нь хяналтын элементүүдийг бага ашиглаж болохыг харуулж байна.

Хүснэгт 2.16. Өөр өөр түлшний чөмөгтэй, төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын нейтроник анализын үр дүн

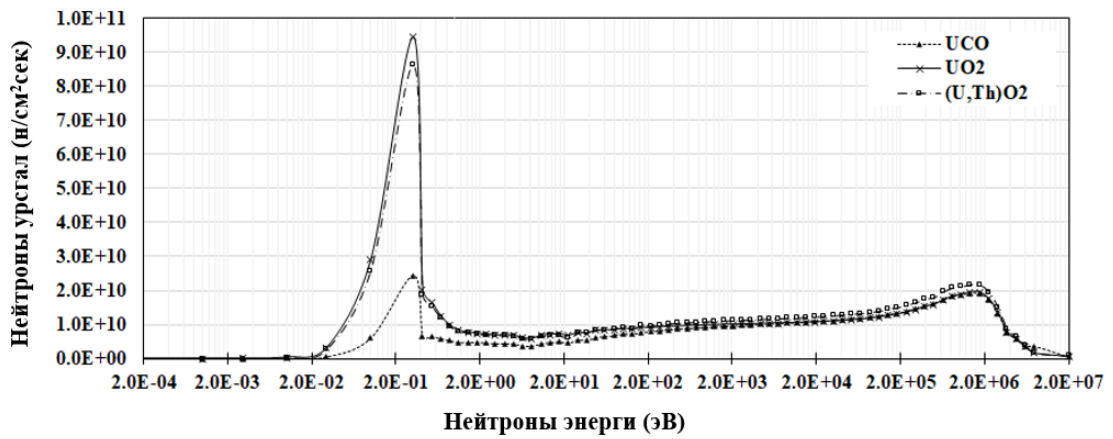
Түлшний чөмөг	k_{eff} -РАЭҮ (алдаа (%))	Макс $\Delta k/k$, %	Реакторын ажиллах жил	Түлший шаталт-РАСҮ (ГВтӨ/т)
UO ₂	1.5039 (0.0215)	33.50	23.8	108.0
UCO	1.4321 (0.0195)	30.17	55.0	85.0
(U,Th)O ₂	1.2976 (0.0250)	22.94	20.3	44.0



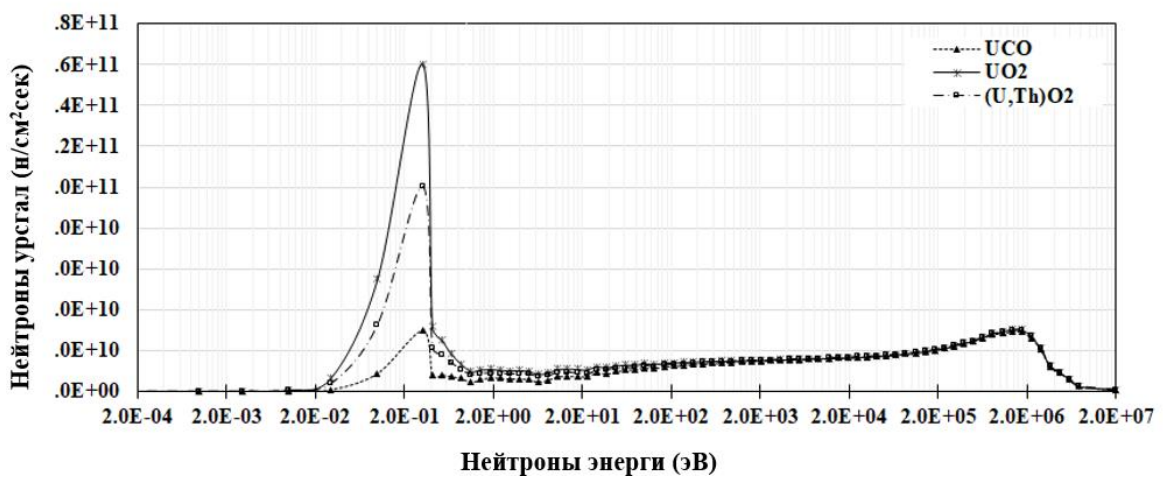
Зураг 2.42. Өөр түлшний чөмгүүдтэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын эффeктив нейтрон үржүүлэгч факторын хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт



Зураг 2.43. Өөр түлшний чөмгүүдтэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын эффeктив нейтрон үржүүлэгч факторын түлшний шаталтаас хамаарсан өөрчлөлт



Зураг 2.44. Өөр түлшний чөмгүүдтэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын ажиллагааны эхэн үеийн голомт даяарх нейтроны спектр



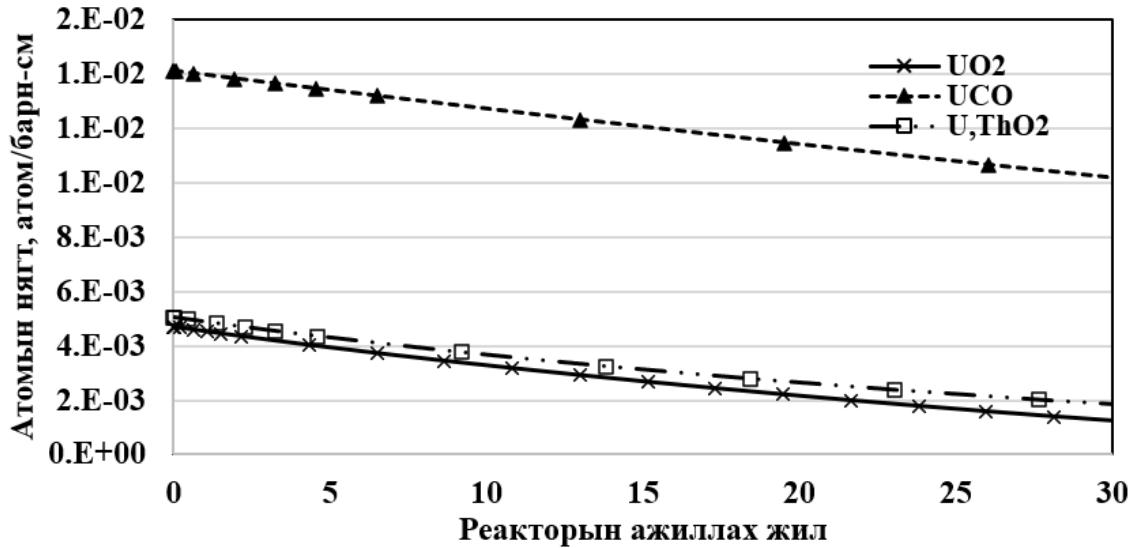
Зураг 2.45. Өөр түлшний чөмгүүдтэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын ажиллагааны сүүл үеийн голомт даяарх нейтроны спектр

Нейтроник анализын өөр өөр үр дүнг тайлбарлахын тулд реакторын ажиллагааны эхэн болон сүүл үеийн голомт даяарх нейтроны урсгал, уран-235 изотопын өөрчлөлт, голомт даяарх хуваагдах болон залгих урвалын хурдны харьцааг тооцон Зураг 2.44-48-д тус тус харуулав.

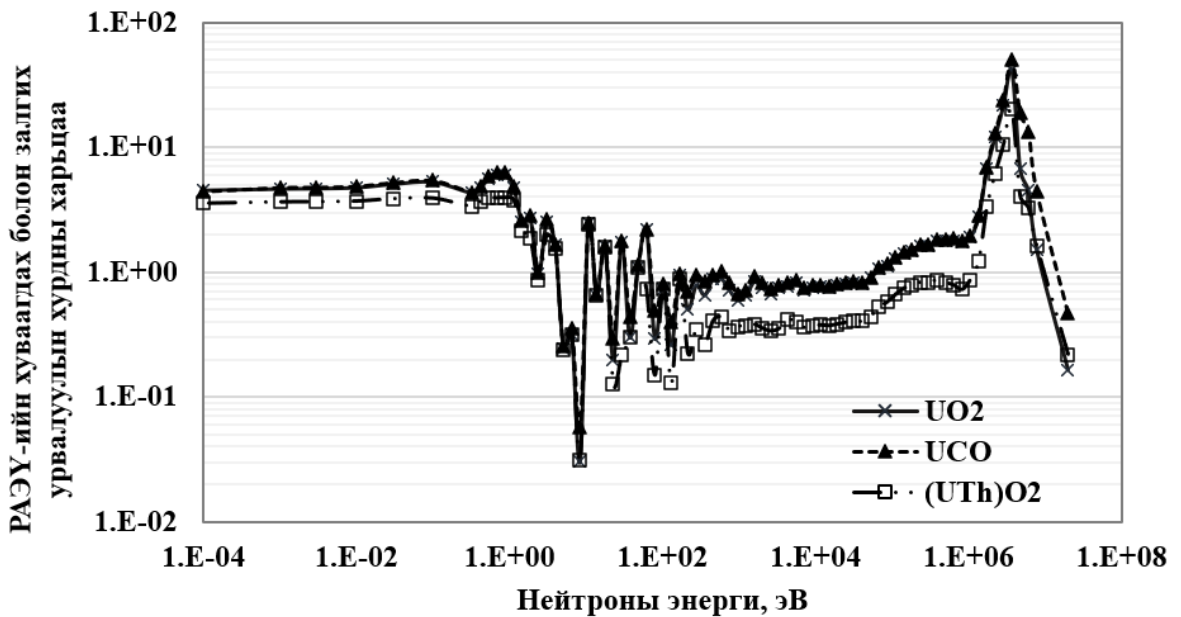
Эдгээр үр дүнгээс харахад, ураны диоксид түлшний чөмөгтэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын бага энергитэй нейтроны урсгал хамгийн их байгаа ч уран 235 изотопын атомын нягт хамгийн бага байна. Харин карбид түлшний чөмөгтэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын хувьд эсрэгээрээ байхад эдгээр түлшүүдтэй (UO₂, UCO) голомтын реакторын ажиллагааны эхэн үеийн хуваагдах болон залгих урвалуудын хурдны харьцаа нь ижил байна.

Нөгөө талаас ураны торийн оксид түлшин дэх атомын нягт болон бага энергитэй нейтроны урсгал нь эдгээр 2 түлшний хооронд байгаа ч хуваагдах болон залгих урвалын

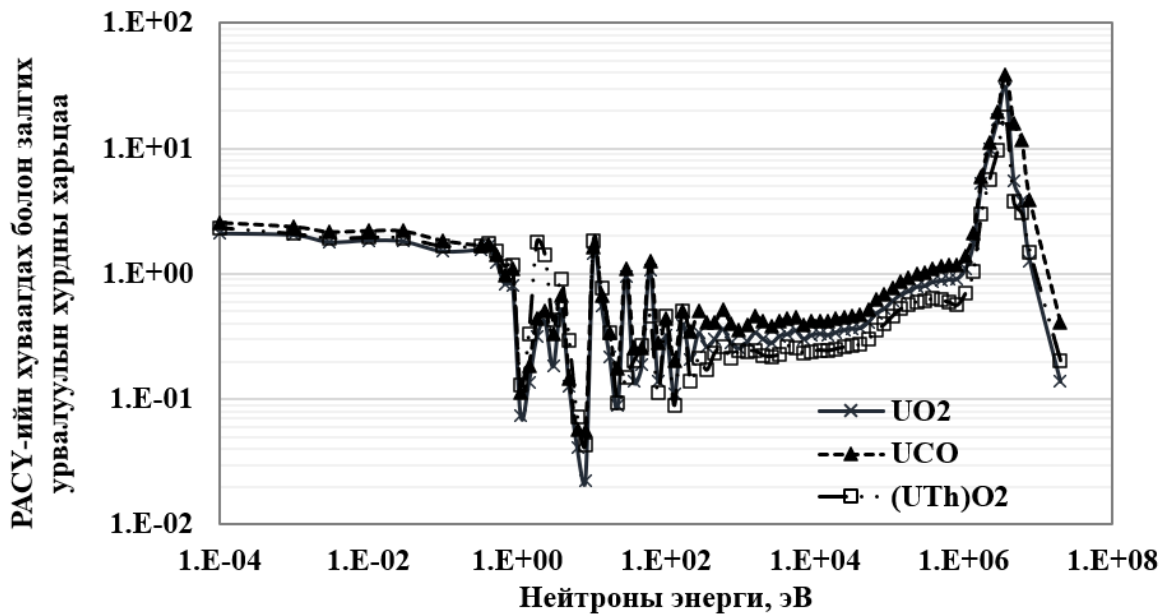
хурд хамгийн бага нь байна. Тиймээс ураны торийн оксид түлшний нейтроник анализын үр дүнг ураны диоксид болон ураны карбид түлшний үр дүнтэй харьцуулахад хамгийн бага нь болов. Иймд $(U,Th)O_2$ түлшний чөмөгтэй МӨТХР-ын голомтын нейтроник үр дүн хамгийн бага байх нь илэрхий юм.



Зураг 2.46. Өөр түлшний чөмгүүдтэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын U^{235} изотопын ядуурал



Зураг 2.47. Өөр түлшний чөмгүүдтэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын РАЭҮ-ийн голомт даяарх хуваагдах болон залгих урвалуудын хурдны харьцаа



Зураг 2.48. Өөр түлшний чөмгүүдтэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын РАСУ-ийн голомт даяарх хуваагдах болон залгих урвалуудын хурдны харьцаа

Дүгнэлт

1. Энэ ажилд 100 МВт чадлын төвдөө ойлгогчтой найман төрлийн дэвшилтэт түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын дизайныг хийж, реакторуудын нейтроник анализ гүйцэтгэн критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэв.

2. Түлшний дизайнаас хамааруулан төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын нейтроник анализын үр дүнг хооронд нь харьцуулахад нэмэлт ZrC давхаргатай дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голомт нейтроник шинж чанараараа хамгийн сайн үзүүлэлттэй байхыг олж тайлбарлав.

3. Харин нэмэлт SiC агуулсан TRISO түлш бүхий төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын хувьд реакторын ажиллах хугацаа богино, түлшний шаталт багатай тул тийм ч сайн сонголт биш болохыг олж тогтоов.

4. Нэмэлт ZrC давхаргатай дэвшилтэт TRIZO түлшний чөмгийн материалыг өөрчлөн МӨТХР-ын голомтын дизайныг хийж, реакторуудын нейтроник анализ гүйцэтгэн критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэв. Үүнд, ураны диоксид, ураны оксикарбид түлшний нейтроник шинж чанараараа сайн байхыг тогтоов.

2.4.9 МӨТХР-ын голомтын шатан шингээгч материалын дизайны судалгаа

Олон улс даяар тулгамдаж буй байгаль, орчинд сөргөөр нөлөөлж байгаа олон асуудлууд дундаас уур амьсгалын өөрчлөлт хамгийн анхаарал хандуулахуйц нь байна. Уур

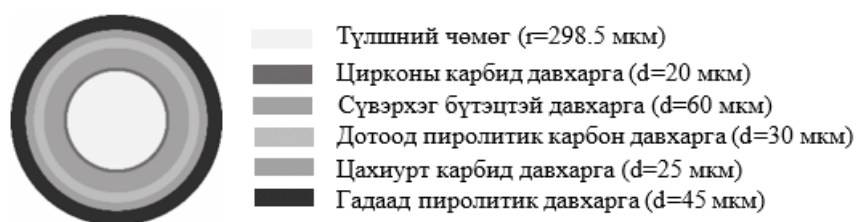
амьсгалын өөрчлөлтөөс шалтгаалж дэлхийн дулаарал, цөлжилт, ган гачиг, усны хомсдол, өлсгөлөн үүсч цаашлаад биологийн тэнцвэрт байдал хүртэл алдагдаж байна. Уур амьсгалын өөрчлөлтийг үүсгэгч үндсэн шалтгаан нь дэлхийн агаар мандлыг бүрхсэн хий бөгөөд үүнийг хүлэмжийн хий гэж нэрлэдэг. АНУ-ын байгаль орчинг хамгаалах агентлагын гүйцэтгэсэн судалгаагаар 2019 оны байдлаар нийт хүлэмжийн хийн эзлэх хувийг 100% гэж үзвэл 81% буюу зонхилох хувийг нүүрстөрөгчийн давхар исэл, 10%-ийг метан, 7%-ийг азотын исэл, 3%-ийг фосфорын хий эзэлж байсан [24]. Энэхүү хүний буруутай үйл ажиллагаанаас үүдэлтэй хүлэмжийн хийг ялгаруулагч хамгийн том эх үүсвэр нь эрчим хүч үйлдвэрлэхэд ашиглах ашигт малтмал болох нүүрс, байгалийн хий, газрын тос зэргийг шатааснаас үүдэлтэй юм. Ихэнх хөгжингүй орнууд энэхүү хүлэмжийн хийг бууруулахын тулд дээрх ашигт малтмалыг ашиглахаас зайлсхийн, цэвэр эрчим хүчний эх үүсвэр болох сэргээгдэх эрчим хүч болон ураныг ашиглан цөмийн цахилгаан станц ажиллуулан эрчим хүчээ үйлдвэрлэж байгаа нь өнөөгийн уур амьсгалын өөрчлөлтийг үүсгэх шалтгааныг шийдэх гарц гэж үзэж байгаагийн илрэл юм. Түүнчлэн дэлхийн өгөгдлийн сангийн гүйцэтгэсэн судалгаагаар эрчим хүч үйлдвэрлэхийн тулд жил болгон нүүрснээс шалтгаалж 25 хүн, газрын тосноос шалтгаалж 18 хүн нас бардаг гэсэн тооцоо гарсан ба цөмийн эрчим хүчнээс болж хэн нэгэн нас барахад 14-100 жил шаардагдана гэсэн тоон дүнг дурджээ [25]. Тиймээс хүн төрөлхтний хүлэмжийн хийг бууруулах хамгийн аюулгүй арга нь цөмийн эрчим хүч ашиглах, үүнийг хөгжүүлэх явдал юм. Одоогийн цөмийн эрчим хүчний систем дөрвөн үе шаттайгаар хөгжиж ирсэн ба хамгийн сүүлийн үеийн реакторын дизайн нь эдийн засгийн үр ашигтай, тогтвортой, аюулгүй ажиллагаатай, цөмийн зэвсгийг үл дэлгэрүүлэх бодлогод нийцсэн байхаар загварчлагдаж байна. Эдгээр дэвшилтэт дизайнтай реакторын нэг нь Маш Өндөр Температурын Хийн Реактор (МӨТХР) юм. МӨТХР-ийн дизайны онцлог нь дэвшилтэт түлшиндээ байх бөгөөд энэхүү түлш нь маш өндөр температурт аюулгүй ажиллаж, реакторын үр ашгийг нэмэгдүүлэхээс гадна олон давхаргатай байдаг нь цөмийн зэвсэг үл дэлгэрүүлэх шинж чанартай болгодог. Сүүлийн жилүүдэд олон улсын эрдэмтэд Фүкүшима цөмийн цахилгаан станц осолдсоноос үүдэлтэйгээр реакторын аюулгүй ажиллагааны тал дээр түлхүү анхаарах болсноор өндөр температурын хийн реакторын түлш болох TRISO-ийн дизайныг сайжруулан хэд хэдэн загвар дэвшүүлсэн. Энд нэмэлт ZrC давхаргатай TRIZO түлш нь маш өндөр температурт (1500°C) хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг гадагш алдахгүй, аюулгүй шинж чанартай түлш болохыг судалгаагаар тогтоосон [19]. Тиймээс энэхүү нэмэлт ZrC давхарга агуулсан TRIZO түлш дээрх шинж чанараараа МӨТХР-ын түлшний боломжит хувилбар хэмээн үзэж байна.

Энэ судалгааны үр дүнгээс харвал, түлшний чөмгийг бүрхэн нэмэлт ZrC давхарга байрлуулсан TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын нейтроник үзүүлэлтүүд харьцангуй сайн байсан. Энэ судалгааны ажлаар бид өмнөх судалгааны ажлаа үргэлжлүүлэн, төвдөө ойлгогчтой, нэмэлт ZrC давхаргатай TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтонд шатан шингээгч материал (ШШМ) нэмж ачаалан, нейтроник анализийн судалгааг гүйцэтгэв. ШШМ нь реакторыг аюулгүй ажиллуулахад гол үүрэг гүйцэтгэдэг тул өөр өөр материалын нөлөөг судлах нь судалгааны ач холбогдолтой. Реакторын ажиллах жилийг уртасгахын тулд анхнаасаа критикээс дээгүүр төлөвт байхаар дизайнчилдаг ба ажиллагааны туршид критик байлгахын тулд ШШМ-ыг голомтод нэмж өгдөг. Тиймээс энэ судалгааны ажлын хүрээнд дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтод өөр өөр төрлийн ШШМ ачаалан, нейтроник тооцооллыг гүйцэтгэн, тэдгээр үзүүлэлтүүдийг харьцуулах замаар ШШМ-ын нөлөөг судлах зорилго тавив.

2.4.10 Голомтын дизайн

МӨТХР-ийн төвдөө ойлгогчтой голомт нь удирдлагын саваа, байнгын болон сольдог ойлгогч, зургаан талт түлшний блокуудаас бүрдэнэ. Цилиндр голомтын хэмжээ болон дизайн нь Японы Атомын Энергийн Агентлагт ажиллаж буй өндөр температурын тест реакторын голомтын дизайнтай адил загварчлагдсан.

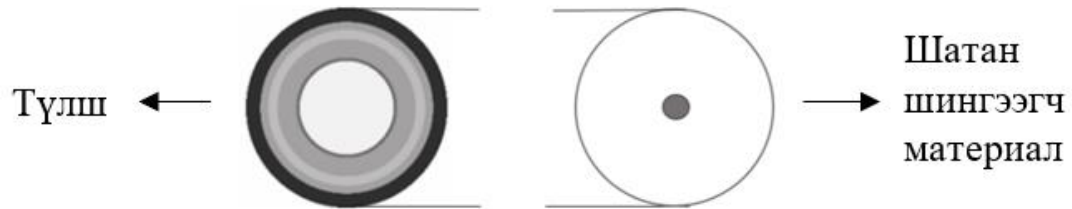
МӨТХР-ийн түлш нь түлшний чөмгийг бүрхсэн нэмэлт ZrC агуулсан 5 давхаргатай. (Зураг 2.49). Үүнд, түлшний чөмөг нь хуваагдагч эсвэл хуваагдаж болохуйц материалаас бүрдэнэ. Түлшний чөмгийг бүрхэн байрласан цирконий карбид давхарга нь маш өндөр температурт түлшний бүтцийг хэвээр нь хадгалж, түлшний чөмгийг нүүхээс сэргийлэхээс гадна хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийг гадагшлуулахгүй барих үүрэгтэй. Сүвэрхэг бүтэцтэй давхаргын хувьд хуваагдлын хий бүтээгдэхүүнийг (Xe, Kr) шингээх бол цахиурт карбид нь хатуу хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг гадагш алдахгүй байх үүрэгтэй. Дотоод пиролизитик давхарга нь сүвэрхэг давхаргад шингэсэн хийг барьж хадгалах, гадаад пиролизитик давхарга нь цахиурт карбид давхаргыг гадны нөлөөллөөс хамгаалах үүрэгтэй байдаг.



Зураг 2.49. Сайжруулсан TRIZO түлшний бөөмийн зүсмэг

2.4.11 Шатан шингээгч материал

ШШМ гэдэг нь нейтроныг маш өндөр хөндлөн огтлолтойгоор шингээх ба үр дүнд нь харьцангуй бага шингээлтийн хөндлөн огтлолтой эсвэл тогтвортой изотоп үүсдэг элемент бүхий материалыг хэлнэ (Зураг 2.50).



Зураг 2.50. ШШМ-ын түлшний чөмөгтэй харьцуулсан зураг

Реакторын голомтод явагдаж буй цөмийн гинжин урвалыг тогтвортой явуулахад ашиглах үндсэн хоёр хяналтын арга нь реакторын голомт руу удирдлагын саваа оруулах эсвэл ШШМ-ыг голомтод ачаалах юм. Өмнө дурдсанчлан, реакторын ажиллагааны эхэн үеийн илүүдэл реактивитиг бууруулахад удирдлагын савааг ашиглаж болох ч реакторын ажиллагааны турш жигд бус чадлын түгэлт үүсч, улмаар реакторын аюулгүй ажиллагаанд нөлөөлнө. Үүнээс зайлсхийх боломжит арга нь ШШМ-ыг түлшинд анхнаас нь холих явдал юм. Хэд хэдэн ШШМ байдгаас өргөн хэрэглэгддэг, тооцоондоо ашигласан ШШМ-ын үндсэн үзүүлэлтийг Хүснэгт 2.17-т харуулав.

Хүснэгт 2.17. ШШМ-ын үндсэн үзүүлэлт

ШШМ	Урвал	Үндсэн шингээгч цөм	Байгалийн тархалт	Дулааны нейтрон (0.0253 эВ) булаах огтлол, барн
B ₄ C	(n,α)	¹⁰ B	18.8	4010
Gd ₂ O ₃	(n,γ)	¹⁵⁵ Gd ¹⁵⁷ Gd	14.7 15.7	70000 180000
Er ₂ O ₃	(n,γ)	¹⁶⁷ Er	22.7	700
CdO	(n,γ)	¹¹³ Cd	12.3	27000

Үүнд, ШШМ бүр өөр өөрийн давуу болон сул талтай. Жишээлбэл, бор нь дулааны энергитэй нейтроныг их шингээдэг, үйлдвэрлэхэд хялбар давуу талуудтай ч, дунд түвшний хаягдал үүсгэх сул талтай. Гадолинигийн хувьд маш өндөр нейтрон шингээх хөндлөн огтлолтой. Энэ нь маш бага хэмжээний концентрацтай байсан ч илүүдэл реактивитиг хангалттай буулгах боломжтой ч, хурдан исэлдэх сул талтай. Кадмигийн хайлах температур бага. Харин эрбигийн нейтрон шингээх хөндлөн огтлол нь бусад материалтай харьцуулахад тийм ч сайн биш боловч Np, Am, Cm зэрэг минор актиноидыг багаар үүсгэдэг давуу талтай. Энэ судалгааны ажлаар B₄C, Gd₂O₃, CdO, Er₂O₃ ШШМ-ын реакторын голомтын нейтроникийн шинж чанарт хэрхэн нөлөөлөхийг судлав.

Нейтроник анализ: Нейтроник анализыг тасралтгүй энергитэй нейтроны харилцан үйлчлэлийг Монте Карло аргаар тооцоолдог, Японы атомын энергийн Агентлагийн хөгжүүлсэн компьютерийн код болох MVP2.0 [21], MVPBURN [22]-ийг цөмийн урвалын өгөгдлийн сан JENDL4.0 [23]-ийн хамт ашиглан гүйцэтгэв. Бүх удирдлагын савааг голомтоос гарган, үүсэх орон зайг гели хийгээр дүүргэн тооцооллыг гүйцэтгэв. MVP 2.0 [21] кодоор реакторын голомт дэх нейтрон үржилтийн коэффициентийг тооцоолохдоо голомт дотор үүссэн нейтронуудын санамсаргүй алхмуудыг тэдний мөрийн уртыг үнэлэх, мөргөлдөөний нягтыг үнэлэх, аналог үнэлэгчүүдийг ашиглах гэсэн аргачлалыг хослуулан хэрэглэж үр дүнг гаргана. Нийт 50000 нейтроны харилцан үйлчлэлийг 100 удаа давтан санамсаргүйгээр үүсгэж, статистик тооцоолол гүйцэтгэсэн. Реакторын голомтын нейтроник анализ бүрийг энэ нөхцөлөөр гүйцэтгэсэн.

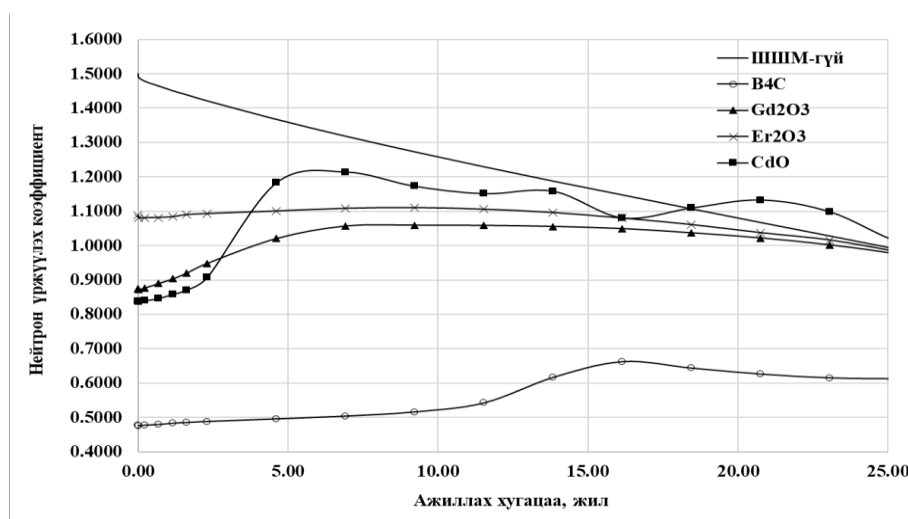
2.4.12 Үр дүн ба хэлэлцүүлэг

Нейтроник анализын үр дүнг Хүснэгт 2.18 болон Зураг 2.51-д харуулав. Үүнд, Хүснэгт 2.18-т харуулсан дөрвөн төрлийн дан ШШМ-ыг төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтод ачаалж, диаметрийг 0.06 см-аар, эзлэхүүнийг нь түлшний эзлэхүүнд харьцуулсан харьцааг 14-аар сонгон авч тооцооллыг гүйцэтгэсэн ба ингэснээр ШШМ тус бүрийн нөлөөллийг илүү ялгах боломжтой юм. Энэ хоёр параметрийг ШШМ-ийн дизайны параметр гэе. Үр дүнгээс харахад бусад ШШМ-тай харьцуулахад Er_2O_3 ШШМ дангаар байхад тухайн голомт реакторын критик ($k_{\text{эф}}=1$) нөхцөлд хамгийн их дөхсөн, реактивитийн өөрчлөлт хамгийн бага байгаа нь тодорхойлогдсон. Түүнчлэн Хүснэгт 2.18-оос харвал дулааны энергитэй нейтроныг хамгийн их шингээх хөндлөн огтлолтой материал нь Gd_2O_3 байхад тус үр дүнгээс B_4C ШШМ нейтроныг маш ихээр шингээж, реакторын ажиллагааны туршид голомт тасралтгүй критикээс доогуур ($k_{\text{эф}}<1$) төлөвт байх нь харагдаж байна. Энэ нь уг ШШМ-уудын дизайны параметрууд адил боловч анх голомтод ачаалсан шингээгч изотопуудын атомын нягт хоорондоо харилцан адилгүй байсантай холбоотой. Энэхүү анхан шатны харьцуулсан үр дүнгээс (Зураг 2.51) харахад хугацаанаас хамаарсан нейтроник үзүүлэлт хамгийн сайн байгаа нь Er_2O_3 ШШМ-тай МӨТХР-ийн голомт байна. Харин Gd_2O_3 болон CdO ШШМ-тай реакторын голомт ажиллагааны эхэн үед критикээс доогуур төлөвт байснаа, хэсэг хугацааны дараа $k_{\text{эф}}$ өссөн нь эдгээр ШШМ-ууд реакторын ажиллагааны эхэн үеийн нейтроныг маш сайн шингээгээд, өөрсдөө шатаж дууссантай холбоотой. Зураг 2.52-д Er_2O_3 ШШМ дангаар байх үеийн нөлөөг харуулсан ба үүнд тухайн ШШМ-ийн бөөмийн МӨТХР-ын голомтод хамгийн тохиромжтой байх диаметр, түлш болон ШШМ-ын эзлэхүүний харьцааг олсон. Үр дүнг нарийвчлан харвал Er_2O_3 ШШМ бөөмийн диаметр хэдий чинээ ихэснэ төдий чинээ нейтрон шингээлт их байна.

Хүснэгт 2.18. Төвдөө ойлгогчтой, өөр өөр ШШМ-тай МӨТХР-ын голомтын нейтроник анализын үр дүн

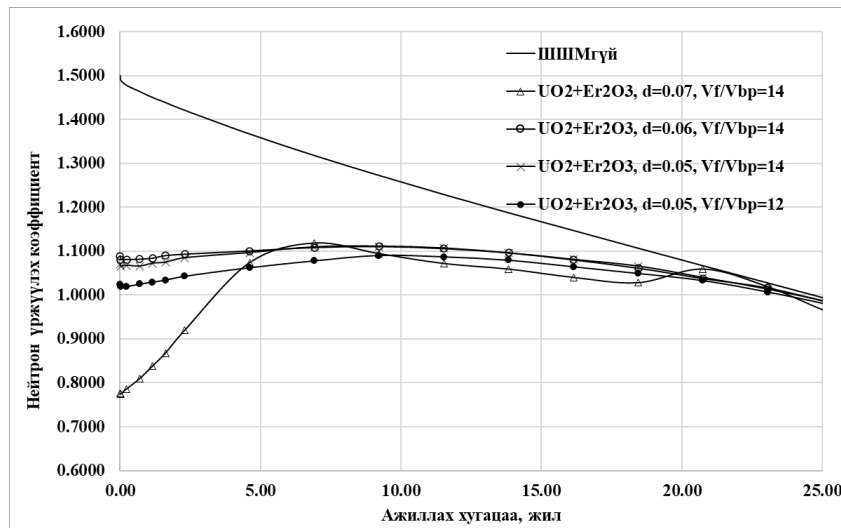
ШШМ-ын төрөл	кэфф,0 (алдаа %)	ХИУ Δк/к, %	тголомт (жил)	Втүлш (ГВт*өдөр/тн)
ШШМ-гүй	1.4994 (0.0250)	33.30	23.8	108
B4C	0.4774 (0.0453)	-	-	-
Gd2O3	0.8752 (0.0319)	5.56	23.1	100
Er2O3	1.0881 (0.1065)	9.93	23.6	100
CdO	0.8394 (0.0831)	17.66	25.3	110

Харин түлш болон ШШМ-ын эзлэхүүний харьцаа нь тухайн ШШМ-ын диаметрээс хамаарах нөлөөтэй харьцуулбал багахан нөлөөтэй байгаа ба эндээс Er₂O₃ ШШМ бөөмийн диаметр 0.05 см, түлш болон ШШМ-ын эзлэхүүний харьцаа 12 байх үед төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын нейтроник үзүүлэлтэд хамгийн сайн нөлөөлж, реакторын ажиллагааны эхэн үеийн $k_{эфф}=1.0245$, реакторын ажиллах жил 23.1, илүүдэл реактивити ШШМ-гүй үеийнхээс 33.3%-иас 8.26% хүртэл буурсан үр дүнтэй байна. Зураг 2.53-д мөн адил CdO ШШМ дангаараа МӨТХР-ын голомтын нейтроник үзүүлэлтэд хэрхэн нөлөөлж байгаа үр дүнг харуулж байна. Үр дүнгээс харвал, CdO ШШМ нь реакторын ажиллагааны эхэн үеийн нейтроныг маш ихээр шингээгээд, шатаж хорогдоод реакторын ажиллагааны дунд үеэс нейтроныг шингээх нь бага байна. Энэ нь эргээд реакторын ажиллагааны туршид реактивити өөрчлөлтийг ихэсгэх шалтгаан болох учраас тухайн материалыг дангаар голомтод ачаалах нь тохиромжгүйг илтгэнэ. CdO ШШМ бөөмийн диаметр 0.06 см, түлш болон ШШМ бөөмийн эзлэхүүний харьцаа 25 байх нь МӨТХР-ын голомтын нейтроник үзүүлэлтэнд хамгийн сайн нөлөөлөх утгууд болно.

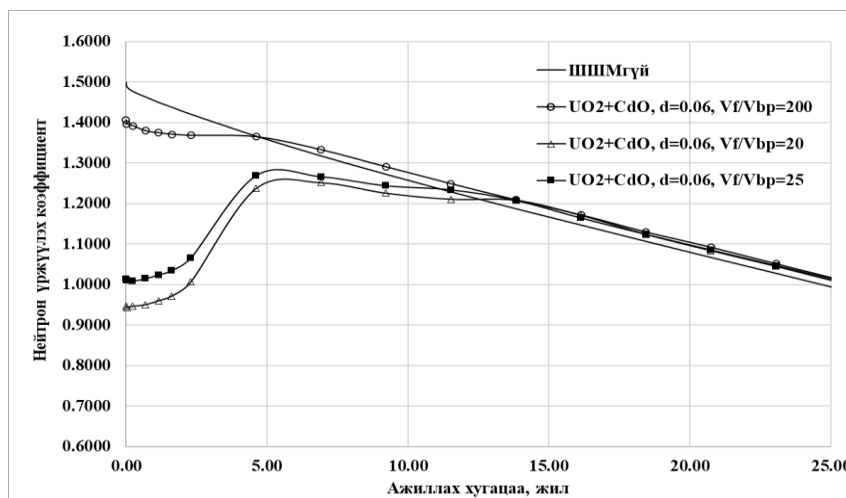


Зураг 2.51. Төвдөө ойлгогчтой, өөр өөр ШШМ-тай МӨТХР-ийн голомтын $k_{эфф}$ -н хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт

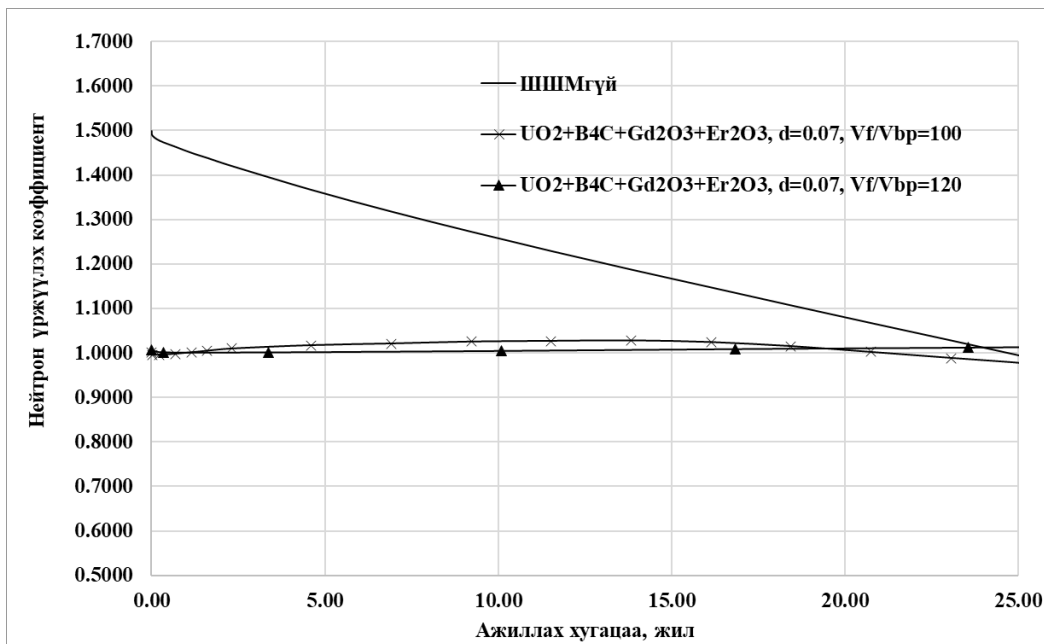
Өмнөх судалгааны ажилд төвдөө ойлгогчтой ӨТХР-ийн голомтод хоёр өөр төрлийн буюу V_4C болон Gd_2O_3 ШШМ-ийг хамтад нь ашиглаж нөлөөг нь судалж байсан [26]. Тиймээс энэ ажилд V_4C ба Gd_2O_3 ШШМ-ууд дээр нэмээд Er_2O_3 эсвэл CdO ШШМ-ыг реакторын голомтод хамтад нь ачаалахад илүүдэл реактивити болон голомтын нейтроникт үзүүлэх нөлөөг авч үзэв. Ингэхдээ өмнөх судалгааны [26] ажил дахь V_4C болон Gd_2O_3 ШШМ-ийн дизайны хамгийн тохиромжтой параметруудийг хэвээр хадгалан (V_4C болон Gd_2O_3 ШШМ-ын бөөмийн диаметр 0.2 см, түлш болон эдгээр ШШМ-ын эзлэхүүний харьцаа харгалзан 140 ба 490 байхаар) шинээр нэмж буй гуравдагч бөөм болох Er_2O_3 эсвэл CdO -ийн дизайны тохирох параметрийг олсон. Тохирох параметр гэдэг нь голомтын нейтрон үржүүлэгч эффектив фактор $k_{\text{эфф}}$ нь ажиллагааны турш $k_{\text{эфф}}=1$ утгад дөхөх, реакторын ажиллах жил хамгийн урт байх, илүүдэл реактивитийн өөрчлөлт хамгийн бага байхаар нейтроник үр дүнд нөлөөлөх параметрийг хэлнэ.



