

Түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторын

ЭХЛЭЛ ГОЛОМТЫН ДИЗАЙНЫ СУДАЛГАА

С.Одмаа^{a,b,2}

^a Ногоон эрчим хүч, инженерчлэлийн тэнхим, ИТС, МУИС, Улаанбаатар, Монгол Улс

^b Цөмийн физикийн судалгааны төв, МУИС, Улаанбаатар, Монгол Улс

Дэлхийн энергийн хэрэгцээ өсөхийн хэрээр түүнийг хангах тогтвортой, найдвартай, цэвэр эх үүсвэрийн нэг нь цөмийн эрчим хүч болно. Байгалийн ураныг үр дүнтэй ашиглах, цөмийн ашигласан түлшний хэмжээг багасгах, хуримтлалыг бууруулах, дахин боловсруулах үнэтэй үйлдвэрийн дутагдлыг нөхөх нэг арга нь түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторыг ашиглах юм. Ийм реакторт байгалийн эсвэл ядуурсан уран түлш ашиглах тул голомтыг критик төлөвт ажиллуулахын тулд нейтроны урсгал өндөртэй байрлалд хуваагдах изотопын агуулагдац өндөртэй түлшийг сэлгэн байрлуулах арга хэрэглэдэг.

Энэхүү ажлаар цахиурт уран (U_3Si_2) түлштэй, шингэн натри хөргөлттэй, сэлгэн байрлуулах схемтэй, түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторын эхлэл голомтын дизайн хийж, транзиент анализ гүйцэтгэн нейтроны үзүүлэлтийг тодорхойлов.

Түлхүүр үгс: Түлшээ үржүүлэн шатаадаг хурдан реактор, эхлэл (start-up) голомт, U_3Si_2 түлш

Мэргэшлийн индекс (PACS number): 28.00.00; 28.41.Ak; 28.50.Ft

I. УДИРТГАЛ

Дэлхийн хүн амын тоо өсч, амьдралын чанар дээшлэхийн хэрээр энергийн хэрэгцээ тасралтгүй нэмэгдэж байна. Энергийн хэрэгцээг хангахад оролцох төрөл бүрийн эх үүсвэр байгаагаас цөмийн эрчим хүч нь тогтвортой, найдвартай, энергийн системийн үндсэн ачаалал даах цэвэр эх үүсвэр юм.

Одоогийн байдлаар дэлхийн 30 гаруй оронд ажиллаж буй 415 орчим реактор нийт эрчим хүчний 10 % орчмыг үйлдвэрлэж байна [1]. Эдгээрийн дийлэнх нь дулааны реактор тул байгалийн ураны ашиглалт үр дүнгүй байна. Мөн цөмийн эрчим хүч ашигладаг дэлхийн орнуудад өнөөг хүртэл их хэмжээний ашигласан түлш хуримтлагдсан. Ашигласан түлшийг дахин боловсруулах радиохимийн үйлдвэрт боловсруулж хэрэгтэй изотопыг ялган авч, хэмжээг багасгаж болох ч ийм үйлдвэр маш өртөгтэй бөгөөд одоогоор цөөхөн үйлдвэр ажиллаж байна. Эдгээр асуудлыг шийдвэрлэх нэг гарц нь байгалийн уран эсвэл ядуурсан уран түлшээр ажиллангаа, үржүүлэгч изотопоос хуваагдагч изотопыг гарган авдаг хурдан реакторыг ашиглах юм. Энэ зорилгоор түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторын голомтын хийцийн хэд хэдэн хувилбарыг судлаачид санал болгон судалсан байна. Үүнд TWR [2-3], CANDU [4-5], мөн шаардагдах хамгийн бага шаталттай түлшээ үржүүлэн шатаах реактор [6-7] зэрэг судалгаа орно.

Түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реактор нь ядуурсан эсвэл байгалийн уран түлш ашигладаг тул критик голомтын дизайн хийх бэрхшээлтэй асуудалтай тулгардаг. Энэ асуудлыг шийдэх нэг арга нь голомтын нейтроны урсгал ихтэй байрлалд хуваагдагч изотопын агуулагдац өндөртэй түлшийг байнга сэлгэн байрлуулах замаар голомт дэх нейтроны тоог нэмэгдүүлэх явдал юм. Энэ санааг Японы Токиогийн Шинжлэх Ухааны Институт (хуучин нэрээр Токиогийн Технологийн Институт)-ийн профессор Тору Обарагийн судалгааны баг дэвшүүлж, янз бүрийн түлш хөргүүрийн материал голомтод хэд хэдэн сэлгээний схемтэйгээр түлшээ үржүүлэн шатаах ажиллагааны горимыг ханган ажиллахыг судласан байна [8-10].

Өмнөх ажлаараа түлш хөргүүрийн ямар хослолд нейтроны тоо өндөр байх параметрийн судалгаа [11], мөн нейтроны тоог нэмэгдүүлэх дизайны боломжийн судалгаа [12] гүйцэтгэсэн. Эдгээр судалгаанд үндэслэн ураны нитрид эсвэл цахиурт уран түлштэй шингэн натри эсвэл хар тугалга хөргүүртэй, сэлгээний схемтэй хурдан реакторын голомтын дизайн хийж, түлшээ үржүүлэн шатаах горимд тогтвортой ажиллах боломжтойг харуулсан [13-15].