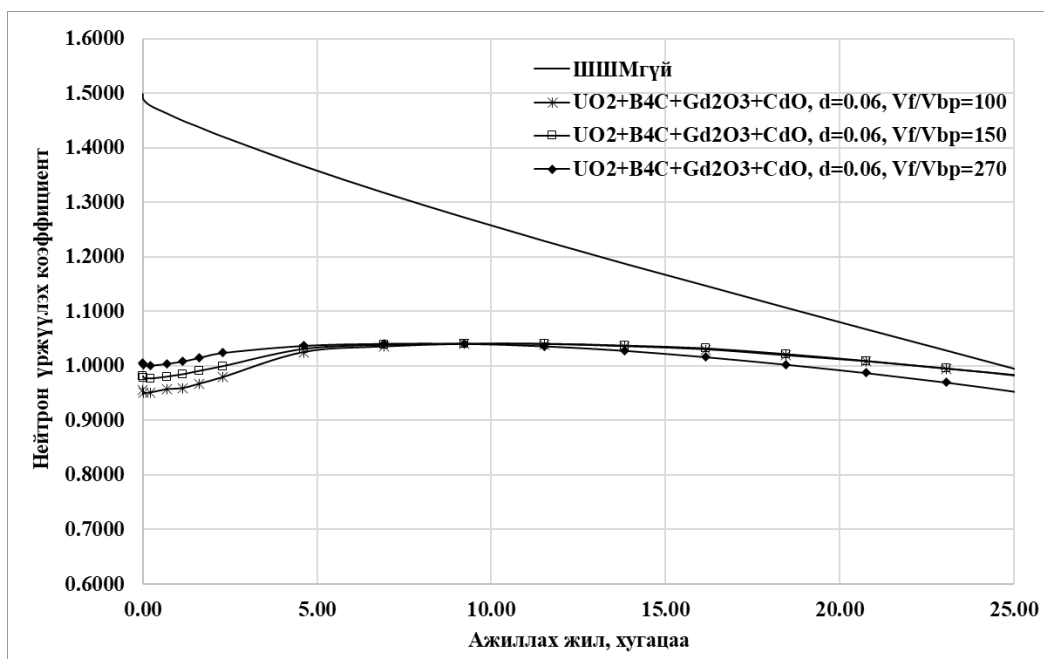
Зураг 2.52. Төвдөө ойлгогчтой Er_2O_3 ШШМ-тай МӨТХР-ын голомтын $k_{\text{эфф}}$ -н хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт



Зураг 2.53. Төвдөө ойлгогчтой CdO ШШМ-тай МӨТХР-ын голомтын $k_{\text{эфф}}$ -н хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт



Зураг 2.54. Төвдөө ойлгогчтой $B_4C+Gd_2O_3+Er_2O_3$ ШШМ-тай МӨТХР-ын голомтын $k_{эфф}$ -н хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт



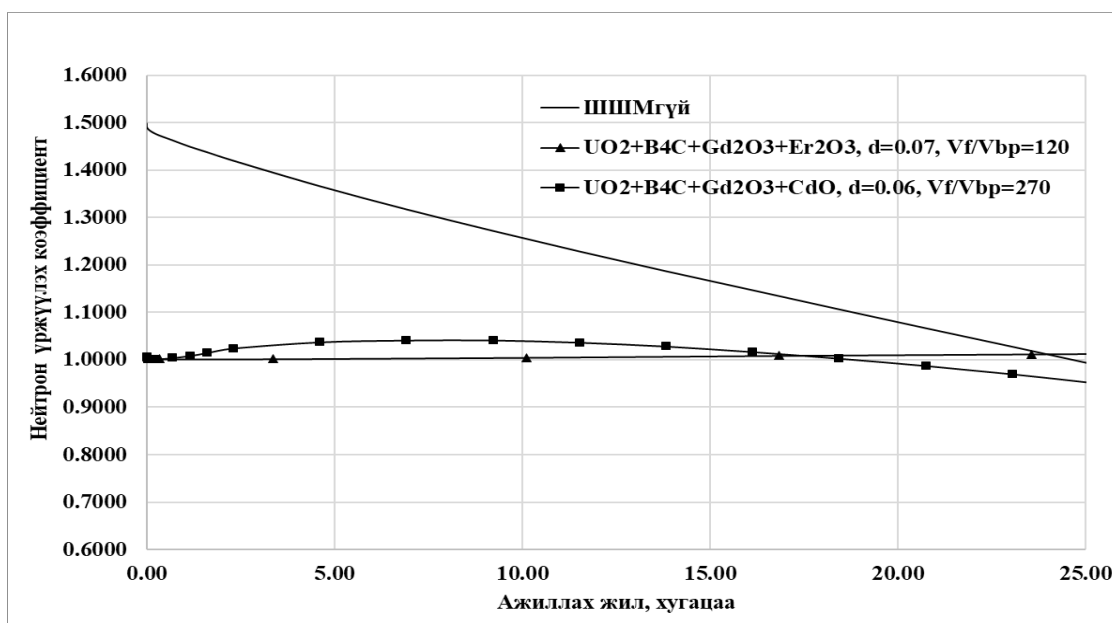
Зураг 2.55. Төвдөө ойлгогчтой $B_4C+Gd_2O_3+CdO$ ШШМ-тай МӨТХР-ын голомтын $k_{эфф}$ -н хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт

Гурван төрлийн ШШМ-тай голомтын нейтроникийн тооцооллыг Er_2O_3 ба CdO -ийн дизайны параметрийн хэд хэдэн утгад гүйцэтгэн голомтын нейтрон үржүүлэх эффектив факторын хугацааны өөрчлөлтийг Зураг 2.54 ба Зураг 2.55-д харуулав. Зургаас харвал ШШМ-ын $B_4C+Gd_2O_3+Er_2O_3$ хольц бүхий голомтын тухайд Er_2O_3 -ын бөөмийн диаметр $d=0.07$ см, $V_{түлш}/V_{шшм}=120$, харин $B_4C+Gd_2O_3+CdO$ хольц бүхий голомтын хувьд CdO -

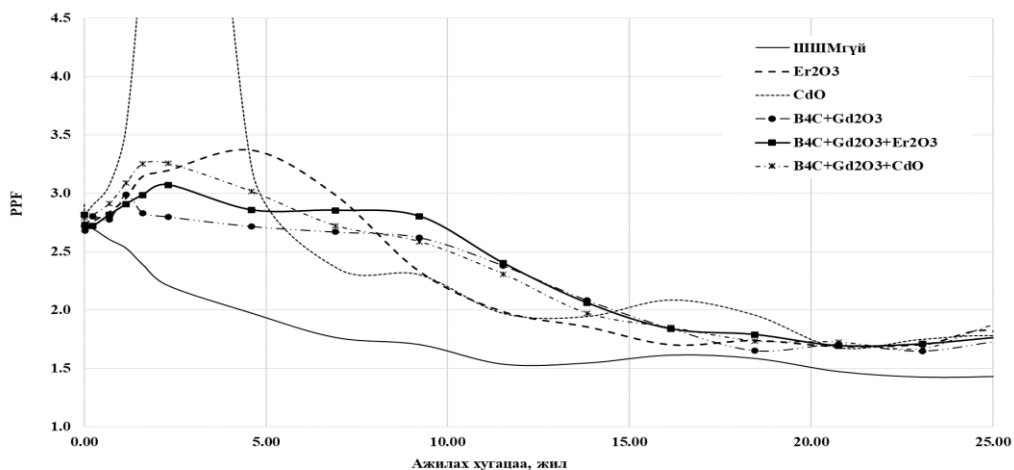
ын бөөмийн диаметр $d=0.06$ см, $V_{түлш}/V_{шшм}=270$ байхад хамгийн сайн үр дүнтэй байгааг харж болно. Хамгийн тохирох параметртэйгээр дангаар нь, мөн зөвхөн $B_4C+Gd_2O_3$, цаашилбал гурван төрлийн ШШМ-ыг хамтад нь голомтод ачаалсан үеийн нейтроник үр дүнг Хүснэгт 2.19-д харьцуулан харуулав. Эндээс реакторын ажиллагааны турш реактивитийн өөрчлөлт ШШМ-гй үед 33.3% байснаа $B_4C+Gd_2O_3+Er_2O_3$ гурван төрлийн ШШМ хослуулан ачаалах үед 2.91% хүртэл буурч, реакторын ажиллах жил уртасч байгаа нь харагдаж байна. Энэхүү үр дүнг нарийвчлан Зураг 2.56-т харуулснаар $B_4C+Gd_2O_3+Er_2O_3$ хольцын ШШМ нь МӨТХР-ын голомтыг критик төлөвт байлгах хамгийн сайн үзүүлэлттэй ШШМ болохыг олж тогтоов.

Хүснэгт 2.19. Төвдөө ойлгогчтой дизайны тохирох параметртэй ШШМ бүхий МӨТХР-ын голомтуудын нейтроник анализын үр дүн

ШШМ-ын төрөл	$K_{эфф,0}$ (алдаа %)	ХИУ $\Delta k/k$, %	$t_{голомт}$ (жил)	$V_{түлш}(ГВт^*өдөр/гн)$
ШШМ-гүй	1.4994(0.0250)	33.30	23.8	108
Er_2O_3 ($d=0.05$ см, $V_{түлш}/V_{шшм}=12$)	1.0245(0.0901)	8.26	23.1	100
CdO ($d=0.06$ см, $V_{түлш}/V_{шшм}=25$)	1.0132(0.0996)	21.14	25.4	110
$B_4C+Gd_2O_3$ [59]	1.0381(0.0381)	3.67	23.1	100
$B_4C+Gd_2O_3+Er_2O_3$ ($d=0.07$ см, $V_{түлш}/V_{шшм}=120$)	1.0068(0.0325)	2.91	25.3	80
$B_4C+Gd_2O_3+ CdO$ ($d=0.06$ см, $V_{түлш}/V_{шшм}=270$)	1.0055(0.0338)	3.94	18.4	80



Зураг 2.56. Төвдөө ойлгогчтой, гурван өөр ШШМ-тай МӨТХР-ын голомтын $k_{эфф}$ -ийн хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт



Зураг 2.57. Төвдөө ойлгогчтой төрөл бүрийн ШШМ-тай МӨТХР-ын голомтын чадлын пикийн факторын хугацааны өөрчлөлт

Түүнчлэн реакторын аюулгүй ажиллагаатай холбоотойгоор ШШМ чадлын түгэлтэнд хэрхэн нөлөөлж байгааг судлав. Чадлын түгэлтийг чадлын пикийн фактоороор илэрхийлэх ба голомтын тухайн хэсэгт үүсч буй хамгийн их чадлыг дундаж чадалд харьцуулсан харьцаагаар тодорхойлдог. Чадлын пикийн фактор жигд байх нь реактор аюулгүй ажиллах нэг үндэс болно. Зураг 2.57-т төрөл бүрийн ШШМ-тай МӨТХР-ын голомтын чадлын пикийн факторын хугацааны өөрчлөлтийг харуулав. Үр дүнг харахад төрөл бүрийн ШШМ ачаалсан МӨТХР-ын голомтын чадлын пикийн факторыг ШШМ-гүй МӨТХР-ын голомттой харьцуулахад ихэссэн байна. Иймд цаашдын судалгааны ажлаараа түлш болон ШШМ-ыг голомтод жигд бусаар ачаалан чадлын пикийн факторыг бууруулан, ажиллах хугацааны турш жигдрүүлэх тооцооллыг гүйцэтгэнэ.

2.4.13 Дүгнэлт

1. 100 МВт чадлын төвдөө ойлгогчтой янз бүрийн ШШМ бүхий МӨТХР-ын голомтын дизайныг хийж, реакторуудын нейтроник анализ гүйцэтгэн критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэв.

2. ШШМ болон түүний дизайны тохирох параметрээс хамааран МӨТХР-ын голомтын илүүдэл реактивитийн хамгийн их утгыг 33.2%-аас хамгийн багадаа 2.91% хүртэл буулгав.

3. Голомтод жигд бусаар ачаалсан түлш болон ШШМ-ууд реакторын голомтын нейтроник үзүүлэлт болон чадлын түгэлтэнд хэрхэн нөлөөлөхийг судалж, чадлын пикийн факторыг жигдлэх судалгааг дэлгэрүүлэн хийх шаардлагатай.

3 БҮЛЭГ. ӨНДӨР ТЕМПЕРАТУРЫН ГЕЛИЙН МОДУЛЬ РЕАКТОР АШИГЛАН УСТӨРӨГЧИЙН ЭРЧИМ ХҮЧИЙГ МОНГОЛД ХӨГЖҮҮЛЭХ ҮНДЭСЛЭЛ

3.1 Устөрөгчийн эрчим хүч нүүрстөрөгч ялгаруулдаггүй экологийн цэвэр тогтвортой эрчим хүч

Устөрөгчийн эрчим хүч нь цөмийн болон нарны энергийг ашиглан ус, нүүрс зэрэг устөрөгч агуулсан байгалийн түүхий эдээс устөрөгч гарган авах, түүнийг хадгалах, түлш болгон ашиглах, энерги дамжуулах технологиудын цогцолбор юм. Иймээс устөрөгчийн эрчим хүч нь устөрөгчийг үйлдвэрлэх, хадгалах, тээвэрлэх, хүмүүсийн ахуй, тээврийн дэд бүтэц, төрөл бүрийн үйлдвэрлэлийн чиглэлээрх энергийн хэрэглээнд зориулсан хэрэгсэл шиг ашиглахад үндэслэсэн хүн төрөлхтний эрчим хүчний үйлдвэрлэл, хэрэглээний эдийн засаг, экологийн чиглэл юм. Энерги агуулагчийг гарган авах альтернатив аргуудын нэг бол устөрөгчийн эрчим хүч юм. Устөрөгчийн түлш олборлох хувилбаруудыг боловсруулах ажлыг эрдэмтэд идэвхтэй эрхэлж байна. Устөрөгчийн эрчим хүчний үндсэн шийдэх асуудал нь устөрөгчийг гарган авахад бусад энерги агуулагч газрын тос, цахилгаан, хий зарцуулах Шаардлагатай байдагт оршино. Мэргэжилтнүүд эдгээр шийдэх асуудлын чиглэлүүдийг арилгах боломжийг олохоор зүтгэж байна. Жишээ нь уснаас устөрөгч гарган авах асуудалд анхаарлаа хандуулж байна. Дэлхийн далай тэрбум тонноор хэмжигдэх устай гэдгийг тооцвол устөрөгчийн түлш гаргахад зориулсан усны нөөц хязгааргүй юм. Устөрөгчийн эрчим хүчний давуу тал бол энергийн альтернатив эх үүсвэрийг гарган авах зам дахь бэрхшээлийг давах боломж, энерги агуулагчийн ашиглалтын болон технологийн өндөр үзүүлэлт юм. Зуурамтгай чанар багатай учраас устөрөгчийг дамжуулах хоолойгоор ямар ч асуудалгүй тээвэрлэнэ. Түүнийг шингэрүүлсэн болон хий төлөв байдалд хадгалж болно. Тэр нь хөнгөн, удаан хадгална.

Монголын хувьд устөрөгчийн эрчим хүчийг хөгжүүлэх дараах үндэслэл байна.

Үүнд:

- Нэгдүгээрт, өнөөдөр даян дэлхий шинэ технологийн хэв маягийн босго дээр байна. Одоогийн эдийн засаг, техникийн тэргүүлэгч орнууд устөрөгчийн эрчим хүч хөгжүүлэх үндэсний хөтөлбөр боловсруулан ажиллаж байна. Манай улс ч гэсэн эрчим хүчний энэ альтернатив чиглэлийг сонгон хөгжүүлж, дэлхийн тэргүүлэх орнуудын хөгжлийг угтаж гүйцэх боломж;
- Хоёрдугаарт, бидэнд өөр сонголт байхгүй. Өнөөдрийн манай улсын эдийн засгийн алдагдалтай, экологийн хор хөнөөлтэй нүүрсний эдийн засгийг газрын тос, хийн

- импортын хамаарлыг бууруулах устөрөгчийн технологи ашигласан экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн эдийн засагт ойрын ирээдүйд шилжүүлэх шаардлагаа;
- Түлшний элементийн гол түүхий эд болох паллади (Pd), цагаан алт (Pt) зэрэг үнэтэй элементүүдийн оронд нанотехнологиор гарган авсан материалыг ашиглаж байгаа учир ТЭ-ийн үнэ жилээс жилд буурч байна.

Өндөр температурын гелийн модуль реактор нь сүүлийн долоон жилд ихээхэн хөгжсөн бөгөөд өртгийн хувьд үр ашигтай байх, аюулгүй байдлыг илүү тогтвортой байлгах, түлш ашиглалтыг сайжруулах зэрэг өндөр түвшинд хүрэхийн тулд маш түргэн хувьсан өөрчлөгдөж байна. Цөмийн эрчим хүч нь геополитикийн нөхцөл байдал, технологийн түвшин, аюулгүй байдал болон бусад асуудлуудын нөлөөнд автан хөгжлийн хэд хэдэн үе шатыг даван туулж байна. Хөгжлийн эхэн үедээ цөмийн судалгаа нь цэргийн болон үндэсний батлан хамгаалах ашиг сонирхолд нийцтэй гэж үздэг байсан ч ихэвчлэн орон нутгийн хүрээнд санхүүждэг байна. Бүс нутгийн хамтын ажиллагаа нь үүссэний дараа технологийн хөгжил нь сүүлийн хэдэн арван жилийн туршид эцэстээ хүрч сүүлийн хорин жилд олон улсын хамтын ажиллагаа засгийн газрууд цөмийн судалгааг маш хүчтэйгээр дэмжиж ирсэн. Энэ хэсэгт цөмийн реакторын дизайны хөгжил болон онцлогууд цөмийн энергийн системийн санаачлага олон улсад хэрэгжиж байгаа гол судалгааны талаар хэлэлцэгдсэн.

Маш өндөр температурын реактор (VHTR) нь IV үеийн реактор бөгөөд бал чулуун удаашруулагчтай, гели хөргүүртэй реактор, нэг удаагийн түлшний циклтэй (ашигласан түлшийг дахин боловсруулахгүй), голомтын гаралтын температур нь 1000°C байна. Өндөр температурын IV үеийн реакторуудад термохимийн бүтээгдэхүүн устөрөгч үйлдвэрлэх боломжтой. Түүнчлэн өндөр температурт дулаан үйлдвэрлэх IV өндөр температурын гелийн модуль реактор нь эрчим хүчний суурилагдсан чадал (20 – 1700 МВт)-ыг өргөн мужид буй болгож болно. Ийм модуль реактор бүхий систем нь дараах хэрэглээний чиглэлүүдийг буй болгож байна.

Жишээ нь:

- Термохимийн аргаар устөрөгч үйлдвэрлэх
- Бага температурын хүрээнд усыг цэвэршүүлэх
- Уур үүсгэх
- Нефть боловсруулах үйлдвэрийг дулаанаар хангах
- Нүүрснээс шингэн үйлдвэрлэх
- Өндөр температурын уурыг аж үйлдвэрт ашиглах

- Устөрөгч үйлдвэрлэх уурын-метаныг шинэчлэх
- Дундаж температурын хүрээнд үр ашиг өндөртэй цахилгаан үйлдвэрлэх
- Нүүрсийг хий болгон хувиргах
- Газрын тосыг шахах
- Тосыг сэргээх
- Петрохимийн аргаар нүүрс, байгалийн хийн дайвар бүтээгдэхүүн үйлдвэрлэх
- Синтетик түлш үйлдвэрлэх / Fischer-Tropsch or methanol/
- Бордоо үйлдвэрлэх /шүвтэр эсвэл аммиак/
- Хотыг дулаанаар хангах

Ийнхүү өндөр температурын хийн хөргүүртэй реактор нь цөмийн эрчим хүчийг ашиглах хүрээг өргөжүүлнэ.

Үүнд:

- Цахилгаан эрчим хүч ба ахуйн хэрэглээний дулаан, газрын тос боловсруулах,
- Нефтехимийн үйлдвэрлэл, нүүрснээс синтетик шингэн түлшний үйлдвэрлэл, устөрөгчийн үйлдвэрлэл
- Баяжуулсан уран, эрчим хүчний буюу зэвсгийн плутони ашиглах МОХ түлш, уран,
- Торийн түлш бүхий голомтын хийц өөрчлөхгүй түлшний циклийн уян хатан байдал
- Реакторын модуль үзэл баримтлал нь эрчим хүчний эх үүсвэрийг хэрэглэгчид ойр
- Байрлуулах боломж олгоно
- Реакторын төхөөрөмж, цөмийн станцын аюулгүйн байдлын системийн тоо хамгийн бага байдаг нь нь хөрөнгө оруулалт, ашиглалтын зардлыг бууруулах урьдчилсан нөхцөл бий болгоно
- Түлшний гүн шаралт (гүйцэд) нь реактороос гарах түлшийг дахин боловсруулалт хийлгүй булшлах боломжтой
- Реакторын дулааны энергийг ашиглах коэффициент өндөртэй учраас хүрээлэн буй орчинд дулааны нөлөө багатай.

Өндөр температурын хийн хөргүүртэй реакторын онцлог:

- Реакторт дулаан зөөгчийг 950⁰С хүртэл халаах боломжтой
- Аюулгүй байдлыг онцгой өндөр түвшинд хангасан

Эдгээр онцлогууд нь дараах байдлаар хангагдана.

Үүнд:

- Керамик микро бөөм дээр суурилагдсан халуунд тэсвэртэй түлшний тусгай хийц
- Бүтээц материалаар бал чулуу, нүүрстөрөгч, нүүрстөрөгчийн зориомж ашигласан
- Дулаан зөөгчөөр идэвхгүй инертийн хий гели ашигласан
- Ямар нэг ослын үед тогтвортой реакторын тусгай бүтээцтэй.

Манай улс байгалийн хийн нөөцгүй тул өндөр температурын гелийн модуль реакторын 900° температуртай гелийн хийг ашиглан термохимийн аргаар усыг задалж эсвэл нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэж эрчим хүч, автомашин, газрын тос боловсруулах, хими, хүнсний үйлдвэрийг хангах болон ураны нөөцөө ашигласан ногоон хөгжлийн бодлогыг төгс шийдэх шаардлагаа гарч байна. Дэлхий нийтээр устөрөгчийн эрчим хүч буюу устөрөгчийн эдийн засагт шилжиж байгаа үйл явдалтай мөр зэрэгцэн орох нь цаг хугацаа хэмнэж, эдийн засгийн алдагдалтай, экологийн хортой түүхий нүүрсний эдийн засгаас устөрөгчийн эдийн засагт шилжих боломж олдох юм. Устөрөгчийн түлшний элемент бүхий автомашины цэнэглэх станц болон цахилгаан, дулаан хангамжийн зориулалттай станцыг хангах устөрөгчийн үйлдвэрлэл, тээвэрлэлт, хадгалалт, хэрэглээний дэд бүтцийг хөгжүүлэх шаардлагаа гарна.

Түлшний элемент дээр устөрөгч ба хүчилтөрөгчийн атомуудын нэгдлээр цахилгаан энергийг гарган авна. Энэ урвал нь усны электролизийн урвалын эсрэг урвал юм. Гэвч усны синтез өнөө цагт катализаторын оролцоотой явагдана. Урвалыг хурдасгах, энергийн үзүүлэлтийг дээшлүүлэх зорилгоор катализаторын гадаргын талбайг огцом ихэсгэх Шаардлагатай. Үүний тулд түүнийг нунтаглана. Платин буюу бусад платиноидыг нунтаглаж, контактын гадарга (онцлог полимерээр хийгдсэн хатуу перфторированную мембран)-д түүнийг суулгах зэрэг нь их үнэтэй ажилвар болдог. Үүн дээр анхдагч платины үнэ өсөж байна (түүний хэрэгцээ хурдан өсөж байна) одоо 1000 руб/г орчим байгаа. Иймээс түлшний элемент дээр үйлдвэрлэж байгаа 1 кВт энергийн үнэ 3-5 мянган доллар байна. 20-30 кВт чадалтай төхөөрөмжийн үнэ 70-80 мянган доллар хүрнэ. Энэ нь автомашины тээвэр, дулаан станцад түлшний элементийн хэрэглээний шилжилтийг саатуулж байгаа юм. Гэвч хөгжилтэй орнууд хэдэн зуун сая доллар, еврог ДЦС, автомашиныг зохион бүтээх, устөрөгч, түлшний элементийн үйлдвэрлэлийг хямдруулах аргад зарцуулж байна. Аль хэдийнээ 400 кВт болон хэдэн МВт чадалтай түлшний элементийн суурин батарей бий болжээ.

Устөрөгчийн эрчим хүчний үндсэн энерги зөөгч нь 99,999 об.% -оос бага цэвэр устөрөгч байна. Өндөр цэвэршилттэй устөрөгч (99,999 об.%) гарган авах ганц арга нь

түүнийг паллади мембранаар сонгон диффузилсний үр дүнд уур хийн холимгоос ялгахад оршино. Паллади мембраны чухал үзүүлэлт бол мембранаар устөрөгч нэвтрэх хурд, түрэмгий хийд ашиглах үед түүний бат бэх чанар, тэсвэр юм. Хатуу уусмалын мужид мембран хайлшийн механик бат бэх чанар, уян хатан байдал, устөрөгчийн нэвтрэлт зэрэг нь Pd легировани хийснээр дээшилнэ. Pd-8Y-Me бүрэлдэхүүн хайлшийн хувийн устөрөгч нэвтрүүлэлт $300-600^{\circ}\text{C}$ үед $3,6$ -аас $4,7 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{цаг}\cdot\text{Мпа}^{0,5}$ болно. 50 ба 30 мкм зузаантай ялтсыг 50 ба 150 мм диаметртэй диффузийн элементийг бэлтгэхэд ашласан байна.

ОХУ-д 30 сая автомашин ашиглаж байгаагийн 70% том хотуудад бөөгнөрсөн байдаг. Томхон хотын экологийн шийдэх асуудлын амин чухал шийдэл нь зөвхөн түлшний элементтэй энергийн төхөөрөмжтэй авто тээврийн хэрэгслийн зарчмын шинэ төрлийг л бий болгоход оршино. Экологийн хатуу хязгаарлалт, торгууль ба хуулийн хөнгөлөлт тогтоосон үед түлшний элементтэй экологийн цэвэр автомашин авах сонирхол бий болох бөгөөд ийм машины үнэ $300-500 \text{ \$/кВт}$ түвшинд хүрсэн үед хэрэглэгчдийн хангалттай тооны хүрээ буй болно. Электро химийн төхөөрөмжийн зах зээлийн худалдааны сүүлийн үеийн анхаарал татах салбар бол цахилгаан тэжээлийн нөөц (ослын) систем юм. Хотын гаднах хаус коттеж, эмнэлэг, хамгаалалтын дээд зэргийн объект зэрэг төвлөрсөн цахилгаан хангамж $12-24$ цаг тасрах үед цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэхэд зориулагдсан $5-10 \text{ кВт}$ чадалтай ийм төрлийн цахилгаан станцыг ашиглах болж байна. Түлшний элементтэй цахилгаан станцын хувийн энерги багтаамж аккумуляторын батареины гүйдэл үүсгүүрийнхээс $10-30$ дахин их байдаг. Энэ бүлгийн төхөөрөмжийн шаардагдах чадлын хамгийн их түвшин нь тэдгээрийн үнийн түвшин $1000-1500 \text{ \$/кВт}$ байхаар худалдаанд гарахаар байна.

Монголд 150 миллиард тонн нөөц бүхий нүүрсний орд газруудыг ашиглаж устөрөгч (буюу хийн синтез) үйлдвэрлэх их боломж нээгдэх юм. Ойрын үед нүүрс олборлох үйлдвэрийн салбар устөрөгчийн том үйлдвэрлэгч болох боломжтой. Байгалийн хийн нөөцгүй манай орны хувьд нүүрснээс устөрөгч их хэмжээтэй үйлдвэрлэх нь эдийн засгийн үндэслэлтэй болно. CO_2 ялгаруулахгүй байх технологийн боловсруулалт нь устөрөгч үйлдвэрлэх үед шаардагдаж байгаа экологийн аюулгүй байдлыг хангах болно.

Устөрөгч их үнэтэй. Энэ санаа хийсвэр. Хувиргах технологи нь байгалийн хийгээс устөрөгч үйлдвэрлэх өөрийн өртөг $\approx 1,5 \text{ \$/кг}$, нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэх өөрийн өртөг $\approx 2,5 \text{ \$/кг}$ (Монголд бензиний үнэ $1 \text{ \$/кг}$ орчим). Цахилгаан эрчим хүчний үнэ $5 \text{ цент/кВт}\cdot\text{цаг}$ байхад $50-55 \text{ кВт}\cdot\text{цаг/кг}$ ($4.5-5,0 \text{ кВт}\cdot\text{цаг/нм}^3$) энергийн зардалтай одоо байгаа төхөөрөмж дээр гарган авсан электролизын устөрөгчийн өөрийн өртөг $\approx 4,0-4,5 \text{ \$/кг}$ буюу бензиний үнээс бараг 5 дахин их байна. Гэвч жишээ нь хотын нөхцөлд түлшний элементтэй автомашин ашиглах үед дотоод шаталтат хөдөлгүүртэй харьцуулахад устөрөгчийн их

дулаан ялгаруулах чадвар (3:1) ба түлшний элемент бүхий энерги төхөөрөмжийн өндөр ашигтай АҮК (2:1) байдгаас энэ ялгаа бүрэн тэгшитгэн арилна.

Устөрөгчийн эрчим хүч шинжлэх ухааны хамгийн хурдан хөгжиж байгаа чиглэлийн нэг юм. 2015 онд Франц улсын нийслэл Парис хотод болсон хүлэмжийн хийн ялгаруулалтыг багасгах, дэлхийн цаг уурын өөрчлөлтийг сааруулах олон улсын хурлаар дэлхийн 195 улс уур амьсгалын өөрчлөлттэй тэмцэх “Парисын хэлэлцээр” хийж, хүлэмжийн хийн ялгаруулалтыг бууруулж, дэлхийн дулаарлын хэмжээг Цельсийн 2 хэмээс доош түвшинд хязгаарлахад бүх улс орон бүхий л хүчин чармайлтаа дайчлах талаар онцлон тусгажээ. Өндөр хөгжилтэй АНУ, Япон хоёр гадаадын нүүрсээр ажилладаг цахилгаан станцыг санхүүжүүлэхгүй гэдэг шийдвэр гаргалаа. Дэлхий дахины хүлэмжийн хийн татвар буй болгох хандлагатай байна [29]. Дэлхий дахиныг хамарсан дулаарлаас шалтгаалж АНУ, БНХАУ зэрэг нүүрсний нөөц ихтэй улсууд нүүрс шууд шатаадаг цахилгаан станцууд барихаас татгалзаж эхлээд байна. Манай хойд хөрш ОХУ Европ, Ойрх Дорнод, Ази-Номхон далайн 12 оронд 30 реактор барихаар захиалга аваад байна. Урд хөрш БНХАУ 2030 он гэхэд 110 реактор барихаар төлөвлөн ажиллаж байна [30]. Иймээс Монгол улс харьцангуй цэвэр байгалийн хийн нөөцгүй илрээгүй, эрчим хүчний үндсэн нөөц нүүрс, уран тул цөмийн эрчим хүчний өндөр температурын реактор ашиглан цахилгаан эрчим хүч болон нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэж экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн эрчим хүчийг ойрын ирээдүйд хөгжүүлэх асуудлыг энэ ажлын хүрээнд дэвшүүлж тавив.

Өнөө үед устөрөгчийн дэлхийн үйлдвэрлэл гол төлөв байгалийн хийг уураар хувиргахад үндэслэнэ. Гадаад орнуудад устөрөгч гарган авахад байгалийн хий, газрын тосноос гадна нүүрсийг өргөн ашиглах болж байна (Уурын риформинг). Устөрөгч үйлдвэрлэхэд нүүрс ашиглах хэд хэдэн шинэ технологийн процесс байна.

Үүнд:

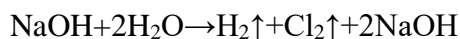
- Катализаторын оролцоотой уурын риформинг
- Төмөр, металлын исэлдэх завсрын үе шатыг багтаасан дараа нь ислийг нүүрсээр ангижруулах процесс
- Ионы (O^{2-}) дамжуулалттай мембран-электролитүүд (жишээ нь $ZrO_2 \cdot MxOy$)-ыг хэрэглэх өндөр температурын процесс гэх мэт.

Сүүлийн үед органик түүхий эдээс устөрөгчийг цөмийн реакторын дулааныг ашиглан гаргаж авах судалгаа хийж байна. АНУ-ийн Генерал атомик фирм чанар муутай нүүрсийг хийжүүлтийн бүтээгдэхүүн, устөрөгч гарган авахад өндөр температурын хийн реакторыг хэрэглэхэд үндэслэсэн арга боловсруулж байна. Цөмийн реакторын дулааныг уур метаны

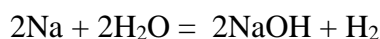
хувиргуурт оруулж өгнө. Эдгээр хувиргуурт устөрөгч гаргаж авах процесс никел катализаторын оролцоотой 850⁰С орчим температуртай үед явагдана. Ер нь устөрөгчийг үйлдвэрт гаргаж дараах аргууд байдаг.

Үүнд:

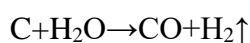
5. Шүлт ба давсны усан уусмалыг электролизд оруулна.



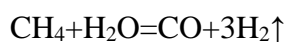
Шүлтэт ба газрын шүлтэт металл жирийн температурт устай урвалд орж шүлт, устөрөгч үүснэ.



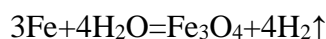
6. 1000⁰С-д улайсгасан нүүрсний дундуур усны уурыг нэвтрүүлнэ.



7. Метаныг 900⁰С-д конверсид оруулна.



8. Уур төмрийн арга



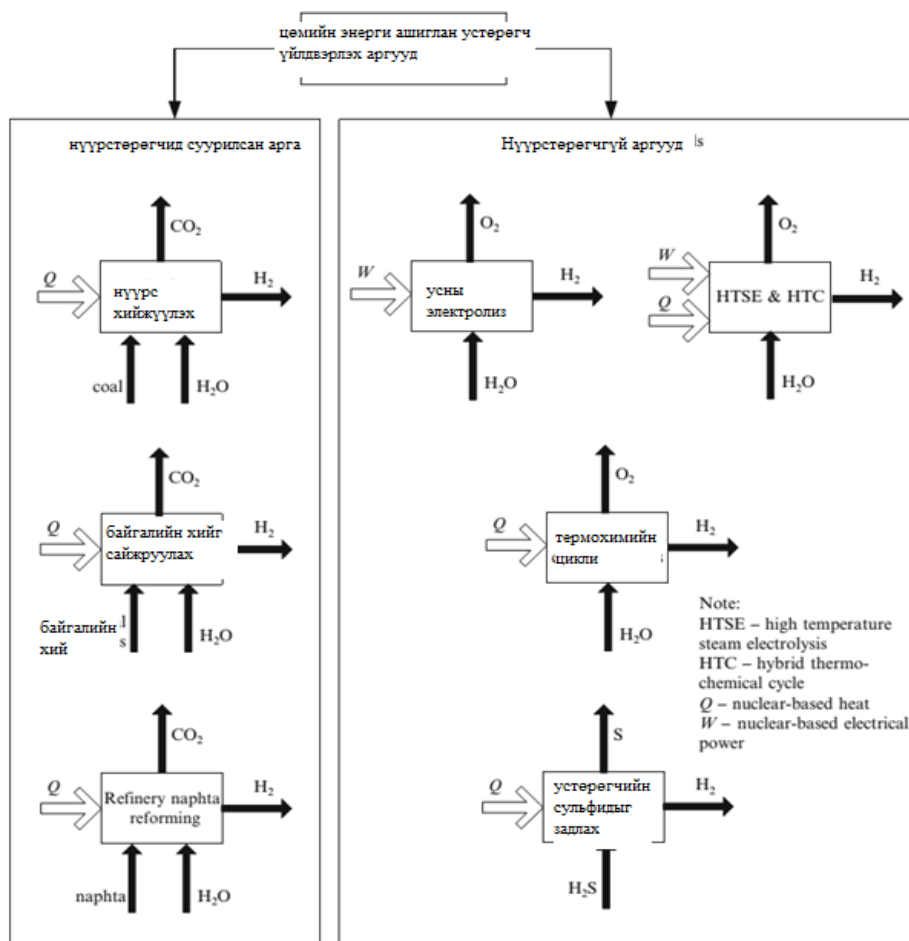
Устөрөгч үйлдвэрлэх төрөл бүрийн аргын харьцуулсан задлыг 3.1-р хүснэгтэд харуулав.

Хүснэгт 3.1. Устөрөгчийн үйлдвэрлэлийн зардал

Процесс	Үнэ, долл/(кВт·цаг)
Термохимийн	0,02 – 0,04
Электролиз	0,05 – 0,06
Бензин	0,03
Цахилгаан	0,05
Байгалийн хий	0,01
Процесс	Нэгж хүчдлийн үнэ, долл/м ³
Түргэсгэх уурын хувиргалт	0,10 – 0,12
Шатахууны зарим хэсгийн исэлдэлт	0,12 – 0,16
Нүүрсийг хийжүүлэх	0,17 – 0,20
Ердийн электролиз	0,34 – 0,41
Тэргүүний электролиз	0,22 – 0,24
Өндөр температурын хийн электролиз	0,22 – 0,24
Шаардлагатай энерги, Вт/м ³	долл/м ³
3,125 – 3,186	0,19 – 0,22
3,064 -3,124	0,18 – 0,21
2,711 -3,064	0,17 – 0,18
Хүхрийн хүчил орсон ердийн электролиз	125,7 – 170,9
Хүхрийн хүчил орсон тэргүүний электролиз	43,8 – 87,6
Шолгоожийн эсэлдх-бикарбонатын цикл	2,32

Устөрөгч нь ирээдүйн эрчим хүчний эдийн засгийн тогтвортой байдлыг хангахад гол энергийн агуулагч болно. Цөмийн реакторын дараагийн үе нь термохимийн аргаар устөрөгч үйлдвэрлэх, усыг ялгах үйл явцыг жолоодох боломжийг илэрхийлэх, өндөр температурт

боловсруулан дулаан эрчим хүч үйлдвэрлэх боломжийг нээхэд оршино. Эдгээр арга замуудыг 3.1-р зурагт харуулав. Хүхэрт устөрөгчийг задлах, газрын тосыг сайжруулах, байгалийн хийг өөрчлөх, нүүрсийг хий болгон хувиргах гэх мэт устөрөгчид үндэслэсэн бусад арга замуудыг харуулсан байна. Энэ бүх процесс Шаардлагатай химийн урвалыг удирдан, өндөр температурын цөмийн реакторын дулааныг ашигладаг. Зөвхөн цахилгаан эрчим хүч өндөр температурын дулааны оролт дээр үндэслэсэн арга замуудыг зураг 3.5-д үзүүлэв. Нүүрсийг шингэрүүлэх болон байгалийн хийг сайжруулах аргуудад ус, хийн давхар шилжих урвалаар нэмэлт устөрөгч үүсгэх ба нүүрстөрөгчийн дан ислийг буруулан CO₂ болгодог. Цөмд суурилсан чулуужсан түлшний сайжруулалт нь чулуужсан түлшнээс хамаарах эрчим хүчний дэлхий нийтийн хамаарлыг бууруулж, устөрөгчийн эдийн засагт бүрэн шилжих арга зам нь хамгийн боломжит ирээдүйтэй арга юм. Устөрөгчийг үйлдвэрлэн ашигласнаар чулуун түлшинд боловсруулалт хийж, метанол эсвэл Fischer-Tropsch түлшүүдийг цөмийн дулааныг ашиглан нэгтгэх боломжтой. Ихэнх түлшийг тээврийн хэрэгслүүдэд ашигладаг. Үүнтэй холбогдуулан цөмийн дулааныг метанол, дизель, нэгдмэл хийг үйлдвэрлэхэд ашиглаж байна.



Зураг 3.1. Цахилгаан эрчим хүч/дулааныг ашиглан цөмийн аргаар устөрөгч үйлдвэрлэх аргууд

Хүхэрт устөрөгч нь геотермал цооног, тосны цооног, галт уулын суурь, болон далайнуудад задардаг. Хар тэнгис нь дэлхийн хамгийн их хүхэрт устөрөгчийн нөөцтэй. Хар тэнгис нь хүхэрт устөрөгчийн сэргээгдэх нөөцтэй учир нь нарны цацрагийн нөлөөлөл доор микро организмууд бий болж байдаг. Ерөнхийдөө дулаан-катализаторийн H_2S эвдрэлийг ашиглан устөрөгч хүхрийг бий болгоход хэрэглэх ба энэ 2 бүтээгдэхүүн нь цөмийн эрчим хүчийг ашиглахад маш чухал юм.

Дээр дурьдснаар цөмийн реакторын дараагийн үе нь олон зорилгоор ашиглаж болох өндөр температурын үйл ажиллагаатай дулаан цахилгаан түүхий эдийг хамтран үйлдвэрлэдэг байх болно.

Иймээс олон аж үйлдвэрийн үйл явцад /жишээ нь: хөнгөнцагаан болон ган хайлуулж үйл явц, петрохими гэх мэт/ үндсэн химийн бүтээгдэхүүн нэн Шаардлагатай ба энерги зөөх, цөмийн энергийг ашиглан устөрөгч үйлдвэрлэх нь цөмийн реакторын дараагийн үеийн хөгжлийн түлхүүр элемент юм. Тийм болохоор маш олон цөмийн R&D хөтөлбөрүүд байгаа хөтөлбөр нь ойролцоогоор санхүүгийн төсвийн 20% эзэлдэг ба цөмийн устөрөгчийн үйлдвэрлэлд чиглэсэн чухал бүрэлдэхүүн хэсгүүд багтана. Энэ хэсэгт цөмд суурилсан устөрөгчийн үйлдвэрлэлийн зарим хөтөлбөрийн талаар олон улс, орон нутаг болон бүс нутгийн санаачлагуудыг хэлэлцсэн. Цөмийн устөрөгчийн хөтөлбөрийн гүйцэтгэгчээр Японы Атомын энергийн агентлаг (JAEA) болон Японы атомын энергийн комисс (JAEC) өндөр түвшний гүйцэтгэгчээр ажиллаж байна. Цөмийн хөтөлбөр нь 1970-аад онд ашиг олох зорилготойгоор эхэлсэн японы HTGR реакторын анхны загвар нь гарсан ба 2020 он гэхэд цөмийн аргаар устөрөгч үйлдвэрлэнэ. JAEA дахь Oarai судалгаа хөгжлийн төвд 30 Мвт чадалтай туршилтын HTGR реакторын үйл ажиллагааг хөгжүүлж байна. Хүхэрт-иод термохимийн циклээр устөрөгч үйлдвэрлэх процессыг энэ реактор дээр туршиж байна. Уг циклийг 1980-аад оны үед General Atomic санал болгосон ба энгийн арилжааны 600 Мвт дулааны чадалтай реакторын хувьд ойролцоогоор 0.06 Мтн/жил устөрөгч үйлдвэрлэдэг байна. Америкт National Hydrogen-fuel Initiative (NHI), GHG-free устөрөгчийг үйлдвэрлэх технологид үндэслэн үндэсний судалгаа болон хөгжлийн хөтөлбөрийг баталсан. NHI түншүүд болох General Atomics, Areva NP, Westinghouse Electric Company-ууд арилжааны реактораар устөрөгч үйлдвэрлэх системийн хөгжүүлсэн.

Төрөл бүрийн технологиудтай ба станцын тохиргоонуудыг нь авч үзсэн:

- Gas Turbine Modular Helium Reactor (GHTR) цахилгаан эрчим хүч гаргах боломжтой ~50% үр ашигтай ба уурын процессийн температур нь 585 °C GA-д боловсруулсан.

- Цөмийн реакторын барилгаас ~90 м зайд хүхэрт-иодын термохимийн үйлдвэр байрлана.
- Дулааны эх үүсвэрийн температур нь 900 °C устөрөгч үйлдвэрлэх үр ашиг нь 44.5% бүхий S-I циклийг боловсруулсан.

830 °C эх температуртай 53% тооцоолсон үр ашигтай өөр хувилбараар устөрөгч бий болгох HTSE (high-temperature electrolysis) өндөр температурын электролизын арга юм.

3.2 Устөрөгч үйлдвэрлэх призм блок түлштэй өндөр температурын гелийн модуль реактор

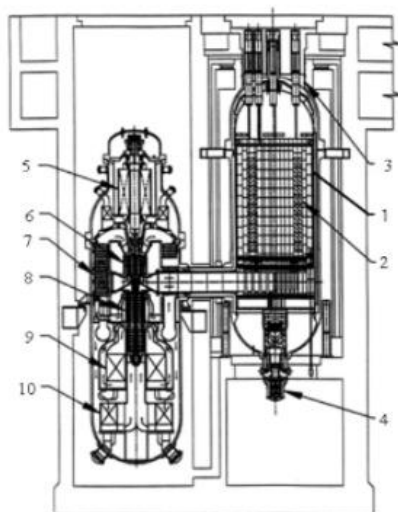
GT-MHR (Gas Turbine modular Helium Reactor) буюу хийн турбинтэй, гелийн хөргүүртэй модуль реактор нь өндөр температурт усыг электролизийн эсвэл термохимийн аргаар задалж устөрөгчийн үр ашигтай, хэмнэлттэй үйлдвэрлэл явуулна.

3.2.1 GT-MHR реакторын төсөл (General Atomics, АНУ)

GT-MHR реакторын үндсэн үзүүлэлтүүд 3.2-р хүснэгтэд харуулав. Шууд хийн турбины циклтэй GT-MHR реакторын бүдүүвчийг 3.2-р зурагт харуулав.

Хүснэгт 3.2. GT-MHR реакторын үндсэн үзүүлэлтүүд

Үзүүлэлтүүд	Утга
Реакторын дулааны чадал, МВт	600
Реакторын цахилгааны чадал, МВт	286
Реакторын голомтын хэлбэр	Призм түлшний эвлүүлэгтэй цагираг
Голомтын дундаж энерги ялгаралт, МВт/м ³	6,6
Нэгдүгээр хэлхээний дулаан зөөгч	гели
Нэгдүгээр хэлхээн дэх дулаан зөөгчийн даралт, МПа	7,07
Голомтод орох дулаан зөөгчийн температур, °C	490
Голомтоос гарах дулаан зөөгчийн температур, °C	850



Зураг 3.2. GT-MHR реакторын нэгжсийн бүрэлдүүлбэрийн бүдүүвч: 1-реактор; 2- реакторын голомт;

*3-удирдлага, хамгаалалтын системийн тулгуур; 4-зогсоосон реакторын хөргөлтийн систем;
5-генератор; 6-турбин; 7-рекуператор 8-компрессор; 9-завсрын хөргүүр; 10-урьчилсан
хөргүүр.*

Хийн турбин модульчлогдсон цахилгаан үйлдвэрлэх өндөр үр ашигтай эрчим хүчний хувиргах Брайтоны цикл бүхий HTGR нь хос зориулалттай, гелийн хөргөлттэй реактор GT-MHR (Gas Turbine modular Helium Reactor) юм. Реакторын системийн 850°C гелийн хийн үр ашигтай өндөр температурт электролизийн эсвэл термохимийн аргаар усныг эсвэл нүүрсийг задалж устөрөгч үйлдвэрлэх боломжтой.

Арилжааны GT-MHR - ийн стандарт түлшний цикл дахин боловсруулахаас гадна бага баяжуулсан уран хэрэглэнэ. General Atomics - ийн GT-MHR нь үйлдвэрлэсэн нэг нэгж эрчим хүч нь цацраг идэвхт хүнд металлын хог бага гаргадаг учир нь үйлдвэрийн бүтээмж өндөртэй, түлшний шатаалтын гүн сайнтай. Үүний нэгэн адил GT-MHR - ийн үйлдвэрлэсэн эрчим хүчний нэгжид ноогдох нийт плутон болон ^{239}Pu бага байна. GT-MHR - ийн аюулгүй байдлын дизайны зорилго нь ямар ч идэвхтэй аюулгүй ажиллагааны системийг ашиглахгүйгээр дулаан дамжуулдаггүй (байгалийн) материалаар зөвхөн задралын дулаан эсэргүүцэх явдал юм.

GT-MHR шууд Брайтоны циклээр эрчим хүч хувиргах систем нь хийн турбин, цахилгаан үүсгүүр болон хийн компрессорыг багтаадаг. Шууд Брайтон циклийн хэрэглээ ойролцоогоор 48%-ийн цэвэр үйлдвэрлэлийн үр ашгийг бий болгодог. GT-MHR хийн турбин эрчим хүч хувиргах систем нь хийн дулаан солилцуурын болон өндөр чадлын, өндөр температурыг даах их бие, идэвхтэй соронзон холхивч, шахагдсан өндөр үр дүнтэй хий ашиглах боломжтой.

3.2.2 HTTR туршилтийн реактор (Япон, JAЕА)

Японы анхны хийн хөргүүртэй реактор болох 30 МВт чадалтай өндөр температурын туршилтын бал чулуун HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor) реактор Ибаракийн засаг захиргааны газар Оараи хотод 1998 оны 11-р сард критик төлөвт хүрсэн бөгөөд 2001 онд бүрэн хүчин чадлаар ажилласан байна. 2010 онд 50 өдрийн турш 950°C температуртай үед тогтвортой халаалтыг харуулсан байна. HTTR реакторын түлш нь керамик бүрээстэй бага баяжилттай (дунджаар 6%) ураны бөөм бүхий түлшний элементтэй түлшний савааг зургаан талтай бал чулуун призм түлшний эвлүүлэгт байрлуулсан нь энэ реакторын “байгалийн” аюулгүй байдлын өндөр түвшинг бий болгоно. HTTR туршилтийн реакторын үндсэн үзүүлэлтүүдийг 3.3-р хүснэгтэд харуулав.

Хүснэгт 3.3. HTTR туршилтийн реакторын үндсэн үзүүлэлтүүд

Үзүүлэлтүүд	Утга
Реакторын дулааны чадал, МВт	30
Реакторын хөргүүр	Гели хий
Реактороос гарах хөргүүрийн температур, °C	850 /950
Реакторт орох хөргүүрийн темпеартур, °C	395
Нэгдүгээр хэлхээний хөргүүрийн даралт, МПа	4
Голомтын хийц материал	Бал чулуу
Голомтын эффектив өндөр, м	2,9
Голомтын эквивалент диаметр, м	2,3
Энерги ялгаралт, Вт/	2,5
Түлш	UO ₂ , TRISO
Түлшний элемент	
Ураны баяжуулалт, %	3-10, дунджаар 6

Японд аюулгүй байдлын шинэ дүрэм хэрэглэсний дараах японы анхны хийн хөргүүртэй реактор юм.



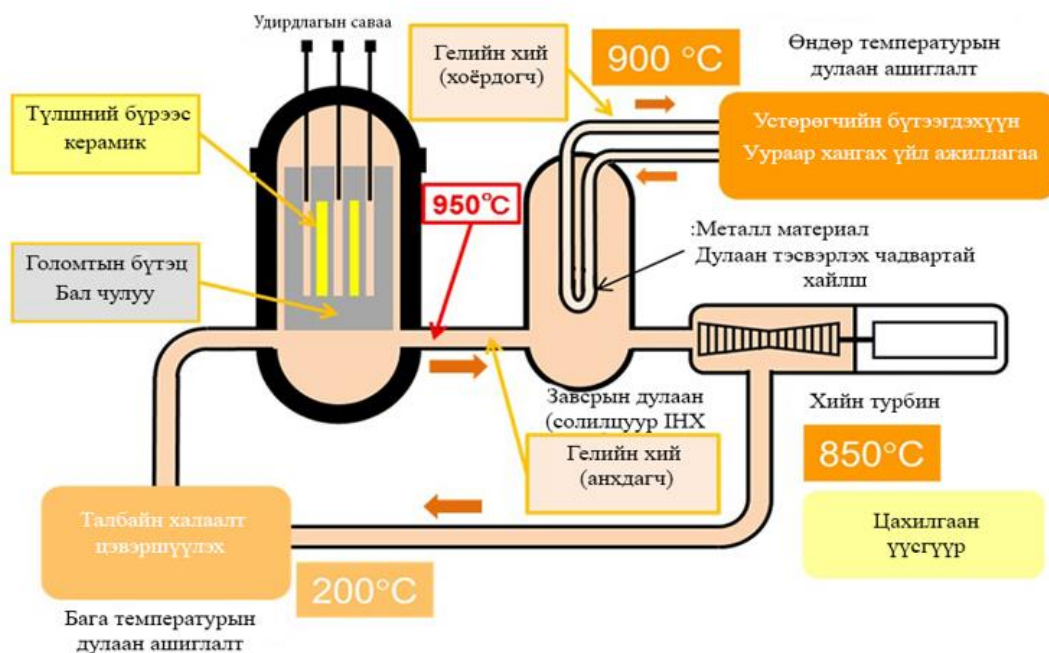
Зураг 3.3. HTTR (JAEA) реактортой танилцсан монголын төлөөлөгчид японы цөмийн эрчим хүчний мэргэжилтнүүдийн хамт 2009 он. Баруун гар талаас: 1 ба 4-р байранд Японы АЭА-ын мэргэжилтнүүд, Токиогийн технологийн их сургуулийн проф.Я.Като, А.Минато, ШУТИС-ийн проф. Ш.Чадраабал, докторант Б.Мөнхбат, МУИС-ын проф. Н.Норов, докторант С.Одмаа, доктор Ц.Амартайван, проф. Т.Обара, проф. Х.Секимота, Токай их сургуулийн проф.Н.Такаки.

HTTR (JAEA) туршилтын реактор дээр дараах зорилтуудыг хэрэгжүүлэх юм. Үүнд:

- HTGR төрлийн реакторын үндсэн технологийг боловсруулах;
- Ашиглалтын үзүүлэлтүүдийг шалах, мөн реакторын дотоод аюулгүй байдал;
- Цөмийн дулааныг технологийн зориулалтаар ашиглах боломжийг судлах (уснаас устөрөгч үйлдвэрлэх);
- HTGR реакторын голомтын нөхцөлд ажиллах үед цөмийн түлш, бүтээц материалын цацрагийн үйлчлэлд тэсвэрлэх чадварыг судлах;
- HTGR реакторыг хөгжүүлэх ирээдүйтэй судалгаанд зориулсан тоноглол зохион бүтээх, буй болгох гэх мэт.

Энэ реактор дээр аюулгүй байдлын системийн аюулгүй байдлын системийн онолын үндэслэлийг үнэн бодитойг туршилтын замаар тогтоох ажлыг 2002 оноос эхэлсэн бөгөөд өнөөдөр хүртэл реакторын бүх системийг судалгаа, нөхөх ажиллагаа үргэлжилсээр байна. Эдгээр гарган авсан үр дүнгүүд нь цөмийн энергийн салбар дахь судалгаа боловсруулалтын Японы корпорацад IV үеийн реакторын олон улсын форумын хүрээнд хийн дулаан зөөгчтэй маш өндөр температурын реактор (VHTR) боловсруулах хамтын ажиллагаанд нэгдэх боломжийг өгсөн юм. Одоо Японд GTHTR-300 реактор (призм голомт)-ын төслийн ажил хийгдэж байна [20,21].

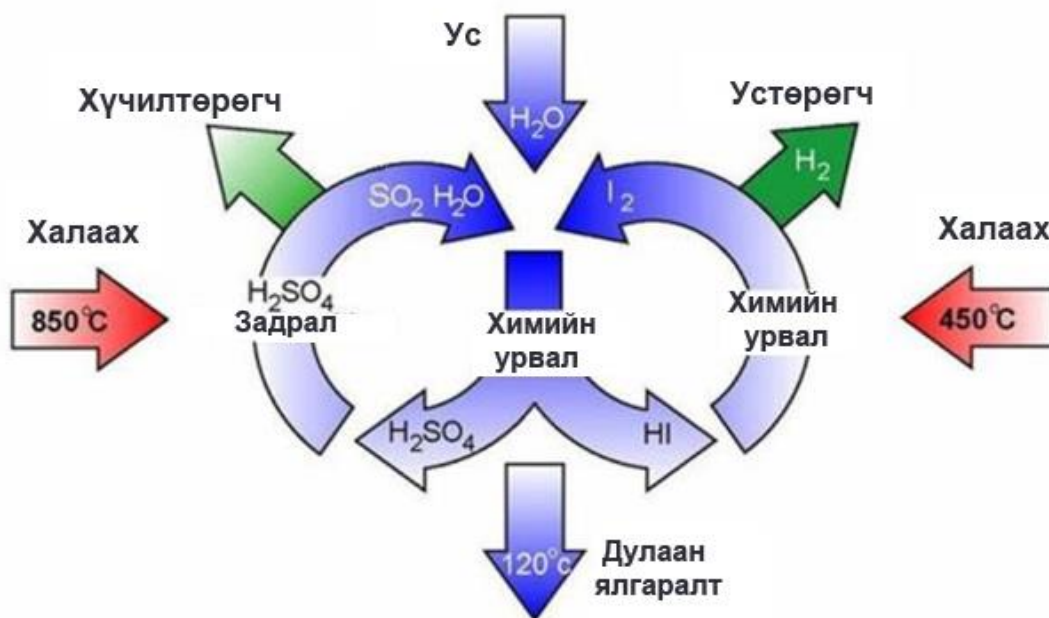
Гелийн хийн хөргүүртэй GT-MHR (GasTurbine-Modular Helium Reactor) реактораас гарах 900°C температуртай гелийн хийг завсрын дулаан солилцуураас устөрөгч үйлдвэрлэхэд ашиглах бүдүүвчийг 3.4-р зурагт харуулав.



Зураг 3.4. GT-MHR реакторын 900 °C температуртай гелийн хийг завсрын дулаан солилцуураас устөрөгч үйлдвэрлэхэд ашиглах бүдүүвч

Устөрөгч үйлдвэрлэх хүхэр-иод (S-I) циклийн үед усан дээр хүхрийн диоксид ба иод нэмж устөрөгчийн иодид ба хүхрийн хүчил үүсгэх экзотермик урвал явуулна. Зохих нөхцөлтэй үед эдгээр бодис холигдохгүй бөгөөд хялбар салгаж болно. Хүхрийн хүчил 850° градустай үед задарч хүчилтөрөгч чөлөөлөгдөн буцаад хүхрийн диоксид үүснэ. Устөрөгчийн иодид 350° орчим температуртай үед задарч устөрөгч чөлөөлөгдөн буцаад иод үүснэ. Урвалын эцсийн үр дүнд ус устөрөгч ба хүчилтөрөгч болж задарна. Процессын оролт дээр зөвхөн ус ба өндөр температурын дулааны энерги Шаардлагатай. Харин гаралт дээр устөрөгч, хүчилтөрөгч, нам температурын дулааны энерги үүснэ.

Японы HTTR реактор дээр хийгдсэн инженерийн туршилтын нэг чиглэл бол хүхэр-иод (S-I)-ийн циклээр устөрөгч үйлдвэрлэх туршилтыг амжилттай хийжээ. Энэ циклийг гүйцэтгэхэд зориулсан бүдүүвчийг 3.5-р зурагт харуулав.



Зураг 3.5. Устөрөгч үйлдвэрлэх S-I цикл.

Термохимийн усны задрал гэдэг нь химийн урвалыг дулаан ашиглан явуулж усыг устөрөгч ба хүчилтөрөгч болгон хувиргах үйл явц юм. Хүхэр-иод цикл нь термохимийн циклийн үндсэн загвар юм. Энэ нь 3 химийн урвалаас бүрдэж байгаа нь усны задралын эцсийн зорилго байсан.





Нэг эсвэл олон эндотермик өндөр температурын химийн урвалаар энерги буюу дулаан термохимийн циклд ордог бол нэг эсвэл олон эксотермик бага температурын урвалуудын үед дулаан нь буцдаг. Бүх урвалд орох бодисууд уснаас бусад нь дахин сэргээгдсэн, дахин ашиглагдсан байдаг. S-I циклд оролтын дулааны ихэнх нь хүхрийн хүчлийн задарлын урвалд (2)-д хэрэглэгдэнэ,. Эксотермик урвалд томъёологдсон хүхрийн хүчил нь H₂O ба SO₂, иодт устөрөгч нь H₂ ба I-ийг үүсгэнэ.

S-I цикл нь 1970-аад оны дундуур General Atomic-д зохион бүтээгдсэн байна. Энэ циклд иод ба хүхрийн диоксидаг усан дээр нэмээд, эксотермик урвал явуулаад, иодот устөрөгч ба хүхрийн хүчил үүсдэг. Эдгээр нэгдлүүд нь холилдоггүй ба амархан салж чаддагаараа дээрх нөхцөлд тохирдог. Хүхрийн хүчил ойролцоогоор 850⁰C-д суллагдсан хүчилтөрөгч ба дахин ашиглалтад орох хүхрийн диоксид болон задардаг. Иодот устөрөгч нь ойролцоогоор 350⁰C-д суллагдсан устөрөгч болон дахин ашиглах иод болон задардаг. Цэвэр ашигтай урвал нь бол усны устөрөгч болон хүчилтөрөгч болох задрал юм. Бүх үйл явцад ус болон өндөр температурын дулаан өгөөд устөрөгч, хүчилтөрөгч болон бага температурын дулааныг ялгаруулдаг. Бүх урвал нь дахин боловсруулагддаг. Энэ үйл явцын үндсэн химийн урвал бүрийг GA-н лабораторид харуулсан байдаг. Уг ажил нь энэ циклийн дулааны хэрэгцээг цөм болон нарны нийлмэл энергийн эх үүсвэрээр хангах явдал байсан. Хүхрийн хүчил болон иодот устөрөгчийн задрал нь химийн орчинд хийгддэг.

Өндөр температурд хүхрийн хүчлийн задрах урвалыг техникийн Georgia институтийн лабораторид үзүүлсэн байдаг. Японд саяхан S-I циклийг шалгах үйл ажиллагааг амжилттай хийж дуусгасан байна.

Дэлхийн хэмжээнд S-I устөрөгчийн үйлдвэрлэлийн үйл явцыг хийн хөргөлтийн сонголттой холбодог. Реакторын шинэ үе нь бол эртний Америкийн эрчим хүчийг тасалдуулах реакторын бэрхшээлүүдээс зайлсхийн боломжтой болсон. GT-MHR нь бол өндөр температурын керамик түлш ба голомтын идэвхгүй хамгаалалтай. Өөрөөр хэлбэл ямар нэгэн осол болох боломжгүй.

Өндөр температурын түлш нь өндөр ашигтай эрчим хүчний хувиргагч болдог. Хийн турбины цикл нь 48%-ийг ашигтай байхаар төлөвлөгддөг. Өндөр гелийн гаралтын температурыг S-I циклийг ашиглан устөрөгч үйлдвэрлэхэд зориулсан MHR-ийн хэрэглээнд ашиглаж болно. Устөрөгч үйлдвэрлэх төхөөрөмжөд анхдагч гелийн циркулятортой хийн турбины систем, завсрын дулаан солилцуур, завсрын гелийн гогцоо циркулятор ба завсрын гогцоог холбож байрлуулснаар GT-MHR- ийг H-MHR-д хувиргаж чадна. Устөрөгч нь 50

сая тн хүртэлх хэмжээгээр сүүлийн үед маш их хэрэгцээтэй болж байна. Устөрөгчийг эхний ээлжид аммиакт бордоо болгон, хүнд даацын машинд газрын тосыг цэвэр түлш болгон цэвэршүүлэхэд хэрэглэдэг. Олон улсын хамтын хэлэлцээрт түлшийг устөрөгчөөр орлуулан машинд ашиглах нь зүйтэй гэж үзсэн. Ирээдүйд бид чулуужсан түлш болон байгалийн хийн оронд H_2 -ийг түлш шиг машинд ашиглах бодолтой байна.

Устөрөгчийг үйлдвэрлэх маш олон арга зам байдаг ч бидний хүрээлэн байгаа орчныг хамгаалах үүднээс эдгээр аргуудыг бүгдийг хэрэгжүүлж болохгүй болох юм.

Устөрөгч нь нефтийн импортийн хамаарлыг бууруулах “Устөрөгчийн эдийн засаг”-ийн үр ашиг ба мөн бохирдол ба хүлэмжийн хийг бууруулдаг болохыг тооцоолоод байгаа. Устөрөгч нь гадаад орчинд хор нөлөөгүй чулуужсан түлшийг орлох боломжтой түлш юм. Гэвч өнөөгийн нөхцөлд устөрөгчийн үйлдвэрлэлийн эхлэл нь чулуужсан түлшинд үндэслэгддэг.

АНУ-д устөрөгчийн үйлдвэр жилд 48ГВт дулааны энергитэй 11 сая тонн устөрөгчийг үйлдвэрлэдэг. Иймээс энэ ажилд АНУ байгалийн хийн хэрэглээний 5%-ийг зарцуулж, 74 сая тонн CO_2 хаягдана. Устөрөгчийн эдийн засгийн өөрчлөлт түүний хэрэглээ болон дэвшилтэт үйлдвэрлэлийн ашгаар тодорхойлогдоно. Устөрөгчийн шинэ эх үүсвэр Шаардлагатай байгаа нь илэрхий байна. Цөмийн энерги ашиглан уснаас устөрөгч үйлдвэрлэх нь нэг эх үүсвэр болж чадах ба чулуужсан түлш болон хүлэмжийн хийнээс зайлсхийх болно. Устөрөгчийг нилээд хэдэн аргаар цөмийн энергиэс үйлдвэрлэж чадсан. Цөмийн эрчим хүчээр цахилгаан гаргаж электролизоор устөрөгч ба хүчилтөрөгчийг уснаас ялгадаг. Цэвэр үр ашиг гэдэг нь гаргасан цахилгааны хувьд реакторын ашигтай бүтээгдэхүүн, электролизийн үр ашиг бөгөөд энд ашгийн хувиарилалт ба ашиглалтад зориулж өндөр даралт хэрэглэдэг. Цэвэр үр ашиг нь ойролцоогоор 75%-80%. 32%-ийн цахилгааны ашигтай LWR-д цэвэр ашиг нь ойролцоогоор 24%-26% байдаг. Хэрвээ 48%-ийн цахилгааны ашигтай АНTR хэрэглэсэн бол цэвэр ашиг нь ойролцоогоор 36%-38% байна. Термохимийн усны задралын үйл явц нь 50%-ийн үр ашигтай дулааны зарцуулалтыг санал болгодог. АНУ-ийн Эрчим хүчний яам (DOE)-ийн саяхан гүйцэтгэж дуусгасан төслийн зорилго нь “Устөрөгчийн үйлдвэрлэлд эдийн засгийн хувьд тохиромжтой ухагдахуунуудыг тодорхойлох, энергийн эх үүсвэрт АНTR-ийг хэрэглэх” гэсэн утга санааг агуулж байсан. Термохимийн усны задрал гэдэг нь усыг устөрөгч ба хүчилтөрөгч рүү задалж дуусгах химийн процесс юм. Энэ судалгааны нэгдүгээр үеийн зорилго нь бодит үнэ, ашиг, томоохон хэмжээний устөрөгчийн үйлдвэрлэлийг бий болгож цаашдаа түүнийг дэлгэрүүлэх боломж бололцоог судалж термохимийн үйл явцыг тооцоолжээ.

Цөмийн реакторын сонголт: Sandia-ийн үндэсний лабораторид S-I процессод Шаардлагатай өндөр температурын дулаан, хамгаалалтын хэрэгсэл, устөрөгчийн үйлдвэрлэлийн эдийн засаг зэрэгт тохирох цөмийн реакторын төрлүүдийг тооцоолсон.

Устөрөгчийг үйлдвэрлэх систем ба реакторын хөргөлтийн гогцооны хооронд завсрын гелийн гогцоог хэрэглэдэг. Энд реакторын хөргөлтийн гогцооны ямар нэгэн алдагдал устөрөгч үйлдвэрлэх системийг бохирдуулдаггүй мөн устөрөгчийн төхөөрөмжийн бүрэлдэхүүнүүдэд цацрагийн шарлага өгдөггүй болох батлагддаг.

Түүнчлэн химийн зэврэлтийн процесс реакторын голомтод орж чадахгүй нь баталагддаг. Дулаан солилцуурын солилцогч материалыг сонгосон реакторын хязгаарын нөхцөлд тааруулан байрлуулдаг. Үндсэн шаардлага нь бол S-I хэрэгтэй температур бөгөөд устөрөгчийг үйлдвэрлэх системийн хэрэглээний мөн чанар ба голомтын гаралтын хоорондын температурын уналтад зориулсан тооцоог хийх ёстой. Бид гаралтын температурыг 950°C гэж бодсон. Үйл ажиллагаанд өгөх температур нь 900°C ба ашиг нь 52% байна.

Реакторыг хөргөлтийн хэлбэрээр нь авч үзэхэд даралтад усан хөргүүртэй, буцалсан усан хөргүүртэй, шүлтлэг шингэн металл хөргүүртэй, хүнд шингэн металл хөргүүртэй, хийн хөргүүртэй, органик хөргүүртэй, уусмал давс хөргүүртэй, шингэн голомттой, хийн голомттой гэсэн төрлүүд байна. Реакторын 5 хэрэгцээ болон 5 чухал шинж тэмдэгтийг харьцууллаа.

Үндсэн хэрэгцээ

- Үндсэн хэлхээний материал болон түлштэй хөргүүрийн химийн зохицол
- Цацрагийн орчин дахь үйл ажиллагааны температурын хөргөлтийн тэнцвэрт байдал
- Гол гогцоонд зориулсан даралтын хэрэгцээ
- Цөмийн хэрэгцээ: шимэгч нейтроныг барих, нейтрон идэвхжил, хуваагдлын бүтээгдэхүүний нөлөө,
- Хэрэгжих үндэс, ерөнхий хөгжлийн шаардлагаа, хөгжлийн эрсдэл

Чухал шалгуурууд

- Хамгаалалт
- Ажиллагааны үр дүн
- Хөрөнгө
- Завсрын гогцооны нийлэмж

- Бусад сайн тал болон асуудлууд

Эдийн засгийн тооцоо: S-I термохимийн циклийг хэрэглэн цөмийн энерги ашиглан устөрөгчийг үйлдвэрлэх эдийн засгийн тооцоог гаргасан. GT-MHR-ийн шөнийн турш асаах үнийг 975\$/кВт(цах) эсвэл 468\$/кВт(дул) гэж урьдчилан тооцсон. Турба-цахилгаан хөдөлгүүр болон завсрын дулаан солилцуур, циркулятор ба хоолой агуулсан үүнийг бууруулсан. GT-MHR-ийн гаралтын температур 850⁰C-ийн оронд хамгийн ихдээ 950⁰C – ийг өгвөл 450\$/кВт(ду) гэж тооцоолсон байна. Устөрөгчийн тоног төхөөрөмж, химийн нөөц бололцооны тооцоог тодорхойлсон. Нийт хөрөнгө ба устөрөгчийг үйлдвэрлэх нэгдсэн төхөөрөмжийн үнийг тооцоолсон. 24000 МВт-д зориулсан хөрөнгө нь өдөрт ойролцоогоор 800 т устөрөгч үйлдвэрлэх ба энэ томоохон газрын тос боловсруулах үйлдвэр эсвэл 1,5 сая машины түлш боловсруулахад хангалттай хүрэлцэнэ. Нийт зардал нь шууд ба шууд бус зардлыг агуулах ба байгууламжийн үнэ ч мөн нэмэгддэг. Реакторын үйл ажиллагааны зардалд бүх түлшний циклийн үнэ (түлш, хувиргагч, баяжуулалт, үйлдвэрлэл, хаягдал зайлуулах, буулгах) багтах ба ердийн үйл ажиллагаа ба засварын зардал нэмэгдэнэ.

Өнөөдөр дэлхий даяар эцсийн эцэст газрын тос, байгалийн хийг халах альтернатив түлшийг хайх ажил хийгдэж байна. Эрчим хүчний салбарт энэ нь уран, тори, бага хаягдал гарах шинэ аргаар шатаах нүүрс, био түлш байж болох юм. Гэвч эдгээр түлшийг ашигласан тээврийн хэрэгслийн хөдөлгүүр харьцангуй том хэмжээтэй болдог нь тэдгээр түлшийг тээвэрт ашиглахад хүндрэл учруулна. Иймээс автобензин, дизелийн түлшийг орлох хамгийн ирээдүйтэй түлш бол машины яндангаар зөвхөн усны уур гарах устөрөгчийн түлш байж болох юм. Устөрөгчийн илчлэг бензинийхээс бараг 4 дахин их байдаг. Одоо устөрөгчийг ихэвчлэн химийн, нефть-химийн аж үйлдвэрийн хэрэгцээнд зориулж усны электролизийн аргаар үйлдвэрлэж байна. Энэ аргаар үйлдвэрлэсэн устөрөгч маш үнэтэй байдаг. Харин өндөр температурын цөмийн реакторын дулааны энергийг ашиглан аж үйлдвэрийн цар хэмжээтэй устөрөгч үйлдвэрлэж болно. Ийм реакторын орчин үеийн төсөл нь устөрөгчийн түлшний өөрийн өртгийг бензиний үнэ, магадгүй түүнээс доод түвшинд хүргэхээр зорьж байна

Өндөр температурын гелийн хөргүүртэй реактор нь экологийн цэвэр олон зориулалттай цөмийн энергийн үүсгүүрийн шинэ төрөл юм. Ийм реакторын хосгүй шинж чанар болох 1000⁰C-ээс их температурт дулаан үйлдвэрлэх чадвар, аюулгүй байдлын өндөр түвшин нь тэдгээрийг хий турбины циклд өндөр АҮК-тэй цахилгаан үйлдвэрлэх, устөрөгч, ус цэнгэгжүүлэх, химийн, газрын тос боловсруулах, төмөрлөгийн болон бусад үйлдвэрийн салбарын процессыг өндөр температурын дулаан, цахилгаанаар хангахад зориулан ашиглах өргөн боломжтой юм.

Өндөр температурын хийн хөргүүртэй реактор нь цөмийн эрчим хүчийг ашиглах хүрээг өргөжүүлж байна. Үүнд:

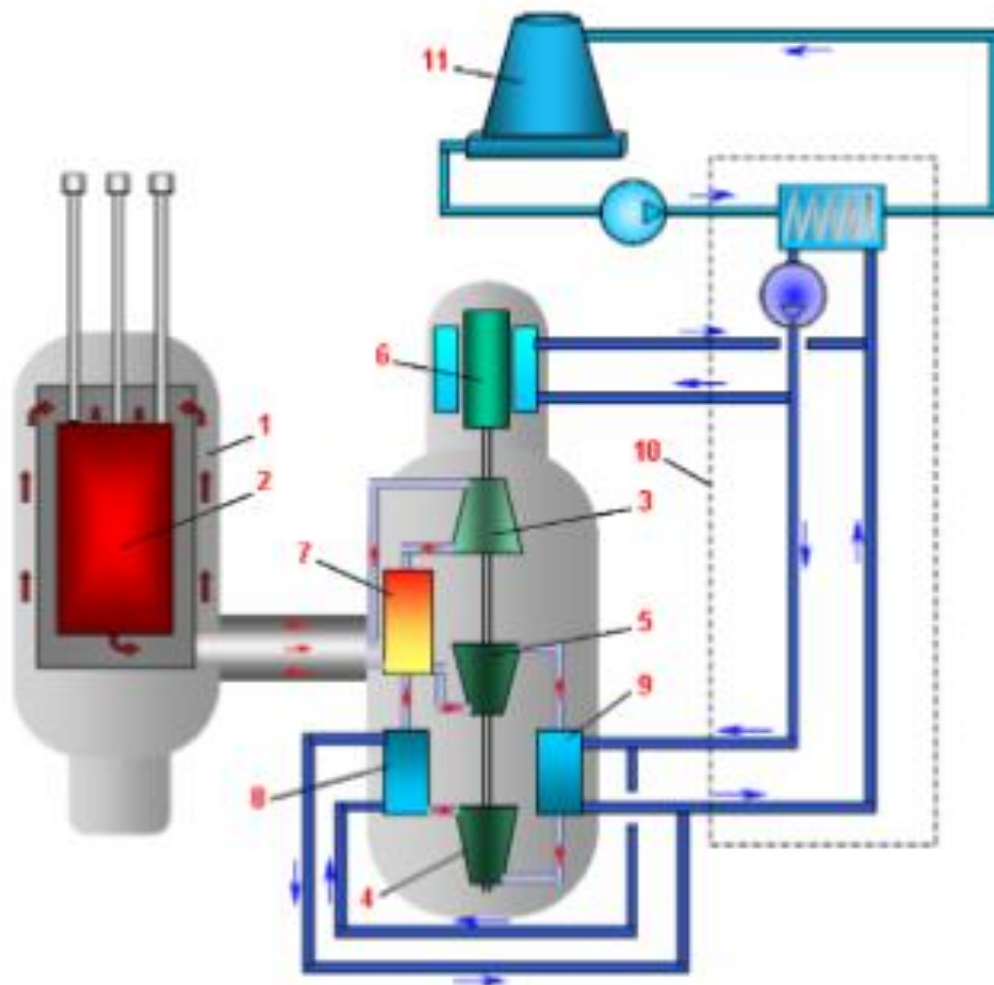
- Цахилгаан эрчим хүч ба ахуйн хэрэглээний дулаан, газрын тос боловсруулах, нефтехимийн үйлдвэрлэл, нүүрснээс синтетик шингэн түлшний үйлдвэрлэл, устөрөгчийн үйлдвэрлэл;
- Баяжуулсан уран, эрчим хүчний буюу зэвсгийн плутони ашиглах моx түлш, уран, торийн түлш бүхий голомтын хийц өөрчлөхгүй түлшний циклийн уян хатан байдал;
- Реакторын модуль үзэл баримтлал нь эрчим хүчний эх үүсвэрийг хэрэглэгчид ойр байрлуулах боломж олгоно;
- Реакторын төхөөрөмж, цөмийн станцын аюулгүйн байдлын системийн тоо хамгийн бага байдаг нь нь хөрөнгө оруулалт, ашиглалтын зардлыг бууруулах урьдчилсан нөхцөл бий болгоно;
- Түлшний шаралтын гүн нь реактороос гарах түлшийг дахин боловсруулалт хийлгүй булшлах боломжтой;
- Реакторын дулааны энергийг ашиглах коэффициент өндөртэй учраас хүрээлэн буй орчин; дулааны нөлөө багатай.

Эдгээр онцлогууд нь реакторын зохиомжийн технологийн дараах шийдлүүдтэй холбоотой юм. Үүнд:

- Керамик микро бөөм дээр суурилагдсан халуунд тэсвэртэй призм болон үрлэн түлшний тусгай хийц;
- Бүтээц материалаар балчулуу, нүүрстөрөгч, нүүрстөрөгчийн зохиомж ашигласан;
- дулаан зөөгчөөр идэвхгүй инертийн хий гели ашигласан;
- Ямар нэг ослын үед тогтвортой реакторын тусгай бүтэцтэй гэх мэт.

3.3 Монгол улсад устөрөгч үйлдвэрлэхэд ашиглах GT-MHR реактор

Туршилт-үйлдвэрийн цөмийн эрчим хүчний төхөөрөмж GT-MHR нь керамик микро түлшний үндэс дээр хийгдсэн призм бал чулуун түлшний эвлүүлгээс реаторын голомт бүрдсэн өндөр температурын гелийн модуль реакторын үзэл баримтлалыг хэрэгжүүлэх төслүүдийн нэг юм. Энэ нь шууд битүү хийн турбины цикл ба турбомашинь роторын цахилгаан соронзон зүүлтийн системийг ашигласан энерги хувиргалтын системийн инновацийн шийдэл дээр үндэслэсэн байна. Төхөөрөмж шууд битүү хийн турбины циклд цахилгаан эрчим хүчийг өндөр бүтээмжтэй үйлдвэрлэхэд зориулагдсан юм (3.6- р зураг)



Зураг 3.6. GT-MHR реактортой ЦЦС-ын дулааны бүдүүвч.

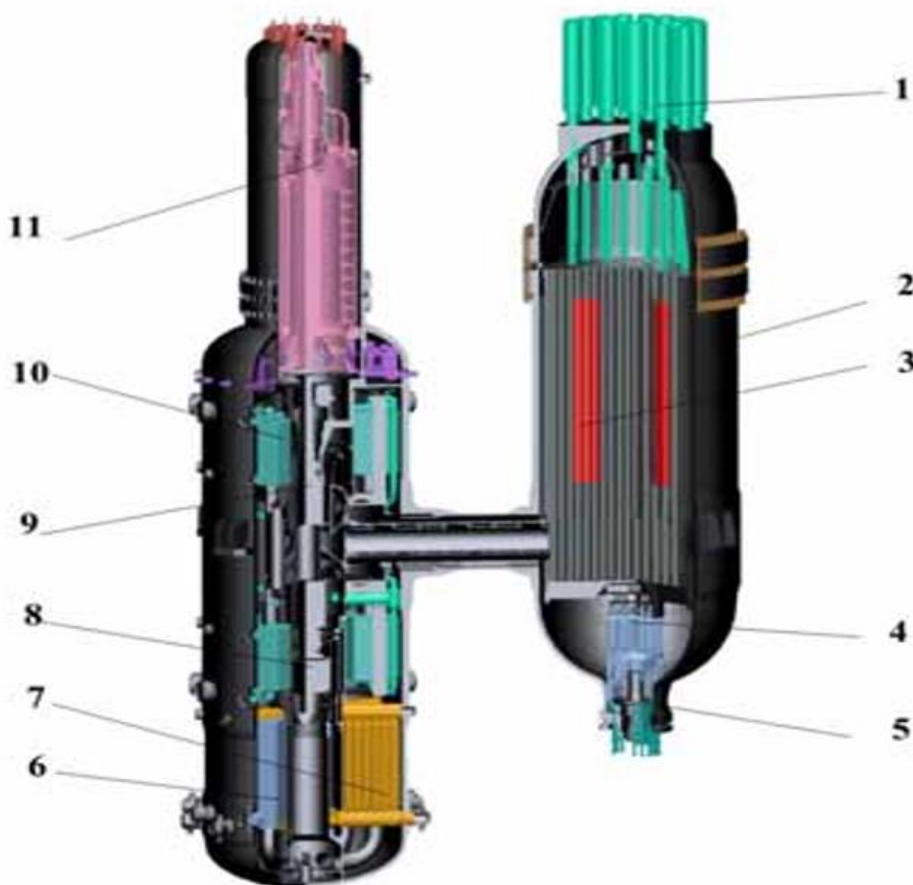
Реактор (1)-ыг ажиллах үед реакторын голомт (2)-д ялгарах дулааны энерги хэлхээгээр эргэлдэх гелийгээр авагдаж турбин (3)-д очно. Турбины үйлдвэрлэж байгаа чадал түүнтэй нэг гол дээр байрлах компрессор (4,5) ба генератор (6)-ыг ажилд оруулна. Өндөр ашигтай ажиллах рекуператор (7) турбинээс гарч байгаа гелийн дулааны энергийн ихэнх хэсгийг циклд буцааж оруулахад зориулагдан ашиглагдаж, түүнийг реакторт орж байгаа гели рүү дамжуулна. Үлдсэн дулаан нам даралтын компрессорын урьд байрлах урьдчилсан хөргүүр (8)-өөр авагдана. Хийн циклийг ашигтай байдлыг нэмэгдүүлэхийн тулд өндөр даралтын компрессор (5)-т орохын өмнө завсрын хөргүүр(9)-т гелийг хөргөнө. Рекуператор реактор ба турбиныг өндөр температуртай үед ажиллах боломж олгоно. Компрессор нам температурт ажиллана. Энерги хувиргах блокийн хөргүүрээс дулаан авалт завсрын усан хэлхээ (10)-гээр хөргөгч градирн (11) руу дулаан авалт болно.

ОХУ-д хийн турбинтэй өндөр температурын гелийн модуль реактор GT-MHR нь устөрөгч үйлдвэрлэхээс гадна цахилгаан эрчим хүч гарган авна. Энэ реакторыг зохион

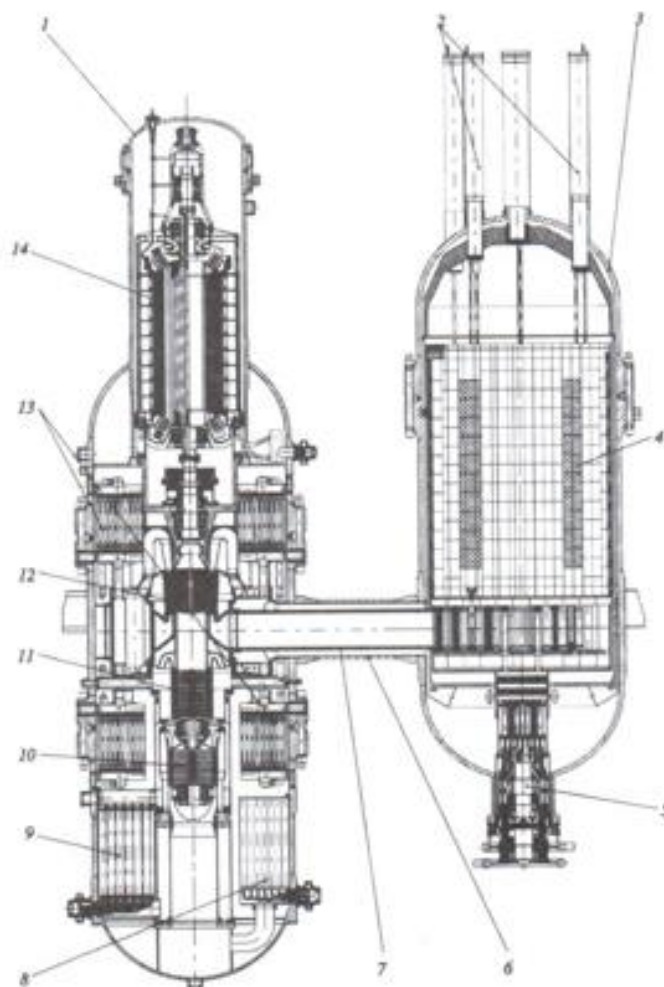
бүтээхэд АНУ, Англи, Франц, Герман зэрэг гадаад орнуудын өндөр температурын реакторын боловсруулалт, ашиглалтын туршилагыг ашигласан.

GT=MHR бий болгох төслийг “General Atomics” компанийн АНУ-ын эрчим хүчний яам ба “Росатом” улсын корпорацийн санхүүжилтийн төслөөр ОКБМ (Опытное конструкторское бюро машиностроения им.И.И.Африкантова)

Модуль эрчим хүчний төхөөрөмж GT-MHR нь 3.7 ба 3.8-р зурагт харуулсан богино дамжуулах хоолойгоор холбогдсон хоёр их биесээс бүрдэнэ. Нэг их биед реакторын төхөөрөмж, нөгөөд нь турбогенератор ба компрессорууд байрлана. Реакторын голомт призм түлшний эвлүүлгээр дүүргэсэн 102 бал чулуун суваг агуулна. Түлшний блокт 13 мм орчим диаметр, 51 мм өндөртэй түлшний компактыг шахаж байрлуулна. Түлшний компакт нь бал чулуун матрицад уран ба плутонийн 0,65-0,85 мм диаметртэй микро бөөм юм.



Зураг 3.7. Өндөр температурын хийн хөргүүртэй, призм түлштэй GT-MHR реактор
1-удирдлага, хамгаалалтын систем, 2-реакторын их бие, 3-реакторын голомт, 4-зогсоосон реакторын хөргүүрийн дулаан солилцуур, 5- зогсоосон реакторын хөргүүрийн системийн хий үлээгч, 6-завсрын хөргүүр, 7-урьдчилсан хөргүүр, 8- өндөр даралтын компрессор, 9-турбин, 10-рекуператор, 11-генератор



Зураг 3.8. GT-MHR модуль реакторын бүрэлдүүлэл.

1-идэвхгүй хөргөлтийн системийн их бие; 2- удирдлага, хамгаалалтын системийн хөтлүүр; 3-реакторын их бие; 4-реакторын голомт; 5-зогсоосон реакторын хөргүүрийн систем; 6- холбох хоолой; 7-халуун хийн урсгал; 8- урьдчилсан хөргүүр, 9- завсрын хөргүүр, 10- нам даралтын компрессор, 11 өндөр даралтын компрессор; 12-турбин, 13-рекуператор, 14- генератор

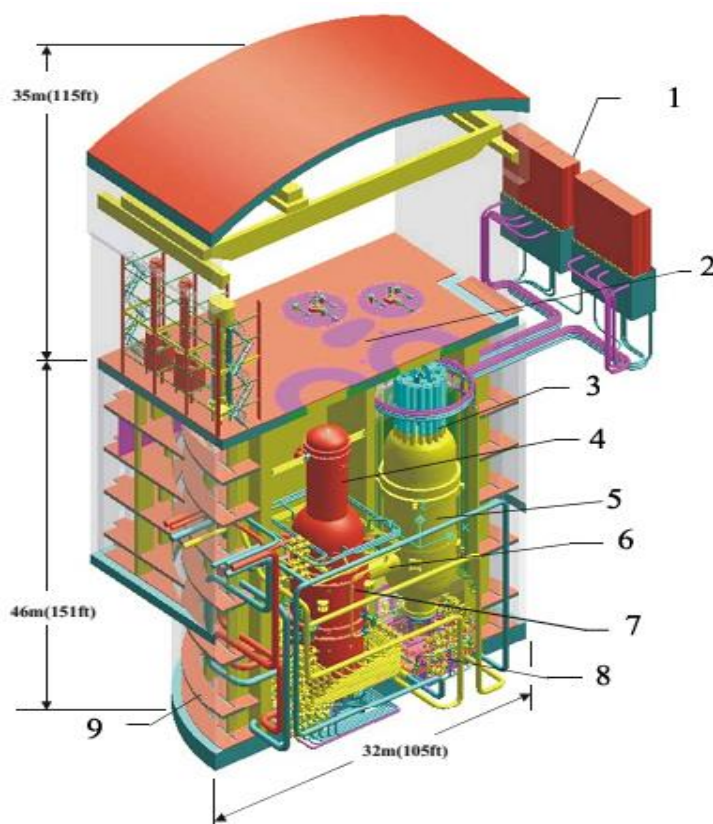
GT-MHR реактортой цөмийн төхөөрөмжийн техникийн үзүүлэлтүүдийг 3.8-р зурагт харуулав.

Хүснэгт 3.4. GT-MHR реактортой цөмийн төхөөрөмжийн техникийн үзүүлэлтүүд

Үзүүлэлтүүд	Утга
Төхөөрөмжийн дулааны чадал, МВт	600
Генераторын ашигтай цахилгааны чадал, МВт	~271
Өөрийн хэрэгцээний чадал, МВт	7.5
Энерги хувиргах термодинамикийн циклийн АҮК, %	48.7
Ашиглах хугацаа, жил	60
Реакторын голомтын хэлбэр	Призм түлшний эвлүүлэгтэй цагариг

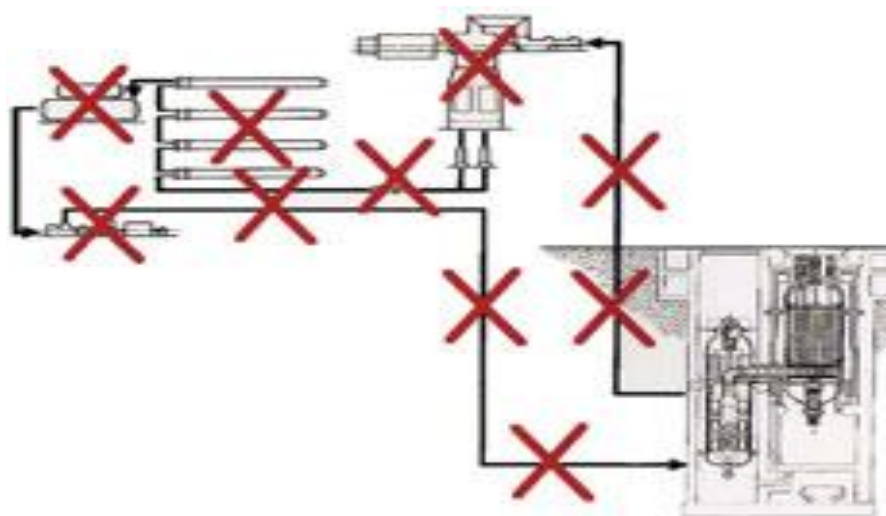
Түлшний төрөл	Хамгаалалтын бүрхүүлийн хэд хэдэн давхаргатай түлшний чөмөг бүхий TRISO төрөл
Түлш цэнэглэх арга	Зогсоож, хөргөсөн реактор дээр хийгдэнэ.
Түлшний хэвийн температур, °C, түүнээс их биш	1200
Ослийн үеийн түлшний хамгийн их температур, °C, түүнээс их биш	1600
Голомтод энерги ялгаралтын дундаж, МВт/м ³	6.5
Голомтод орох гелийн дундаж температур, °C	~492
Голомтоос гарах гелийн дундаж температур, °C	850.0
Голомтоор өнгөрөх гелийн зарцуулалт, кг/с	~320
Реакторт орох гелийн даралт, МПа	~7.1
Турбомашинны роторын рэгэлтийн давтамж, эрг/мин	4400
Турбины чадал, МВт	~558
Компрессор дахь шахалтын нийлбэр зэрэг	~2.86
Рекуператорын чадал, МВт	~645
Рекуператорын ашигтай ажиллагаа	0.95

“GT-MHR” реактор бүхий цөмийн станцын ерөнхий бүдүүвч 3.9-р зурагт, ийм реактор бүхий станцын хялбар болсон бүдүүвчийг 3.10-р зурагт харуулав. Реакторын төхөөрөмжийг газар доор цул төмөр болон бетон саванд байрлуулсан. Реакторын байгууламж нь ихэнхдээ цөмийн эрчим хүчний өрөөнүүд ба эрүүл ахуйн, аюулгүй ажиллагааны нэмэлт хэсгийн өрөөнүүд байна.