Цахиурт уран түлшийг ихэвчлэн судалгааны реакторт ашиглаж байсан ба эрчим хүчний реакторт ашиглаж байсан туршлага бага юм. Цахиурт уран – U_3Si_2 түлш нь физик нягт өндөр тул ураны атомын нягт өндөр. Хэдийгээр энэ

² Email: sodmaal@num.edu.mn; sodmaal@gmail.com

түлшний хайлах температур нь ураны нитрид ба исэл түлштэй харьцуулбал бага ч, температур нэмэгдэхэд дулаан дамжуулах чадвар болон дулаан багтаамж нь ихэсдэг давуу талтай [16-17].

Энэ ажлын зорилго нь цахиурт уран түлштэй, шингэн натри хөргүүртэй, сэлгээний схемтэй, түлшээ үржүүлэн шатаах горимд тогтвортой ажиллах хурдан реакторын эхлэл голомтын дизайн хийж, гүйцэтгэлийг тодорхойлох юм.

II. ТОГТВОРТОЙ ТӨЛӨВИЙН АНАЛИЗ

Бид эхлээд 750 МВт дулааны чадал үйлдвэрлэх, 85% онолын нягттай цахиурт уран түлштэй, натри хөргүүртэй, түлшээ үржүүлэн шатаадаг хурдан реакторын голомтын тогтвортой төлөвийн анализыг гүйцэтгэв. Өмнөх ажилд цахиурт уран түлш ашигласан түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторын голомтын дизайн хийх боломжийг судлахдаа түлшний эвлүүлгийг гадуур нь хүрээлэх метал хүрээг оруулаагүй байсан [15].

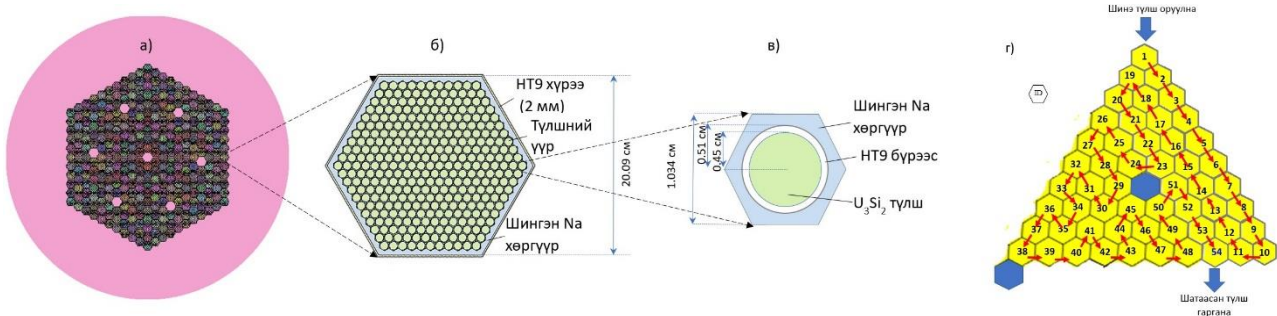
Голомтын түлшний элементийг цахиурт уран түлш, НТ-9 ган бүрээс, натри хөргүүр бүрдүүлэх ба түлшний эвлүүлэг нь 331 түлшний үүрээс тогтоно. Нийтдээ 324 түлшний эвлүүлэг болон хөргүүрийн 7 сувагтай голомтын идэвхтэй өндөр, эффектив радиус нь харгалзан 180 см ба 200 см болно. Голомтын идэвхт бүсийн гадуур шингэн натрийг ойлгогчоор ашигласан. Голомтын дизайны үндсэн үзүүлэлтүүдийг Хүснэгт 1-д харуулав. Түлшний элемент, эвлүүлэг болон голомтын хөндлөн огтлол болон 1/6 тэгш хэмтэй голомтод түлшний эвлүүлгийг сэлгэн байрлуулах схемийг Зураг 1-д харуулав. Зураг 1г-д харуулсан түлшний эвлүүлэг дэх тоо (ID) нь харгалзах байрлалын дугаарыг төлөөлнө. Хамгийн анх голомт даяар шинэ түлш бүхий эвлүүлгүүд байрлах ба эхний сэлгээний дараа анх 1-р байрлалд байсан түлшний эвлүүлгийг ID-2 луу, 2-р байрлалд байсныг нь ID-3 луу гэх зэргээр голомтын төв муж руу сэлгэн байрлуулсаар 54-р байрлалд байрласан түлшний

эвлүүлгийг голомтоос гаргаж, дараагийн цикл 1-р байрлалд гаднаас шинэ түлш ачаалж түлшний шаталтын тооцоолол гүйцэтгэнэ. Нэг циклийн үргэлжлэх зохимжит хугацаа 700 өдөр болохыг өмнөх тооцоололд тодорхойлсон [15]. Дараа дараагийн циклд түлшний шинэ эвлүүлгийг үргэлж 1-р байрлалд байрлуулж, сэлгээний 10 циклийн дараа анх 1-р байрлалд байрласан түлшний эвлүүлгийг 10-р радиал бүсээс 9-р бүс рүү, дараагийн 9 сэлгээний дараа 8-р радиал бүс рүү гэх зэргээр голомтын төв рүү чиглэлтэй байрлуулсаар, эцэстээ 54 дэх сэлгээний дараа 54-р байрлалаас гаргана. Энэ сэлгээний схемийг зураглавал гацуур мод шиг траектори үүсгэж байх тул үүнийг бид “гацуур модон сэлгээний схем” гэж нэрлэв.