Зураг 3.9. GT-MHR реакторын төхөөрөмжийн бүтэц. 1 – реакторын хонгилын хөргүүрийн систем, 2 – түлш цэнэглэх давхарга, 3 – удирдлагын савааг удирдах хоолойн суурь, 4 –

генератор, 5 - реакторын даралтат их бие, 6 –холбогч дамжуулах хоолой, 7 –энерги хувиргах системийн их бие, 8 –хөргүүрийн системийг унтраах хоолой, 9 –ердийн давхарлаг



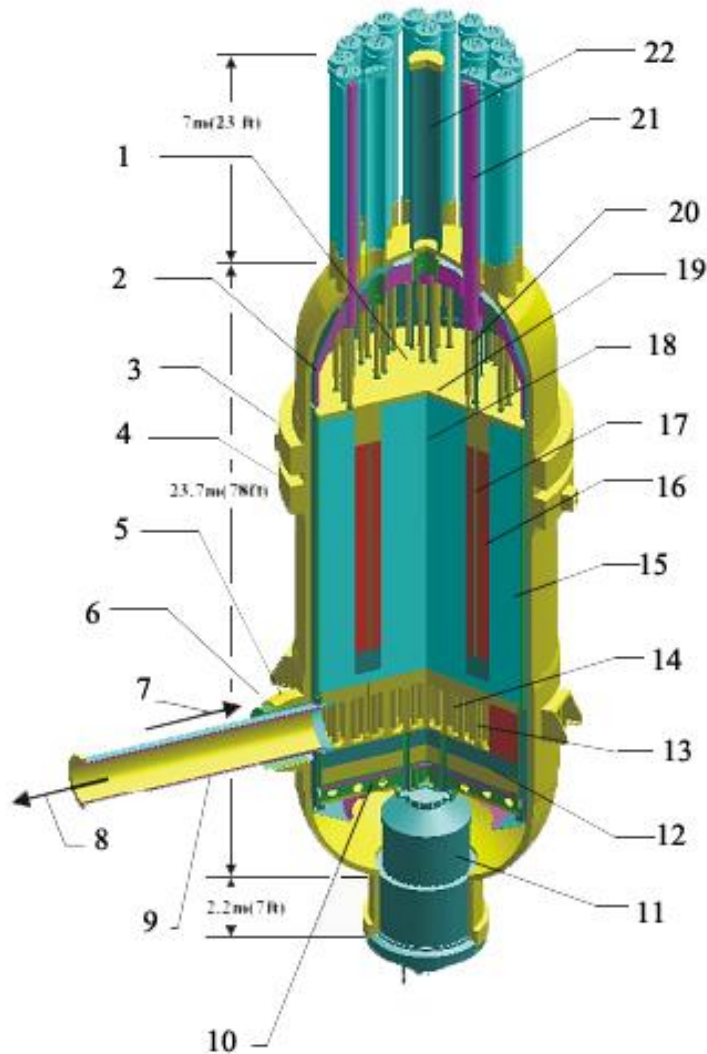
Зураг 3.10. Хийн хөргүүрт GT-MHR реакторын интеграл хийц

GT-MHR-ын үндсэн үзүүлэлт (метаны уурын хувиргалтын хувилбар)-ийг 3.5-р хүснэгтэд үзүүлэв.

Хүснэгт 3.5. GT-MHR-ын үндсэн үзүүлэлт (метаны уурын хувиргалтын хувилбар)

Станцын чадал:	
Дулааны, МВт	4x600
- устөрөгч үйлдвэрлэх	4x160
- цахилгаан үйлдвэрлэх	4x440
Устөрөгч үйлдэрлэх бүтээмж, т/цаг	4x12,5
Цахилгааны чадал, МВт	4x207
Өөрийн өртөг:	
-устөрөгч, цент/м ³ -ээс ихгүй	5
-цахилгаан эрчим хүч, цент/(кВт·цаг)	1,3
Ашигт үйлийн коэффициент (цахилгаан үйлдвэрлэх), %	47
Хөргүүр	Гели
Анхдагч хөргүүрийн эргэлт	албадмал
Хийцийн төрөл	Интеграл
Чадлын хүрээ	- 100%
Үйлдвэрлэх энергийн хэмжээ:	
- генераторд үүсэх, кВ	20
-гүйдлийн давтамж, Гц	50

Анхдагч хөргүүрийн параметрууд	
даралт, МПа	7.24
реакторт орох температур, С	490
реактороос гарах температур, С	850
Түлш	TRISO,
Ашиглах хугацаа, жил	60
Төхөөрмжийн сейсмик тэсвэр	8 балл (MSK 64)



Зураг 3.11. GT-MHR реакторын хийц. 1 – голомтын хөргүүр бүхий дээд талын даралтат камер, 2 – дээд даралтат камерын бүрхүүл, 3 – реакторын их биеийн 8,2м (27ft) диаметртэй бүслүүр, 4 – реакторын их бие, 5 – хөндлөн их бие, 6 – холбогч хоолойн бүрэлдэхүүн элемент, 7 – голомт руу орох урсгал, 8 – голомтоос гарах халуун гелийн урсгал, 9 – холбогч хоолойн дулаан тусгаарлагч материал, 10 – металл голомтын дэмжих байгууламж, 11 – хөргүүрийн системийг унтраах хэсэг, 12 – металл голомтын туслагч хавтангийн тусгаарлагч материал бүхий давхарга, 13 – бал чулаан голомтын тулах баганууд, 14 – голомтоос гарах халуун хийн даралтат камер, 15 – бал чулуун ойлгогчийн гадна тал, 16 – цагариг (бөгж) хэлбэртэй голомт,

17 – удирдлагын саваа, 18 – төвийн ойлгогч бал чулуу, 19 – голомтын дээд хязгаарлагч, 20 – удирдлагын савааны хоолой, 21 – удирдлага ба хамгаалалтын системийн хөтлүүр, 22 – түлш цэнэглэх хоолой.

GT-MHR реактор нь призм хэлбэрийн түлшний угсралттай өндөр температур гаргах голомт ба гелийн хийн турбинтай энерги хувиргах систем бүхий 2 үндсэн хэсгээс тогтно.

GT-MHR төхөөрөмжийн хийн цикл турбинтай цөмийн эрчим хүчний төхөөрөмж буюу дулааныг цахилгаан эрчим хүч болгон хувиргахад 48%-ийн ашигт үйлийн коэффициенттой төхөөрөмжийг сонгосон байдаг.

Модуль гели реактор нь олон давхар бүрээстэй жижиг үрлэн түлш, бал чулуун удаашруулагч бүхий голомтыг ашиглана. Реакторын төхөөрөмжийн их биеийн угсралт нь голдуу эгц босоо байрласан байдаг ба дараах хэсгүүдээс бүрдэнэ.

- Удирдлагын саваа
- Реакторын их бие
- Ойлгогч
- Голомт
- Хийн хоолой
- Хөргөлтийн системийн унтраах хэсэг

Реакторын голомт: Реакторын голомт нь нейтроны үүсгүүр, нейтроныг шингээх элементүүдээс бүрдэнэ. Өндөр температурт тэсвэртэй бал чулууг голомтын бүтцийн материал ба ойлгогч болгон хэрэглэдэг. GT-MHR-ийн голомт нь түлш болон балчулуугаар дүүргэсэн 6-н өнцөгтүүдээс тогтох 4м радиустай 10м өндөртэй цилиндр байхаар загварчилсан. 7.93м өндөртэй 36 ширхэг 6-н өнцөгтийг 3ш нэг төвт бөгжний дагуу тараан байрлуулах ба дээд доод хэсэгт үлдсэн 2.07 ба 1.035м–уудыг графитаар дүүргэдэг. 6-н өнцөгт хавтангийн хана нь 20.8см байна. Тэдгээр түлшний хавтан бүр нь 108 хөргөх гелийн суваг, 144 жолоодогч түлшний саваа, 72 хувирагч түлшний саваатай байна. Ингэхлээр DF ба TF-ийн эзэлхүүний харьцаа 2:1 байна.

Хөргөх сувгийн радиус 0.797см, DF ба TF савааны радиус 0.622 байна. Жолоодогч ба хувиргагч саваа бүрийг бүрхэх 0.635см радиустай нэмэлт хөргөлтийн суваг байдаг. Гели 7МПа даралттай 490°C температуртай реакторын ёроолоос хөргөлтийн сувагт гели ордог ба 850°C температуртай болоод реакторын дээд хэсгээр гардаг. 3.11-р зурагт GT-MHR-ийн загварыг үзүүлсэн ба 3.6-р хүснэгтэд голомтын ерөнхий загварын мэдээлэл ба материалын өгөгдлийг тус тус үзүүлсэн.

Хүснэгт 3.6. GT-MHR реакторын голомтын үзүүлэлт

Голомт	
Радиус, см	400
Өндөр, см	1000
Хяналтын саваа	
Эхлүүлэх (дотоод)	12
Ажиллагаатай(гадна талын удаашируулагч, ойлгогч тойрог)	36
Унтраах(төвийн тойрог/ гадна тойрог)	6/12
Дотоод радиус(асаах/ажиллуулах/унтраах) [см]	0/2,64/0
Гадна радиус [см]	4,13
Нүхний радиус[см]	5,05
Төвөөс 6-н өнцөгт хүртэлх зай[см]	9,75
insertion at bol(асаах /ажиллуулах/ унтраах) [см]	0/793/0
Зургаан талт түлшний блок	
Тоо	36*3
Өргөн [см]	35,99
Өндөр [см]	793
Хоорондын зай[см]	0,1
sp,fp1,fp2 (хяналтын саваатай/ саваагүй)	70/62
bp pins(хяналтын саваатай/ саваагүй)	6/6
Хөргөлтийн суваг (хяналтын саваатай/ саваагүй)	108/95
Түлш саваа	
Радиус [см]	0,62
Өндөр [см]	0,739
савааны хоорондох зай[см]	3,25
Нүхний радиус (түлш/ хөргөлтийн суваг)[см]	0,635/0,795
TRISO хэсэг	
Чөмөгний радиус (DF/TF/BP/CR)[мм]	150/10/0150/300
Сүвэрхэг карбон бүрхүүлийн өргөн(DF/TF/BP/CR) [мм]	150/150/25/25
Дотоод пиролитик карбон бүрхүүлийн өргөн (DF/TF/BP/CR)[мм]	35
SiC бүрхүүл (DF/TF) [мм]	35
Дотоод пиролитик карбон бүрхүүлийн өргөн (DF/TF)[мм]	40

GT-MHR реаторын призм түлшний хийцийг 3.12-р зурагт харуулав. Одоо үед өндөр температурын хийн реакторын түлшийг хийхдээ пиролит балчулуун буфер үе, пиролит балчулуун дотоод бүрхүүл, саатуулах цахиурын карбид бүрхүүл, пиролит балчулуун гадаад бүрхүүл зэргээс бүрдэх TRISO (TRistructural ISOtropic-type fuel) бүрхүүлээр түлшний бөөм (чөмөг)-ийг хучна. Дотоод сүвэрхэг пиролит балчулуун үе түлшнээс нисэн гарах хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг шингээнэ. Цахиурын карбид үе хуваагдлын газрын шүлтийн ба газрын ховор бүтээгдэхүүнийг сайн барина. Их нягттай пиролит балчулуун гадаад үе хуваагдлын хийн төлөвтэй бүтээгдэхүүнүүдийг нэвтрүүлэхгүй. TRISO бүрхүүлтэй түлшний температур 1500 °C хүрч болно.



Зураг.3.12. GT-MHR реакторт ашиглах “TRISO” түлшний элементийн бүдүүвч

GT-MHR-ийн гол нэг давуу тал нь TRISO хэсэгт байрлах актинидын оксидын түлшний хэрэглээ юм. TRISO хэсэг нь түлшний оксид, нэг төвтэй нэмэлт 3 бүрхүүлтэй чөмгөөс бүрддэг.

- Сүвэрхэг нүүрстөрөгч үе, энэ үе нь хуваагдлын тийрэлтийн сулралт болон хуваагдлын хийн тэсрэлтийн тоо хэмжээг хангаж өгдөг.
- Пиролитик карбон дотоод үе давхарга, SiC үе давхаргад зориулсан дотоод иж бүрдэл
- SiC үе давхарга, хий ба хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийг авч хоцрох ба механик эсэргүүцлүүдийг хангаж өгдөг.
- Пиролитик карбон гадаад үе давхарга,

Түлшний радиус ба түүний бүрхүүлийн зузааны харьцаа TRISO хэсэгт 1.5, ердийн даралтат устай реакторын түлшний саваанд 0.14 байна. Сүвэрхэг пиролитик үе, дараа нь сүвэрхэг графит үе, ба пиролитик -SiC үе өмнө нь SiC үе, TRISO хэсгийн шинэ хэлбэрт ялгаатай үеүүдийн хооронд нягтын өөрчлөлт нь илүү бага багаар механик дарамтыг бууруулдаг ба түүгээр зогсохгүй хийн бүтээгдэхүүний тоо хэмжээг хувиарладаг. Цацаргалтын үед гаралтын хэмжилт маш чухал жишээ нь температурын 50⁰C-ийн өөрчлөлт нь үнэнд маш олон хүчин зүйлээр нөлөөлдөг. Үйлдвэрлэх үйл явцад урт удаан хугацааны туршлага хэрэгтэй бөгөөд энэ бол TRISO-ийн үйл ажиллагааны маш чухал зүйл юм. Үнэн хэрэгтээ бол үйлдвэрлэх үйл явцын туршид бага хэмжээний механик зуршил, эвдрэл гарах тохиолдол байдаг.

Энерги хувиргах нэгжийн (power conversion unit) инженерчлэл гэдэг нь бол гелийн модуль реакторын өндөр температурыг цахилгаан эрчим хүчинд бүрэн дүүрэн, ашигтай хувиргахад чиглэсэн орчин үеийн техникийн шийдлийн ашиглалт юм. Энэ эрчим хүчний үйлдвэрт нисэх хүчний үйлдвэр, сансрын үйлдвэрээс хуримтлуулсан техникийн шийдэл, материалын амжилттай хэрэглээ зэрэг туршлагыг ашигладаг. Тухайлбал: Хийн хоолойн боловсруулалтын үйл явцын гүйцэтгэл, цахилгаан соронзон холхивч ба дулааныг эсэргүүцэх материал зэргээс харж болно.

GT-MHR –ийн эрчим хувиргах хэсгийн талаарх ерөнхий ойлголт

- GT-MHR-ийн эрчим хүч хувиргах хэсгийг битүү цикл шулуунаар хийгдсэн хийн уурын турбинтай цөмийн эрчим хүчний төхөөрөмжүүдтэй харьцуулахад өрсөлдөх чадвар сайтай. Учир нь реакторын гаралтын гелийн температур уурын турбиний цикл дэх суперкритек параметрийн температураас нилээд их байдаг. Инженерийн шийдэл гэдэг бол маш чухал зүйл учраас анхаарч үзэх нь яах аргагүй зөв зүйл юм.

Үндсэн циклд багажийг тохируулснаар шулуун циклийг хялбаршуулан дулаан шилжүүлэгчийг нь хассан завсрын эргэлтийн төхөөрөмжийг ашиглах боломжтой. Дэлхийн анхаарлын төвд байгаа энерги хувиргах төхөөрөмжийн инженерчлэлийн эрсдэлийг цөмийн биш дулаан эх сурвалжийн туршлагыг бүрэн эзэмшсэнээрээ магадгүй бууруулж болох юм.

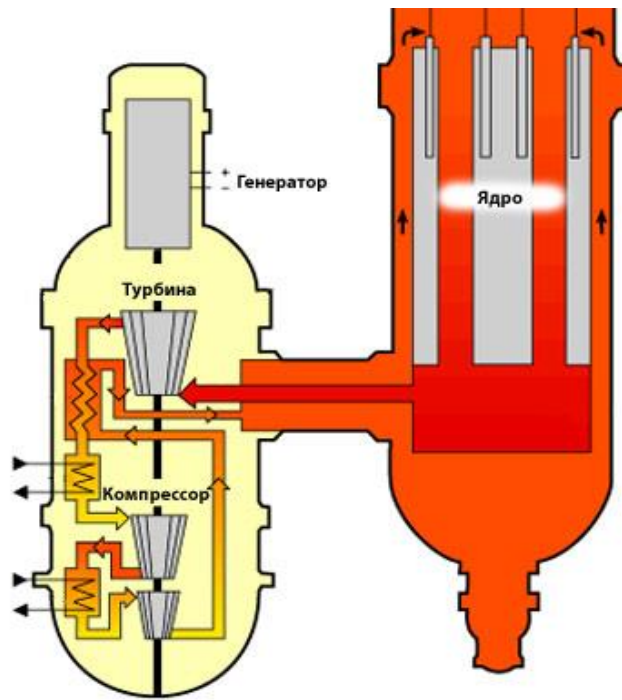
- Энерги хувиргах нэгжийн төхөөрөмж нийлмэл босоо камер дотор реакторын босоо камерын ойролцоо байрладаг ба эдгээрийг богино хөндлөн камераар холбож байрлуулдаг. Энэ байршил нь анхдагч эргэлтээс салаалсан шулуунуудыг багасгах, реакторын төхөөрөмжийн хамгаалалтыг нэмэгдүүлэх үйл ажиллагааг гүйцэтгэдэг.
- Турбо компрессор ба генераторт нийлмэл босоо тэнхлэг байдаг ба мембран холбоосоор холбогддог. Нийлсэн тэнхлэг цахилгаан эрчим хүчний хяналт ба турбомашины хамгаалалтын задгай циклийн хяналтыг хялбарчилдаг. Жишээ нь НРС-ээс турбин руу гарах гаралт нь хөдөлгүүрийн хүчин чадлыг бууруулах ба компрессорын эрчим хүчний хэрэглээг үл ялиг нэмэгдүүлнэ. Гэсэн ч нийлсэн тэнхлэгийн мембраны холбоосын зөвшөөрөгдөх хэмжээ ба жингээс үл хамааран холбосон тэнхлэгийн чанар сайжирснаар цахилгаан соронзон холхивчийн ачаалал багасдаг.
- Энерги хувиргах нэгжийн загвар ба түүний зураг төсөл нь тоног төхөөрөмжийг суурилуулах, буулгах дахин засварлах, хэвээр хадгалах, нөхөн сэргээх зэрэг боломжуудаар хангаж өгдөг.

- Загварыг гаргахын тулд үндсэн тооцооноос гадна дараах нэмэлт хэрэглээний ойлголтуудыг тооцох Шаардлагатай.
- Тухайн хэсэг дэх замаар урсах усны хаягдлын хамгийн бага хэмжээ
- Дулааны сэргээн засварлалтын хаягдал
- Хэсгийн бүх хэмжээсийг хангах ёстой

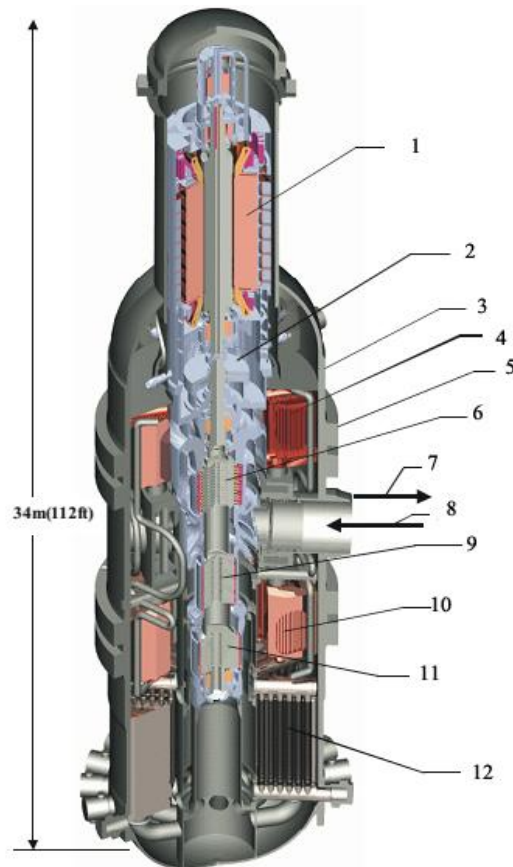
Энерги хувиргах нэгжийн үндсэн параметруудийг 3.7-р хүснэгтэд харуулав.

Хүснэгт 3.7. Энерги хувиргах нэгжийн үндсэн параметрууд

Параметр	Хэмжээ
Энерги хувиргах нэгжийн дулаан багтаамж, МВт	594,9
Цахилгаан эрчим хүчний цэвэр ашиг, %	46,7
Харьцангуй даралтын алдагдал, %	7,4
Турбомашины эргэлтийн хурд, эрг/мин	3000
Энерги хувиргах нэгжийн оролт дээрх гелийн температур, °С	849
Энерги хувиргах нэгжийн гаралт дээрх гелийн температур, °С	490
Энерги хувиргах нэгжийн оролт дээрх гелийн даралт, МПа	7,02
Энерги хувиргах нэгжийн оролт дээрх гелийн даралт, МПа	7,12
Үүсгүүрийн чадал, МВт	287,5
Гүйдлийн давтамж, Гц	50
Үүсгүүрийн хүчдэл, кВ	20
Үүсгүүрийн ашиг	0,986
Турбины чадал, МВт	558,5
Адиабат ашиг, %	93
Турбины үеийн тоо	12
Турбинаар гелийн урсах хурд, кг/с	322
Дискийн хөргөлтөнд зориулсан гелийн урсах хурд, %	1
Турбины гарах гелийн температур, °С	508
бага/их даралтат компероссорын чадал, МВт	132,3/134,5
Шахуургын хэм	1,7/1,7
Адиабат ашиг, %	88,0/87,0
Давхаргын тоо	16/24
Оролтын гелийн температур	24,4/25,6
Гаралтын гелийн температур	103,2/105,6
Рекуператорын дулааны чадал, МВт	639
Рекуператорын ашиг, %	95
Урьдчилан/завсрын хөргүүрийн чадал, МВт	173,0/130,2
Хөргөлтийн усны температур, °С	20



Зураг 3.13. Гелийн хийн хөргүүрт GT-MHR реакторын төхөөрөмжийн бүдүүвч



Зураг 3.14. Энерги хувиргах нэгжийн хөндлөн огтлол. 1 –генератор, 2 –түлхэлтэт холхивч (thrust bearing), 3 – энерги хувиргах нэгжийн их бие, 4 –рекуператор, 5 – реакторын их биеийн 8.2 м(27ft) даимертэй бүслүүр, 6 –турбин, 7 –реакторт орох хүйтэн гели, 8 –реактороос гарах халуун гели хий, 9–өндөр даралтын компрессор, 10–рекуператор, 11–нам даралтын компрессор, 12 – урьдчилсан/завсрын хөргүүр

Турбомашин: Турбомашин нь ажлын талбайн төв хэсэгт байрласан байна. Турбомашин нь үндсэн хавтанд энерги хувиргах нэгжийн эд ангид төмрөөр бэхлэгдэн суурилагдсан байна. Энэ тавцан нь түүнчлэн генераторын хөндий ба үндсэн урсгалын замын хөндийг тусгаарладаг. Турбин хөдөлгүүр дээр байрлах хийгээр дүүргэсэн генератор хөндий доторх үндсэн хэлхээний идэвхтэй хөргөлтийн алдагдлаас сэргийлнэ. Генераторын хөндий ба турбомашинд гелийг тойрог замаар оруулах үеийн нэвчих байдлын багасган, урьдчилан сэргийлж хамгаалах болон засварлах лацыг жийрэг болгож хийж өгдөг. Генераторын ротор ба турбокомпероссор нь мембранан холбоосоор холбогдог. Цахилгаан соронзон зүрхэвч нь турбомашини роторын хэрэгслээр хэрэглэгддэг. Баригч холхивч нь цахилгаан соронзон зүрхэвчийн эвдрэлтэй үед жолоодлогогүй болсон роторын ачааллыг багасгана.

Генератор: Генератор гэдэг нь нэгэн зэрэг босоо эргэлдэх ротор ба хөдөлгөгчөөс бүрдэх машин юм. Үндсэн генераторын ротор ба хөдөлгөгчийг хөдөлгөөнгүй холбосон байдаг. Генератор статор нь турбокомпероссор статор ба турбомашини дээд тулгуурт бэхлэгдэж холбогдсон холхивчийн байгууламж бүхий камерт хамрагддаг. Генератор ротор нь 2 од хэлбэрийн ба 1 тэнхлэгийн дагуух цахилгаан соронзон зүрхэвчид байрладаг. Генераторын температурын зөвшөөрөгдөх хэмжээ нь генераторын хөндий дэх гелийн эргэлтийн 2 үлээгчээр тодорхойлогдог.

Турбокомпероссор: Турбокомпероссор нь ротор дээр угсарсан өндөр болон бага даралтыг компрессорууд, турбины нийлбэрээс бүрднэ. 2 од хэлбэрийн ба нэг тэнхлэг дагуух цахилгаан соронзон зүрхэвч нь турбокомпрессорын роторыг бүрдүүлнэ. Турбина болон компероссор нь нэг тэнхлэг дагуу олон үетэйгээр байрласан байдаг. Турбокомпрессорын загвар нь камерын холбогч хамраар нэвт буух/өгсөх-ийг зөвшөөрдөг. Турбокомпрессорын загварт гулсдаг лацын хэрэглээнд турбокомпрессор статор ба энерги хувиргах нэгжийн дотоод харилцан хамааралд 4мм-ийн харилцан шилжилтийг зөвшөөрдөг.

Турбин: Турбины сэнс(ротор) нь 12 далавчит хүрд, хазайлгагч диск, дээд тэнхлэг ба хуваагчаас бүрдэж хоорондоо харилцан бие биетэйгээ холбогч боолт ба тойргоор байрласан нэгэн төрөл 12 лабирант хуваагчаар холбогддог. Далавчит хүрд бүр диск, “fir-tree root”-нд бэхлэгдсэн ирийг агуулдаг. 3 үеийн эхний дискэнд үйл ажиллагаа явуулах температур шаардагдах ба түүнийг өндөр даралтат компрессорын ард талын хоолойгоос авах гелигээр хөргөдөг. Турбины үйл ажиллагааны ир нь хүрээтэй байна.

Ирний хөл нь дискний бүрхүүлийн дулааныг нэмэх ба угсарч холбогдох сунасан иштэй хийгдсэн байна.

Компрессор: Бага болон өндөр даралтын компрессорууд адилхан техникийн шийдэлтэй. Статор нь эргэлдэгч тэнхлэгийн газарт уртрагийн дагуу холбогчоор холбогдсон хөндий тайрсан конус хэлбэртэй хийгдсэн. Энэ нь уртрагийн дагуу нэг загварын холбогчид холбоотой байрласан сэлүүрээр гадагшаа сэлгэгдэнэ. Үе бүрийн хажуу бөгж хэлбэрийн бүсний өсөлт хатуу сэлүүр статорын дотор талаас хангагдаж өгдөг. Ротор бол баррел-диск хэлбэрийн гагнаастай байгууламж юм. Жижиг тэнхлэгийн дагуу урттай баррел хэсэгүүдийг электрон цацрагаар гагнаж холбон дискүүдийг хийнэ. Ир нь дискийн дунд трапец хэлбэрийн ховилд нэвт бэхлэгдсэн байна. Доошилсон гели сам хэлбэрийн олон салаа лацаар гоожиж роторын гадна талбай ба шулуун тогтворжуулагчийн дотор талбайн хоорондох үе бүрд очно.

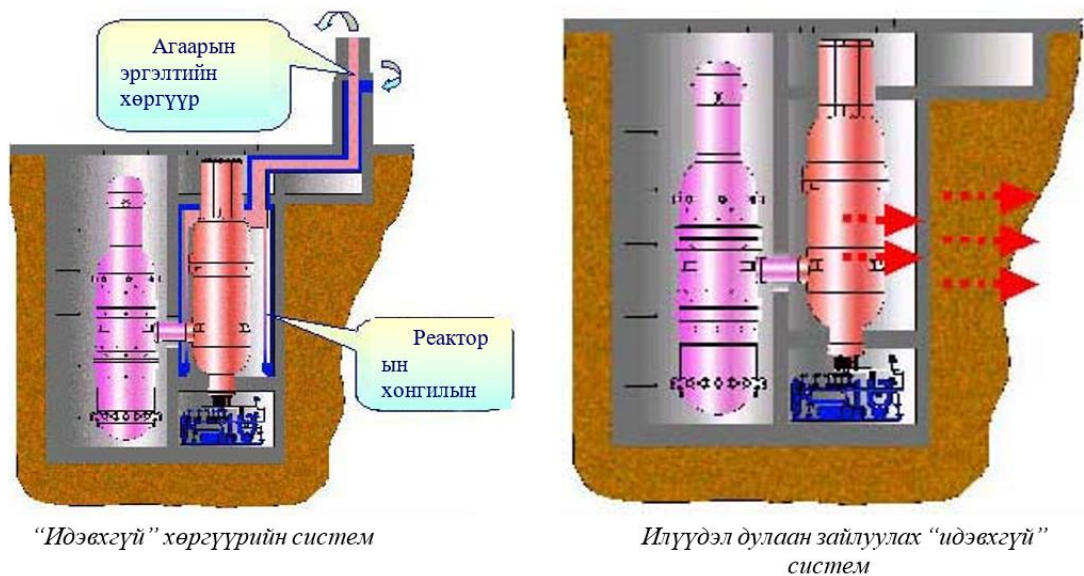
Дулаан солилцуурын төхөөрөмж: Турбокомпрессор ба энерги хувиргах нэгжийн камерын хоорондох бөгж хэлбэрийн зайд рекуператор, урьдчилан хөргөгч, ба завсрын хөргөгч байна. Энерги хувиргах нэгжийн дулаан солилцох төхөөрөмж нь модуляр загвартай. Дулаан солилцуурын нарийн дэс дарааллын шаардлагаа нь энерги хувиргах нэгжийн бага диаметр ба өндөр, хадгалагдах модулийн үндэс нь дулаан солилцуур, дулаан багтаамж, гелийн ба хөргөх усны параметруудээр тодорхойлогддог.

Урьдчилан хөргүүр ба завсрын хөргүүрийг зэрэгцүүлэн суурилуулдаг. Рекуператор, хөргүүр, хийн хөргүүрийн загвар нь үйл ажиллагааны туршид дулаан солилцуурын гадаргаар гелийг нэвтрүүлнэ. Реактор унтарсан үед л засвар хийнэ.

Аюулгүй байдал

GT-MHR реакторын аюулгүй байдал нь дараах хүчин зүйлүүдээр хангагдана. Үүнд:

1. Гелийн хөргүүртэй. Иймээс химийн урвалын нөлөө байхгүй.
2. Бал чулуун голомт нь маш өндөр температурт бүтээцээ хадгална.
3. Олон давхар бүрээстэй жижиг түлшний элемент “TRISO” нь хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг тархахгүйгээр барина.
4. Реактивностийн сөрөг температурын коэффициент
5. Байгалийн эргэлттэй хөргөлтийн систем
6. Голомтод ялгарах энергийн нягт харьцангуй бага
7. “Идэвхгүй” унтраах систем зэрэг болно.



Зураг 3.15. GT-MHR реакторын хөргүүрийн систем.

GT-MHR реакторыг ашиглан дараах чиглэлийн үйлдвэрлэл явуулах боломжтой.

Үүнд:

- Өндөр зэргийн уурын генератор
- Ус цэнгэгжүүлэх
- Зэвсгийн плутонийг устгах
- Аммони үйлдвэрлэх
- Устөрөгч синтезлэх
- Этилен үйлдвэрлэх
- Синтезийн түлш үйлдвэрлэх зэрэг болно.

GT-MHR реакторын техникийн үндсэн шийдлүүд:

- Модуль хандлага;
- Шууд циклийн хийн турбины энергийн хувиргуур;
- Керамик микро түлш (бал чулуун мариц дотор олон давхар бүрээстэй бөмбөлөг) хэрэглэсэн;
- Химийн идэвхгүй, фазын төлөв байдлын өөрчлөлтгүй, нейтроны идэвхгүй гелийн дулаан зөөгчтэй;
- Бал чулуун удаашруулагчтай;
- Реакторын голомтод металл хийц байхгүй;
- Эрчим хүчний төхөөрөмжийг газар доор байрлуулж болно;
- GT-MHR реакторын давуу талууд:

- Модулийг үйлдвэрт бэлтгэж боломжтой;
- Дулаан зөөгчийг 1000°C орчим өндөр температур хүртэл халаана;
- Цөмийн түлшний шаталтын гүн их тул цөмийн түлшний циклийн ашгийг нэмэгдүүлнэ;
- Реактивитийн өндөр хасах температурын коэффициент;
- Цөмийн түлшний хувьд уян хатан байдал (уран, плутони, тори, актиноид ашиглаж болно);
- “Зэвгийн” плутонийг ашигтай шатаана;
- Цөмийн материалыг дэлгэрүүлэхгүй байх баталгаа;
- Актиниодыг тансмутаци хийн шатаана;
- Реактор дах бал чулууны массын дулааны инерц их;
- Ослын үед тогтвортой;
- Ашигласан түлшийг урьдчилсан боловсруулалт хийлгүй хадгалах боломжтой.

GT-MHR реакторыг ашиглах үед гарах үндсэн шийдэх асуудлууд:

- Хийн турбины роторын тулгуур бүтээцийн тохиромжтойг тогтоох ёстой;
- Гелийн хэлхээний битүү байдлыг хангах стой.

Устөрөгчийг цэвэр хүчилтөрөгчид шатаах үед бүтээгдэхүүн нь өндөр чадамжтай дулаан ба ус байна Харин устөрөгч агаарт шатах үед эрдсийн түлш шатааснаас маш бага хэмжээтэй агаар бохирдуулагч үүснэ. Өнөөдөр CO₂ шууд ялгаруулдаггүй устөрөгч үйлдвэрлэх гурван үндсэн арга байна. АНУ-ын “National Academy of Engineering”-ын илтгэлд 1 кг устөрөгч үйлдвэрлэх зардлыг үнэлсэн байна. Үүнд:

- Байгалийн хийд уурын тусламжтай үйлчлэх, өөрийн өртөг 1,72 долл;
- Нүүрсний үйрмэгт уур ба хүчилтөрөгчөөр үйлчлэх (ахиад л нүүрстөрөгчтэй холбогдоно) өөрийн өртөг 1,45 долл;
- Усны электролиз, өөрийн өртөг 3,93 долл.

3.3.1 Устөрөгчийн тээвэрлэлт, хадгалалт

Устөрөгчийг их даралттай саванд хадгалах буюу тээвэрлэнэ (3.16-р зураг).

УСТӨРӨГЧИЙН ТЭЭВРИЙН БАЛЛОН



Зураг 3.16. Устөрөгчийг тээвэрлэх баллон

	Хадгалах хэлбэр	Тээвэрлэлтийн хол, км	Процессын боловсорсон байдал	Давуу тал	Дутагдалтай тал
Шатахуун зөөгч хөлөг онгоц	Шингэрүүлэх, аммиак	4000-ээс их	Нам	Их хэмжээтэй экспортод зориулсан хувилбар	Устөрөгчийн маш бага нягт, ашиглалтын зардлын үнээс болж шахалтын технологи ашиглах магадлал бага
Дамжуулах хоолой	Шахалт	1000-4000	Өндөр	Тасралтгүй хүргэхэд зориулсан хамгийн хямд хувилбар, ашиглалтын зардал бага	Дэд бүтэцэд тавигдах шаардлагаас болж хөргөнгө оруулалтын зардал ихтэй
Ачааны машины тээвэр	Шахалт, Шингэрүүлэлт, аммиак	1000-аас бага	Өндөр	Ачааны автомашины тэвэрлэлтэй харьцангуйгаар их эзлэхүүнийг хол зайд зардал багатай	Маршрутын уяан хатан байдал хязгаарлагдмал
Төмөр замын тээвэр	Шахалт, шингэрүүлэлт, аммиак	800-1000	Дунд зэрэг		

Түлшнээс ашиглалт хүртэлх иж бүрдэл дэх орчин үеийн экологийн бага нүүрстөрөгчийн тээврийн шийдэл буюу устөрөгчийн тээврийн давуу талууд:

- Орон нутгийн цахилгааны сүлжээнд хэтэрсэн ачаалал өгдөггүй
- Дотоод шаталтын хөдөлгүүртэй сонгодог автобус шатахуун түгээх станцаас түлш хийдэгтэй адил устөрөгчийн цэнэглэх станцаас устөрөгч хийнэ.
- Цахилгаан автобусны чиглэл дэх цэнэглэх станцтай холбогдохгүй
- Зорчигчдын бүхээг түлшний элементээс ялгарах дулаанаар халаана. Хөдөлгөөн хийж байх үед нүүрстөрөгч гадаад орчинд хаягдахгүй.
- Нэг цэнэглэлтээр удаан явах учир чиглэл дэх автобусны тоог цөөлнө.
- Технологийн аюулгүй ажиллагаа гадаадын олон улсад ашиглалтын туршилтаар батлагдсан.

Төрөл бүрийн тээврийн харьцуулалтыг 3.8-р хүснэгтэд харуулав.

	1924	2018	2022
	Дизель түлштэй автобус	Цахилгаан автобус	Устөрөгчийн автобус
Бүрэн цэнэглэх/түлш хийх хугацаа	~10 минут	6,5 цаг	10 минут орчимд 25 кг устөрөгч
Явалтын зайн хамгийн их нөөц	~ 500 км	60 км	~ 500 км
Цахилгааны сүлжээний ачаалал	Байхгүй	Их хэмжээтэй	Байхгүй
Хаягдал, CO₂	72 т/жил	14 т/жил	Байхгүй (Усны уур)
Агаарын чанарын индекс PM2.5	13,6 кг/жил	~2%	~3%

Устөрөгчийг тээвэрлэх дамжуулах хоолойтой холбоотой нэлээд хэдэн хүндрэлүүд байдаг. Өмнө дурдснаар худалдааны зориулалт бүхий хийн устөрөгчийг хамгийн багадаа 150 жилийн турш нийслэл хотуудын цахилгаан хангамжид хэрэглэж байсан. Устөрөгчийг тээвэрлэх ба түгээлтээс үүсэх эрчим хүчний зардал бий болно. Устөрөгчийн үйлдвэрлэл ба түгээлтийн энергийн алдагдлыг ойролцоолон харууллаа.

Үйлдвэрлэл: хэрэв чулуужсан түлшийг сайжруулан үйлдвэрлэвэл 10% ба хэрэв электролизээр үйлдвэрлэвэл 25%.

Агааржуулалт: цэвэршүүлэлт, даралт ба шингэрүүлэлт. Цэвэршүүлэлт нь даралтат устөрөгчид 4ppm ба шингэрүүлэлтэд 1 ppm байна. Нийт агааржуулалтын 20-80 МПа даралтад 10-15%-ын алдагдал, цагт 0,01-1тн-ыг шингэрүүлэхэд 30-150%-ын алдагдал гарна.

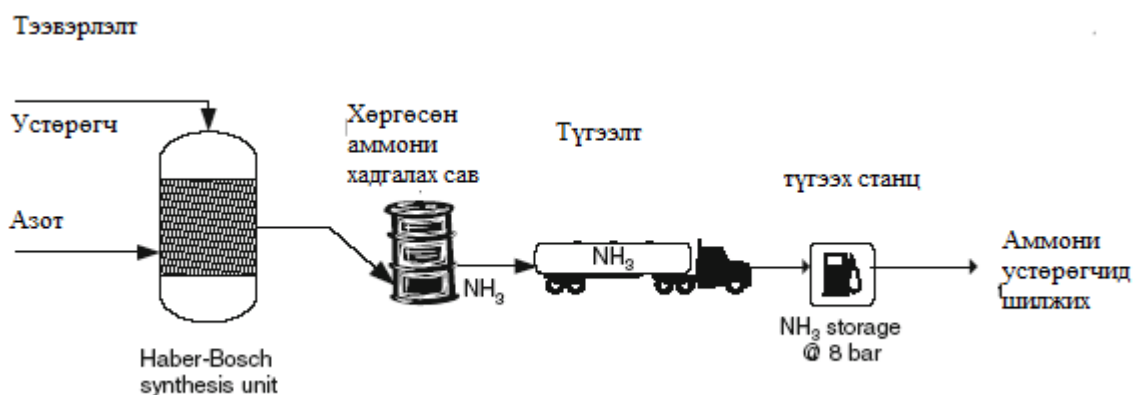
Тээвэрлэлт: дамжуулах хоолойгоор 150км дамжуулахад 1,4%-н алдагдал гарна.

ШТС-аар түгээхэд: өдөрт 100-2000 машинд устөрөгч шахах цахилгаан энергийн алдагдал 7.5-40% байна. Дамжуулах хоолойноос гадна устөрөгч тээвэрлэх олон хувилбарууд байгаа. Нэг боломж нь одоо байгаа байгалийн хий дамжуулах хоолойн дэд

бүтцээр устөрөгч тээвэрлэх юм. Ямар нэгэн өөрчлөлтгүй явуулах зорилгоор устөрөгчийг байгалийн хийтэй 1:9 харьцаатай хольсон. Байгалийн хийн дамжуулах хоолойг ашиглан устөрөгчжүүлэх нь хүлэмжийн хийг бууруулах гайхалтай арга юм. Устөрөгч тээвэрлэхэд зориулсан дамжуулах хоолой Европ ба АНУ-д байгаа талаар өмнө дурдсан. Практик дээр тулгуурлан дамжуулах хоолойн ажиллах даралт 0,34-10МПа, диаметр 100-200мм гэж олсон. Материалын хэврэгшил нь зарим нэг чухал техникийн асуудлуудад эрсдэл учруулдаг боловч эдгээрийг шийдэх боломжтой. Шахсан устөрөгчийн канестр (баллон)ийг ачааны тэргээр ердийн авто тээвэрлэлтээр зөөж болно. 40т-ын ачааны машин 700кг устөрөгчийг зөөж чадна. Шахсан ердийн устөрөгч 14кг/м³ нягттай, 20МПа даралттай байна. Хадгалах танкан хүртэлх хийн масс зөвхөн 6% нь байна. Энэ бол хадгалалтын танкны жингээс 8% хүртэл устөрөгчийг нягтаршуулан 70МПа хүртэлх устөрөгчийн хадгалалтын технологи юм. Шахсан хий хэлбэртэй устөрөгчийг тээвэрлэх хамгийн хол зай нь 500км ба тээвэрлэлтийн үнэ нь ачсан устөрөгчийн үнэтэйгээ тэнцэнэ. Устөрөгчийн илүү хялбар тээвэрлэлтийн арга бол криогений шингэн төлөв юм. 40тн-ий ачааны машинд 3.5 тн устөрөгч тээвэрлэж чадах төмөр замын тээвэрт зориулсан криоген хадгалагч сав байна. Тээвэрлэлтийн криоген хэлбэрийг төмөр замын ба авто тээврийн аль алинд хэрэглэж болно. Устөрөгчийн тээвэрлэлтийн бусад зүйлд химийн хувиралууд ордог. 2 үндсэн боломж байдаг:

1. Карбон диоксид хэрэглэн устөрөгчийг метанолд хувиргадаг батлагдсан технологид үндэслэсэн арга.
2. Haber-Bosch процессоор боловсруулан устөрөгчийг аммонид хувиргах

Түгээлтийн цэгт метанол ба аммониос шууд устөрөгчийг гаргах ба бага хэмжээний нөхөн сэргээлтийн энерги Шаардлагатай. Дараах зурагт устөрөгчийг аммони-д шилжүүлэн тээвэрлэх схемийг харуулав.