Энэ голомтын түлшний шаталтын тооцооллыг тасралтгүй энергитэй нейтронуудын голомтын материалтай харилцан үйлчлэлийг Монте Карло аргаар тооцоолдог SERPENT 2.1 код [18], цөмийн өгөгдлийн ENDF-B/VII.0 санг [19] ашигласан.

Нейтроникийн тооцоололд, түлш, бүрээс, хөргүүрийн температурыг харгалзан 800 К, 700 К ба 700 К гэж авсан. Түлшний эвлүүлэг бүрийг босоо тэнхлэгийн дагуу 20 см өндөртэй шаталтын 9 муж болгон хуваасан. Бүх нейтроник тооцооллыг ижил нөхцөлд гүйцэтгэсэн ба цикл бүрт үүсгүүрийн нейтроны тоо 50000, нийтдээ идэвхтэй 200 цикл тооцооллыг гүйцэтгээд, эхний 50-ийг нь үр дүнгийн статистик алдааг багасгах үүднээс хэрэгсээгүй.

Нейтроник тооцоололд тухайн реакторын үйлдвэрлэх чадал буюу үүсэх нейтроны хурдыг тохируулж өгдөг. Манай бодлогод реакторын үйлдвэрлэх дулааны чадлыг бага чадлын реакторын хамгийн дээд утга болох 750 МВт-ду утгаар сонгов. Түлшний эвлүүлгийг 700 өдрийн интервалтайгаар сэлгэн байрлуулсаар хоёр бүтэн цикл буюу нийтдээ 108 сэлгээ хийн түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэв. Энэ



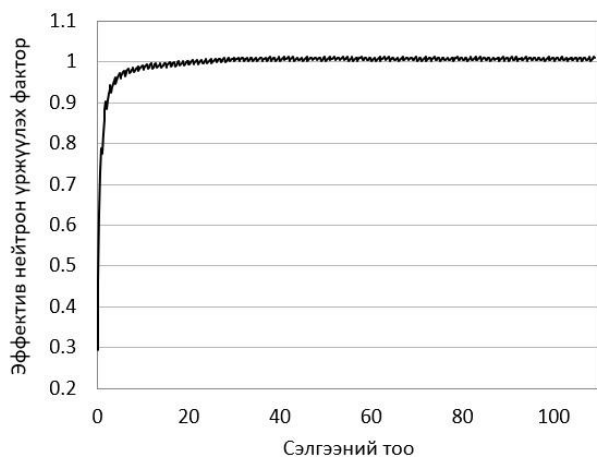
Зураг 1. а) Голомтын б) түлшний эвлүүлгийн, в) түлшний элементийн хөндлөн зүсмэг, г) голомтын 1/6 хэсгийн түлшний эвлүүлгийн сэлгээний схем

Хүснэгт 1. Голомтын үндсэн үзүүлэлтүүд

Параметр	Утга	Параметр	Утга
Дулааны чадал (МВт)	750	Бүрээсийн гаднах радиус (см)	0.51
Голомтын өндөр (см)	180	Түлшний үүрийн алхам (см)	1.034
Голомтын эквивалент радиус (см)	200	Хүрээний зузаан (см)	0.2
Түлшний эвлүүлгийн тоо	324	Түлшний эвлүүлэг хоорондын зай (см)	0.2
Хөргүүрийн суваг буюу удирдлагын савааны эвлүүлгийн тоо	7	Хүрээний материал	HT9 steel
Нэг эвлүүлэг дэх түлшний үүрийн тоо	331	Түлшний нягт	Онолын нягтын 85%
Түлшний эвлүүлгийн алхам (см)	20.09	Түлшний дундаж температур (К)	800
Түлшний материал	U ₃ Si ₂	Бүрээсийн дундаж температур (К)	700
Түлшний баяжуулалт	Байгалийн уран	Хөргүүрийн дундаж температур (К)	700
Хөргүүр материал	Шингэн нагри	Дээд ба доод талын ойлгогчийн зузаан (м)	1
Бүрээс материал	HT9 ган	Радиал ойлгогчийн зузаан (м)	1.5
Түлшний савааны радиус (см)	0.45	Ойлгогчийн материал	Нагри

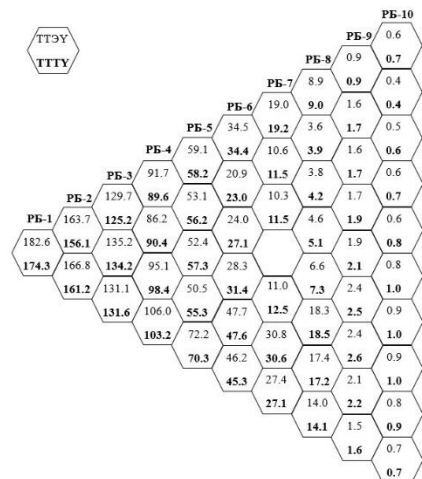
тооцооллын зорилго нь голомтоос удирдлагын савааны бүх эвлүүлгийг гаргасан үед голомт критик төлөвт хүрч, түлшээ үржүүлэн шатаах ажиллагааны горимд хүргэх юм.

Голомтын эффектив нейтрон үржүүлэх факторын өөрчлөлтийг сэлгээний тооноос хамааруулж Зураг 2-т харуулав. Реакторын голомтын тэнцвэрийн төлөвт эффектив нейтрон үржүүлэх факторын утга 1-ээс их байх ба хуваагдагч изотопын агуулагдац ихтэй түлшийг голомтын урсгал ихтэй байрлалд тасралтгүй байрлуулснаар нейтроны тоо аажим ихэсдэг.



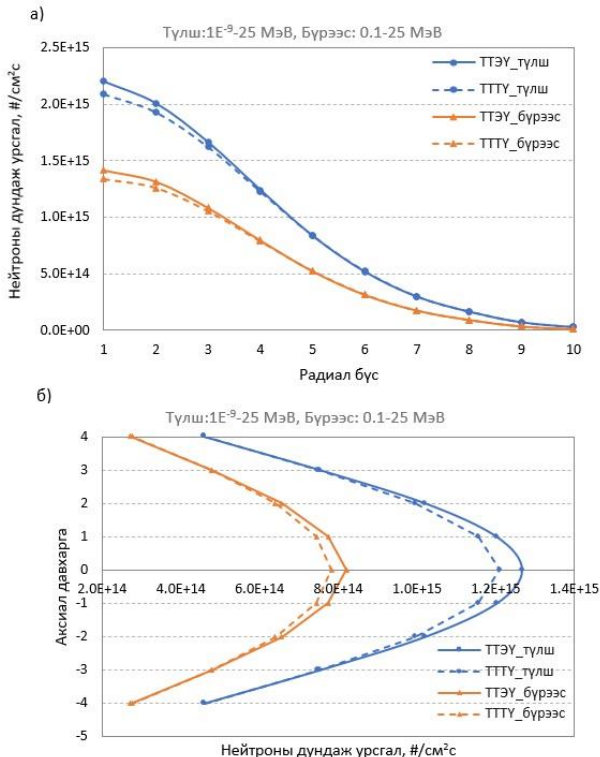
Зураг 2. Эффектив нейтрон үржүүлэх фактор сэлгээний тооноос хамаарах өөрчлөлт

Мөн тэнцвэрт төлөвт түлшний шаталтын турш чадлын нягт болон нейтроны урсгалын түгэлт өөрчлөгддөггүй. Голомт ийм тэнцвэрт төлөвт хүрсэн л бол төвдөө нейтроны урсгал өндөр байж, түлшээ үржүүлэн шатаах мужаа тасралтгүй хадгалдаг. Бид энэ тооцооллын эцсийн төлөв болох сэлгээний 108 дугаар төлөвийг тэнцвэрийн төлөв гэж авч үзэв. Тэнцвэрийн энэ төлөвт голомтын илүүдэл реактивитийн хамгийн их утга ойролцоогоор 1.12 % байгаа ба үүнийг удирдлагын савааны эвлүүлгийг голомт руу оруулах замаар дарж болно.



Зураг 3. Тэнцвэрт төлөвийн эхэн ба төгсгөл үед голомтын 1/6-д дундаж чадлын нягтын (Вт/см³) 2D түгэлт

Зураг 3-д тэнцвэрт төлөвийн эхэн ба төгсгөл үеийн дундаж чадлын нягтын утгыг голомтын 1/6 хэсгийн түлшний элементэд харуулав. Зураг 4а, 4б-д тэнцвэрт төлөвийн эхэн ба төгсгөл үед түлш болон бүрээсийн материалаар урсах нейтроны дундаж урсгалын радиал ба аксиал түгэлтийн утгыг харуулав. Энд бүх буюу 10-9-25 МэВ энергитэй нейтроны урсгалыг түлшний мужаар, харин 100 кэВ-25 МэВ энергитэй нейтроны урсгалыг (учир нь, үүнийг бүрээсийн DPA тооцоолоход ашиглана) бүрээсийн мужаар харуулав.



Зураг 4. Тэнцвэрт төлөвийн эхэн ба төгсгөлд түлш ба бүрээсийн материалд нейтроны дундаж урсгалын түгэлт. а) радиал чиглэлд, б) аксиал чиглэлд.

Зураг 3 ба 4-аас харвал тэнцвэрийн төлөвийн эхэн ба төгсгөл үед эдгээр түгэлтийн муруйнд ялгаа маш бага байгаа нь голомт түлшээ үржүүлэн шатаан ажиллах горимд хүрснийг батлана. 108 сэлгээний дараа голомтын ID-54-өөс гаргаж буй түлшний эвлүүлэг дэх түлшний шаталтын дундаж утга болон түлшний бүрээст үүссэн эвдрэлийн хамгийн их утгыг үнэлэхэд харгалзан 243 МВт/кгХМ (ХМ-хүнд метал буюу уран, плутони) ба 721 DPA байв. Бүрээсийн DPA-ийн утгыг үнэлэхдээ 100 кэВ-ээс их энергитэй нейтроны $2 \cdot 10^{21}$ н/см² урсацаар шарахад 1 DPA эвдрэл үүснэ гэж тооцов [20]. HT-9 ган материалын хувьд цацрагийн эвдрэлийн хүлцэх хязгаарыг үнэлсэн судалгаа цөөхөн байдаг ба одоогоор TerraPower компани тайланд энэ утгыг 650 DPA гэж үнэлсэн байна