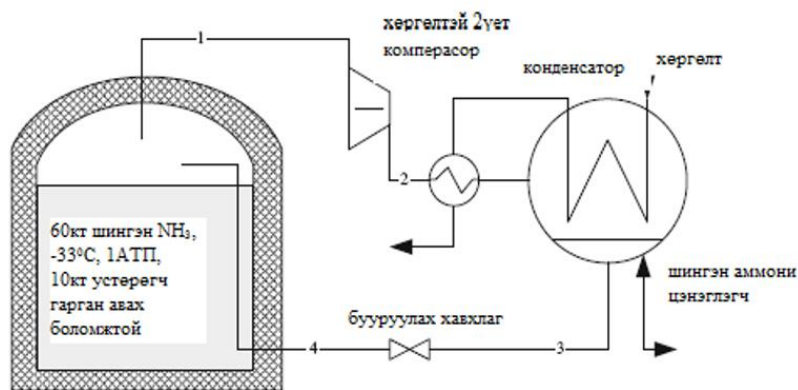


Зураг 3.17. Аммони хэлбэрт шилжүүлэн устөрөгчийг тээвэрлэх схем

Криоген ба шахсан хийн төлөв дэх авто тээврийн харьцуулсан анализыг Dincer ба Zamfirescu нар гаргасан. Аммониос устөрөгчид хувиргахад 25 %-ийн хохирол учруулдаг хэдий ч аммонитор дамжуулсан устөрөгчийн хямд түгээлт ба тээвэрлэлтийн ачаар шахаж шингэрүүлсэн устөрөгчийн авто тээвэрлэлттэй бүрэн өрсөлдөхүйц байгааг Dincer ба Zamfirescu нарын анализ харуулсан. Устөрөгчийн тээвэрлэлтийн эцсийн хэсэг бол хэрэглэгчдэд түгээх юм. Одоог хүртэл устөрөгчийн хэрэглээнд зориулсан 2 төрлийн шатахуун түгээх станц байгаа: шахсан хий ба криогений шингэн станц. Шахсан устөрөгчтэй тээврийн хэрэгслийн түлшинд зориулсан 2 хувилбар байгаа: тээврийн хэрэгслийн банк руу шатахуун түгээх станцийн түлш хадгалагч савнаас өндөр даралтаар тусгай гуурсаар дамжуулах, эсвэл солих боломжтой банк хэрэглэх.

Хадгалалт: Устөрөгчийн хадгалалтын асуудлыг хадгалах савны багтаамжтай холбож тайлбарладаг. Хадгалалтын сав нь зөөврийн хэрэглээнд зориулсан жижиг хэмжээтэй, автотээвэрлэлтэнд зориулсан дунд хэмжээтэй эсвэл хэдэн зуугаас хэдэн мянган m^3 -г хадгалах боломжтой маш том гэх мэт янз бүр байж болно. Маш том хадгалалтын савыг устөрөгч үйлдвэрлэгч үйлдвэрийн ойролцоо хэрэглэдэг (ирээдүйд цөмийн устөрөгчийн төхөөрөмж). Энэ тохиолдолд устөрөгчийг дууссан газрын тосны цооног, газар доорх агуй нүх эсвэл давсан овоо руу оруулж хадгалж болдог. Давсан хөндийн буюу нүхэнд устөрөгчийг хадгалах сайн туршлага байгаа. Мексикийн Гулфид хөндий дэх хадгалах төхөөрөмжтэй нэгдмэл устөрөгчийн хоолой байдаг. Linde процессоор 40 atm даралтад газар доор нүхтэй хаданд хадгалдаг. Дундаж хэмжээтэй агуулахад аммони эсвэл хүчил хэлбэртэй устөрөгчийг хадгалах боломжтой. Аммонийг байнга 60 кт-ийн танканд атмосферийн даралтад хөргөсөн шингэнд хадгалдаг.

Энэ аргыг өргөн хэрэглэдэг учир нь аммонийг жилийн түлш үйлдвэрлэх ба ихэвчлэн зун хэрэглэдэг (бордоо). Ердийн битүүмжилсэн хадгалах савны барилгын хэмжээ нь 50м диаметртэй, 30 өндөртэй байна. Зураг 3.18. –д аммони хадгалдаг савыг харуулав.



Зураг.3.18. Аммони агуулсан устөрөгч хадгалах сав

Гаргаж авсан устөрөгчийн хамгийн бага дулаан хэмжээний 15% -аас бага энергиэр аммониос устөрөгчийг буцаан ялгаж авах харьцангуй хялбар

60 кт аммониос ойролцоогоор 10 кт устөрөгч гаргаж авна. Бага хэмжээтэй устөрөгчийг хадгалалт нэлээд бэрхшээлтэй. Устөрөгчийг хэт нягтаршуулах хадгалах нь хэцүү учраас машины ердийн түлшний адилаар савладаг. Өндөр дулааны хэмжээнд үндэслэсэн 1кг шингэн түлш нь 0,3кг устөрөгчтэй тэнцүү. Шингэн түлш 1,3л/кг байхад шингэрүүлсэн устөрөгч 3,5 дахин их эзлэхүүнтэй байна. 298К-нд 400бар-аар шахсан устөрөгч шингэн түлшнээс 9,6 дахин их эзлэхүүнтэй байдаг. Бага хэмжээтэй устөрөгчийн хадгалалтыг доор авч үзлээ.

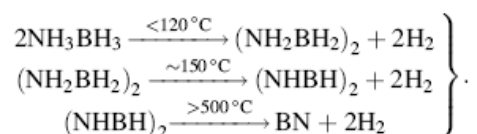
- 20 К температур, хэвийн даралттай шингэн криоген
- Ердийн температур өндөр даралтад шахсан хий
- Хатуу материал матриц дахь устөрөгчийн молекулын физикийн холбоо
- Химийн холбоог чөлөөлөн синтезлэх

Хатуу матрицид устөрөгчийг хадгалахад 2 процесс хэрэглэгдэнэ: physisorption and chemisorption. Ерөнхийдөө энд цэнэггүй үе дэх дулааны энерги, цэнэглэлтэд хэрэглэх хөргөлт Шаардлагатай.

Натри, лити, магни ба бор зэрэг нь химийн устөрөгчийн нэгдэл үүсгэх ба устөрөгчийн хадгалалт physisorption and chemisorption-ээр үүссэн метал устөрөгчийн нэгдлээс илүү нягт байх боломжтой.

Химийн устөрөгчийн нэгдлийн задралыг өөрчлөх боломжгүй. Түүнчлэн устөрөгчийг салгасны дараа химийн нэгдлүүдийг дахин байрлуулах нарийн процесс байх ёстой. Устөрөгчийн нэгдлээс устөрөгч гаргадаг химийн төхөөрөмж нь овор ихтэй.

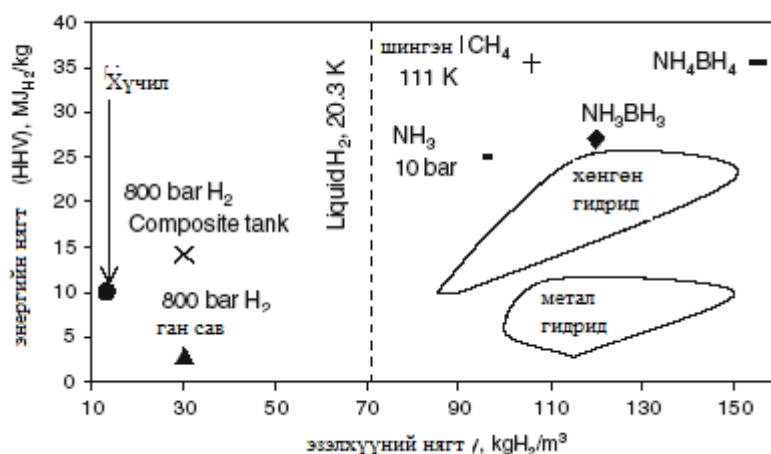
Жишээлбэл, Борд үндэслэсэн устөрөгчийн нэгдлийг тээврийн хэрэгсэлд хэрэглэх боломжгүй гэж АНУ-ын Department of Energy (DOE) -ээс үзсэн. Гэвч борын аммони нь зөөврийн хэрэглээнд бол маш сайн сонголт болно. Энэ нь 19% -ын агуулалтай 120г/л-тай устөрөгч хадгалах системд тохиромжтой. Борын аммониос устөрөгчийг дулааны үйлчлэлээр салгадаг. Дараах урвалаар харуулав.



Дээрх урвалд харуулснаар борын аммониос 120-оос бага температурт устөрөгчийн салгаж болно. Хэрэв зөв хийж чадвал өрөөний температурт устөрөгчийг ялгаж болно. Бага

температурт устөрөгч ялгах нь жижиг хөдөлгүүр бүхий хүйтэн хадгалалтын системийн маш чухал шинж чанар юм.

Метал аминийг устөрөгчийн хадгалалтад хэрэглэх болсон. Жишээ нь магнийн хлорид $Mg(NH_3)_6Cl_2$. Энэ молекулыг 109г/л буюу 92г/кг устөрөгчид нэвтрүүлэх ба аммонийг дулааны дисорбциор салгадаг. Бага хэмжээтэй ердийн хэрэглээнд устөрөгчийг аммони хэлбэртэй хадгалалж хэрэглэх болсон. Аммони бол гидролизээр гаргаж авдаг хүчил юм. Хүчил бол тогтвортой удаан хугацааны турш хадгалж болох ба суудлын машинд тээвэрлэж болно. Биомасс синтезлэх үед дэх хүчил нь zero carbon түлш ба устөрөгчийн үүсгүүр болно. Хүчлээс устөрөгчийн ялгахад тогтвортой дулааны энерги Шаардлагатай. Дээрх хүчлийн жишээнд харуулсан аммонид суурилсан нэгдлүүд нь устөрөгчийн хадгалалт ба түүний ялгах сайн арга юм. 3.19-р зурагт өөр өөр технологитой устөрөгч хадгалалтын нягтыг харууллаа (х- эзлэхүүний багтаамж, у-хүндийн гингийн багтаамж). NH_4BH_4 химийн томьёотой борийн аммоний нэгдэл нь устөрөгч хадгалах саван дахь хамгийн нягтшилтай болох нь харагдаж байна.



Зураг 3.19. Төрөл бүрийн арга технологитой устөрөгчийн хадгалалтын нягт

3.4 Монгол дахь устөрөгчийн хэрэглээ. Түлшний элемент

Устөрөгчийн хэрэглээ:

- Эрчим хүч. Өнөөдрийн хэрэглээ: 4-р цахилгааны станцад турбогенераторын хөргөлтөнд ашиглаж байна. Ирээдүйд: энергийн хуримтлуур, цахилгааны үүсгүүр (түлшний элемент, хийн турбин), метан-устөрөгчийн холимог
- Тээвэр. Түлшний элемент: Суудлын автомашин, автобус, ачааны тээвэр, төмөр замын тээвэр, агаарын тээвэр. Дотоод шаталтат хөдөлгүүр: метан- устөрөгчийн холимог, аммиакийн түлш

- Бариллага байгууламж. Дулаан, цахилгаан хангамж, цахилгаан хангамжийн орон нутгийн болон тус газрын систем.
- Үйлдвэр. Химийн, төмөрлөгийн, хүнсний, шилний, газрын тос боловруулах үйлвэр гэх мэт.

Түлшний элемент нь цахилгаан химийн урвалын энергийг цахилгаан энергид шууд хувиргадаг төхөөрөмж юм. Түлшний элементийн ерөнхий бүтэц буюу зохион байгуулалтын блок нь электролитийн давхарга ба түүнийг хоёр талаас нь хавчих маягаар байрлана сүвэрхэг бүтэцтэй анод, катод гэсэн электродоос бүрдэнэ. Түлш исэлдүүлэгч хийнүүд болон ионуудын урсгалын чиглэлүүдийг тусгасан түлшний элементийн схемийг доорх зурагт үзүүлэв.

Сүвэрхэг бүтэцтэй электродуудын гадарга дээр хийн түлш болон исэлдүүлэгч, электролит, түүнчлэн катализаторын хооронд гурван-фазын холимог гадарга (ГФХГ) үүснэ. Энэхүү ГФХГ-ийн төлөв байдал, шинж чанар нь түлшний элементийн, ялангуяа шингэн электролиттой түлшний элементийн цахилгаан-химийн үзүүлэлтүүдэд шийдвэрлэх нөлөөтэй. Ийм түлшний элементүүдэд, сүвэрхэг бүтэцтэй электродуудын тодорхой хэсэгт нэвтэрсэн шингэн электролитийн нимгэн давхаргыг хийн түлш ба исэлдүүлэгч хийнүүд нь диффузийн процессоор нэвтэрч, тэнд байгаа идэвхтэй гадарга дээр цахилгаан химийн урвалд орно. Хэрвээ сүвэрхэг электрод нь электролитийг их хэмжээгээр агуулж байвал илүүдэл электролит нь хийн түлш болон исэлдүүлэгч хийнүүдийн идэвхтэй гадаргууд нэвтэрч хүрэх тоо хэмжээг хязгаарлаж, ингэснээрээ сүвэрхэг бүтэцтэй электродуудын цахилгаан химийн үзүүлэлтүүдэд сөрөгөөр нөлөөлдөг. Тиймээс түлшний элементийн тогтвортой ажиллагааг хангахад сүвэрхэг бүтэцтэй электродууд дахь хийн түлш болон исэлдүүлэгч, электролит, түүнчлэн катализаторын хооронд зохистой баланс чухал үүрэгтэй. Үүнтэй уялдан хямд өртөгтэй, тогтвортой өндөр цахилгаан химийн үзүүлэлт бүхий түлшний элемент үйлдвэрлэхэд чиглэгдсэн технологийн судалгаа шинжилгээнд элементийн эд ангиудыг нимгэн болгох, электродын бүтэц болон электролитийн фазыг сайжруулж боловсронгуй болгох явдал онцгой байр эзэлж байна. Түлшний элементэд, хийн түлшийг сөрөг цэнэгтэй анод руу зогсолтгүй дамжуулагдах бөгөөд эерэг цэнэгтэй катод руу исэлдүүлэгч /хүчилтөрөгч/ зогсолтгүй дамжуулагдаж электродууд дээр цахилгаан-химийн урвал явагдах замаар цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэнэ. Электролит нь зөвхөн өөрт нь ууссан хийн молекулуудыг электродууд руу дамжуулаад зогсохгүй мөн ионы цэнэгүүдийг электродуудын хооронд тээвэрлэх замаар элементийн цахилгаан үйлдвэрлэх мөч [цикл]-ийг бүрдүүлнэ. Түүнчлэн электролит нь түлш болон исэлдүүлэгч хийнүүдийг шууд холилдохоос урьдчилан сэргийлэх үүрэгтэй.

Түлшний элементийн технологи ажиллагааг оновчтой болгохын тулд эхний ээлжид түүний үзүүлэлтүүдийг онолын хувьд тодорхойлох Шаардлагатай. Дараа нь технологи ажиллагааны үед зайлшгүй гарах алдагдлуудыг тооцож гаргасны дараа онолын үзүүлэлт ба алдагдлуудын нийлбэрийн зөрөөнөөс түлшний элементийн бодит үзүүлэлтийг тогтооно. Полимер Электродын Түлшний Элемент (ПЭТЭ), Шүлтийн Түлшний Элемент (ШТЭ) болон Фосфорын Хүчлийн Түлшний Элемент (ФХТЭ) зэрэг нам температурын түлшний элементүүд нь анод болон катод дээр урвалын хурдыг Шаардлагатай түвшинд барихын тулд ховор металлын катализаторуудыг ашиглах бөгөөд зөвхөн устөрөгчийг түлш болгон ашиглана. Шингэрүүлсэн Карбоны Түлшний Элемент (ШКТЭ), Дундаж Температуртай Хатуу Ислийн Түлшний Элемент (ДТХИТЭ) болон Хатуу Ислийн Түлшний Элемент (ХИТЭ) зэрэг өндөр температурын түлшний элементүүдийн хувьд катализаторын хатуу шаардлага зөөлрөх бөгөөд түлшний хувьд ч сонголт харьцангуй өндөр байдаг. Нүүрстөрөгчийн дан исэл (СО) нь нам температурт түлшний элементийн анод дээрх Pt зэрэг үнэт металлын катализаторыг идэвхжүүлэх сөрөг нөлөөтэй бол никел зэрэг хямд катализатор ашигладаг өндөр температур дахь түлшний элементүүдийн хувьд СО нь устөрөгчийг түүхий эд болдог давуу талтай.

ТЭ ба ДЦС-ын үйл ажиллагааны харьцуулалт

Дулааны хөдөлгүүр (ДХ) буюу уурын хөдөлгүүрүүд нь халуун, хүйтний хэмийн зөрүүгээр тэлж агшдаг түмэн бодисын хуулийн дагуу шахалт, даралтын зөрүүгээр хөдөлж байдаг. Түлшний элемент нь химийн урвалын энергийг шууд цахилгаан энерги болгон хувиргадаг цахилгаан химийн төхөөрөмж юм. Энэхүү хоёр процессын онолыг авч үзээд ТЭ, ДХ хоёрын ялгааг тодруулж болох юм. Дулааны цахилгаан станцад нүүрсийг уурхайгаас тээвэрлэж ирээд түлшний анхан шатны тор, бутлуур, шүүр, металл хог ялгах зэрэг цэвэрлэх төхөөрөмжийн дамжлагуудаар дамжуулан анхдагч цэвэрлэгээг хийж түүхий нүүрсний бункерт оруулна. Тэндээс цааш нь нүүрсийг бутлагчид оруулж ихэнхийг 90 микрон хүртэл буталж бэлэн тоосыг нүүрсний бункерт оруулан зууханд асаагуур хэмээх төхөөрөмжөөр зуухны гал ноцох төхөөрөмжийн тусламжтайгаар нүүрсний тоос шатаж дулаан гаргах ба зуухны экран хоолойд байгаа тэжээлийн ус халж уур үүсэх процесс явагдах ба турбиныг эргүүлэн механик энерги болгон генераторыг эргүүлж цахилгаан эрчим хүчийг гаргана.

Орчин үеийн эрчим хүчийг түлшний элементгүйгээр төсөөлөх боломжгүй юм. Түлшний элемент нь энергийн сонгодог эх үүсгүүртэй харьцуулахад дараах хэдэн үндсэн давуу талуудтай. Үүнд:

1. Бараг 75 % хүрэх маш өндөр АҮК - тэйгээс гадна бас давхар дулаан ялгадаг тул түүнийг ашиглаж болно
2. Түлшний элемент байгалийн хий, биогаз, метанол, дизелийн түлш, нүүрсний хийжүүлэлтийн бүтээгдэхүүн зэрэг устөрөгч агуулсан дурын түлшийг харгалзах боловсруулалт хийсний дараа анод дээр орох үед ажиллах "бүх хортой" юм
1. Түлшний элемент хөдлөх хэсэг, деталь байхгүй учир шуугиан гаргахгүй
2. Ямарч хорт бодис агаарт хаяхгүй харин усны бүлээн уур гарч агаар мандлыг чийгжүүлэх учир экологийн цэвэр үүсгүүр юм (3.20-р зураг).

ТҮЛШНИЙ ЭЛЕМЕНТ



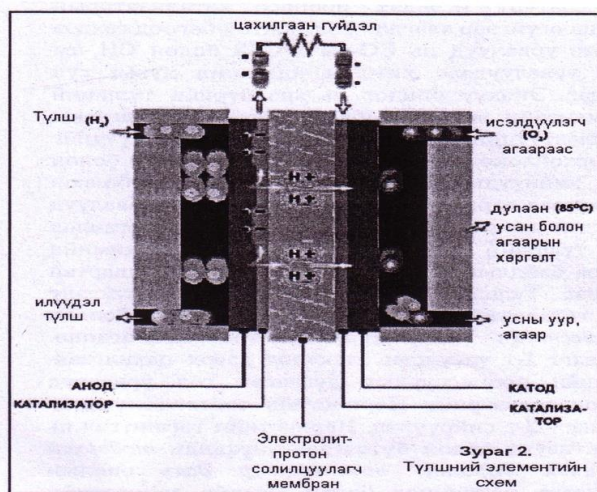
Зураг 3.20. Түлшний элемент

Устөрөгчийн эрчим хүч ба түлшний элементийн технологи нь нар, салхи, ус зэрэг нөхөн сэргээдэг эх үүсвэрийг ашиглан цахилгаан эрчим хүч гарган авах үед эдийн засгийн ашигтай байдаг. Сүүлийн үед биомасс, хөдөө аж ахуйн хаягдлын исэлтээс устөрөгч гарган авах сонирхол их болж байна. Ямар ч аргаар гаргасан ч устөрөгчийг хадгалах асуудал чухал юм. Даралттайгаар шахаж баллонд хадгалах арга бол хамгийн түгээмэл нь юм. Одоо 450 атм-ын даралтыг тэсвэрлэх хэт хөнгөн баллонууд буй болсон байна. Устөрөгчийн атомууд нь өчүүхэн жижигхэн тул маш их даралтын үед тэдгээрүүд нь баллоны ханаар шүүрээд нэвтэрч гарна. ОХУ-ын ШУА-ын хатуу биеийн физикийн эрдэмтэд энэ бэрхшээлийг давах арга олжээ. Ердийн нөхцөлд H_2 бол хий, бага хэмтэй нөхцөлд ($-253\text{ }^\circ\text{C}$)-д шингэн болдог. Дулаан алдахгүй битүүмжилсэн саванд шингэн H_2 -ийг хадгалж тэсвэрлэх нь зохимжтой. Авто машинд зориулж вакуман ханатай сав зохион бүтээж 2 долоо хоног гаруй хугацаанд шингэн H_2 -ийг хадгалж байна. Гэвч H_2 -ийг хатуу биетүүдэд хадгалах талаар судалж байна. H_2 -ийн жижиг молекулууд ихэнх металлуудын талстлаг торонд ороод бүгж байдаг. Жишээ

нь паладигийн тодорхой хэмжээний хэсэгт түүнээс 800 дахин их хэмжээний H_2 -ийг хадгалж болно гэж үзэж байна. Металын торонд ороод гарч чадахгүй байгаа H_2 металлын атомуудтай химийн гидрид нэгдлийг үүсгэдэг. Энэ үед дулаан ялгарна. Метал дотор шингээсэн H_2 -ийг гарган авахын тулд халаадаг. Титани, төмөр, магни, никел, лантан, ванади зэрэг интерметаллудын хайлш онцгой сонирхлыг татаж байна. Эдгээр металлууд хэт хүнд байгаа явдал юм. Иймээс H_2 -ийг хадгалах нүүрстөрөгчийн нано-хоолой, шилэн бичил бөмбөг гэх мэт олно төрлийн хөнгөн бодисуудыг гарган аваад байна. H_2 -ийн эрчим хүчинд шилжих үндсэн нөхцөл нь найдвартай, эдийн засгийн хэмнэлттэй H_2 -ийн түлшний элементийн үндэс суурийг буй болгох явдал юм. Түлшний элементийн АҮК 90 хүртэл нэмэгдэх боломжтой гэнэ.

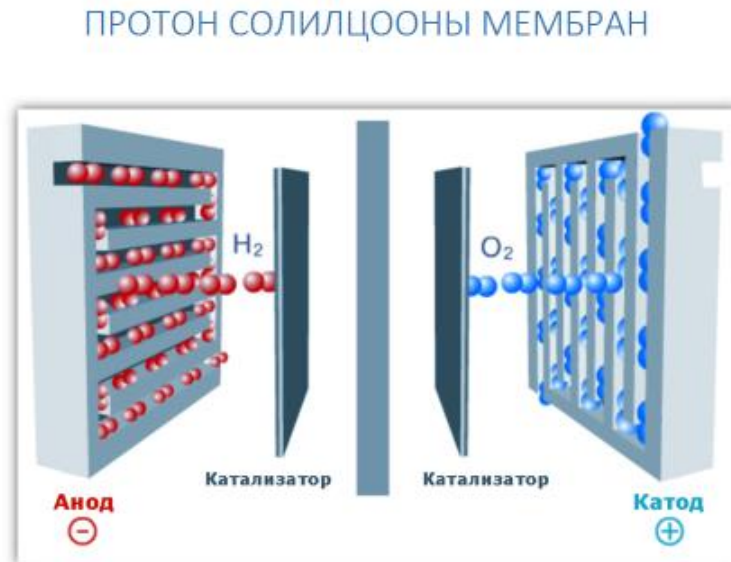
Түлшний элемент нь *цахилгаан химийн урвалын энергийг цахилгаан энергид шууд хувиргадаг* төхөөрөмж юм. Түлшний элементийн ерөнхий бүтэц буюу зохион байгуулалтын блок нь электролитийн давхарга ба түүнийг хоёр талаас нь хавчих маягаар байрласан сүвэрхэг бүтэцтэй анод, катод гэсэн электродоос бүрдэнэ. Түлш исэлдүүлэгч хийнүүд болон ионуудын урсгалын чиглэлүүдийг тусгасан түлшний элементийн бүдүүвчийг 4.1-4.3-р зургуудад үзүүлэв.

1. Устөрөгч хий түгээх сувгаар түлшний элементийн анод дээр харин агаараас хүчилтөрөгч катод дээр орно.
2. Анод дээр устөрөгч цагаан алтан катализаторыг байхад протон ба электрон болж задарна.
3. Полимер электролитын мембран зөвхөн нэмэх цэнэгтэй ионыг түлшний элементийн катод руу нэвтрүүлнэ. Хасах цэнэгтэй ион гадаад хэлхээгээр гүйж цахилгаан гүйдэл үүсгэнэ.
4. Катод дээр устөрөгчийн электрон, протон ба хүчилтөрөгч ус үүсгэнэ. Түлшний элементийн бүдүүвчийг 3.21-р зурагт харуулав.



Зураг 3.21. Устөрөгчийн түлшний элементийн ерөнхий бүдүүвч

Устөрөгчийн элементийн протон солилцооны мембраны бүдүүвчийг 3.22-р зурагт харуулав.



Зураг 3.22. Протон солилцооны мембран

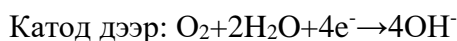
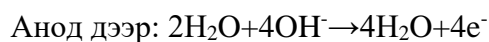
Сүвэрхэг бүтэцтэй электродуудын гадарга дээр хийн түлш болон исэлдүүлэгч, электролит, түүнчлэн катализаторын хооронд *гурван-фазын холимог гадарга* (ГФХГ) үүснэ. Энэхүү ГФХГ-н төлөв байдал, шинж чанар нь түлшний элементийн, ялангуяа шингэн электролиттой түлшний элементийн цахилгаан-химийн үзүүлэлтүүдэд шийдвэрлэх нөлөөтэй. Ийм түлшний элементүүдэд, сүвэрхэг бүтэцтэй электродуудын тодорхой хэсэгт нэвтэрсэн шингэн электролитийн нимгэн давхаргыг хийн түлш ба исэлдүүлэгч хийнүүд нь диффузийн процессоор нэвтэрч, тэнд байгаа идэвхтэй гадаргуунууд дээр *цахилгаан химийн урвалд* орно. Хэрвээ сүвэрхэг электрод нь электролитийг их хэмжээгээр агуулж байвал илүүдэл электролит нь хийн түлш болон исэлдүүлэгч хийнүүдийн идэвхтэй гадаргууд нэвтэрч хүрэх тоо хэмжээг хязгаарлаж, ингэснээрээ сүвэрхэг бүтэцтэй электродуудын цахилгаан химийн үзүүлэлтүүдэд сөргөөр нөлөөлдөг. Тиймээс түлшний элементийн тогтвортой ажиллагааг хангахад сүвэрхэг бүтэцтэй электродууд дахь хийн түлш болон исэлдүүлэгч, электролит, түүнчлэн катализаторын хооронд зохистой баланс чухал үүрэгтэй. Үүнтэй уялдан хямд өртөгтэй, тогтвортой өндөр цахилгаан химийн үзүүлэлт бүхий түлшний элемент үйлдвэрлэхэд чиглэгдсэн технологийн судалгаа шинжилгээнд *элементийн эд ангиудыг нимгэн болгох, электродын бүтэц болон электролитийн фазыг сайжруулж боловсронгуй болгох* явдал онцгой байр эзлж байна. Түлшний элементэд, хийн түлшийг сөрөг цэнэгтэй анод руу зогсолтгүй дамжуулагдах бөгөөд эерэг цэнэгтэй катод руу

исэлдүүлэгч /хүчилтөрөгч/ зогсолтгүй дамжуулагдаж электродууд дээр цахилгаан-химийн урвал явагдах замаар цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэнэ. Электролит нь зөвхөн өөрт нь ууссан хийн молекулуудыг электродууд руу дамжуулаад зогсохгүй мөн ионы цэнэгүүдийг электродуудын хооронд тээвэрлэх замаар элементийн цахилгаан үйлдвэрлэх мөч [цикл]-ийг бүрдүүлнэ. Түүнчлэн электролит нь түлш болон исэлдүүлэгч хийнүүдийг шууд холилдохоос урьдчилан сэргийлэх үүрэгтэй.

Химийн энергийг цахилгаан энергид шилжүүлэх төхөөрөмжид түлшний элемент орно. Түлшний шатах (исэлдэх- ангижрах) урвалаас цахилгаан энерги гаргадаг төхөөрөмжийг түлшний элемент гэдэг. Энд ангижруулах бодисын үүргийг ердийн түлш болох нүүрс, кокс, байгалийн болон зохиомол аргаар гарган авсан хийнүүд гүйцэтгэнэ. Харин исэлдүүлэгч болгож хүчилтөрөгч эсвэл агаарыг ашиглана.

Хамгийн өргөн хэрэглэгддэг энерги ихтэй түлшний элемент бол устөрөгч-хүчилтөрөгчийн элемент юм. Ийм элементийг бэлтгэхдээ нүхэрхэг нүүрс буюу никел электродыг шүлтийн уусмалд дүрж: $-(C)H_2 / KOH(30-40\%) / O_2(C)+$ гэсэн цахилгаан химийн бүдүүвчийг бүрдүүлнэ.

Устөрөгчийн элементийн анод, катод дээр явагдах химийн урвал:



Нэгтгэвэл: $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ гэсэн ус үүсэх, өөрөөр хэлбэл устөрөгчийн шатах урвалаар цахилгаан энергийг гарган авч байна. Энэ гальвани элементийн ЦХХ нь стандарт нөхцөлийн үед:

$$E^0 = \Delta G^0_{298} / 2F = (-234 \text{ кЖ/моль}) / (296.5 \text{ кЖ/В моль}) = 1.23 \text{ В}$$

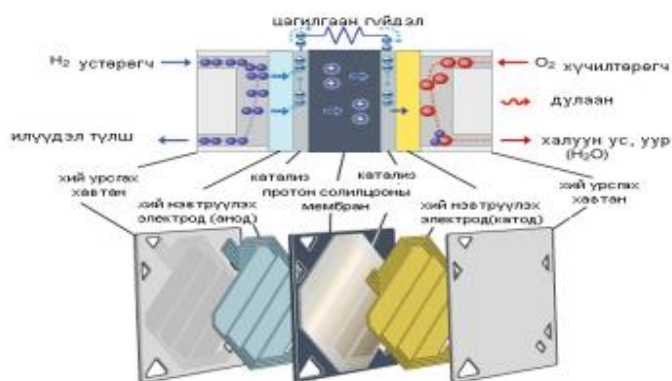
Устөрөгч-хүчилтөрөгчийн түлшний шатах зай нь цэнэггүйжихдээ электродын гүйдлийн нягтаас хамааран 0.7 - 0.9В-ийн хязгаарт хүчдэлээ барьдаг. Энэхүү зай нь бага хүчдэлтэй тогтмол гүйдлийг гаргах бөгөөд элдэв муу чимээгүй, хорт бодис ялгаруулдаггүй болно.

Устөрөгч- хүчилтөрөгчийн түлшний шатах зайг сансрын техникт ашиглаж байна. Энэ нь сансрын хөлөг болон нисгэгчдийг цахилгаан энергиэр хангаад зогсохгүй, усаар хангана. Ийм түлшний шатах зайн хувийн энерги 400 – 800 Вт цаг/кг, АҮК 60 – 80% байна. Сарын хугацааны сансрын нислэгт дунджаар 10 кВт- ын хүчин чадал бүхий ийм генераторыг ашигладаг болно.

Түлшний шатах зайн хүчдэлийг ихэсгэхийн тулд электродын туйлшрал, электролитийн эсэргүүцлийг багасгах Шаардлагатай байдаг. Үүний тулд электродын талбайг ихэсгэх, катализатор хэрэглэх, уусмалын концентраци ба температурыг нэмэгдүүлнэ. Электродын талбайг ихэсгэхийн тулд нунтаг металл буюу нүүрсээр сүвэрхэг электродыг бэлтгэнэ. Түлшний шатах зайн катализатор болгож цагаан алт, мөнгөний бүлгийн элементүүдийг ашиглахаас гадна Ni, Co, идэвхжүүлсэн нүүрсийг хэрэглэдэг.

Хүчилтөрөгч нь 25-100⁰C-ийн үед өндөр хурдтайгаар ангижирч, устөрөгч, гидразин (N₂H₄), метилийн спирт (CH₃OH) зэрэг түлшийг исэлдүүлнэ. Дээрх температурын мужид ажилладаг түлшний шатах зайг нам температурынх гэнэ. Түлшний элементийн технологи ажиллагааг оновчтой болгохын тулд эхний ээлжид түүний үзүүлэлтүүдийг онолын хувьд тодорхойлох Шаардлагатай. Дараа нь технологи ажиллагааны үед зайлшгүй гарах алдагдлуудыг тооцож гаргасны дараа онолын үзүүлэлт ба алдагдлуудын нийлбэрийн зөрөөнөөс түлшний элементийн бодит үзүүлэлтийг тогтооно. Түлшний элементийн онолын үзүүлэлт нь 3.21-р зурагт үзүүлсэн түлшнүүд ба хүчилтөрөгчийн цахилгаан химийн урвалуудаас хамаарна. Полимер Электролитын Түлш Элемент (ПЭТЭ), Шүлтийн Түлшний Элемент (ШТЭ) болон Фосфорын Хүчлийн Түлшний Элемент (ФХТЭ) зэрэг нам температурт түлшний элементүүд нь анод болон катод дээр урвалын хурдыг Шаардлагатай түвшинд барихын тулд ховор металлын катализаторууд ашиглагдах бөгөөд зөвхөн устөрөгчийг түлш болгон ашиглана.

Түлшний элемент бүр ойролцоогоор 1В үүсгэдэг. Хэрэглээнээс хамааран гадаад хүчдэл 6-200В, эсвэл үүнээс ч илүү байж болно.



Протон солилцооны мембрант ГЭ-ийн бүтэц

Зураг 3.23. Түлшний элементийн давуу талууд

Шингэрүүлсэн Карбоны Түлшний Элемент (ШКТЭ), Дундаж Температуртай Хатуу Ислийн Түлшний Элемент (ДТХИТЭ) болон Хатуу Ислийн Түлшний Элемент (ХИТЭ)

зэрэг өндөр температурт түлшний элементүүдийн хувьд катализаторын хатуу шаардлага зөөлрөх бөгөөд түлшний хувьд ч сонголт харьцангуй өндөр байдаг. Нүүрстөрөгчийн дан исэл (CO) нь нам температурт түлшний элементийн анод дээрх Pt зэрэг үнэт металлын катализаторыг идэвхжүүлэх сөрөг нөлөөтэй бол никел зэрэг хямд катализатор ашигладаг өндөр температурт түлшний элементүүдийн хувьд CO нь устөрөгчийг түүхий эд болдог давуу талтай. Түлшний элементийн давуу талуудыг 3.23-р зурагт харуулав.

Түлшний элемент дээр үндэслэсэн цахилгаан станц. Дулааны цахилгаан станцын уурын турбиныг ажиллуулах ажлын биеийн халуун, хүйтний хэмийн зөрүүгээр тухайн станцын ашигт үйлийн коэффициент нь тодорхойлогдоно. Түлшний элемент нь химийн урвалын энергийг шууд цахилгаан энерги болгон хувиргадаг цахилгаан химийн төхөөрөмж юм. Дулааны цахилгаан станцад нүүрсийг уурхайгаас тээвэрлэж ирээд түлшний анхан шатны тор, бутлуур, шүүр, металл хог ялгах зэрэг цэвэрлэх төхөөрөмжийн дамжлагуудаар дамжуулан анхдагч цэвэрлэгээг хийж түүхий нүүрсний бункерт оруулна. Тэндээс цааш нь нүүрсийг бутлагчид оруулж ихэнхийг 90 микрон хүртэл буталж бэлэн тоосыг нүүрсний бункерт оруулан зууханд асаагуур хэмээх төхөөрөмжөөр зуухны галын хор цацан ноцоох төхөөрөмжийн тусламжтайгаар нүүрсний тоос шатаж дулаан гаргах ба зуухны экран хоолойд байгаа тэжээлийн ус халж уур үүсч тэр нь турбиныг эргүүлэн механик энерги үүсгэж генераторын голыг эргүүлж цахилгаан эрчим хүчийг гаргана.

Цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэхэд дараах түлшний элементүүдийг ашиглаж болно. Үүнд:

1. Шүлтийн электролит буюу ион солилцооны хатуу полимер мембрантай нам температурын түлшний элемент
2. Фосфорын хүчлийн электролиттэй дунд температурын түлшний элемент
3. Хайлмаг карбонатын электролит буюу хатуу ислийн электролиттэй өндөр температурын түлшний элемент зэрэг орно.



Зураг. 3.24. Түлшний элемент дээр үндэслэсэн цахилгаан станцын бүдүүвч

3.5 Монгол улсын 2040 оны устөрөгчийн хэрэгцээг GT-MHR реактор ашиглан хангах үндэслэл

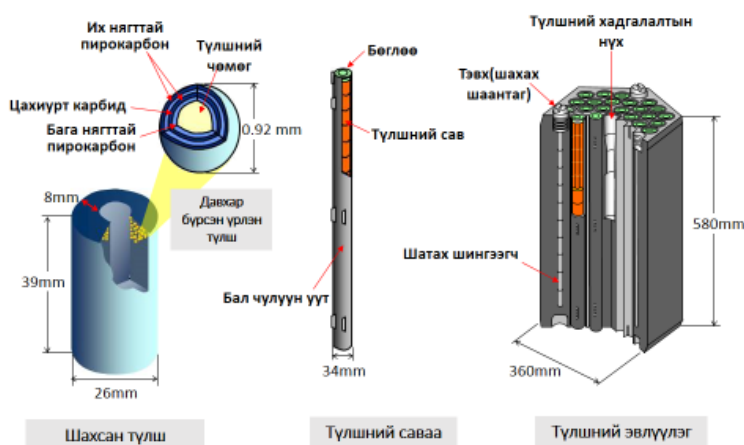
“Алсын хараа 2050” Монгол Улсын урт хугацааны хөгжлийн бодлогод Эдийн засгийн тэргүүлэх салбаруудын дэлхийн зах зээл дэх байр суурь бэхжүүлэх чиглэлийн 4.2.53. Эрчим

хүчний тэнцэлд цөмийн эрчим хүчний байр суурийг нэмэгдүүлэх бодлого хэрэгжүүлэх болон “Шинэ эргэлтийн бодлого”-ын Эрчим хүчний сэргэлтэд Цөмийн болон устөрөгчийн эрчим хүчний эх үүсвэрийг барьж байгуулахыг төрийн бодлогоор дэмжинэ гэж заажээ.

Өнөөдөр дэлхий даяар эцсийн эцэст газрын тос, байгалийн хийг халах альтернатив түлшийг хайх ажил хийгдэж байна. Эрчим хүчний салбарт энэ нь уран, тори, бага хаягдал гарах шинэ аргаар шатаах нүүрс, био түлш байж болох юм. Гэвч эдгээр түлшийг ашигласан тээврийн хэрэгслийн хөдөлгүүр харьцангуй том хэмжээтэй болдог нь тэдгээр түлшийг тээвэрт ашиглахад хүндрэл учруулна. Иймээс автобензин, дизелийн түлшийг орлох хамгийн ирээдүйтэй түлш бол машины яндангаар зөвхөн усны уур гарах устөрөгчийн түлш байж болох юм. Устөрөгчийн илчлэг бензинийхээс бараг 4 дахин их байдаг. Одоо устөрөгчийг ихэвчлэн химийн, нефть-химийн аж үйлдвэрийн хэрэгцээнд зориулж усны электролизийн аргаар үйлдвэрлэж байна. Энэ аргаар үйлдвэрлэсэн устөрөгч маш үнэтэй байдаг. Харин өндөр температурын цөмийн реакторын дулааны энергийг ашиглан аж үйлдвэрийн цар хэмжээтэй устөрөгч үйлдвэрлэж болно. Ийм реакторын орчин үеийн төсөл нь устөрөгчийн түлшний өөрийн өртгийг бензин үнэ, магадгүй түүнээс доод түвшинд хүргэхээр зорьж байна

Өндөр температурын гелийн хөргүүртэй реактор нь экологийн цэвэр олон зориулалттай цөмийн энергийн үүсгүүрийн шинэ төрөл юм. Ийм реакторын хосгүй шинж чанар болох 1000°C -ээс их температурт дулаан үйлдвэрлэх чадвар, аюулгүй байдлын өндөр түвшин нь тэдгээрийг хий турбины циклд өндөр АҮК-тэй цахилгаан үйлдвэрлэх, устөрөгч, ус цэнгэгжүүлэх, химийн, нефтболовсруулах, төмөрлөгийн болон бусад үйлдвэрийн салбарын процессыг өндөр температурын дулаан, цахилгаанаар хангахад зориулан ашиглах өргөн боломжийг тодорхойлно

HTTR: Түлшний элемент



Зураг 3.25. Гелийн хийн хөргүүртэй реакторын призм түлшний хийц

Гелийн хийн хөргүүртэй GT-MHR(GasTurbine-ModularHeliumReactor) реактораас гарах 900°C температуртай гелийн хийг завсрын дулаан солилцуураас устөрөгч үйлдвэрлэхэд ашиглах бүдүүвчийг ба цөмийн түлшний технологийг 3.25-р зурагт тус тус харуулав.

Хэдийгээр бидний призм түлштэй өндөр температурын хийн реакторыг сонгож авч үзэж байгаа ч гэсэн RBMR (Pebble-bed modular reactor) нь өнөөдрийн байдлаар дэлхий түвшинд хүлээн зөвшөөрөгдөөд байгаа дэвшилтэт өндөр температурын реактор юм. Герман улсын Засгийн газар 1990 онд өндөр температурын реакторыг хөгжүүлэх хөтөлбөр (Siemens, ABB)-ийг зогсоох шийдвэр гаргасан нь Өмнөд Африкийн (Eskom, RBMR Со компани) хувьд түүхэн боломж нээгджээ. Техникийн лицензийг Areva (Siemens-т зориулж), Westinghouse (ABB-д зориулж) эзэмшдэг.

Үрлэн түлштэй RBMR реакторын өрсөлдөх давуу талууд:

- Дотоод аюулгүй байдал (реакторын голомт хайлах аваар гарах боломжгүй)
- Бага талбай эзэлдэг
- Өндөр бүтээмж (> 44% АҮК)
- Реакторыг зогсоохгүй дахин цэнэглэх
- Байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөлөл бага
- Угсралтын хугацаа богино
- Угсралтын үеийн өртөг бага
- Бага овортой тул тараан байршуулах боломжтой
- Модуль нэмэх замаар хүчин чадлыг өсгөх боломжтой
- RBMR нь чадлаа сэлгэх горим(маневэрлэх)-д ажиллана
- RBMR-г өндөр температурын дулаан үйлдвэрлэхэд хэрэглэнэ
- RBMR нь ердийн ашиглалтын үед харьцангуй бага хэмжээний ус шаардагдана.
- RBMR реакторын системийг хэрэглэгчийн ойр байрлуулах боломжтой

Устөрөгчийн эрчим хүчийг Монголд хөгжүүлэх шаардлагаа:

1. Монгол улсад хүрээлэн буй орчинд харьцангуй цэвэр байгалийн хийн нөөцгүй;
2. Манай улсын эрчим хүч түүхий нүүрс шатаах ус халаах зуух, дулааны станцуудтай тул өвлийн улиралд нийслэл болон аймгийн төвүүдийн агаарын бохирдол ихтэй.

3. Монголын эрчим хүчний хангамжийн 90 гаруй хувь, экспортын ихэнх хувь нь нүүрс учраас манай улсад экологийн хохиролтой, үрэлгэн нүүрсний эдийн засаг үйлчилж байна.
4. Дэлхийн хөгжилтэй орнуудын түвшинд хүрэхийн тулд эдгээр улсуудад альтернатив эрчим хүч болоод байгаа экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн эрчим хүч буюу эдийг засагт ойрын ирээдүйд шилжих Шаардлагатай.
5. Манай улсад газрын тос боловсруулах үйлдвэр баригдахаар төлөвлөж байгаа тул, тэдгээрийн өндөр температуртай энергийн эх үүсвэрт өндөр температурын хийн реакторыг ашиглах шаардлагаа тулгарч байна.