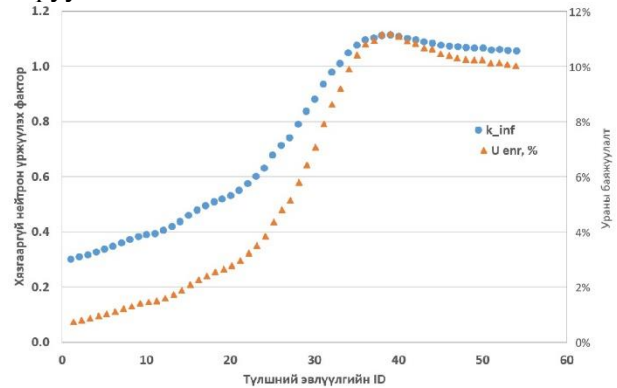
[3]. Цаашдын судалгаагаар энэ утга нэмэгдэнэ гэж үзэж байна.

III. ЭХЛЭЛ ГОЛОМТЫН АНАЛИЗ

3.1. Эхлэл голомтын дизайн

Эхлэл голомтын дизайныг хийхдээ өмнөх хэсэг II-т гарган авсан тэнцвэртэй төлөвт үндэслэдэг. Энд тэнцвэрт төлөвийн (108-р сэлгээний дараа) үеийн түлшний эвлүүлэг тус бүрийн реактивитийн утгыг хангадаг байхаар шинэ түлшний эвлүүлэг дэх түлшний тохирох баяжуулалтыг олох шаардлагатай. Үүнийг критик байдлыг тодорхойлох тооцооллыг гүйцэтгэж олно. Энэ тооцоололд тэнцвэрт төлөвийн түлшний эвлүүлэг дэх элементийн найрлагыг ашиглан хэвтээ чиглэлд хязгааргүй хилийн нөхцөлтэйгээр, босоо чиглэлд бодит голомттой адил байх системийн хязгааргүй нейтрон үржүүлэх факторыг гарган авна.

Ийм аргаар критик байдлын тооцооллыг гүйцэтгэн эхлэл голомтыг бүрдүүлэх түлшний эвлүүлэг бүрийн U_3Si_2 түлшний баяжуулалтын утга болон эвлүүлэг тус бүрийн хязгааргүй нейтрон үржүүлэх факторын утгыг Зураг 5-д харуулав.



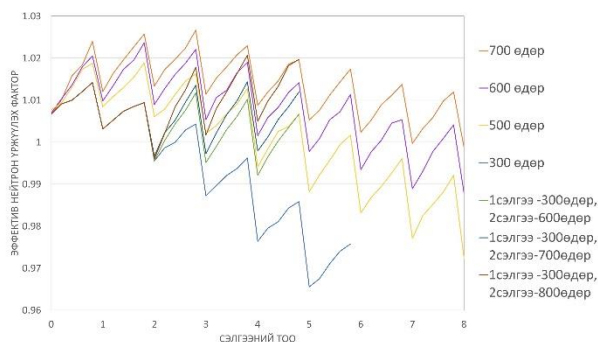
Зураг 5. Эхлэл голомтын 1/6 хэсгийн түлшний эвлүүлэг дэх U_3Si_2 -ийн баяжуулалт болон эвлүүлэг бүрт харгалзах хязгааргүй нейтрон үржүүлэх факторын утга

Зураг 5-аас харвал голомтын төв хэсгийн түлшний эвлүүлэг хамгийн их баяжуулалттай- 11.18 %, харин захад ID-1 байрлалд байрлах түлшний эвлүүлгийн хамгийн бага буюу 0.73 % байна.

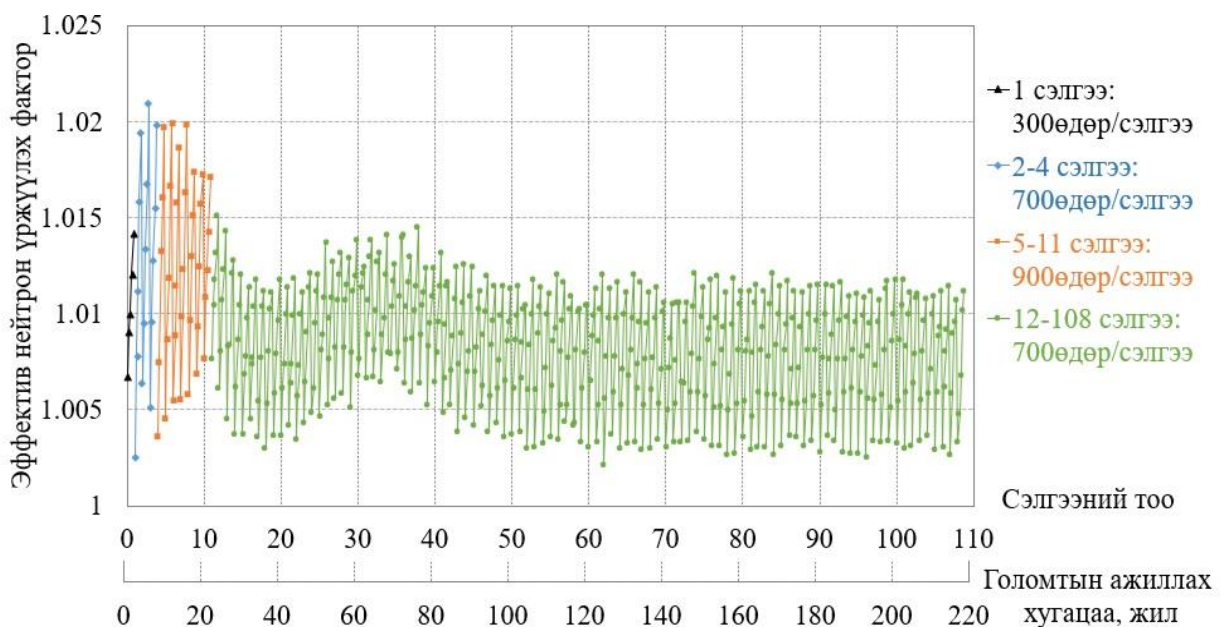
3.2. Эхлэл голомтын түлшний шаталтын анализ