Монгол улс өнөөдөр боловсруулаагүй нүүрс ашиглан эрчим хүч үйлдвэрлэж байгаа учир хотын агаарын бохирдолтын асуудал гамшгийн хэмжээнд яригдаж байна. Иймээс манай орны хүрэн нүүрсийг хийжүүлэх, шингэрүүлэх технологийг хөгжүүлэн гэр ахуй, үйлдвэрлэлийн хэрэгцээнд болон эрчим хүч үйлдвэрлэлд нүүрсний хийг, улмаар устөрөгчийг ашиглах нь агаарыг бохирдуулахгүй байхад онцгой ач холбогдолтой юм. 2030, 2050 онд эрчим хүчний төрөл бүрийн эх үүсвэрийн хөрөнгө оруулалт, өөрийн өртгийг 3.9-р хүснэгтэд харьцуулж үзүүлэв.

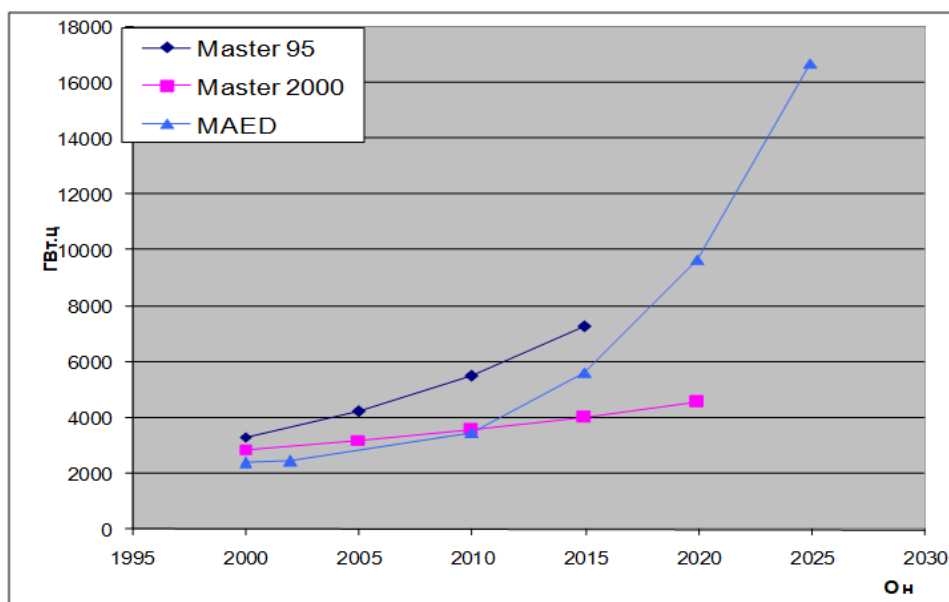
Хүснэгт 3.9. Эрчим хүчний төхөөрөмжүүдийн хөрөнгө оруулалт, өөрийн өртөг

Үйлдэрлэлийн технологи	Хувийн хөрөнгө оруулалт, долл/кВт			Үйлдвэрлэлийн өөрийн өртөг, цент/кВт·цаг		
	2005 он	2030 он	2050 он	2005 он	2030 он	2050 он
Түлшний элемент бүхий эрчим хүчний төхөөрөмж	3000-10000	500-1000	300-500	2-3(4-5)	2-3(4-5)	2-3(4-5)
Нүүрсний дулааны цахилгаан станц	1500-2500	1000-1150	-/-	-/-	3,5-4(8-12)	3,5-4(8-12)
Цөмийн цахилгаан станц	1500-2500	1500-2500	-/-	-/-	4-5(8-12)	4-5(8-12)
Биомасс	1000-2500	950-1900	900-1800	3,1-11	3-9,6	2,9-9,4
Геотермаль цахилгаан станц	1700-5700	1500-5000	1400-4900	3-9,7	3-8,7	2,9-8,4
Бага оврын усан цахилгаан станц	2500	2200	2000	5,6	5,2	4,9
Нарны фотоцахилгаан	3750-3850	1400-1500	1000-1100	17,8-54,2	7-32,5	6-29
Нарны термоцахилгаан	2000-2300	1700-1900	1600-1800	10,5-23	8,7-19	6-17,5
Эх дэлхийн салхин станц	900-1100	800-900	750-900	4,2-2,2	3,6-2,1	3,5-2,1
Далайн салхин станц	1500-2500	1500-1900	1400-1800	6,6-21,7	6,2-18,4	6-18

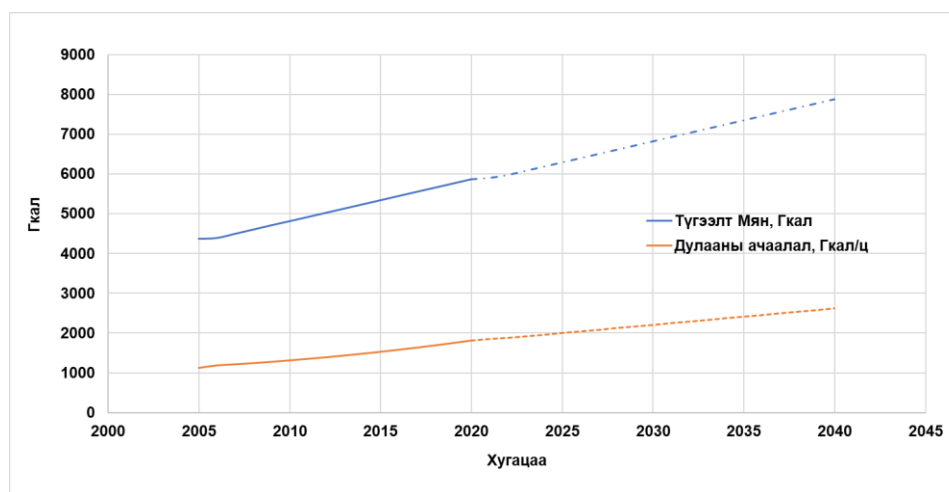
Цөмийн энерги ашиглан үйлдвэрлэх 1 кг устөрөгчийн үнэ 2,3 \$ байхад цахилгаан эрчим хүчний сүлжээний цахилгаан ашиглан усны электролизийн аргаар үйлдвэрлэх 1 кг устөрөгчийн үнэ 6-7 \$, ирээдүйд 4\$ болж буурах, нарны цахилгаан станц ашиглан үйлдвэрлэх 1 кг устөрөгчийн үнэ 10-30 \$, ирээдүйд 3-4 \$ болж буурах төлөвтэй байна.

Цахилгаан эрчим хүч ашиглан усыг электролизийн аргаар задалж устөрөгч үйлдвэрлэхээс нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэх нь хямд үнэтэй байна. Иймээс нүүрсний нөөцтэй манай улс өндөр температурын реактороос их температуртай гарах гелийн хийгээр нүүрсний уурын хувиргалт хийж устөрөгч үйлдвэрлэх боломжтой. Гэвч өнөөдөр энэ аргаар үйлдвэрлэсэн устөрөгч “ногоон устөрөгч” биш “хүрэн устөрөгч” байна.

МАЕD программаар тооцоолсон ТЭХС-ийн эрчим хүчний хэрэгцээг Мастер 95, Мастер 2000 төлөвлөгөөгөөр тооцоолсонтой харьцуулсан дүнг 3.26-р зурагт харуулав.



Зураг.3.26. Эрчим хүчний хэрэгцээний тооцоолол



Зураг 3.27. Улаанбаатар хотын дулааны ачаалалын өсөлтийн прогноз

Монгол улсын цахилгаан эрчим хүч, Улаанбаатар хотын дулаан хангамж, устөрөгчийн түлшний элементтэй автомашины хэрэгцээнд 2040 оны түвшинд шаардагдах устөрөгчийн хэмжээ, энэ хэрэгцээг хангах өндөр температурын гелийн хөргүүртэй реакторын тоо, хөрөнгө оруулалтыг тооцож үзье.

Монголын 2040 оны түвшинд шаардагдах цахилгаан эрчим хүчний хэрэгцээ $20 \cdot 10^9$ кВт·цаг гэж тооцоолж, үүний 1/3-ийг устөрөгчийн эрчим хүчээр хангана гэвэл $7 \cdot 10^9$ кВт·цаг орчим болно. Зарцуулагдах устөрөгчийн хэмжээ: $7 \cdot 10^9 \text{ кВт·цаг} / 33,5 \text{ кВт·цаг/кг} = 2,0 \cdot 10^8 \text{ кг} \approx 200$ мян.тонн

Улаанбаатар хотын дулаан хамгамжийн хэмжээ 2040 онд $8,0 \cdot 10^6$ Гкал гэж үзээд устөрөгчийг шууд шатааж Улаанбаатарын дулааныг хангахад:

$$8,0 \cdot 10^6 \text{ Гкал} \times 4,8 = 2,8 \cdot 10^7 \text{ ГЖ} / 120,6 \text{ МЖ/кг } H_2 \cdot 0,9 \approx 35 \text{ мян.тонн}$$

Автомашинд:

$$500 \text{ мянга} \approx 150 \text{ мян. тонн}$$

Ийнхүү манай улсын цахилгаан, дулааны эрчим хүч, автомашины түлшинд шаардагдах нийт 385 мян.тонн H_2 үйлдвэрлэхэд 4 ширхэг GT-MHR реактор Шаардлагатай бөгөөд ийм реакторын цахилгааны нэгж чадал 285 МВт, хувийн хөрөнгө оруулалт 1528 \$ /кВт(цах) гэвэл хөрөнгө оруулалтын хнэмжээ $4 \times 436 \cdot 10^6 \$ = 1,7 \cdot 10^9$ \$ болно. Устөрөгч үйлдвэрлэх үйлдвэрийн хөрөнгө оруулалтыг тооцвол ойролцоогоор $2 \cdot 10^9$ \$ болно.

Ийнхүү цөмийн энерги ашиглан нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэх нь ойрын ирээдүйд манай улсад түүхий нүүрсний хэрэглээг халж, устөрөгчийн түлшний элементийн технологи бүхий хүрээлэн буй орчинд зөвхөн ус ялгарах экологийн үнэмлэхүй цэвэр альтернатив устөрөгчийн эрчим хүч буюу устөрөгчийн эдийн засгийг хөгжүүлэх асуудлыг хөндөж тавив.

Устөрөгчийн эрчим хүчийг Монголд хөгжүүлэх үндэслэлээр дараах дүгнэлт гарав.

1. Монгол улс байгалийн хийн нөөцгүй тул ураны нөөцөөр ажиллах өндөр температурын реактор бүхий цөмийн станцаас цахилгаан эрчим хүчээ хангах, мөн түүнээс гарах өндөр температуртай гели хийг ашиглан нүүрсээ гүн боловсруулан устөрөгч үйлдвэрлэж, түүгээр зарим хот, аймаг, сумын төвүүдийн цахилгаан, дулааны эрчим хүчийг түлшний элементийн станцаар хангах, устөрөгчийн түлшний элементтэй автомашины устөрөгчийн станцыг цэнэглэх, газрын тос боловсруулах, хими, хүнсний

үйлдвэрийг хангах устөрөгчийн технологид суурилсан ногоон хөгжлийн бодлогыг дэвшүүлж тавив.

2. Цахилгаан, дулааны эрчим хүч, устөрөгч үйлдвэрлэх зорилготой зохион бүтээгдэж байгаа хийн хөргүүртэй GT-HMR, PBMR реакторуудаас сонгон хүрэн нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэж дулаан дамжуулах хоолойгоор дамжуулан Улаанбаатар хотын дулаан хангамжийг шийдэж, устөрөгчийн түлшний элемент бүхий автомашиныг цэнэглэх станцуудыг устөрөгчөөр хангаж, манай улсын ойрын ирээдүйн хөгжлийн үндэс болох эдийн засаг, экологи, энергийн хэрэгцээгээ цогцоор шийдвэрлэх боломж байгааг харуулав.
3. GT-HMR реактор бүхий станцад үйлдвэрлэх 1 кВт·цаг цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх өөрийн өртөг 1,3 цент байгаа нь ойрын болон дунд хугацаанд эрчим хүчний үнийг тогтвортой барих баталгаа болохын зэрэгцээ ийм 4 реактортой станц нь манай улсын устөрөгчийн хэрэгцээг 2040 хүртэл хангах бөгөөд түүний хөрөнгө оруулалт 1,7 тэрбум ам.доллар, 1 м3 устөрөгчийн өөрийн өртөг 5 центээс хэтрэхгүй болно.
4. Манай улсын эдийн засгийн хувьд алдагдалтай, экологийн хувьд хор хөнөөлтэй түүхий нүүрсний зах зээлийг импортын хараат бус, дэлхийн дулаарлын эх үүсвэр нүүрстөрөгч ялгаруулахгүй экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн түлшний элемент бүхий устөрөгчийн зах 2040 оноос шилжих нь хот суурин газрын агаарын бохирдол утааны асуудлыг бүрэн шийдвэрлэж, монгол хүн экологийн тэнцвэртэй аюулгүй орчинд амьдарч, ажиллах нөхцөлийг бүрдүүлнэ.

4 БҮЛЭГ. МОНГОЛД АШИГЛАХ СУДАЛГААНЫ РЕАКТОРЫН ДЭД БҮТЦИЙН СУДАЛГАА

4.1 Удиртгал

Өндөр хөгжилтэй орнуудын туршлагаас харахад Цөмийн Шинжлэх Ухаан, Технологийн Төв (ЦШУТТ) байгуулах нь тухайн улсад шинжлэх ухаан, технологи, үйлдвэрлэлийн салбарт үсрэнгүй хөгжлийг авчрах үндэс суурь болж чадсан байдаг. ЦШУТТ-ийн гол, үндсэн төхөөрөмжинд цөмийн судалгааны реактор, цөмийн хурдасгуур багтдаг.

Судалгааны реакторыг ашиглан эрүүл мэндийн үйлчилгээг сайжруулах, үйлдвэр болон хөдөө аж ахуйн бүтээмжийг өсгөх, цөмийн энергийг ашиглах боломж бололцоог бүрдүүлснээр тухайн улсын шинжлэх ухаан, боловсролын салбар хөгжих, хүн амын амьдралын түвшин сайжрах зэргээр хувь нэмрээ оруулдаг. Гэсэн хэдий ч шинээр судалгааны реактор барих шийдвэр гаргах нь тухайн улсаас олон улсын өмнө үүрэг хариуцлага хүлээх, судалгааны реакторт шаардлагатай бодлого боловсруулах, техникийн дэд бүтцийг хэрэгжүүлэхийг шаарддаг. Зохистой төлөвлөгдөж зохион байгуулагдсан, хянан баталгаажигдсан судалгааны реактор нь сургалт, судалгаа, цацраг идэвхт изотоп үйлдвэрлэл, түлш болон материалын судалгаа, эмнэлэг, аж үйлдвэрийн хэрэглээ гэх мэт олон салбарт чухал ач холбогдолтой.

ЦШУТТ-ийг шинээр байгуулахад шаардагдах дэд бүтэц нь уг төвд багтах судалгааны реакторын төрөл, цөмийн хурдасгуур, лабораториуд, тухайн улсад байх цөмийн дэд бүтцийн хөгжил, хүний болон техникийн нөөц бололцооноос хамаарч байдаг. Ялангуяа цөмийн судалгааны реакторт шаардагдах дэд бүтэц нь нилээд онцлог байдаг ба үүнтэй холбоотой асуудлуудыг шийдвэрлэх зорилгоор Олон Улсын Атомын Энергийн Агентлаг (ОУАЭА) судалгааны реакторыг барьж байгуулахад дөрвөн үе шатыг тогтоож, шаардагдах бэлтгэл ажлын талаарх зөвлөмжийг ойлгомжтой байдлаар гаргасан байдаг.

Энэхүү сэдвийн хүрээнд ОХУ-ын РОСАТОМ-ын шинжээчидтэй хамтран ажиллах, тэдний зүгээс өгсөн санал, зөвлөмжинд анализ хийх, РОСАТОМ-ын санал болгож буй ЦШУТТ-ийн саналыг судлах, РОСАТОМ-ын байгууламжуудыг очиж үзэх, туршлага судлах зэргээр шаардлагатай мэдээлэл, туршлагийг цуглуулж Монгол улсад тохиромжтой ЦШУТТ-ийг байгуулахад шаардагдах үндэслэлийг боловсруулсан болно.

Манай улс эрүүл мэнд, хөдөө аж ахуй гэх мэт бусад салбарт хэрэглэдэг бүх цацраг идэвхит изотопоо импортоор авдаг бөгөөд хэрэв Монголдоо судалгааны реактор (СР) ашиглах бол эдгээр изотопуудаа өөртөө үйлдвэрлэх боломж бүрдэхийн хажуугаар цөмийн

салбарын хүний нөөцийг дотооддоо бэлтгэх суурь баазтай болох юм. СР-той болох төсөл эхлүүлэхийн тулд хууль эрх зүйн тогтолцоо, хяналтын тогтолцоо, хүний нөөц үндэсний бодлого гэх мэт цөмийн дэд бүтцүүдээр үндэсний хэмжээнд дэмжигдэх ёстой. СР-ын дэд бүтцийн одоогийн төлөв байдал ба хөгжлийг Олон Улсын Атомын Энергийн Агентлаг (ОУАЭА)-ийн гаргасан замын зураглалын дагуу 3 үе шатад хуваах ба үе шат бүрд 19 асуудлыг (Хүснэгт 4.1) нарийвчлан хэлэлцдэг. Төслийг эхлүүлэхээс өмнө одоогийн нөхцөл байдлаа үнэлж, ОУАЭА-ийн ерөнхий шаардлагуудтай харьцуулж тэдгээрийн хоорондын зөрүүг тогтоон цаашид дутагдалтай байгаа асуудлуудаа тодорхой болгодог.

Бид Монголд анхны СР-ын төсөл эхлүүлэхэд зориулан дэд бүтцийн зарим асуудлын өөрийн үнэлгээг ОУАЭА-ийн гаргасан арга зүйн дагуу боловсруулав. Үр дүнд замын зураглалын 1-р үе шат дах одоогийн ерөнхий нөхцөл байдал ба цаашид анхааралдаа авах зарим дүгнэлтүүдийг гаргав. Зураг 4.1-т СР-ын замыг зураглалыг харуулсан ба СР-ын төслийн 3 шат ба тэдгээрт харгалзах асуудлуудыг 4.1-р хүснэгтэд дүрслэн харууллаа.

Хөгжлийн явц ба биелэлтэд өөрийн үнэлгээ хийж, одоогийн нөхцөл байдлыг тогтоох, цаашид анхаарах шаардлагыг тодорхойлох, дараагийн шат руу шилжихэд бэлэн эсэхийг тогтоох нь чухал байдаг. СР-ын дэд бүтцийн 19 асуудал бүр нь хоорондоо уялдаа холбоотой байдаг ба эдгээр бүр нь олон нөхцлөөс бүрдэх ба нөхцөл бүр нь тохирох нотлох баримтаар батлагдах ёстой. Нотлох баримт гэдэгт хууль, зарлиг, албан гэрээ, тайлан, уулзалтын тэмдэглэл, харилцаа холбоо, яриа ба илтгэл, хурал оролцох, зөвөлгөө, байгуулгын ба ажлын тодорхойлолт зэрэг багтана. Үр дүн нь дээрхийг нэгтгэн харуулсан тайлбар бүхий хүснэгт байна. Ингээд Монголын одоогийн нөхцөлд олдож буй баримт, мэдээлэлд тулгуурлан СР-ын дэд бүтцийн 5 асуудлын өөрийн үнэлгээний дүнг Хүснэгт 4.2-4.6-д харуулав.

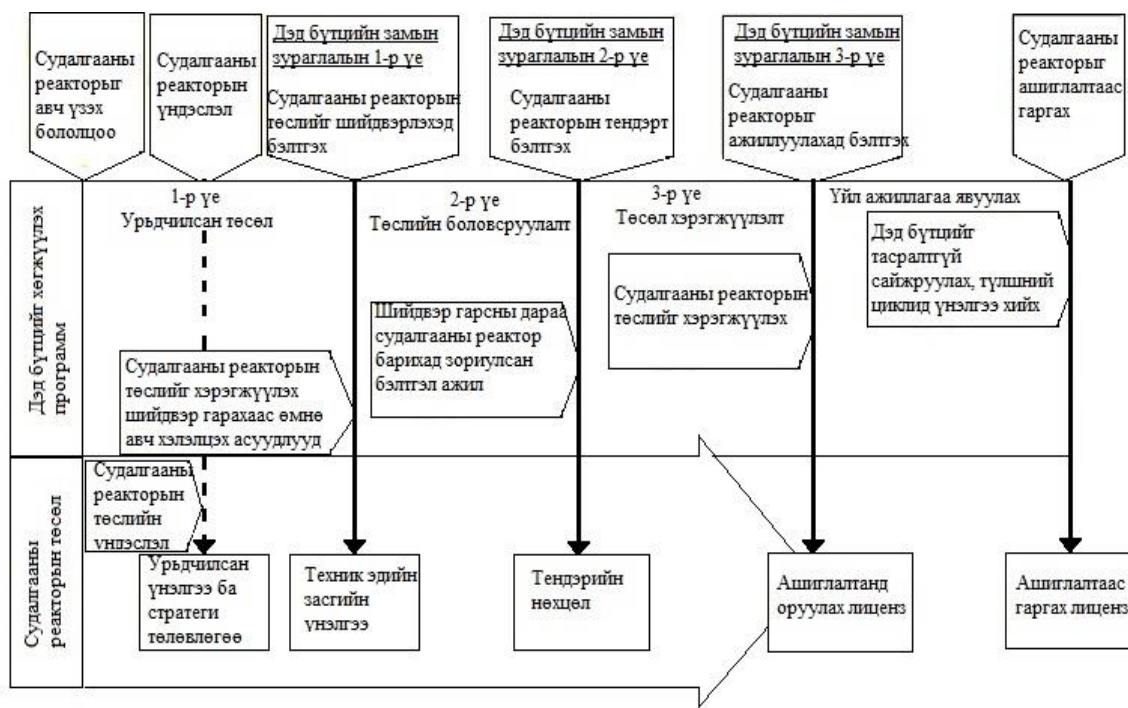
СР-д урт хугацааны үндэсний ба олон улсын үүрэг хариуцлага шаардлагатай. Тиймээс үндэсний байр суурийн асуудал СР-ын төсөл хэрэгжүүлэхэд маш чухал. Судалгааны реакторын төсөл хэрэгжүүлэх комисс (СРТХК) ба Үнэлгээ, маркетинг, төслийн баг (ҮМТБ)-ийг засгийн газрын дэмжлэгтэйгээр байгуулах ёстой.

Монгол Улсын цөмийн энергийн тухай хууль болон дүрэм журмууд голчлон цацраг идэвхит ашигт малтмал ба цацраг идэвхит изотопын зохицуулалтанд зориулагдсан байна. Иймд манай улс цөмийн төхөөрөмж барьж байгуулахын тулд цөмийн хууль эрхзүйн орчноо сайжруулж, тохирох нэмэлт өөрчлөлтүүдийг хийх шаардлагатай.

Манай улсын цөмийн болон цацрагийн хяналтын тогтолцоо 2015 онд өөрчлөгдөж, үндсэн хяналтын байгууллага нь мэргэжлийн хяналтын ерөнхий газрын харьяа цөмийн ба цацрагийн мэргэжлийн хяналтын хэлтэс болсон. Цөмийн ба цацрагийн мэргэжлийн

хяналтын хэлтэс нь цацраг идэвхит үүсгүүрийн зөвшөөрөл, хяналт, дүрэм журам боловсруулах хэрэгжүүлэх зэрэг үйл ажиллагааг гүйцэтгэж байна. Одоогоор манай улсад техникийн зөвлөх байгууллага байхгүй, мөн зөвшөөрөл олгох, хяналт шалгалт хийх, дүрэм журам хэрэгжүүлэх баримт бичгүүдэд цөмийн төхөөрөмжийн тухай заалт ороогүй байгаа ба цаашид зарим нэмэлт өөрчлөлт хийхдээ энэ тал дээр анхаарах хэрэгтэй.

Урьдчилсан судалгаанаас харахад манай улсад СР-ыг сургалт судалгаа, эрүүл мэнд, хөдөө аж ахуй гэх мэт салбаруудад хэрэглэх тооцоо гаргаж оролцогч байгууллагуудыг тогтоох ажил хийгдэж байгаа ба эцэслэн шийдэгдээгүй байна. Зарим тодорхой болсон оролцогч байгууллагууд тэдгээрийн хэрэгцээнд үндэслэн дагалдах төхөөрөмжүүдийн судалгаа хийгдэж байна. Урьдчилсан стратеги төлөвлөгөөг боловсруулахдаа тоног төхөөрөмж ба багаж хэрэгсэл, мэргэшсэн боловсон хүчин, төслийн хэрэгжилтийн явц зэргийг багтаасан тогтвортой ажиллагааны асуудлыг заавал авч үзэх хэрэгтэй.



Зураг 4.1. Судалгааны реакторын замын зураглал

Хүснэгт 4.1. Цөмийн дэд бүтцийн хөгжлийн асуудлууд

Дэд бүтцийн асуудлууд		Замын зураглалын I үе	Замын зураглалын II үе	Замын зураглалын III үе
1	Үндэсний байр суурь	Судалгааны реакторын төслийг хэрэгжүүлэх шийдвэр гарахаас өмнө хэрэгжүүлэх асуудлуудыг хангах нөхцөлүүд	Шийдвэр гарсны дараа судалгааны реактор барихад зориулан бэлтгэл ажлыг хангах нөхцөлүүд	Судалгааны реакторын төслийг хэрэгжилтийг хангах нөхцөлүүд
2	Цөмийн аюулгүй ажиллагаа			
3	Менежемент			
4	Хөрөнгө оруулалт ба санхүү			
5	Хууль эрх зүйн тогтолцоо			
6	Аюулгүй байдал			
7	Хяналтын тогтолцоо			
8	Цөмийн хамгаалалт			
9	Ашиглалт			
10	Хүний нөөцийн хөгжил			
11	Хэрэглэгч талуудын оролцоо			
12	Барих газрын судалгаа, сонголт, үнэлгээ			
13	Байгаль орчны хамгаалал			
14	Ослын бэлэн байдал, хариу арга хэмжээ			
15	Цөмийн аюулгүй байдал			
16	Цөмийн түлшний менежмент			
17	Цацраг идэвхт хаягдал			
18	Аж үйлдвэрийн оролцоо			
19	Худалдан авалт			

Хүснэгт 4.2. Үндэсний байр суурь

Нөхцөлүүд	Үнэлгээний статус	Ажиглалт	Цаашид анхаарлаа хандуулах
СРТХК ба ҮМТБ үүсгэн байгуулагдсан, бие бүрэлдэхүүнтэй, эрх мэдэлтэй, санхүүжилттэй байх	Маш их үйл ажиллагаа шаардлагатай.	СРТХК ба ҮМТБ-ийг байгуулах саналыг ЦФСТ-өөс ЦЕК-д гаргасан.	СР-ийн төсөл хэрэгжүүлэх ба үнэлгээ, маркетинг, төслийн багийг үүсгэх байгуулах
Аюулгүй ажиллагаа, аюулгүй байдал, хамгаалал ба үл дэлгэрүүлэх гэсэн ойлголтуудыг засгийн газрын юмуу түүний агентлагуудын түвшинд хүлээн зөвшөөрсөн байх	Бага зэргийн үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Цөмийн энергийн хууль батлагдсан. Зарим олон улсын гэрээ, конвенцэд нэгдсэн. Судалгааны ба эрчим хүчний гэх мэт цөмийн төхөөрөмжүүдтэй холбоотой аюулгүй байдал стандарт, дүрэм журамьг төслийн хугацаанд хөгжүүлэх хэрэгтэй.	Холбогдох байгуулгуудад аюулгүй ажиллагаа, аюулгүй байдал, хамгаалал зэргийн соёл ба менежементийн төлөвшүүлэх бодлого ба стратеги төлөвлөгөө
Олон улсын Цөмийн Аюулгүй Байдлын Дэглэмийг таньж ойлгон, түүнд оролцоход тавигдах шаардлагууд	Бага зэргийн үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Судалгааны реакторын аюулгүй байдлын дүрмийг батлуулах санал дэвшигдсэн.	Шаардлагатай олон улсын гэрээ конвенцуудад цаг тухайд нь нэгдэх
СР-ийн төсөл боловсруулахад урьдчилсан стратеги төлөвлөгөө шаардлагатай ба шаардагдах үүрэг даалгаврыг ойлгосон байх	Маш их үйл ажиллагаа шаардлагатай.	СР-ийн төсөл боловсруулах урьдчилсан стратеги төлөвлөгөө боловсруулахад ЦЕК-ийн дэмжлэг маш чухал.	ОУАЕА-ийн зөвөлгөөний дагуу судалгааны реакторын урьдчилсан стратеги төлөвлөгөө ба үндэслэлийг боловсруулах
Засгийн газар хоорондын шаардлагатай гэрээ хэлэлцээрүүд тодорхой болсон байх.	Бага зэргийн үйл ажиллагаа шаардлагатай.	ЦЕК ба РОСАТОМ-ийн хооронд судалгааны реакторын төслийн талаарх анхны санамж бичиг хийгдсэн.	Судалгааны реактор ба хүний нөөцтэй холбоотой гэрээ ба санамж бичгийг

ЦФСТ- Цөмийн физикийн судалгааны төв
ЦЭК- Цөмийн энергийн комисс

Хүснэгт 4.3. Хууль эрх зүйн тогтолцоо

Нөхцлүүд	Үнэлгээний статус	Ажиглалт	Цаашид анхаарлаа хандуулах
2.1. СРТХКийн тогтоосон олон улсын эрх зүйн баримт бичиг, тэдгээрийг засгийн газартай зөвшилцөж, төлөвлөн дагаж мөрдөх	Бага зэргийн үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Ихэнхи шаардлагатай гэрээ конвенцуудад нэгдсэн ба зарим нь засгийн газраар хэлэлцэх түвшинд явж байгаа. Судалгааны реакторын аюулгүй байдлын дүрмийг батлуулахаар ЦЭК-д хүсэлт гаргасан.	Дараах бичиг баримтуудыг батлуулахад анхаарлаа хандуулах: Цөмийн аюулгүй байдал, ашигласан түлшний болон цацраг идэвхит хаягдлын менежментын аюулгүй байдал, цөмийн материалын биет хамгаалалтын тухай конвенци, бага хэмжээний цөмийн материалын шинэчлэсэн протокол.
2.2. Засгийн газрын цөмийн тухай хууль тогтоомжийг батлан гаргах төлөвлөгөө.	Бага зэргийн үйл ажиллагаа шаардлагатай.	ЦЭК холбогдох байгууллагуудтай хамтран цөмийн энергийн хуулийг батлуулсан ба цөмийн болон цацрагийн аюулгүй байдал, хамгаалалтын бодлого ба дүрмийг боловсруулж байгаа.	Цаашид боловсруулах баримт бичгүүддээ цөмийн төхөөрөмжийн талаарх заалтуудыг тодорхой оруулж өгөх.
2.3. Одоогийн хууль тогтоомжид нэмэлт өөрчлөлт оруулах Засгийн газрын төлөвлөгөө.	Бага зэргийн үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Одоогийн хууль, дүрэм журмууд ихэвчлэн цацраг идэвхит ашигт малтмал ба цацраг идэвхит изотопод чиглэсэн хандлагатай байгаа тул зарим нэмэлт өөрчлөлт шаардлагатай.	Төслийн ажлийг эхлүүлэхээс өмнө зохих нэмэлт өөрчлөлтийг хийх хэрэгтэй.
2.4. Хууль эрх зүйн хүрээний талаар оролцогч талуудтай зөвлөлдөх.	Маш их үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Оролцогч талуудыг эцэслэн шийдээгүй байгаа ба тэдэнтэй Хууль эрх зүйн хүрээний талаар албан ёсоор зөвлөлдөөгүй байгаа.	Оролцогч талуудын эрх үүргийг хуулийн хүрээнд тодорхой болгох.

Хүснэгт 4.4 Хяналтын тогтолцоо

Нөхцлүүд	Үнэлгээний статус	Ажиглалт	Цаашид анхаарлаа хандуулах
3.1. СРТХК-ын хяналтын тогтолцооны хэрэгцээ шаардлага болоод хамрах хүрээг судлаж харгалзан тусгай төлөвлөгөө боловсруулах хэрэгтэй.	Бага зэргийн үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Одоогоор техникийн зөвлөх байгуулга байхгүй, мөн зөвшөөрөл олгох, хяналт шалгалт, дүрэм журам хэрэгжүүлэх баримт бичгүүдэд цөмийн төхөөрөмжийн тухай заалт бараг ороогүй.	Хяналтын байгууллагаас гадна техникийн талаас дэмжигч байгууллага байгуулах шаарлагатай. Хяналтын байгуулгынхаа хүчин чадал боломж бололцоо, үйл ажиллагааны чиглэл, хариуцлагыг тодорхой болгож хүчин чадлаа нэмэгдүүлэхэд анхаарах.

Хүснэгт 4.5. Судалгааны реакторын ашиглалт

Нөхцөлүүд	Үнэлгээний статус	Ажиглалт	Цаашид анхаарлаа хандуулах
4.1. Оролцогч талуудыг тогтоох, зөвшилцөх.	Бага зэргийн үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Оролцогч талуудын тоймлон гаргасан боловч нарийвчласан жагсаалт гараагүй.	Цаашид оролцогч талуудыг эцэслэн шийдэж, тэдэнтэй албан ёсоор зөвшилцөх.
4.2. Судалгааны реакторын хэрэглээний цар хүрээг судласан байх.	Бага зэргийн үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Одоогийн шаардлагадаа үндэслэн боломжит хэрэглээг урьдчилсан байдлаар тодорхойлсон.	Судалгааны реакторын хэрэгцээгээ хангах боломжит чадалдаа үнэлгээ хийх.
4.3. Судалгааны реакторын ашиглалтанд оролцогч талуудын байнгын оролцоог тодорхойлох.	Маш их үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Энэ талаар одоогоор зөвлөлдөөгүй байна.	4.3. Судалгааны реакторын ашиглалтанд оролцогч талуудын байнгын оролцоог тодорхойлох.
4.4. Бүсийн нутгийн болон олон улсын хамтын ажиллагааг авч үзэх	Маш их үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Одоогийн байдлаар бусад улс орнуудтай ашиглалтын асуудлаар хийсэн тодорхой гэрээ хэлэлцээр байхгүй.	Цаашид судалгааны реакторын ашиглалтын талаар бүс нутгийн ба олон улсын түвшиний боломжит оролцогчдыг судлах.
4.5. Урьдчилсан төслийн үнэлгээний тайланг (PPAR) СРТХК-д танилцуулах.	Маш их үйл ажиллагаа шаардлагатай	Урьдчилсан үнэлгээ боловсруулж байгаа ч СРТХКхараахан байгуулагдаагүй байгаа.	СРТХК-ийг даруйхан байгуулах шаардлагатай.
4.6. Судалгааны реактор ба түүний дагалдах төхөөрөмжүүдийн үндэслэл нь СРТХК-оор хүлээн зөвшөөрөгдөх	Маш их үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Дагалдах төхөөрөмжүүдийг хэрэглэнд үндэслэн судлаж байна.	Оролцогчдын хэрэгцээг тусгах хэрэгтэй ба хэрэгцээг эцэслэсний дараа тэдгээрийн техникийн үзүүлэлтийг тодорхой болгох хэрэгтэй.
4.7. Тогтвортой ашиглалтын талаар судалгааны реакторт зориулсан урьдчилсан стратеги төлөвлөгөөнд (PSP) тусгайлан заах	Маш их үйл ажиллагаа шаардлагатай	Одоогоор тодорхой авч үзсэн зүйл байхгүй. Урьдчилсан стратеги төлөвлөгөө нь тоног төхөөрөмж ба багаж хэрэгсэл, мэргэшсэн боловсон хүчин, зэргийг багтаасан байна.	Төхөөрөмжийн тогтвортой ажиллагааны талаар урьдчилсан стратеги төлөвлөгөөнд заавал авч үзэх хэрэгтэй.

2009 онд батлагдсан “Цөмийн энергийн тухай хууль”-д Улсын хэмжээнд цацраг идэвхт ашигт малтмал болон цөмийн энерги ашиглах, цөмийн технологи нэвтрүүлэх, судалгааг хөгжүүлэх, цөмийн болон цацрагийн аюулгүй байдлыг хангах үйл ажиллагааг уялдуулан зохицуулах үүрэг бүхий Цөмийн Энергийн Комисс (ЦЭК) ажиллана гэж заасан байдаг. Мөн УИХ-ын 2009/45 тоот “Монгол Улсын төрөөс цацраг идэвхт ашигт малтмал болон цөмийн энергийн талаар баримтлах бодлого”-д “Цацраг идэвхт ашигт малтмалын эрэл, хайгуул, олборлолт, боловсруулалт, цөмийн эрчим хүчний эх үүсвэр, өндөр технологийн судалгаа явуулах, мэдээллийн нэгдсэн тогтолцоог бүрдүүлэх, мэргэжилтнийг дадлагажуулан сургах үйл ажиллагааг хариуцах Цөмийн судалгаа, технологийн үндэсний хүрээлэнг байгуулж ажиллуулна” гэж заасан байдаг.

Хүснэгт 4.6. Хүний нөөцийн хөгжил

Нөхцлүүд	Үнэлгээний статус	Ажиглалт	Цаашид анхаарлаа хандуулах
5.1. Үндэсний хэмжээнд шаардагдах хүний нөөцийг хөгжүүлэх төлөвлөгөөтэй байх.	Бага зэргийн үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Одоогийн байдлаар улсын хэмжээний нэгдсэн бодлого байхгүй цөмийн чиглэлээр үйл ажиллагаа явуулдаг байгууллагууд тус тусдаа өөрсдийн хүний нөөц дээр тулгуурлах ажиллаж байна.	ЦФСТ цөмийн инженерчлэлийн мэргэжилтнүүдээ мэргэшүүлэх тал дээрх анхаарч цогц сургалтын хөтөлбөрийг хэрэгжүүлэх, мөн цаашид хэрэгцээ нэмэгдэнэ гэдгийг анхаарах.
5.2. СР-ын төсөлд дэмжлэг үзүүлэхэд шаардагдах үндэсний хэмжээний мэдлэг, ур чадварыг ҮМТБ-аас тогтоож, СРТХК-ээр хүлээн зөвшөөрүүлсэн байх.	Маш их үйл ажиллагаа шаардлагатай.	Одоо үйл ажиллагаа явуулж байгаа байгууллагуудынхаа хүний нөөцөд хийсэн нэгдсэн үнэлгээ хийх.	Үе шат бүрд шаардагдах хүний нөөцийн үнэлгээг гаргаж, оролцогч байгууллагуудтайгаа хамтран улсын хэмжээнд нэгдсэн бодлогоор хүний нөөцдөө анхаарч, борлуулагч талтай хамтран сургалт хөтөлбөр зохион байгуулах.

2018 оны 02-р сард Москва хотод хуралдсан Монгол Улс, ОХУ-ын Засгийн газар хоорондын Худалдаа, эдийн засаг, шинжлэх ухаан, техникийн хамтын ажиллагааны комиссын 21 дүгээр хуралдааны үеэр Монгол Улсын ЦЭК, ОХУ-ын атомын энергийн “Росатом” улсын корпораци хооронд Монгол Улсад Цөмийн Шинжлэх Ухаан, Технологийн Төв (ЦШУТТ) байгуулахад хамтран ажиллах тухай харилцан ойлголцлын санамж бичиг байгуулсан.

Тус санамж бичиг нь Монгол Улсад ЦШУТТ байгуулах тухай замын зураглал, төсөл боловсруулах үндсэн зорилготой ба тус төвийн урьдчилсан шаардлага, зориулалт, холбогдох объектуудын бүтэц, зохион байгуулалт болон Монгол Улсын хэрэгцээнд нийцэх тоног төхөөрөмж, шарах байгууламжийг тодорхойлоход Росатом корпорацийн зүгээс дэмжлэг үзүүлэхэд чиглэсэн болно.

2019 оны 07-р сард ЦЭК-ын Ажлын албанаас МУИС-д 1/408 тоот албан бичгээр хандаж Монгол Улсад ЦШУТТ байгуулахдаа МУИС-ийн харьяа Цөмийн физикийн судалгааны төвийг өргөтгөн хөгжүүлэх хэлбэрээр зохион байгуулах нь зохистой тул санамж бичгийн хэрэгжилтийг хангах хүрээнд “ЦШУТТ байгуулах төсөл боловсруулах хэлэлцээр”-г Оросын талаас Росатом корпорацийн охин компани болох “Русатом Оверсиз” ХХК, Монголын талаас Монгол Улсын Их Сургууль зурж, холбогдох бэлтгэл ажлыг хариуцах нь зүйтэй хэмээн хоёр тал үзэж байгаагаа илэрхийлсэн болно.

4.2 ЦШУТТ-ийн ерөнхий төсөөлөл

2019 оны 09-р сард МУИС дээр ЦШУТТ байгуулах төслийн бэлтгэл ажилтай холбоотой судалгааны багийг үүсгэн байгуулсан. Уг судалгааны баг ЦШУТТ-ийн ерөнхий төсөөллийг дараах байдлаар гаргасан.

ОХУ-ын атомын энергийн “Росатом” улсын корпорацийн зүгээс доорх (Зураг 4.1) байдлаар ерөнхий төсөөллийг ирүүлсэн байдаг. Үүнд төвийн үндсэн төхөөрөмж болох цөмийн судалгааны реактор, түүнийг дагалдах нэмэлт лабораториуд, төрөл бүрийн бараа бүтээгдэхүүнийг цацрагаар боловсруулах байгууламж, цөмийн сургалт, судалгааны төв, цөмийн эмчилгээ, оношлогооны төв зэргүүд багтаж байна. Эдгээр байгууламж, тоног төхөөрөмж, лабораториудын техникийн үзүүлэлт, хүчин чадал нь Монгол улсын хэрэгцээ шаардлагаас хамаарч эцсийн байдлаар тодорхойлогдоно.



Зураг 4.1. ЦШУТТ-ийн ерөнхий бүдүүвч зураг

4.3 ЦШУТТ-ийн суурь төхөөрөмж, лабораториуд

4.3.1 Цөмийн судалгааны реактор

ЦШУТТ-ийн үндсэн төхөөрөмж нь цөмийн судалгааны реактор байна. Судалгааны реактор нь эрчим хүч үйлдвэрлэхгүй, зөвхөн нейтрон цацрагийн үүсгүүр байдлаар ашиглагдана. Судалгааны реакторыг барьж байгуулах хугацааг 5-8 жил гэж үздэг. Энэ хугацаанд зөвхөн байгууламжийг барихаас гадна уг төхөөрөмжийг ажиллуулах боловсон хүчнийг мөн бэлтгэх шаардлагатай болдог.

Судалгааны реакторын төрөл, чадал, дагалдах лабораториуд нь тухайн улсын хэрэгцээгээр тодорхойлогддог. Монгол улсад судалгааны реакторыг ашиглах дараах хэрэгцээ шаардлага байна. Үүнд (ач холбогдлоор нь эрэмблэв):

1. Хорт хавдарын оношлогоо, эмчилгээнд зориулсан эмнэлэгт ашиглагдах цацраг идэвхт изотопийг дотооддоо үйлдвэрлэх, цаашдаа аж үйлдвэр, барилгийн салбарт ашиглагдах цацраг идэвхт изотопийг үйлдвэрлэх;
2. Монгол улсын хилээр орох, гарах төрөл бүрийн бараа бүтээгдэхүүн, ялангуяа уул уурхайтай холбоотой эрдэс материалын дээж, бүтээгдэхүүн, Монгол улсын нутаг дэвсгэрээс олдсон эртний олдвор, эд өлгийн зүйлүүд, төрөл бүрийн хүнсний бүтээгдэхүүн, барилгийн материал зэрэгт тэдгээрт агуулагдах химийн элементийн шинжилгээг хийх, тоон болон чанарын анализ хийх, насжилтыг тодорхойлох, мөн чанарын судалгаа хийж хуурамж, жинхэнэ эсэхийг тодорхойлох, хортой эсэхэд дүгнэлт гаргах;
3. Монгол улс ирээдүйд цөмийн энергийг ашиглах төлөвлөгөөтэй байдаг. Цөмийн энерги, түүнийг эрчим хүчинд хувиргахад олон тооны мэргэшсэн боловсон хүчин шаардлагатай болно. Эдгээрийг бүгдийг гадаадад бэлтгэх боломжгүй учраас цөмийн судалгаан реакторыг ашиглан дотооддоо шаардлагатай боловсон хүчнээ бэлтгэх, мөн олон нийтэд цөмийн технологийн тухай танилцуулах;
4. Арилжааны зорилгоор төлбөрт үйлчилгээг үзүүлэх, үүнд үнэт чулууг нейтроноор шарж өнгийг өөрчлөх, цахиурыг шарж хагас дамжуулагч үйлдвэрлэх, төрөл бүрийн үнэт зүйлс, дээжинд үл эвдэх байдлаар зургийг нь авч, найрлагийг тодорхойлж өгөх, өөр улсын захиалгаар төрөл бүрийн дээжийг шарах зэрэг үйлчилгээнүүд байж болно;
5. Дотоодын судалгааны байгууллагуудад үйлчилгээ үзүүлэх, үүнд дотоодын судалгааны байгууллагуудын захиалгаар төрөл бүрийн дээжинд анализ хийж өгөх, ялангуяа хүрээлэн буй орчны бохирдол, хөдөө аж ахуйн салбарын дээж, бүтээгдэхүүнийг нейтроноор шарж, анализ хийж өгөх.

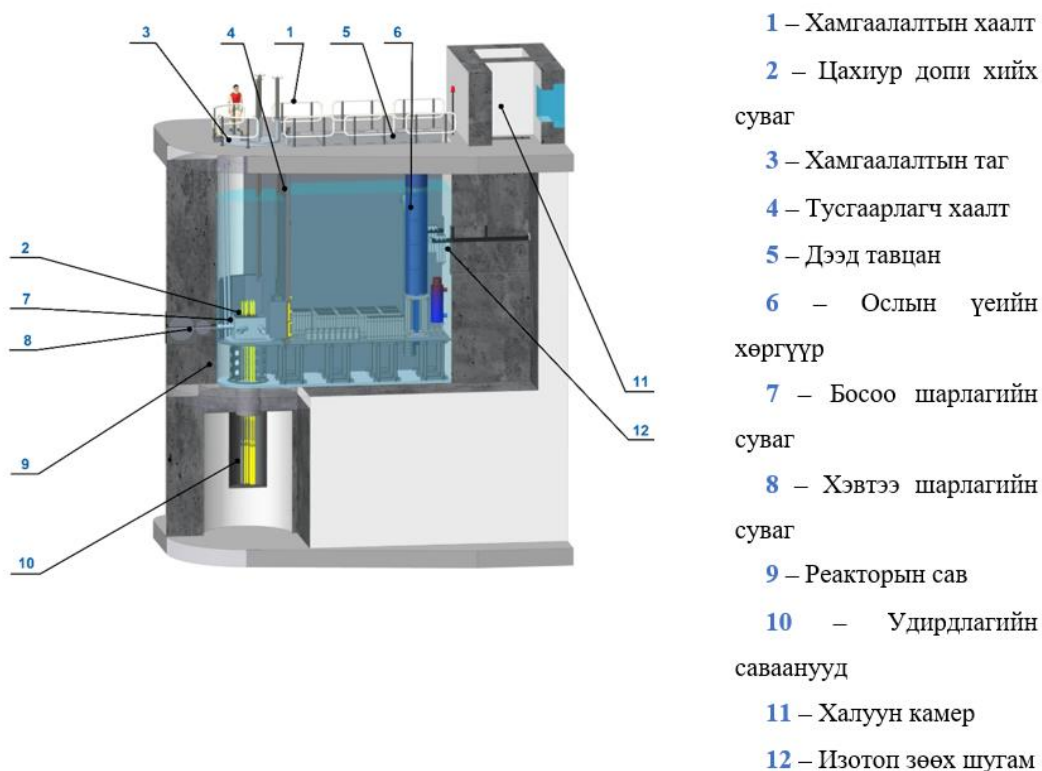
Судалгааны реакторыг ашиглаж хийх төрөл бүрийн судалгаа, шинжилгээнүүдийг Хүснэгт 4.7-д харуулав.

Хүснэгт 4.7. Судалгааны реакторыг ашиглах боломжууд

Хэрэглээ	Хэрэглэгчид
Эрдэс материал, түүхий эд, геологийн дээжинд анализ хийх, элементийн агуулгыг тодорхойлох	Уул уурхай, аж үйлдвэрийн чиглэлийн төрийн байгууллагууд Эрдэс баялагтай холбоотой төрийн байгууллагууд Эрчим хүчний чиглэлийн төрийн байгууллагууд
Хүрээлэн буй орчны бохирдлыг судлах, хяналт тавих	Алт, уран гэх мэт түүхий эд олборлодог уул уурхайн компаниуд Байгаль орчин, хүрээлэн буй орчин, аялал жуулчлалын чиглэлээр ажилладаг төрийн байгууллагууд Цаг уур, хүрээлэн буй орчны чиглэлийн төрийн агентлагууд

	Хувийн компаниуд Хөдөө аж ахуй, газар тариалангийн чиглэлийн компаниуд
Шүүхийн шинжилгээний анализ	Их сургууль, хүрээлэнгүүд Цэрэг, цагдаа ба хамгаалалтын чиглэлийн байгууллагууд Эрүүл мэндийн чиглэлийн төрийн байгууллагууд
Бохирдол/хор судлалын анализ	Их сургууль, хүрээлэнгүүд Эрүүл мэндийн чиглэлийн төрийн байгууллагууд Цэрэг, цагдаа ба хамгаалалтын чиглэлийн байгууллагууд Цаг уур, хүрээлэн буй орчны чиглэлийн төрийн агентлагууд Хувийн компаниуд
Геохронологи	Уул уурхай, аж үйлдвэрийн чиглэлийн төрийн байгууллагууд Эрдэс баялагтай холбоотой төрийн байгууллагууд Урлаг, соёлын чиглэлийн байгууллагууд
Эмнэлэгийн оношлогоо, эмчилгээ	Эрүүл мэндийн чиглэлийн төрийн байгууллагууд Их сургууль, хүрээлэнгүүд Эмнэлэгүүд
Хөдөө аж ахуй, газар тариалангийн салбарын хэрэглээ	Боловсрол, соёл, шинжлэх ухааны чиглэлийн төрийн байгууллагууд Хүнс, хөдөө аж ахуй, хөнгөн үйлдвэрлэлийн чиглэлийн төрийн байгууллагууд Их сургууль, хүрээлэнгүүд

Дээр дурдагдсан хэрэгцээ шаардлага, ашиглах хэрэглэгчидийн хэрэгцээг нийтэд хангаж байхын тулд дараах техникийн үзүүлэлт бүхий судалгааны реактор байх шаардлагатай. Уг цөмийн судалгааны реактор нь ОХУ-д үйлдвэрлэгддэг VVR-KN төрлийн түлш бүхий 5 МВт хүртлэх чадлаар ажиллах боломжтой олон зорилгоор ашиглаж болох усан санд байрлуулсан төхөөрөмж байна. Реакторын голомтын өндөр 600 мм, бага баяжуулсан уран түлштэй, дулааны нейтроны урсгал $(0.3-1.5) \times 10^{14}$ н/(см²с) байх хэвтээ ба босоо 12 шарлагийн сувагтай байна (Зураг 4.2).



Зураг 4.2. Реакторын ерөнхий бүдүүвч зураг

4.4 Олон зориулалтаар ашиглах шарлагийн төв

Төрөл бүрийн бүтээгдэхүүнийг ионжуулагч цацрагаар шарж боловсруулах технологи дэлхий дахинд түгээмэл хэрэглэгддэг. Электрон цацраг, гамма цацраг хоёрыг ихэвчлэн ашиглаж байгаа нь олон улсын туршлагаас харагддаг. Хүснэгт 4.8-д Монгол улсад ашиглах боломжуудийг харуулав. Эдгээр дотроос төрөл бүрийн хүнсний ногоо, ялангуяа намар хурааж зооринд хадгалж жилийн турш хэрэглэдэг хүнсний ногоонууд тухайлбал төмс, лууван, байцаа, манжин зэрэг Монголчуудын түгээмэл хэрэглэдэг ногоонуудыг шарж хортон шавьж, хорхойнуудыг устгах, ингэснээр хадгалах хугацаа нь илүү урт болж дараа жилийн шинэ ургацын ногоо хүртэл хэрэглэх боломж бүрдэнэ. Мөн хэрэглээний болон үрийн улаан буудайг шарснаар хадгалалтын хугацаа уртсаж, хаягдал ихээхэн буурах боломжтой.

Мах, махан бүтээгдэхүүнийг савласны дараагаар цацрагаар шарж төрөл бүрийн шавьж, шимигч хорхой, бактерийг устгах боломж бүрдэнэ. Хадгалалтын хугацаа илүү урт болох бөгөөд гадагшаа экспортлоход эрүүл ахуйн хувьд асуудалгүй болно. АНУ зэрэг өндөр хөгжилтэй орнууд гаднаас импортоор орж ирж буй төрөл бүрийн махан бүтээгдэхүүнийг заавал шарсан байхыг шаарддаг. Эмнэлэгийн салбарт ариутгал хийх, нэг удаагийн эмнэлэгийн хэрэгслүүдийг цацрагаар шарж ариутгах боломж бүрдэнэ.

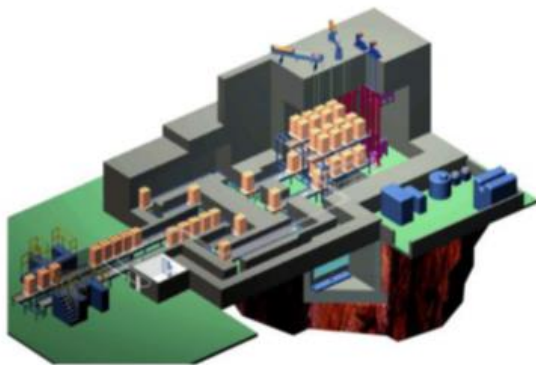
Төрөл бүрийн дэвшилтэн материалыг дотооддоо үйлдвэрлэх хэрэгцээ шаардлага өндөр байдаг. Сэргээгдэх эрчим хүч, нарны хавтан ба салхин сэнсний гадаргууг нүүрстөрөгчийн мяндасаар бүрж цацрагийн боловсруулалт хийж илүү бат бөх болгох, ингэснээр ашиглалтын хугацаа уртасна. Төрөл бүрийн биополимер материалуудыг ионжуулагч цацрагаар шарж үйлдвэрлэх ба эдгээр нь бусад ердийн материалуудтай харьцуулахад ус өөртөө шингээн авч удаан хугацаанд барих чадвартай болдог.

Эдгээрийг төрөл бүрийн тариалалтанд бордоо байдлаар ашиглах бөгөөд бороо багатай жилд сайн ургац авах боломжийг бүрдүүлнэ. Мөн эдгээр материалуудыг ус цэвэршүүлэх, устөрөгчөөр ажиллах төрөл бүрийн төхөөрөмжүүдэд ашиглах боломжтой байдаг. Өөр нэг чухал хэрэглээ бол хүнд фракцтай газрын тосыг боловсруулахад ашиглах боломж байдаг. Монгол улс ирээдүйд газрын тосыг олборлохоор төлөвлөж байгаа ба Монголын газрын тос хүнд фракц ихтэй байдаг.

Цацрагаар боловсруулалт хийснээр газрын тосонд цаашид боловсруулалт хийхэд илүү хялбар болдог. Ялангуяа хүхрийн агуулга буурах, исэлдэх процесс илүү хурдтай явагдах боломж бүрддэг.

 <p style="text-align: center;">Төрөл бүрийн жимс, хүнсний ногоо</p> <ul style="list-style-type: none"> • Хадгалах хугацаа уртсах • Хүнсний ногоо ургаж муудахаас сэргийлэх • Шавьж, хорхойг арилгах • Сэрүүн нөхцөлд боловсруулалт хийгдэх тул амтанд өөрчлөлт орохгүй 	<p style="text-align: center;">Цацрагаар шарж ариутгаснаар эмнэлэгийн төрөл бүрийн материалд байх бүх микро- организм, бактерийг утгадаг</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Боловсруулах хурд өндөр, зардал бага • Эмнэлэгийн нөхцөлд 250 төрлийн бүтээгдэхүүнийг ариутгах шаардлагтай байдаг
 <p style="text-align: center;">Мах, махан бүтээгдэхү үн</p> <ul style="list-style-type: none"> • Хадгалах хугацаа уртсах • Шинэ, хөлдүү, лаазалсан бүтээгдэхүүнийг боловсруулах боломжтой • Савлаж бэлтгэсэн бүтээгдэхүүнийг боловсруулснаар нян бактер үржихгүй болгох 	<p style="text-align: center;">Материал ын шинж чанарыг өөрчлөх</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Төрөл бүрийн резинэн бүтээгдэхүүнийг шарж боловсруулснаар бат бөх чанар нь сайжрах, ингэснээр илүү нимгэн болгож үйлдвэрлэх • Хаягдлыг бууруулах

Дээрх хэрэгцээ, шаардлагийг бүрэн хангасан байхын тулд уг шарлагийн төвд хоёр төрлийн төхөөрөмж, тээвэрлэх шугам, автоматжуулалтын систем, зориулалтын байр, хадгалах өрөө, шарлагийн хяналтын систем, аюулгүй үйл ажиллагааны систем зэрэг байх шаардлагтай болно. Үндсэн хоёр төхөөрөмж нь өндөр идэвхтэй Со-60 үүсгүүр, өндөр чадлын электроны хурдасгуур байна (Зураг 4.3).



а) Со-60 үүсгүүр



б) Электроны хурдасгуур

Зураг 4.3. Үндсэн хоёр төхөөрөмж нь өндөр идэвхтэй Со-60 үүсгүүр, өндөр чадлын электроны хурдасгуур

4.5 Сургалт, судалгааны төв

Сургалт, судалгааны төвд судалгааны ажилтан, судлаачдын баг байрлана. Сургалтын анги танхим, сургалтын төрөл бүрийн төхөөрөмжүүд байрлана. Мөн төрөл лабораторууд, номын сан байрлах боломжтой. Шинжлэх ухааны тооцооллын төв (Scientific computation center) энд байрлана. Төрөл бүрийн лиценз бүхий тооцооллын кодууд, 1000 CPU core тооцооллын сервер, 100,000 GPU core бүхий тооцооллын сервер, их хэмжээний мэдээллийг удаан хугацаанд найдвартай хадгалах дата сервер тус тус байхаар төсөөлж байна.

Цөмийн реакторын симулятор байна. Бага, дунд, өндөр чадлын эрчим хүчний удирдлага, үйл ажиллагааг таниулах, судлаачидыг сургах иж бүрэн симулятор байна. Судлаачид, суралцагчид цөмийн судалгааны реактор, шарлагийн төхөөрөмжүүдийг ашиглаж төрөл бүрийн туршилт, лабораторийн ажлыг хийж гүйцэтгэх боломж бүрдэнэ.

4.6 Нейтрон, реакторын физикийн лаборатори

Цөмийн эрчим хүчний реактор, судалгааны реактор, цөмийн эрчим хүчний инженерчлэл, цөмийн түлшний цикл, дулааны гидравликийн судалгаа, нейтрон цацрагийн хэрэглээ, аюулгүй ажиллагаа зэрэг цогц судалгаа хийх иж бүрэн лаборатори байна. Дээрх сургалт судалгааны төвд байрлах тооцооллын төвийг ашиглаж төрөл тооцооллыг хийнэ. Цөмийн судалгааны реактор дээр төрөл бүрийн туршилтыг хийж гүйцэтгэх бөгөөд шаардлагатай тохиолдолд бусад лабораториудтай хамтарч салбар дундын судалгааг хийнэ. Реакторын аюулгүй байдал, дулааны гидравликийн туршилт, судалгааг хийх лабораторитой байна. Цөмийн түлшний цикл, цөмийн материалын судалгааг хийх радиохимийн иж бүрэн лаборатори мөн байна.

4.7 Нейтрон идэвхжилийн анализийн лаборатори

Уул уурхай, хөдөө аж ахуй, хими, биологийн дээж, импортоор ирж буй төрөл бүрийн бүтээгдэхүүнд элементийн анализыг өндөр түвшинд хийнэ. Судалгааны реакторт дээжийг шарах бөгөөд үүний дараа өндөр нарийвчлалтай, мэдрэх чадвар сайтай багажаар хэмжилт хийнэ. Уг лабораторид реактороос дээжийг шилжүүлэх, дамжуулах “раббит” систем, гамма спектрометрийн иж бүрдэл систем, дээж солигч, дээжинд төрөл бүрийн боловсруулалт хийх багаж төхөөрөмжүүд, бусад нэмэлт төхөөрөмжүүд байх шаардлагатай.

4.8 Радиобиологийн лаборатори

Монгол улсын хувьд хөдөө аж ахуйн гаралтай түүхий эд, бүтээгдэхүүнийг халдваргүйжүүлэх, ариутгах, хадгалалтын хугацааг уртасгах шаардлага их байдаг. Үүнийг ионжуулагч цацрагаар шарж боловсруулалт хийх замаар хийж гүйцэтгэх боломжтой. 3.2-д дурдагдсан шарлагийн төхөөрөмжийг ашиглан төрөл бүрийн бүтээгдэхүүн, дээжинд радиобиологийн судалгааг энэхүү лабораторид хийнэ.

Радиобиологийн лаборатори нь физик болон биологийн салбар дундын эрдэм шинжилгээний судалгаа, сургалтын үйл ажиллагаа гүйцэтгэнэ. Ялангуяа хэтийн төлөвдөө цацрагийн технологийг ашиглах, хэрэглээнд нэвтрүүлэх зорилт бүхий одоогийн орчин нөхцөлд энэ чиглэлийн судалгааны ажлыг хөгжүүлэх нь зайлшгүй юм. Уг лабораторид дараах үндсэн ажлуудыг гүйцэтгэнэ:

- Цацрагын хими, физик, биологийн үйлчлэл (цахилгаан соронзон цацрагын шинж чанар, фотоэлектрон эффект, шингээгч материалын, энергийн түгэлт, энергийн тун, тун тогтоох/гооцоолох, усны радиохими, чөлөөт радикал үүсэх урвал,/гооцоолол, цацрагаас үүдэлтэй химийн урвалууд)
- Молекул, эсийн түвшний радиобиологи (ДНХ-ийн гэмтэл, засварлагдах механизм, цацрагын нөлөө, эсийн гэмтэл ба үхэл, амьд үлдэх чадвар, эсийн цикл, мембран ба митохондрийн гэмтэл/засварлалт/амьдрах чадвар)
- Хавдарын радиобиологи ба хүрээлэн буй орчин (хавдарын эсийн өсөлт, хавдар үүсэх/хөгжих магадлал, хавдарыг дарангуйлах/өсөлтийг зогсоох, радио-эмчилгээ)
- Эдэд үзүүлэх нөлөө (бичил биетэн, ургамал ба хүн амьтны эс, эдэд үзүүлэх гэмтэл/чөлөөт радикалын гаралтай эсийн гэмтэл/илрэл, үрэвсэл, цитокин гэх мэт бодисын солилооны урвалуудад үзүүлэх цацрагын нөлөө)

Энэ чиглэлийг судалгаа гүйцэтгэх лаборатори нь өвөрмөц багаж тоног төхөөрөмж шаардахгүй. Үндсэн багаж, тоног төхөөрөмжүүд нь байгалийн шинжлэх ухааны лабораториудтай ижил байна. Үүнд төрөл бүрийн микроскоп, центрифуг, автоклав,

фотомертрууд, нам температурын хөлдөөгч, биореактор, протейн үүсгэгч, DNA үүсгэгч зэрэг багаж төхөөрөмжүүд байх шаардлагатай.

4.9 Материал судлалын лаборатори

Шинэ материалын судалгаа хийх, тэдгээрийг гаргаж авах, нано хэмжээст материалын судалгаа хийх, эрдэс минералын судалгаа хийх, үл эвдэх сорилын шинжилгээ хийх, төрөл бүрийн материалын судалгаа хийх иж бүрэн лаборатори байна. Уг лаборатори нь цөмийн судалгааны реактор, шарлагийн төвийг ашиглан дэвшилтэд материалын судалгааг хийж биологи, хөдөө аж ахуй зэрэг төрөл бүрийн салбарт ашиглах боломжтой шинэ материалиудыг гаргаж авна. Дээрх хоёр үндсэн төхөөрөмжөөс гадна үл эвдэх сорилд ашиглагдах хийх төрөл бүрийн (нейтрон, рентгений) зургийн камер, электрон микроскоп, цөмийн соронзон резонансын спектрометр, энергийн дисперсийн спектрометр, рентген дифракцийн спектрометр, хий ба шингэний масс спектрометр, материалд төрөл бүрийн боловсруулалт хийх төхөөрөмжүүд, татах шүүгээ, центерфуг, индукцийн болон шатаах зуух зэрэг нэмэлт багаж төхөөрөмжүүдээр тоноглогдсон байна.

4.10 Радиохимийн лаборатори

Эмнэлэг болон аж үйлдвэрийн зориулалттай төрөл бүрийн цацраг идэвхт изотоп үйлдвэрлэхэд энэхүү лаборатори ашиглагдана. Ердийн химийн лабораторид байх бүх багаж төхөөрөмжүүд байх ба үүн дээр нэмэгдээд цацраг идэвхт бодистой ажиллах нэмэлт төхөөрөмжүүд байх шаардлагатай. Төрөл бүрийн урвалж бодисийг хадгалах, тэдгээртэй ажиллах агааржуулалтын систем, аюулгүй ажиллагаатай холбоотой нэмэлт төхөөрөмжүүд мөн байна.

Тохиромжтой дээжийг бэлтгэж судалгааны реакторт шарж, үүний дараа цацраг идэвхтэй болсон дээжийг уг лабораторид зохих аюулгүй ажиллагааг хангасан шугамаар зөөвөрлөж оруулна. Үүний дараа дээж/бодис-т радиохимийн боловсруулалтыг “халуун камер” ашиглаж хийнэ. Хэд хэдэн тооны “халуун камер” байх шаардлагатай ба уг камер нь радиохимийн лабораторийн үндсэн төхөөрөмж болдог.

Цацраг идэвхт дээж/бодис-т боловсруулалт хийснээ дараа ялгаж авсан изотопуудыг зориулалтын саванд хийж савлах шугам байх шаардлагатай. Мөн боловсруулалт хийсний дараа үүсэх цацраг идэвхт хаягдалд зохих боловсруулалт хийх, савлах, хадгалах шугам байх шаардлагатай.

4.11 Хүрээлэн буй орчны судалгааны лаборатори

Улаанбаатар хотын агаар, хөрсний бохирдол жил бүр ихэссээр байгаа бөгөөд энэ нь ханиад, хатгаа, уушгины хавдар, мөн бусад эд эрхтэний хавдарууд үүсэх энгийн шалгаан

болж байна. Агаарын бохирдол буюу утаанд поли цикло ароматик нүүрсустөрөгч (polycyclic aromatic hydrocarbons-PAHs)-д их хэмжээгээр агуулагддаг бөгөөд эдгээр органик нэгдлүүд нь амьсгалын замаар хүний биед орж эсийн түвшинд генийг өөрчлөн хавдар үүсгэх эх үүсвэр болдог ба тухайн хүний бие организаас хамаарч хавдарт өвчнөөр өвчлөх магадлалыг ихэсгэж өгдөг. Хөрсний бохирдолд хими ба биологийн гаралтай бохирдлууд ордог.

Ионжуулагч цацрагийг ашиглан агаар, хөрсний бохирдол, хаягдал ус, лаг зэрэг хүрээлэн буй орчны бохирдлыг бууруулах, археологийн олдвор, барилга байгууламж, модон эдлэлийн насжилтыг тодорхойлох, хадгалах, хамгаалахад ашиглах боломжтой байдаг.

Уг лабораторид 3.2-д дурдагдсан шарлагийн төхөөрөмжийг ашиглан хүрээлэн буй орчинтой холбоотой төрөл бүрийн судалгаа, шинжилгээг хийнэ. Рентген флуоресценци, рентген дифрактометр, хийн хроматографи-масс спектрометр, өндөр мэдрэмжит шингэний хроматографи, ионы хроматографи, индукцийн холбоот плазм-масс спектрометр, цөмийн соронзон резонансын спектрометр зэрэг үндсэн багаж төхөөрөмжүүд, мөн ердийн хими, биологийг лабораторид байдаг багаж, төхөөрөмжүүд байх шаардлагатай.

4.12 Эмнэлгийн оношилгоо, эмчилгээний зориулалттай цацраг идэвхт изотопын хэрэгцээ болон геологи, уул уурхай, хүрээлэн буй орчин, хүнс, материал судлал, цөмийн найрлагын судалгаанд цөмийн идэвхжлийн шинжилгээ хийх хэрэгцээ, шаардлага

4.12.1 Эмнэлэгийн оношилгоо, эмчилгээний зориулалттай цацраг идэвхт изотопын хэрэгцээ ба үйлдвэрлэх боломж

Монгол улсад 2018 оны байдлаар нэг жилд 12 Ки идэвх бүхий Тс-99m-н генератор, 1 Ки идэвх бүхий I-131 изотопийг эмчилгээ, оношлогоонд зориулж 100% гаднаас импортоор оруулж ирдэг. Бусад төрлийн изотопийн хэрэглээ харьцангуй бага байдаг. Энэ нь эдгээр изотопуудыг оруулж ирэх, ашиглахад шаардагдах тоног төхөөрөмж зэргүүдтэй холбоотой байдаг.

Монгол улсад зөвхөн нэг гамма камер (СПЕКТ-СТ) ажилладаг бөгөөд түүнд ашиглагдах үндсэн изотоп болох Тс-99m-н жилийн нийт хэрэгцээ нь 12 Ки болно. Гэтэл 1 сая хүн амд ноогдох эмчилгээ, оношлогооны гамма камер (СПЕКТ-СТ гэх мэт) – ийн дэлхийн дундаж тоо 2.2 байдаг. 2025 онд Монгол улсын хүн ам 3.5 саяд хүрнэ гэж үзвэл (2017 оны НҮБ-н тайлан) тэр үед $3.5 \times 2.2 \approx 8$ ширхэг гамма камер ажиллаж байна гэж үзэж

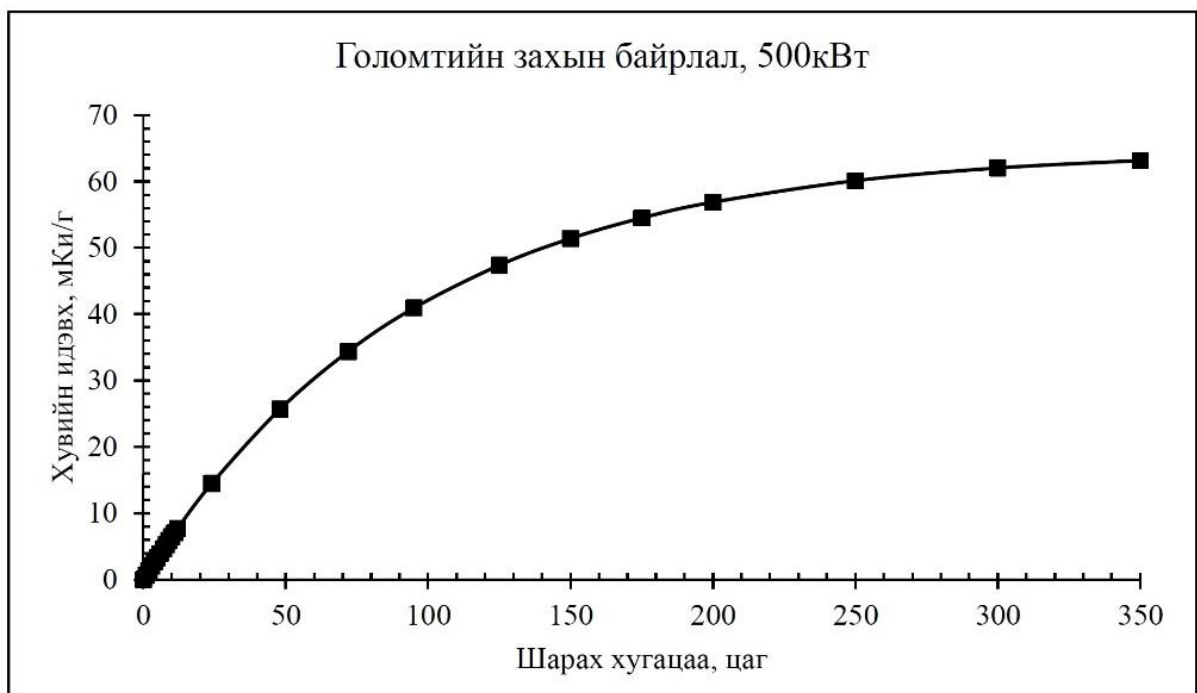
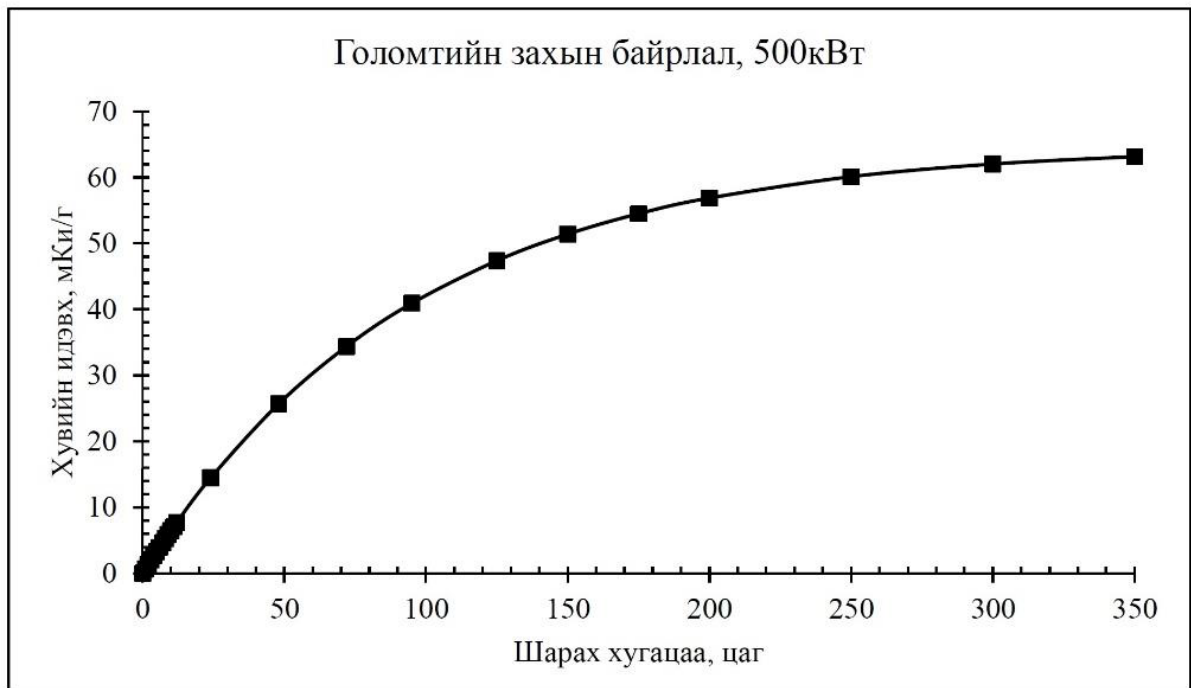
болно. Сүүлийн жилүүдэд Монголд хорт хавдарын өвчлөлтийн хэмжээ эрс нэмэгдэж байгаа ба түүний оношлогоо, эмчилгээнд нилээд хөрөнгө оруулалт хийгдэж байгаа тул дээрх тоо нилээд бодиттой тоо байх боломжтой.

Дээрх мэдээллээс харахад 2025 онд нэг жилд 100 Ки Тс-99m изотопийн хэрэгцээ бий болохоор байна. Энэхүү изотопийг долоо хоног бүрээр үйлдвэрлэх шаардлагатай байдаг. Иймд 2 Ки/(долоо хоног) хэмжээгээр үйлдвэрлэх шаардлага гарна.

Монгол улсад түгээмэл хэрэглэгддэг дээрх изотопуудыг цөмийн судалгааны реакторт ихэвчлэн үйлдвэрлэдэг. ЦШУТТ байгуулагдах тохиолдолд зайлшгүй нэг судалгааны реактор баригдах ба түүний чадал ямар байхаас хамаарч хөрөнгө оруулалт, аюулгүй ажиллагааны байдал өөр өөр болно. Одоогийн байдлаар 500 кВт хүртэл чадалтай бага чадлын реактор, 5 МВт хүртэл чадалтай дунд чадлын реактор гэсэн хоёр сонголт байгаа ба алийг нь сонгох нь Монгол улсын нийт хэрэгцээ, шаардлагаас хамаарна.

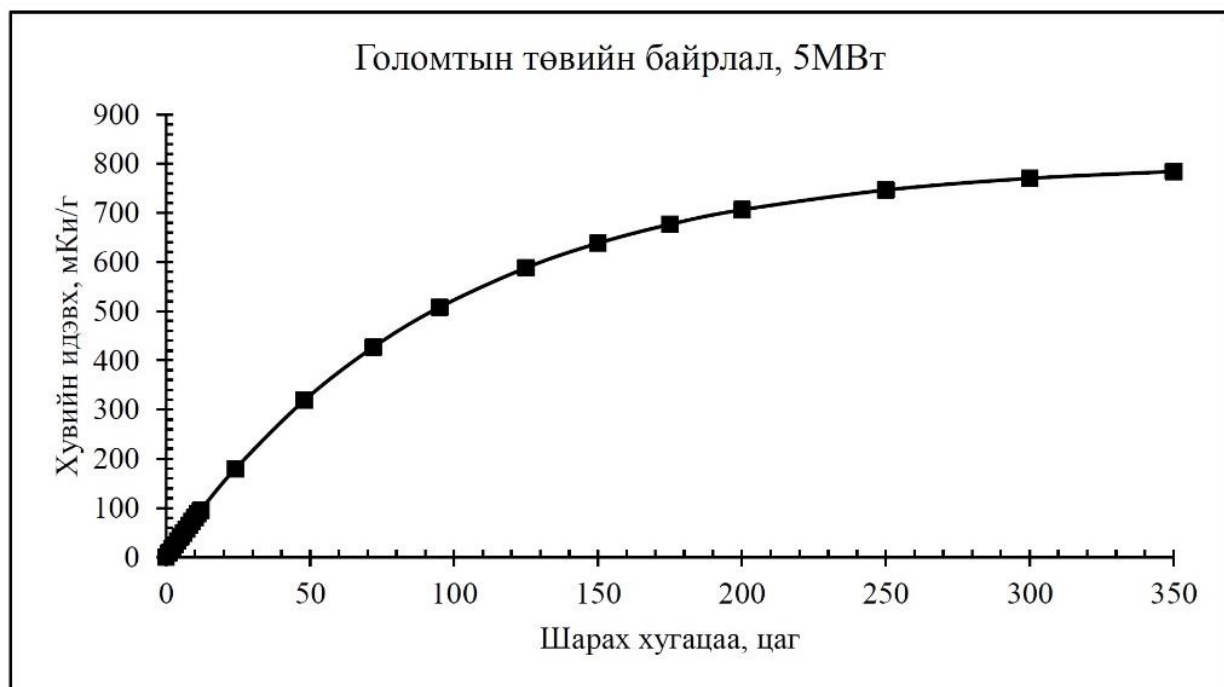
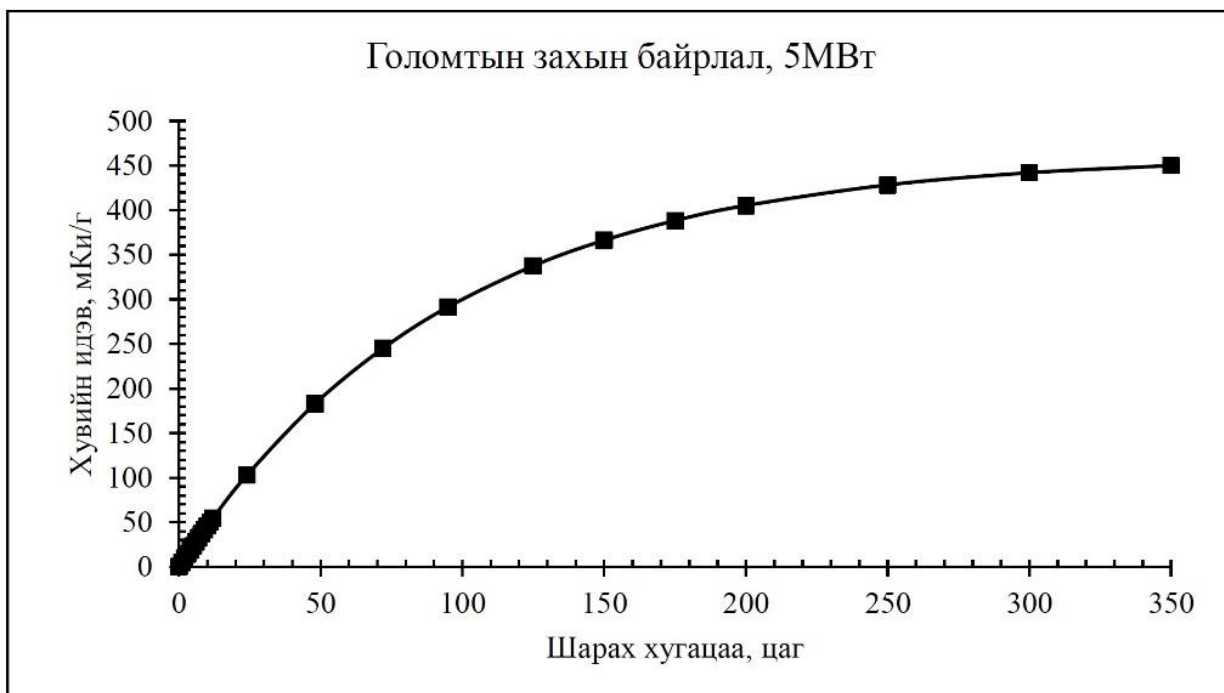
Энэхүү ажлаар дээрх чадалтай реакторууд дээр 2 Ки/(долоо хоног) идэвхтэй Тс-99m изотопийг үйлдвэрлэх боломжийг авч үзлээ. Ийм хэмжээний идэвхтэй изотопийг үйлдвэрлэх боломж байвал бусад төрлийн бага идэвхтэй изотопуудыг үйлдвэрлэх боломж хангалттай бий болно. Тс-99m изотоп нь Мо-99 изотопоос үүсдэг ба Мо-99-г үйлдвэрлэх 2 төрлийн технологи түгээмэл ашиглагддаг. Ураныг судалгааны реакторт шарж, хуваагдлын бүтээгдхүүнээс Мо-99-ийг ялгаж авдаг. Ихэнх өндөр чадалтай реакторуудад энэ аргыг ашигладаг ба гол дутагдал нь их хэмжээний цацраг идэвхт хаягдал үүсэх, хуваагдлын бүтээгдхүүнтэй ажиллахад өндөр цацраг идэвхтэй байх зэрэг асуудлууд байдаг. Нөгөө арга нь байгалийн эсвэл баяжуулсан Мо-г судалгааны реактор дээр шарж идэвхжүүлэх замаар Мо-99-г үйлдвэрлэдэг. Энэ арга нь цацраг идэвхт хаягдал маш бага үүсдэг сайн талтай, харин үйлдвэрлэх хэмжээ нь өмнөх аргатай харьцуулахад бага байдаг тул зөвхөн дотоодын хэрэгцээг хангахад хүрэлцэхүйц байдаг. Монгол улсын хувьд сүүлийн арга нь илүү тохиромжтой. Байгалийн Мо-ний асар их нөөцтэй, өөрөөр хэлбэл түүхий эд маш хямдхан бэлэн байдаг гэж үзэж болно.

Вьетнам улсад ОХУ-ын технологиор баригдсан 500 кВт чадалтай судалгааны реактор ажилладаг. Энэ реакторын голомтын төвд, голомтын захад зөвхөн нэг байрлал дээр байгалийн Мо-г оруулж шарахад ямар хэмжээний идэвхтэй Мо-99 үүсэх боломжтой тооцоог Японы Атомын Энергийн Агентлагийг хөгжүүлсэн MVP/GMVP II реакторын физикийн кодыг JENDL 3.3 гэсэн нейтроны мэдээллийн сангийн хамтаар ашиглаж хийсэн.



Зураг-4.4 500 кВт чадалтай реакторт байгалийн Мо шарахад Мо-99 үүсэх хэмжээ

РОСАТОМ-с гадагш экспортод гаргадаг дунд чадлын судалгааны реакторт IRT-4M маркийн түлшийг ашигладаг. Энэхүү түлшээр ажилладаг 5 МВт чадалтай реакторт байгалийн Мо-г шарахад үүсэх Мо-99-ийн хэмжээг мөн тооцож үзэв.



Зураг-4.5. 5 МВт чадалтай реакторт байгалийн Мо шарахад Мо-99 үүсэх хэмжээ

4.13 Судалгааны реактор дээр нейтрон идэвхжлийн анализ хийх боломж

Монгол орны эдийн засагт уул уурхайн салбар зонхилох үүрэг гүйцэтгэдэг. 2017 оны эхний 10 сарын байдлаар улсын нийт экспортын 78,8 хувийг уул уурхайн бүтээгдэхүүний экспорт эзэлсэн байна. Манай оронд алт, зэс, вольфрам, мөнгө, молибден, төмөр зэрэг металлууд болон хайлуур жонш, нүүрс олборлож, уран, газрын ховор элементүүдийн нөөцийг тогтоох хайгуулын ажлууд хийгдэж, олборлох бэлтгэл ажлуудыг тодорхой шат

дарааллаар явуулж байна. Манайх шиг газрын доорх баялаг ихтэй улсын хувьд эдгээр баялгаа зөв үнэлэх, зөв тодорхойлох, шинжлэх шаардлага зайлшгүй тулгардаг. Ашигт малтмал, ус, агаар, ургамал, хүнс, эмнэлэг, барилгын гэх зэрэг төрөл бүрийн сорьц дахь макро болон микро элементүүд болон газрын ховор элементүүдийн агуулгыг тодорхойлж, шинжлэхэд дараах аргуудыг дэлхий дахинаа өргөн ашиглаж байна.

Үүнд: Энергийн болон долгионы дисперсийн рентген флуоресценцийн шинжилгээ, Атом шингээлтийн спектрометр, Нейтрон идэвхжилийн анализ, Индукцийн холбоост плазмын спектрометр г.м. Үүнээс, нейтрон идэвхжилийн анализ (НИА) нь бодисын бүрэлдэхүүний тоон болон чанарын шинжилгээнд өргөн ашиглагддаг, мэдрэх чадвар сайн, олон элементийг нэгэн зэрэг тодорхойлдог, өндөр нарийвчлалтай, хатуу, шингэн, хийн төлөвт буй сорьцыг эвдэхгүйгээр судалж болдог зэрэг бусад аналитик аргуудаас онцлох давуу талуудтай. Энэ аргад бай-бодисыг нейтроноор шарж идэвхжүүлээд үүссэн цацраг идэвхт цөмүүдээс гарах тодорхой энерги, эрчимтэй гамма-цацрагийг бүртгэх замаар шинжилгээ хийдэг. Цөмийн урвалаар үүссэн цацраг идэвхт цөмөөс гарах гамма-цацрагаар тухайн сорьц дахь элементийг таньж болдог. Манай орны хувьд 1972 онд хүдэр дэх зэсийн агууламжийг 14 МэВ энергитэй нейтроноор идэвхжүүлэн тодорхойлсон нь идэвхжилийн анализын анхны ажил байсан байна [1].

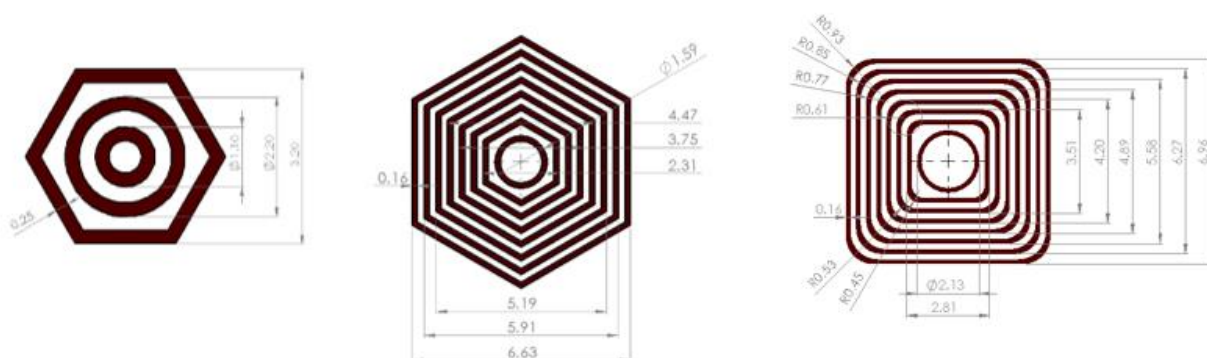
НИА-ыг ашиглахад хамгийн тохиромжтой нейтроны эх үүсвэр бол судалгааны реактор. Хэдэн арван кВт ба түүнээс дээш чадалтай ямар ч реакторыг НИА-д ашиглах боломжтой. Түүнчлэн, НИА нь ихэнх судалгааны реакторын стратеги төлөвлөлтийн гол бүрэлдэхүүн хэсэг болдог. Судалгааны реактор дээр НИА-ыг геологи, уул уурхайн төрөл бүрийн сорьц дахь олон элементийн агуулгыг нэгэн зэрэг тодорхойлох, анагаах ухаан, биологи, хөдөө аж ахуй, хүнсний бүтээгдэхүүнд элементийн шинжилгээ хийх, хүрээлэн буй орчны бохирдлыг хянах, археологи болон зарим олдворын насыг тогтоох, элементийн маш бага агууламжийг тодорхойлох зэрэг шинжлэх ухаан, технологийн бүхий л салбарт хэрэглэж байна.