Өмнөх хэсэг 3.1-д олсон найрлага бүхий түлшний эвлүүлэгтэйгээр эхлэл голомтын түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэж, уг голомт түлшээ үржүүлэн шатаах горимыг ханган критик төлөвт ажиллахыг батлах шаардлагатай. Түлшний шаталтын эхний 700 өдрийн турш л эхлэл голомт энэ найрлагатай байх ба дараагийн сэлгээ бүрт ID-1 байрлалд байгалийн агуулагдацтай U_3Si_2 түлш бүхий шинэ түлшийг

байнга ачаална. Эхлэл голомтыг 700 өдрийн сэлгээний интервалтайгаар ажиллуулахад эхний хэдэн сэлгээний алхамд илүүдэл реактивити өндөр байснаа, 6-р алхмаас реактор критикээс доош төлөвт орсон тул голомтын илүүдэл реактивитийг зохих утганд байхаар шаталтын үргэлжлэх хугацааг өөрчилж тооцооллыг гүйцэтгэв. Сэлгээний интервалыг 600 өдөр, 500 өдөр ба 300 өдөр хүртэл бууруулан эхний хэдэн алхмын үеийн илүүдэл реактивитийг дарсан боловч цаашид сэлгээний интервалыг ихэсгэж, голомтод түлшний эвлүүлгийг арай удаан хугацаанд шарж түлшээ үржүүлж, хуваагдагч изотоп үйлдвэрлэн голомтоо критик төлөвт ажиллуулах шаардлагатай болсон. Өөрөөр хэлбэл, адил интервалтайгаар сэлгээг гүйцэтгэх бус, ялгаатай байлгах шаардлагатай байна. Ийнхүү сэлгээний үргэлжлэх интервалын хугацааг тохируулах тооцооллыг олон давтан гүйцэтгэсний заримын үр дүнг Зураг 6-д харуулав.



Зураг 6. Эхлэл голомтыг ялгаатай сэлгээний интервалтайгаар ажиллуулах үед эффектив нейтрон үржүүлэх факторын өөрчлөлт



Зураг 7. Эхлэл голомтийн эффектив нейтрон үржүүлэх фактор сэлгээний алхаас хамаарч

Эдгээр тооцооллын үр дүнд үндэслэн эхний алхамд 300 өдөр, дараагийн гурван алхмын турш 700 өдөр, 5-11-р алхамд 900 өдөр, үлдсэн алхамуудад 700 өдрийн интервалтайгаар шаталтын тооцоолол гарган авсан гүйцэтгэн эффектив нейтрон үржүүлэх факторын өөрчлөлтийг Зураг 7-д харуулав.

Реакторын ажиллагаа эхлэх үед эффектив нейтрон үржүүлэх фактор 1.0071 байсан ба түлшний эвлүүлгүүдийг Зураг 2-т харуулсан схемийн дагуу дээр дурдсан хугацааны интервалтайгаар сэлгэн байрлуулахад энэ утга ихэсч, буурсаар хамгийн багадаа 2-р сэлгээний эхэнд 1.0026, харин хамгийн ихдээ 3-р сэлгээний төгсгөлд 1.0209 утганд хүрчээ. Улмаар 108 сэлгээний эцэст 1.009 утгын орчимд тогтворжжээ.

Тогтвортой төлөвт реакторын голомтын гүйцэтгэлийн үзүүлэлтийг шалгаснаар түлшээ үржүүлэн шатаах горимыг дэмжиж ажиллаж буйг батлана. Иймд реактор ажиллаж эхлэх үе, $k_{eff,max}$ байх үе, $k_{eff,min}$ байх үе болон эцсийн тогтвортой төлөвийн үед чадлын нягтын радиал түгэлтийг Зураг 8-д харуулав. Зураг 8-өөс харвал голомтын төвд үргэлж чадлын нягтын хамгийн их утга оршиж байгаа нь тэнд хуваагдагч изотопын агуулагдац өндөр түлш байнга байрлаж, түлшийг үржүүлэнгээ шатааж байгаагаас шалтгаална.

Түлшний шаталтын турш түгэлтийн энэ хэлбэр өөрчлөгдөхгүй байна. Чадлын нягтын түгэлтийн энэ хандлага голомтоорх урсгалд мөн адил хадгалагдана. Хүснэгт 2-д тогтвортой төлөвт ажиллаж буй голомтоос гаргасан түлшний эвлүүлгийн бүрээсийн DPA болон түлшний шаталт, плутонийн изотопын эзлэх хувийг аксиал давхарга бүрд харуулав.

Голомтоос гаргасан түлшний эвлүүлгийн

Хүснэгт 2. Тогтвортой төлөвт ажиллаж буй голомтоос гаргасан түлшний эвлүүлгийн үзүүлэлт (аксиал давхаргаар)

Аксиал давхаргын өндөр, (см)	E>100 кэВ нейтроны урсац (n/cm ²)	Голомтоос гаргасан түлшний эвлүүлгийн		Pu-ийн изотопын эзлэх хувь, %				
		бүрээсийн DPA	Шаталт (МВт-өдөр/кгХМ)	Pu ²³⁸	Pu ²³⁹	Pu ²⁴⁰	Pu ²⁴¹	Pu ²⁴²
0-20	5.18E+23	259	118.8	1.0	71.6	25.1	1.6	0.8
20-40	8.74E+23	437	189.0	1.0	72.4	24.4	1.5	0.7
40-60	1.17E+24	587	271.9	0.8	74.9	22.5	1.3	0.5
60-80	1.37E+24	685	328.9	0.6	79.2	19.0	0.9	0.3
80-100	1.44E+24	721	349.1	0.6	79.1	19.0	1.0	0.3
100-120	1.37E+24	685	328.9	0.6	79.2	19.0	0.9	0.3
120-140	1.17E+24	587	271.9	0.8	74.9	22.5	1.3	0.5
140-160	8.74E+23	437	189.0	1.0	72.4	24.4	1.5	0.7
160-180	5.18E+23	259	118.8	1.0	71.6	25.1	1.6	0.8
		Max = 721	Дундаж = 240.7					

төвийн давхаргуудад НТ9 ган материалын хязгаарын утга 650 DPA-ээс хэтэрсэн байна. Түүнчлэн, өмнөх хэсэг II-т тогтвортой төлөвийн судалгаанд гарган авсан бүрээсийн DPA-ийн хамгийн их утга 721 болон түлшний шаталтын дундаж утга 243 МВт-өдөр/кгХМ-тай адил байна. Хүснэгт 2-д харуулсан плутонийн изотопын харьцааг харвал Pu²⁴⁰-ийн эзлэх хувь 18-30 % хооронд байгаа нь реакторт ашиглаж болох түвшинд байгаа нь голомтоос гаргасан түлшний эвлүүлгээс плутонийг ялган цөмийн зэвсэг болгон ашиглах боломжгүй болгоно [21].

Голомтоос гаргасан түлшний эвлүүлгийн шаталт 240.7 МВт-өдөр/кгХМ гэдэг нь 0.257 FIMA буюу голомтод анх ачаалсан анхны байгалийн ураны 25.7 %-ийг л шатаасан гэсэн үг. Анх эхлэл голомтод ачаалсан ураны нийт хэмжээ 118.1 тн бөгөөд үүнээс 7 тн нь байгалийн уран ба 111.1 тн нь хамгийн ихдээ 11.18 % хүртэл баяжуулсан уран болно. Реакторын ажиллагааны үед сэлгээ бүрд ойролцоогоор 360 кг байгалийн уран шинээр ачаалсан. Тэгэхээр түлшний зарцуулалтын хурд нь эхний сэлгээнд 360 кг/300өдөр буюу 438 кг/жил, харин дараагийн 3 сэлгээнд 188 кг/жил, улмаар 5дугаар сэлгээнээс цааш 146 кг/жил болж буурсан. Энэ үр дүн нь гацуур модон сэлгээний схемтэй, түлшээ үржүүлэн шатаах реактор ураны нөөцийг үр ашигтай ашиглахыг харуулж байна.

IV. ДҮГНЭЛТ

1. Энэхүү ажлаар 750 МВт-дугаар чадлын, U₃Si₂ түлштэй, шингэн натри хөргөлттэй, сэлгэн байрлуулах гацуур мод схемтэй, түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторын эхлэл голомтын дизайн хийв.
2. Байгалийн уран бүхий цахиурт уран түлштэй, 180 см өндөртэй, 200 см эквивалент радиу

стай, голомтын түлшний эвлүүлгийг 700 өдрийн интервалтайгаар гацуур мод сэлгээний схемээр сэлгэхэд бүтэн 2 цикл буюу нийтдээ 108 сэлгээний дараа тэнцвэрт төлөвт хүрч буйг харуулав.

3. Тэнцвэрт төлөвийн түлшний эвлүүлгүүдийн хязгааргүй нейтрон үржүүлэх факторт үндэслэн эхлэл голомтын дизайныг бага зэргийн ба аяжуулсан уран түлш ашиглан хийв.
4. Эхлэл голомтын ажиллагааг тэнцвэрт төлөв хүртэл үргэжлүүлэн, түлшээ үржүүлэн шатаах горимыг дэмжин ажиллаж байгааг транзистент анализ гүйцэтгэж харуулав.
5. Уг голомтыг ажиллуулахад шаардлагатай ураны хэмжээг үнэлэв.

V. ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааны ажлыг МУИС-ийн P2023-4611 дугаартай “Түлшээ үржүүлэн шатаадаг (B&B) бага чадлын реакторын голомтын дизайны судалгаа-II” сэдэвт өндөр түвшний төслийн хүрээнд МУИС-ийн санхүүгийн дэмжлэгтэйгээр гүйцэтгэв.