Ашигт малтмалын нөөц ихтэй манай орны хувьд геологи, уул уурхайн сорьц дахь химийн элементийн агуулгыг шуурхай, нарийн тодорхойлоход өргөн ашиглагддаг судалгааны реактортай болох асуудал сүүлийн жилүүдэд тодорхой түвшинд нилээд эрчимтэй яригдаж байна. Ер нь судалгааны реакторыг зөвхөн НИА төдийгүй, реакторын мэргэжилтэн бэлтгэх, нейтронон дүрс-зураг гаргаж авах, цацраг идэвхт изотоп үйлдвэрлэх, силикон-допинг хийх, үнэт ба хагас үнэт чулууг нейтроноор шарж өнгө хувиргах, бодисын бүтцийн судалгаа хийх зэрэг олон чиглэлээр ашигладаг. Тиймээс манай улсын эрэлт

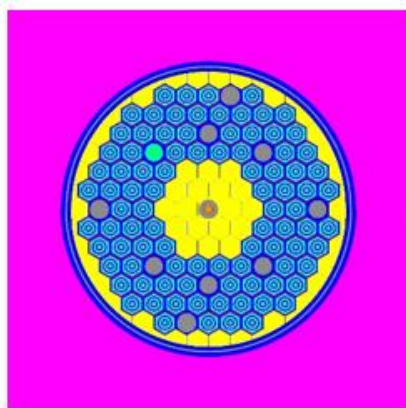
хэрэгцээнд нийцсэн, үнэ өртөг нь боломжийн, ашиглалтын зардал хэт өндөр биш, ажиллуулахад харьцангуй хялбар судалгааны реакторыг сонгох шаардлагатай болж байна.

4.13.1 Монголд тохиромжтой судалгааны реакторын нейтроник тооцоолол

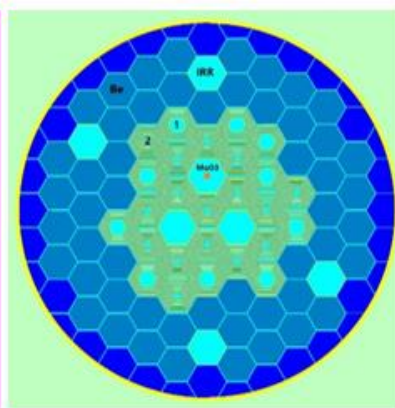
Энд Монте-Карло аргад үндэслэсэн Японы Атомын Энергийн Агентлагт хөгжүүлсэн MVP/GMVP-II код-ийг нейтроноор явагдах урвалын өгөгдлийн сан JENDL-3.3-ийн хамтаар ашиглан ОХУ-н Росатом" корпорациас үйлдвэрлэн гаргадаг судалгааны реакторын гурван төрлийн түлшний эвлүүлэгээс (VVR-M2, IRT-4M, VVR-KN) (Зураг 4.6) бүрдсэн 3 голомтыг байгуулж (Зураг 4.6-4.9) нейтроникийн тооцооллыг хийсэн.



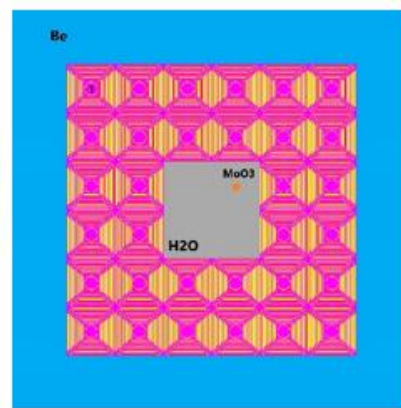
Зураг. 4.6. Түлшний эвлүүлэг, VVR-M2, VVR-KN AND IRT-4M



Зураг. 4.7. VVR-M2 голомт



Зураг. 4.8 VVR-KN голомт



Зураг. 4.9. IRT-4M голомт

Хүснэгт 4.9. ОХУ-ын түлшний багцуудын техникийн үзүүлэлт.

Параметр	VVR-M2	IRT-4M 6/8	VVR-KN 5/8
Түлшний өндөр, мм	600	600	600
Түлш	UO ₂ -AL	UO ₂ -AL	UO ₂ -Al
Түлшний баяжуулалт, U-235, %	19.7	19.7	19.7
Түлшний ассемблей дахь U-235-ийн масс	50	268.8/300	196/245
Түлшний нягт	2.5	3	3

Түлшний бүрээс материал	SAV-1	SAV-1	SAV-1
Эдгээр түлшийг ашиглаж байгаа орнууд	DRR (Вьетнам), BRR (Унгар), WWR-M Kiev, Neutron source (Украин)	IRT-1(Ливи) IRT-Sofia(Болгар) VR-1, LVR-15(Чех), WWR-СМ Tashkent(Узбек)	KS VVR-K (Казахстан)

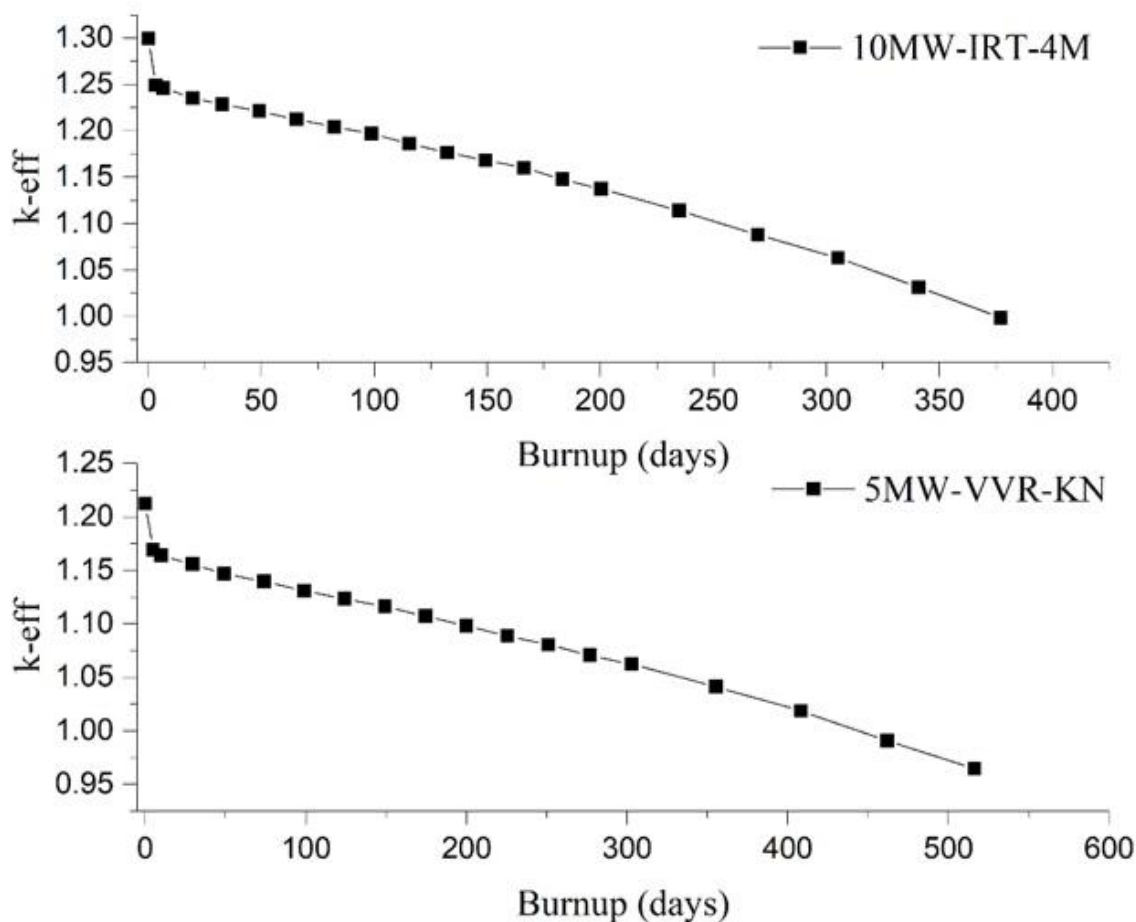
Реакторын голомтын дулааны нейтроны урсгалыг голомтын төв болон дээр байгуулж хамгийн их утгыг хүснэгт 4.10-д харуулав.

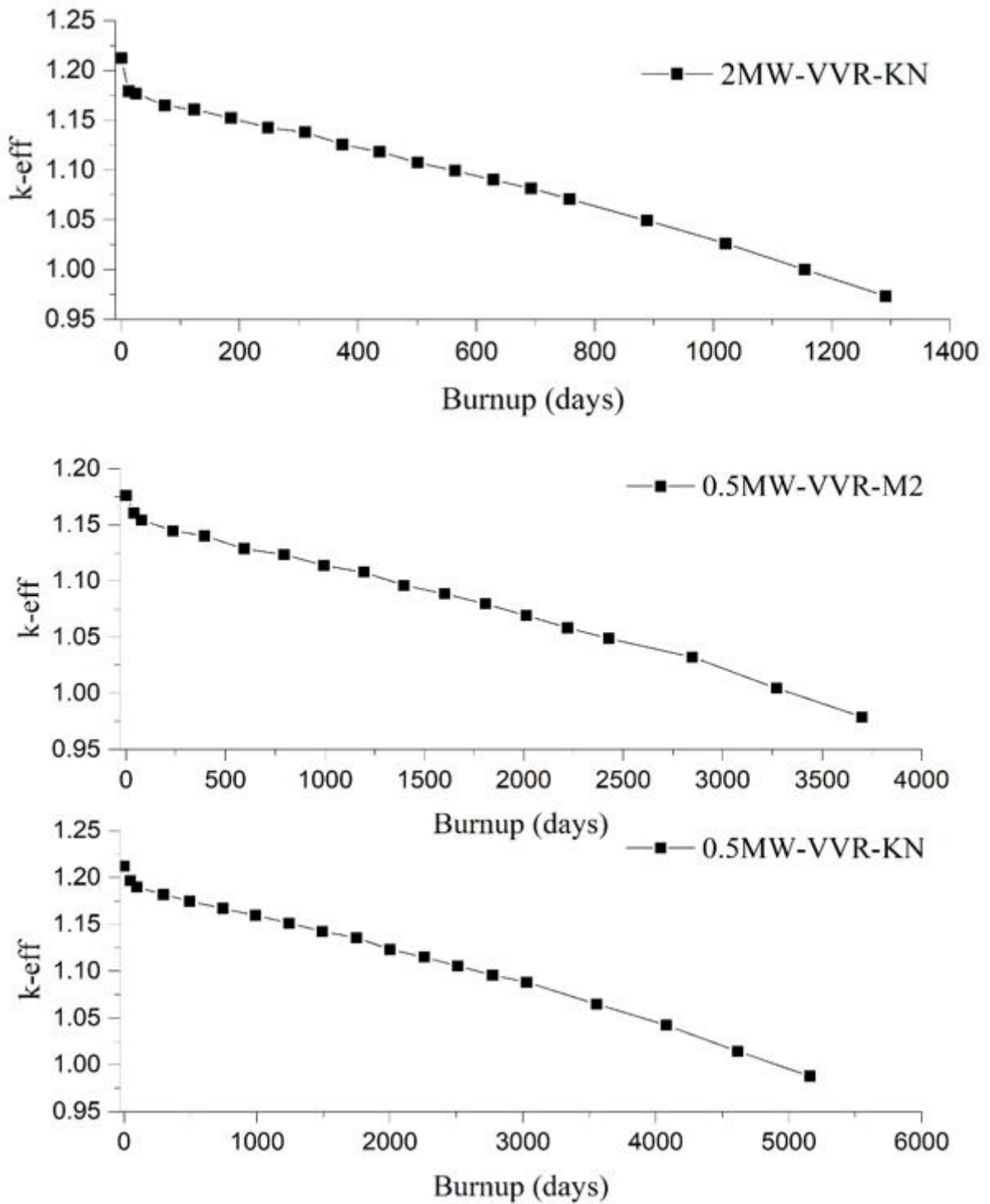
Хүснэгт 4.10. Голомтын төв болон зах дээрх дулааны нейтроны урсгал.

	Голомтын төв дээрх дулааны нейтроны урсгал	Голомтын зах дээрх дулааны нейтроны урсгал
VVR-M2 Түлшний эвлүүлэгээс бүрдсэн голомт	$1.41 \cdot 10^{13} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$7.92 \cdot 10^{12} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
IRT-4M Түлшний эвлүүлэгээс бүрдсэн голомт	$1.65 \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$1.20 \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
VVR-KN Түлшний эвлүүлэгээс бүрдсэн голомт	$1.17 \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$5.54 \cdot 10^{13} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

4.13.2 Түлшний эвлүүлгийн тооцооны үр дүн

Зураг 4.10-д түлшний эвлүүлгүүдийн шаталтын үр дүнг харуулав.





Зураг. 4.10. Түлшний эвлүүлэгүүдийн шаталт

4.13.3 Дүгнэлт

1. ОХУ-ын "Росатом" корпорац нь судалгааны реакторын 3 төрлийн түлшийг дэлхийн зах зээлд нийлүүлдэг. Үүнд: VVR-M2-ийг бага чадлын реакторуудад, IRT-4M-ийг 10-15МВт өндөр чадалтай реакторуудад, VVR-KN-ийг мөн 5-15МВт чадалтай реакторуудад ашиглах зорилгоор шинээр үйлдвэрлэж байна.

2. Энэхүү 3 төрлийн түлш бүхий судалгааны реакторуудын хувьд нейтроны урсгалыг нейтроны энерги ба голомтын төв, захын байрлалууд дээр реакторын чадлаас хамааруулж тодорхойлсон.
3. Дээрх 3 төрлийн түлш бүхий судалгааны реакторуудын хувьд реакторын ажиллах хугацааг түлшний шаталтын тооцоог гүйцэтгэж тодохойлсон. Үр дүнгээс харахад өндөр чадалтай реакторын ажиллах хугацаа хамгийн бага, бага чадалтай реакторын ажиллах хугацаа хамгийн их байсан.
4. Нейтроны урсгалын түгэлтийг ашиглаж Мо-ийг шарах оновчтой байрлалыг тодорхойлж уг байрлал дээр бай материалыг оруулж шарахад үүсэх Мо-99 изотопийн хувийн идэвхийг реакторын түлш ба чадлаас хамааруулж тооцсон.

4.13.4 ЦШУТТ-ийн суурь төхөөрөмж, лабораториудын эдийн засгийн урьдчилсан тойм үнэлгээ

ЦШУТТ-ийн техник, эдийн засгийн үнэлгээг бүхэлд нь хийх боломж судалгааны багт одоогийн байдлаар бүрдээгүй байна. Уг ажлыг хийж гүйцэтгэхэд нилээд зардал гарахаар байна. Мөн цөмийн тоног төхөөрөмжтэй холбоотой мэдээлэл нийтэд нээлттэй биш, тодорхой нууцын зэрэглэлтэй байдаг тул үнэлгээг нарийн хийх боломжгүй байна. “Русатом Оверсиз” ХХК-тай “Технологийн нууц хадгалах гэрээ” байгуулсны дараагаар нарийвчилсан үнэлгээ хийх боломж бүрдэнэ гэж үзэж байна.

Барилга байгууламжийг барих, шаардлагатай дэд бүтцийг бий болгох, эдгээртэй холбоотой үүсэх төрөл бүрийн асуудлууд, үүнд хууль эрх зүй, хүрээлэн буй орчин, байгаль хамгаалалт гэх мэт асуудлуудтай холбоотой өөрчлөлт, үнэлгээ, ЦШУТТ-ийн физик хамгаалалт, аюулгүй байдал, аюулгүй ажиллагаатай холбоотой нэмэлт зардлууд, хэдэн хүн ажиллах, хэрхэн сургах, эдгээр хүмүүсийн цалин болон бусад төрөл бүрийн урсгал зардлуудыг тооцохгүйгээр үндсэн тоног төхөөрөмж, лабораториудыг барьж байгуулахад шаардагдах төсвийг урьдчилсан байдлаар үнэлэхийг оролдлоо.

Цөмийн судалгааны реакторыг барьж байгуулахад шаардагдах үнийн тухай мэдээлэл нийтэд ил байдаггүй. Сүүлийн жилүүдэд шинээр баригдсан судалгааны реактор тийм ч олон байдаггүй. Иордон ба Австрали улсад хамгийн сүүлд баригдаж, үйл ажиллагаа нь эхэлсэн реакторууд байдаг. 2018 оны байдлаар шинээр баригдаж байгаа 7 цөмийн судалгааны реактор байдаг. Аргентин, Бразил, Франц, Энэтхэг, Өмнөд Солонгос, ОХУ, Саудын Араб зэрэг улсуудад баригдаж байна.

Хамгийн сүүлд баригдаж, үйл ажиллагаа нь эхлэсэн Иордан улсын анхны цөмийн судалгааны реакторын үнэ 130 сая америк доллар, үүний 70 сая долларыг Өмнөд Солонгос улсаас урт хугацааны хөнгөлттэй зээлээр авч байгаа мэдээлэл байдаг.

2006 онд Австрали улсад шинэ цөмийн судалгааны реактор ашиглалтанд орсон байдаг. Уг реактор 20 МВт чадалтай, нейтроны урсгал өндөр учраас олон зорилгоор ашиглах боломжтой. Реакторыг барихад олон улсад нээлттэй тендер зарласан ба Аргентин улсын INVAP компани шалгарч 7-8 жилийн хугацаанд реакторыг 270 сая америк доллар, нейтроны шарлагийн сувгуудтай холбоотой төхөөрөмжүүдийг 28 сая америк доллараар барьж өгсөн байдаг.

Монгол улсын газар зүйн байршил, дэд бүтцийн хөгжил, хүнд үйлдвэрлэлийн нөхцөл байдлаас шалтгаалж 3.1-д дурдагдсан цөмийн судалгааны реактор барьж байгуулахад шаардагдах төсвийг 250 сая америк доллараас хэтрэхгүй гэж үзэж байна.

3.2-д дурдагдсан шарлагийн төвд багтах электроны хурдасгуур, Со-60 үүсгүүр, шаардагдах дэд бүтэцтэй холбоотой мэдээлэл мөн нийтэд ил биш байдаг. Монгол улсын хэрэгцээ, шаардлагийг харахад өндөр чадалтай, бага/дунд энергитэй электрон хурдасгуур, шарлагийн автомат горимоор ажилладаг иж бүрэн систем байх нь тохиромжтой гэж үзэв. Со-60 үүсгүүр бүхий шарлагийн системийн хувьд 1000-1500 ТБк идэвхтэй үүсгүүртэй, шарлагийн автомат шугамтай байх шаардлагатай гэж үзэв. Эдгээрийг нийтэд нь барьж байгуулахад шаардагдах төсвийг 30 сая америк доллараас хэтрэхгүй гэж үзэж байна.

Нейтрон, реакторын физикийн лабораторийг байгуулахад 2 сая, нейтрон идэвхжилийн анализийн лабораторийг байгуулахад 1 сая, радиобиологийн лабораторийг байгуулахад 1.7 сая, материал судлалын лабораторийг байгуулахад 5 сая, радиохимийн лабораторийг байгуулахад 10 сая, хүрээлэн буй орчны судалгааны лабораторийг байгуулахад 1 сая америк долларын төсөв шаардлагатай гэж үзлээ.

Нийтэд нь дүгнэхэд ЦШУТТ-д багтах үндсэн суурь төхөөрөмж, лабораториудыг байгуулахад шаардагдах төсвийг урьдчилсан байдлаар 300 сая америк доллар гэж үнэлэв. Энэхүү дүнд ЦШУТТ-ийн барилга байгууламжийг барих, шаардлагатай дэд бүтцийг бий болгох зэрэг бусад зардлууд багтаагүй болно.

СЭДЭВТ АЖЛЫН ХҮРЭЭНД ХЭВЛҮҮЛСЭН БҮТЭЭЛИЙН ЖАГСААЛТ

Бүтээлийн жагсаалт

1. Сэдэвт ажлын хүрээнд 2018-2021 онд дотоодын мэргэжлийн сэтгүүлд хэвлүүлсэн байдал

1. Т.Жамъянсүрэн, С. Одмаа, Цөмийн өгөгдлийн JENDL-3.3 болон JENDL-4.0 санг ашигласан үр дүнгийн харьцуулалт. МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг, ФИЗИК сэтгүүл №26(490), х20-24.
2. Т.Жамъянсүрэн, С. Одмаа, Жигд бус голомттой, цагираган өндөр температурын хийн хөргөлттэй реакторын нейтроник анализ. МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг, ФИЗИК сэтгүүл, №27(495), х44-50.
3. Б.Хөхсүвд, С. Одмаа, Т.Жамъянсүрэн, Маш өндөр температурын хийн хөргүүртэй реакторын голомтын дизайны судалгаа. МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг, ФИЗИК сэтгүүл №27(495), х66-72.
4. М.Эрдэнэтуяа, Н.Норов, В.Алимаа, Ж.Лхамсүрэн, Монгол орны цацраг идэвхт нэгдлийн тархалт судалгааны тойм, Газрын тос-2018 Эрдэм шинжилгээний бүтээлийн эмхэтгэл №9/239 х 48-54.
5. G.Tsemelmaa, S.Odmaa, B.Munkhbat, N.Norov, Preliminary neutronic analysis of the LFR core and subassembly, Mongolian Journal of Physics, Issue 5, April 2019, p24-29.
6. A.Tsendsuren, B.Munkhbat S.Odmaa Design on a small breed and burn type fast reactor dedicated for remote areas of Mongolia, Mongolian Journal of Physics, Issue 5, April 2019, p34-35.
7. 3. Ц.Сайнсанааь Н.Норов, Төвийн бүс нутгийн хөрсөн дэх ^{137}Cs -ийн хуримтлал, МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг, ФИЗИК сэтгүүл №28 (510), 2019, х76-79.
8. Т. Жамъянсүрэн, С. Одмаа, Б. Мөнхбат, Н. Норов, Өндөр температурын хийн реакторын голомтын нейтроник анализд “SERPENT” кодыг ашиглах нь, МУИС,Эрдэм шинжилгээний бичиг, Физик сэтгүүл №30 (527), 2020. х1-6.
9. Т. Жамъянсүрэн, С. Одмаа, Өндөр температурын хийн реакторын голомт дахь шатан шингээгч материалын хэлбэрийн нөлөө. МУИС,Эрдэм шинжилгээний бичиг, ФИЗИК сэтгүүл №31 (536), 2020, х77-83.
10. Н. Норов, С. Одмаа, Б. Мөнхбат, Т.Жамъянсүрэн, Г. Нарантунгалаг, Б. Хөхсүвд, Цөм-устөрөгчийн эрчим хүчнийг Монголд хөгжүүлэх үзэл баримтлалы боловсруулах асуудалд. МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг, ФИЗИК сэтгүүл №31(536), 2020, х148-153.

11. Б.Хөхсүвд, С.Одмаа “Маш өндөр температурын хийн хөргүүртэй реакторын голомтын дизайны судалгаа: өөр өөр бөөм түлштэй голомтуудын харьцуулалт, МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг, ФИЗИК сэтгүүл №31(536), 2020, х46-53.
12. Г.Нарантунгалаг, С.Одмаа, Бага чадлын, хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын дизайныг сайжруулах судалгаа, МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг, ФИЗИК сэтгүүл №31(536), 2020, х15-23.
13. А.Цэндсүрэн, Б.Мөнхбат, С.Одмаа, Н.Норов, Бага чадлын түлшээ үржүүлэн шатаадаг реакторын нейтроник судалгаа, МУИС ийн эрдэм шинжилгээний бичиг, ФИЗИК сэтгүүл №31(536), 2020, х157-162.
14. Munkhbat Byambajav, Tsendsuren Amarjargal, Odmaa Sambuu, Igniting burning wave in a small nuclear reactor dedicated for remote areas in Mongolia, Mongolian Journal of Engineering and Applied Sciences, №2, 2020.

2. Сэдэвт ажлын хүрээнд 2018-2021 онд дотоодын эрдэм шинжилгээний хурлын илтгэлийн эмхэтгэлд хэвлүүлсэн байдал

1. А.Цэндсүрэн, Б.Мөнхбат, Монголын Алслагдсан Бүс Нутагт Тохиромжтой Бага Чадлын Түлшээ Үржүүлдэг Эрчим Хүчний Реакторын Дизайны Судалгаа, Хүрэлтогоот-2018 эрдэм шинжилгээний хурлын эмхэтгэл, 2018, х128-131.
2. Г. Нарантунгалаг, С.Одмаа, Хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын хоёр өөр түлшний эвлүүлгийн нейтроник анализ, Хүрэлтогоот-2019 эрдэм шинжилгээний хурлын эмхэтгэл, 2019, х106-111.

3. Сэдэвт ажлын хүрээнд 2018-2021 онд олон улсын мэргэжлийн сэтгүүлд хэвлүүлсэн байдал

1. Jamiyansuren Terbish, W.F.G. van Rooijen. Design and neutronic analysis of the intermediate heat exchanger of a fast-spectrum molten salt reactor. Nuclear Engineering and Technology. 53(2021) p.2126-2132. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.01.021>
2. Van Khanh Hoang, Odmaa Sambuu, Jun Nishiyama, Toru Obara. Feasibility of Sodium-Cooled Breed-and-Burn Reactor with Rotational Fuel Shuffling. Nuclear Science and Engineering. <https://doi.org/10.1080/00295639.2021.1951063>
3. Odmaa Sambuu, Van Khanh Hoang, Jun Nishiyama, Toru Obara. Neutron balance features in Breed-and-Burn Fast Reactors. Nuclear Science and Engineering. <https://doi.org/10.1080/00295639.2021.1980361>

4. Сэдэвт ажлын хүрээнд 2018-2021 онд олон улсын эрдэм шинжилгээний хурлын илтгэлийн эмхэтгэлд хэвлүүлсэн байдал

1. Tsendsuren, B.Munkhbat A comparative study on Mo-99 isotope production rates of research reactors with VVR-M2, IRT-4M and VVR-KN fuel assemblies, Proceeding of FICASE, V001:569-574, 2019.
2. G.Narantungalag, S.Odmaa, Preliminary neutronic analyses of LFR fuel rod and fuel assembly, Proceeding of FICASE, V001:575-578, 2019.

Илтгэлийн жагсаалт

1. Сэдэвт ажлын хүрээнд 2018-2021 онд олон улсын эрдэм шинжилгээний хуралд хэлэлцүүлсэн байдал

1. S.Odmaa, T.Jamiyansuren B.Munkhbat, N.Norov “Comparative study on core designs of an annular, prismatic HTGR passive decay heat removal, International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems for 21st Century, ISSNP 2018, Harbin, China, 2018.07.09-11.
2. S.Odmaa, B.Khukhsuvd, T.Jamiyansuren B.Munkhbat, N.Norov “ Preliminary neutronic analyses in VHTR core design, International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems for 21st Century, ISSNP 2018, Harbin, China, 2018.07.09-11.
3. B.Khuhsuvd, S.Odmaa, T.Jamiyansuren, B.Munkhbat, “Neutronic analyses in VHTR core design. Modern Trends in Natural Sciences and Advanced Technologies in Science Education, ICNS 2018, Ub, Mongolia, 2018-08.20-23.
4. G.Tsemelmaa, S.Odmaa, B.Munkbat, N.Norov. Preliminary neutronic analysis of the LFR core and subassembly. Modern Trends in Natural Sciences and Advanced Technologies in Science Education, ICNS 2018, UB, Mongolia, 2018.08.20-23.
5. M.Erdenetuya, V.Alimaa, N.Norov, T.Tsagaanaa,” The study of radioactive isotopes in water samples from Toson-Uul basin of Mongolia” IFOST-2018, 13th International Forum on Strategic Technology, IEEE, May 28-June 2, 2018, Harbin, China.
6. G.Narantungalag, S.Odmaa, Preliminary neutronic analyses of LFR fuel rod and fuel assembly, The International Conference of Applied Sciences and Engineering-FICASE 2019,Ub, Mongolia 2019.04.05-06.
7. Tsendsuren, B.Munkhbat A comparative study on Mo-99 isotope production rates of research reactors with VVR-M2, IRT-4M and VVR-KN fuel assemblies, The International Conference of Applied Sciences and Engineering-FICASE 2019,Ub, Mongolia 2019.04.05-06.

8. A.Tsendsuren, S.Davaa, B.Munkhbat, Design study on research reactor for Mongolia. International Conference on Research Reactors: Addressing Challenges and Opportunities to Ensure Effectiveness and Sustainability, Buenos Airies, Argentina. 2019.11.25-29.
9. W.F.G. van Rooijen, Terbish Jamiyansuren, "Evaluation of the inherent neutron source and power density in the Intermediate Heat Exchanger of a small chloride-fueled Molten Salt Fast Reactor", paper 3B10, Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan 2021 (March 17 - March 19 2021)
10. Odmaa Sambuu, Van Khanh Hoang, Jun Nishiyama, Toru Obara "Impact of core materials on the fuel cladding irradiation damage in breed and burn fast reactors" IAEA-FR22 (2021 May, accepted→ 2022 April, China)
11. Toru Obara, Odmaa Sambuu, Van Khanh Hoang, Jun Nishiyama, "Impact of Cladding Material on Neutronic Balance in Breed-and-Burn fast reactor" IAEA-FR22 (2021 May, accepted→ 2022 April, China)
12. Van Khanh Hoang, Odmaa Sambuu, Jun Nishiyama, Toru Obara "Development of Burnup Analysis System for rotational and Spiral Fuel Shuffling scheme in Breed-and-Burn Fast Rectors" (2021 May, accepted→ 2022 April, China)

2. Сэдэвт ажлын хүрээнд 2018-2021 онд дотоодын эрдэм шинжилгээний хуралд хэлэлцүүлсэн байдал

1. Т.Жамъянсүрэн, С. Одмаа. Жигд бус голомттой, цагираган өндөр температурын хийн хөргөлттэй реакторын нейтроник анализ. Физик, физик боловсролын асуудалд. МФН-ийн эрдэм шинжилгээний хурал. 2018.12.08-09. Улаанбаатар, Монгол улс.
2. Б.Хөхсүвд, С. Одмаа. Т.Жамъянсүрэн, Маш өндөр температурын хийн хөргүүртэй реакторын голомтын дизайны судалгаа. Физик, физик боловсролын асуудалд. МФН-ийн эрдэм шинжилгээний хурал. 2018.12.08-09. Улаанбаатар, Монгол улс.
3. Г. Нарантунгалаг, С.Одмаа Хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын хоёр өөр түлшний эвлүүлгийн нейтроник анализ, "Хүрэлтогоот-2019" Эрдэм шинжилгээний хурал, 2019 Улаанбаатар Монгол.
4. И.Хайрым, Ц.Цэрэнгомбо, Н.Норов, Ц.Сайнсанааь Баян-Өлгий аймгийн хөрсөн дэх ¹³⁷Cs-ийн хуримтлал, XIV международной конференций "Природные условия, история, культура и язык западной монголии и сопредельных регионов. 2019.09.18-19, Ховд, Монголия.
5. Т.Жамъянсүрэн, С.Одмаа, Б.Мөнхбат, Н.Норов, Өндөр температурын хийн реакторын голомтын нейтроник анализд "SERPENT" кодыг ашиглах нь, Физик, физикийн боловсролын асуудалд. МФН-ийн эрдэм шинжилгээний хурал, 2019.09.25 Улаанбаатар, Монгол улс.

6. Т. Жамъянсүрэн, С. Одмаа, Б. Мөнхбат, Н. Норов, Өндөр температурын хийн реакторын голомтын нейтроник анализд “SERPENT” кодыг ашиглах нь, Монголын физикийн нийгэмлэгийн эрдэм шинжилгээний хурал, 2020, 11 сарын 19-20, Улаанбаатар, Монгол улс.
7. Т. Жамъянсүрэн, С. Одмаа, Өндөр температурын хийн реакторын голомт дахь шатан шингээгч материалын хэлбэрийн нөлөө. Монголын физикийн нийгэмлэгийн эрдэм шинжилгээний хурал, 2020, 11 сарын 19-20, Улаанбаатар, Монгол улс.
8. Н. Норов, С. Одмаа, Б. Мөнхбат, Т.Жамъянсүрэн, Г. Нарантунгалаг, Б. Хөхсүвд, Цөм-устөрөгчийн эрчим хүчнийг Монголд хөгжүүлэх үзэл баримтлалы боловсруулах асуудалд. Монголын физикийн нийгэмлэгийн эрдэм шинжилгээний хурал, 2020, 11 сарын 19-20, Улаанбаатар, Монгол улс.
9. Б.Хөхсүвд, С.Одмаа “Маш өндөр температурын хийн хөргүүртэй реакторын голомтын дизайны судалгаа: өөр өөр бөөм түлштэй голомтуудын харьцуулалт, Монголын физикийн нийгэмлэгийн эрдэм шинжилгээний хурал, 2020, 11 сарын 19-20, Улаанбаатар, Монгол улс.
10. Г.Нарантунгалаг, С.Одмаа, Бага чадлын, хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын дизайныг сайжруулах судалгаа, Монголын физикийн нийгэмлэгийн эрдэм шинжилгээний хурал, 2020, 11 сарын 19-20, Улаанбаатар, Монгол улс.
11. А.Цэндсүрэн, Б.Мөнхбат, С.Одмаа, Н.Норов, Бага чадлын түлшээ үржүүлэн шатаадаг реакторын нейтроник судалгаа Монголын физикийн нийгэмлэгийн эрдэм шинжилгээний хурал, 2020, 11 сарын 19-20, Улаанбаатар, Монгол улс.
12. Б.Хөхсүвд, Т.Жамъянсүрэн, С.Одмаа “Маш өндөр температурын хийн реакторын голомтын дизайны судалгаа: шатан шингээгч материалын нөлөө” Монголын физикийн нийгэмлэгийн эрдэм шинжилгээний хурал, 2021, 11 сарын 18, Улаанбаатар, Монгол улс
13. Т.Жамъянсүрэн, Б.Хөхсүвд, С.Одмаа “Өндөр температурын хийн реакторын голомтын үзүүлэлтэд шатан шингээгч материалын өөрийгөө хаах үзэгдлийн нөлөө” Монголын физикийн нийгэмлэгийн эрдэм шинжилгээний хурал, 2021, 11 сарын 18, Улаанбаатар, Монгол улс.

Нэг сэдэвт бүтээл

Н.Норов, С.Одмаа, Т.Жамъянсүрэн, Б.Хөхсүвд

ӨНДӨР ТЕМПЕРАТУРЫН ГЕЛИЙН МОДУЛЬ РЕАКТОРЫН СУДАЛГАА

**СЭДЭВТ АЖЛЫН ХҮРЭЭНД 2018-2021 ОНД МАГИСТР, ДОКТОРАНТУУДЫГ
ДАГАЛДУУЛЖ МЭРГЭШҮҮЛСЭН БАЙДАЛ**

Магистрын зэргээр хамгаалсан байдал

Б.Хөхсүвд: ‘Маш өндөр темдературын хийн хөргүүртэй реакторын голомтын нейтроник үзүүлэлтийн харьцуулсан судалгаа’ 2019, МУИС, ХШУИС.

А.Цэндсүрэн: “Бага чадлын “CANDLE” реакторын дизайны судалгаа” 2019, МУИС, ХШУИС.

Г.Нарантунгалаг: “100 МВт чадалтай, хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын нейтроникийн судалгаа” 2020, МУИС, ХШУИС.

Докторын зэргээр элссэн байдал

Ц.Сайнсанаа – 2018, МУИС, ХШУИС.

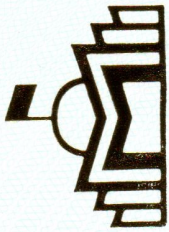
АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

1. International atomic energy agency, Climate Change and The Role of Nuclear Power. IAEA, Vienna, 2020.
2. Ohta, T. Some thoughts about the hydrogen civilization and the culture development Intern. J. Hydrogen Energy, 2006, Vol. 31, p161-166.
3. Goltsov V.A, Veziroğlu T.N, Goltsova L.F. Hydrogen civilization concept: historical and allplanetary aspects / Intern. J. Nucl. Hydrogen Prod. & Appl. 2006, Vol. 1, No. 4. p 112-133.
4. International atomic energy agency, Обзор ядерных технологий — 2020, IAEA, Vienna, 2020.
5. International atomic energy agency, Advances in small modular reactor technology developments. 2016 Edition. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) <http://aris.iaea.org>.
6. S. Fujikawa et al., Achievement of reactor-outlet coolant temperature of 950°C in HTTR, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 41, No. 12, p1245–1254.
7. S. Katanishi et al., Safety evaluation on the depressurization accident in the gas turbine high temperature reactor (GTHTTR300), Nuclear Engineering and Design 237, p2007 1372–1380.
8. K. Kunitomi et al., Reactor core design of gas turbine high temperature reactor 300, Nuclear Engineering and Design, Vol. 230, 2004, p349-366.
9. K. Kunitomi, et al., JAEA'S VHTR for hydrogen and electricity cogeneration: GTHTTR300C, Nuclear Engineering and Technology, Vol6.3, 2007.
10. X. Yan et al., GTHTTR300 design and development, Nuclear Engineering and Design, vol. 222, 2003. p.247-262.
11. N. SAKABA et al., Development Scenario of the Iodine-Sulphur Hydrogen Production Process to be Coupled with VHTR System as a Conventional Chemical Plant, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 45, No. 9, 2008, p962–969.
12. Ядерные энергетические установки с модульными ВТГР: учеб. пособие/Н.Г. Абросимов и др.; Нижегород. гос.техн. ун-т им. Р.Е.Алесева. –Н.Новгород, 2014.
13. Гребенник, В.Н. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы-инновационное направление развития атомной энергетики/ В.Н.Гребенник, Н.Е.Кухаркин, Н.Н.Пономарёв-Степной. -М.:Энергоатомиздат,2008.

14. IAEA, 2006, “Status of innovative small and medium sized reactor designs 2005” Annex14. Pebble bed modular reactor (PBMR). PBMR,Ltd,South Africa, IAEA-TECDOC-1485.P.419-449.
15. Current status and future development of modular high temperature gas cooled reactor technology// IAEA-TECDOC-1198, 2001, p19-67.
16. International atomic energy agency, Fuel performance and fission product behavior in gas cooled reactors, IAEA-TECDOC-978, IAEA, Vienna, 1997.
17. International atomic energy agency, Advances in High Temperature Gas Cooled Reactor Fuel Technology, IAEA-TECDOC-CD-1674, IAEA, Vienna, 2012.
18. International atomic energy agency, Evaluation of High Temperature Gas Cooled Reactor Performance: Benchmark Analysis Related to the PBMR-400, PBMR,GT-MHR, HTR-10 and the ASTRA Critical Facility, IAEA-TECDOC-1694, IAEA, Vienna, 2013.
19. Inato K, Ogawa T: Advanced Concepts in TRISO fuel, Comprehensive nuclear material, Vol 3.
20. S.Odmaa, T.Jamyansuren, O.Toru, N.Norov and B.Munkhbat. Design parameters in an annular, prismatic HTGR for passive decay heat removal. Annals of Nuclear Energy, 111, 2018, p441-448.
21. Nagaya Y, Okumura K, Mori T, Nakagawa M. MVP/GMVP II: general purpose Monte Carlo code for neutron and photon transport calculations based on continuous energy and multigroup methods. Tokai, Ibaraki (Japan): Japan Atomic Energy Research Institute; JAERI-1348, 2005.
22. Okumura K, Nagaya Y, Mori T. MVP-BURN user’s manual. Tokai, Ibaraki (Japan): Japan Atomic Energy Agency, 2005.
23. Shibata K, Iwamoto O, Nakagawa T, Iwamoto N, Ichihara A, Kunieda S, Chiba S, Furukawa K, Otuka N, Ohsawa T, Murata T, Matsunobu H, Zukaran A, Kameda S, Katakura J. JENDL-4.0: A new library for nuclear science and technology. J. Nucl. Sci. Technol. 2011 Jan; 48: p1-30.
24. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>
25. <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>
26. Т.Жамъянсүрэн, С.Одмаа: Задралын дулаанаа идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай, төвдөө ойлгогчтой, өндөр температурын хийн хөргөлттэй реакторын голомтын дизайны судалгаа: МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг; Физик №25 (478), 2017, 35-40-р тал.

ХАВСРАЛТ

1. Б. Хөхсүвдын Магистрын дипломны хуулбар
2. Г. Нарантунгалагийн Магистрын дипломны хуулбар
3. А. Цэндсүрэнгийн Магистрын дипломны хуулбар



МОНГОЛ УЛС
МОНГОЛ УЛСЫН ИХ СУРГУУЛЬ
МАГИСТРЫН ДИПЛОМ

Дугаар E 20183993

Монгол улсын ирэн Балсайханы ХӨХСҮВД нь

2018 онд "МӨНХР"-ийн голмтын нейтроник үзүүрлэлийн харууцсан судлагаа" гэдвэр дипломын ажил бүтэж хамгаалсан тул магистрын ажил хамгаалуулах Зөвлөлийн шийдвэрийн үндсэн захирыг 2019 оны 01 дүрэг сарын 09-ний өдрийн А/13 тоот тушаалаар

ЦЮМИЙН ЭРЧИМ ХВЧНУЙ МАЯИСИР-ыг

Зэрэг олов.

Дэд проф., Д-р. С.Монхбат
Идирлэх Зөвлөлийн дарга



Д-р Я.Шоморбаатар

Захирагч 17144746
УХД0072 9104399

Д-р. Б.Энх-Амгалан
Ажлын түвшний сургуулийн бодлогын
газрын дарга

Д-р. Д.Хасваатар
Хамгаалуулах Зөвлөлийн дарга



Бурхалын дугаар 08777



МОНГОЛ УЛС
МОНГОЛ УЛСЫН ИХ СУРГУУЛЬ
МАГИСТРЫН ДИПЛОМ

Дугаар E20204218

Монгол улсын ирэн Төмбөдоржийн НАРАНШУНБАЛАА нь

2020 онд "100 МВт гадалтай, хар тургалан хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын нейтроникийн судалгаа" сэдвэр дипломын ажил бийж тамаалсан тур магистрын ажил тамаалуулах Зөвлөлийн шийдвэрийг үндэслэн Захирлын 2020 оны 06 дугаар сарын 11-ний өдрийн А/143 тоот тушаалаар

ЦОМВИЙН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ МАГИСТР-ын

Зэрэг олоов.



С.Ц.

Проф., Д-р. С.Цэцэгдэлмаа
Зөвлөх Зөвлөлийн дарга

Батболд

Проф., Д-р. Н.Батсарангэ
Ажлын гүйцэтгэгч зургуулийн захирал

С.Д.

Д-р. С.Даваа
Хамгаалуулах Зөвлөлийн дарга



Бүртгэлийн дугаар 09499



МОНГОЛ УЛС
МОНГОЛ УЛСЫН ИХ СУРГУУЛЬ
БАКАЛАВРЫН ДИПЛОМ

№ D 201615436


Монгол улсын ирэн Амаржаргалын ЦЭНДСҮРЭН нь
2016 онд Хэрэгжээний тийжлэх ухаан, инженерийн сургуульд

ЦӨМИЙН ЭРЧИМ ХҮЧ


мэрижлэл (D443200)-ээр сурагчид төгссөн тух төгсөлтийн комиссын


2016 оны 06 дугаар сарын 06-ны өдрийн шийдвэрийн үндсэн,
Засварын 2016 оны 06 дугаар сарын 13-ны өдрийн А/159 тоот тушаалаар

Цөмийн технологийн БАКАЛАВР зэрэг олов.


Б.Насамбаяр
Ундрах Зөвлөлийн дарга




Г.Баярмагнай
Д-р Г.Баярмагнай
Шөгсөлтийн комиссын дарга


Д-р Н.Баатарбаяр
Хэрэгжээний тийжлэх ухаан,
инженерийн сургуулийн
Засвар



Улаанбаатар хот

2016 оны 06 дугаар сарын 17

Бүртгэлийн дугаар 1828