VI. АШИГЛАСАН ХЭВЛЭЛ

- [1] International Atomic Energy Agency, Power reactor information system, <https://pris.iaea.org/pris/> (current as of Oct.08, 2024).
- [2] T. ELLIS, et al., TWRs: A truly sustainable and full-scale resource for global energy needs. Proceedings of ICAPP'10, SanDiego, CA, USA, June 13-17, 2010, Paper 10189.
- [3] J. GILLELAND, R. PETROSKI, and K. WEAVER, The traveling wave reactor: design and development, *Engineering*, **2**, 88–96 (2016).

- [4] H. SEKIMOTO and K. RYU, A New Reactor Burnup Concept CANDLE, *Proc. Physor 2000*, Pittsburgh, Pennsylvania, 2000, American Nuclear Society (2000).
- [5] H. SEKIMOTO, Application of CANDLE Burnup Strategy for Future Nuclear Energy Utilization, *Prog. Nucl. Energy*, **47**, 91, 1 (2005); <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2005.05.007>
- [6] E. GREENSPAN, A phased development of B&B reactors for enhanced nuclear energy sustainability. *Sustainability* 2012, 4, 2745-2764. doi:10.3390/su4102745.
- [7] S. QVIST and E. GREENSPAN, “Design space analysis for B&B reactor cores,” *Nucl. Sci. Eng.*, **182**, 197-212 (2016); <http://dx.doi.org/10.13182/NSE14-135>
- [8] T.OBARA, K.KUWAGAKI, J.NISHIYAMA, “Feasibility of burning wave fast reactor concept with rotational fuel shuffling,” Proc. of International Conference of Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), IAEA-CN245-051, Yekaterinburg, Russia, 26-29 June 2017, 2017.
- [9] K.KUWAGAKI, J.NISHIYAMA and T.OBARA, “Concept of Stationary Wave Reactor with Rotational Fuel Shuffling,” *Nucl.Sci.Eng.*, 191, 178-186, (2018); <https://doi.org/10.1080/00295639.2018.1463744>
- [10] K.KUWAGAKI, J.NISHIYAMA and T.OBARA, “Concept of breed and burn reactor with spiral fuel shuffling,” *Ann.Nucl.Energy*, 127, 130-138 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.12.006>
- [11] O. SAMBUU, et al., Neutron balance features in Breed-and-Burn fast reactors, *Nucl. Sci. Eng.*, **196**, 322-341, (2022).
- [12] С.Одмаа. Түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторын нейтроны тоог нэмэгдүүлэх бол омжууд. МУИС, ФИЗИК. No 35 (594), 2024, xx1-8. <https://doi.org/10.22353/physics.v34i577.5914>
- [13] O. SAMBUU, et al., Feasibility of breed-and-burn reactor core design with nitride fuel and lead coolant, *Ann. Nucl. Energy.*, 182 (2023) 109583; <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109583>.
- [14] Odmaa Sambuu, Van Khanh Hoang, Jun Nishiyama, Toru Obara. Concept of Lead-Cooled Rotational Fuel-Shuffling Breed-and-Burn Fast Reactor. *Transactions of the American Nuclear Society*, 127, (1), 1052-1054 (2022)
- [15] O. SAMBUU, et al., Feasibility of RFBBs with Silicide Fuel and Sodium Coolant, Accepted in publication to *Transactions of the American Nuclear Society*, Washington. D.C., November 12-15, 2023.
- [16] M.R. FINLAY, et al., Irradiation behaviour of uranium silicide compounds, *J. Nucl. Mat.*, **325**, 118-128 (2004).
- [17] J.T. WHITE, et al., Thermophysical properties of U₃Si₂ to 1773 K, *J. Nucl. Mat.*, **464**, 275-2280 (2015).
- [18] J. LEPPÄNEN, Serpent—a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, VTT Technical Research Centre of Finland (2015).
- [19] M.B. CHADWICK, et al., ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology, *Nuclear data sheets*, **107**, 12, 2931 (2006).
- [20] Edited by D.G. CACUCI, *Handbook of Nuclear Engineering*. Vol.6, p.555. Springer (2010).
- [21] B. PELLAUD, Proliferation Aspects of Plutonium Recycling, *J. of Nucl. Mat. Management*, Vol XXXI, No. I, 30-38 (2002).

The design study of the start-up core of breed-and-burn fast reactor

Abstract World energy demand is increasing daily, so one of reliable, sustainable, and clean sources to satisfy this demand is nuclear energy. In particular, innovative fast reactor systems such as breed-and-burn (B&B) reactors can make effective use of natural uranium, reducing the amount of spent nuclear fuel as well as the accumulation of nuclear waste and the need for costly fuel reprocessing plants to separate the fissile isotopes from the spent nuclear fuel. In B&B reactors, since the core consists of natural and/or depleted uranium fuel, high reactivity or fresh fuel must then always be located in the high-neutron-flux region by appropriately shuffling the fuel assemblies during the core operating period in order to achieve a critical core. The study's purposes were to design a start-up core design of Breed-and-Burn reactor with rotational fuel shuffling scheme using U₃Si₂ and sodium coolant and to demonstrate its performance at equilibrium state.