

U₃Si₂ түлштэй түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторын голомтын дизайны харьцуулалт

А.Тэмүүлэн^a, С.Одмаа^{a,b,1}

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

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

Хураангуй

Түлшээ үржүүлэн шатаадаг хурдан реактор нь цөмийн эрчим хүчний реакторын дэвшилтэт нэг төрөл бөгөөд үүнийг барьж ашигласнаар байгалийн эсвэл бага баяжуулсан уран түлш хэрэглэх тул ураны нөөцийг үр дүнтэй ашиглах, ашигласан цөмийн түлшний хэмжээг багасгах, үүнийг дахин боловсруулах өртөг өндөртэй үйлдвэрийн хомсдолыг нөхөх зэрэг олон асуудлыг шийдэх боломжтой юм.

Шингэн натри болон хар тугалга нь нейтроны алдагдал болон дулаан зайлуулах шинж чанараараа өөр тул ижил чадал үйлдвэрлэхэд эдгээр хөргүүр бүхий голомтын дизайн ялгаатай байж, нейтроникийн гүйцэтгэлийг харьцуулах шаардлагатай. Иймд энэ ажлын гол зорилго нь ураны нягт өндөртэй цахиурт уран (U₃Si₂) түлш бүхий натри эсвэл хар тугалга хөргүүртэй түлшээ үржүүлэн шатаадаг хурдан реакторын голомтын дизайн хийж харьцуулна. Цахиурт уран түлш нь голдуу судалгааны реакторт ашиглагдаж байсан ба хурдан реакторын уламжлалт түлш болох метал түлштэй өрсөлдөхүйц байж болно.

Энэхүү ажлаар 750 МВт чадалтай, U₃Si₂ түлштэй, шингэн натри эсвэл шингэн хар тугалга хөргөлттэй, сэлгэн байрлуулах схемтэй, түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторын эхлэл голомтын дизайн хийж, түлшний шаталтын анализ гүйцэтгэн нейтроникийн үзүүлэлтийг тодорхойлон харьцуулав.

Түлхүүр үгс: Түлшээ үржүүлэн шатаадаг хурдан реактор, эхлэл (start-up) голомт, U₃Si₂ түлш

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

I. УДИРТГАЛ

Дэлхийн энергийн хэрэгцээний өсөлтийг хангах тогтвортой, найдвартай, цэвэр эх үүсвэр нь цөмийн эрчим хүч билээ.

Одоогийн байдлаар дэлхийн 30 гаруй оронд ажиллаж буй 417 орчим реактор нийт эрчим хүчний 10 % орчмыг үйлдвэрлэж байна [1]. Эдгээрийн дийлэнх нь дулааны реактор тул байгалийн ураныг баяжуулан ачаалах шаардлагатай. Түүнчлэн өнөөг хүртэл ажиллуулсан дулааны реакторуудаас үүссэн ашигласан цөмийн түлш их хэмжээгээр хуримтлагдсан, түүний дараагийн боловсруулалт болон хаягдлыг булшлах менежментийн асуудал бүрэн гүйцэт шийдэгдээгүй хэвээр байна. Цөмийн ашигласан түлшийг радиохимийн үйлдвэрт дахин боловсруулах замаар хэрэгтэй изотопыг ялган авч, хэмжээ болон цацрагийн хорт чанарыг багасгаж болох хэдий ч, ийм үйлдвэр маш өндөр өртөг зардалтай тул одоогоор цөөн хэдэн орон үүнийг ажиллуулж байна. Иймд ашигласан цөмийн түлшний хуримтлалыг сааруулах замаар энэ асуудлыг шийдвэрлэх боломжтой бөгөөд энэ

нь байгалийн уран эсвэл ядуурсан уран түлшийг шатаан ажиллахын зэрэгцээ түлшинд агуулагдах үржигч цөмийг хувирган хуваагдагч цөмийг үйлдвэрлэдэг хурдан реакторыг ашиглах явдал юм. Өргөн ашиглагддаг цөмийн түлшний элемент болох уран нь байгаль дээр U²³⁵ ба U²³⁸ гэсэн хоёр төрлийн изотоп байдлаар тархсан байх ба реакторт U²³⁵ хуваагдагч цөм хуваагдахын хамтаар U²³⁸ үржигч цөм нейтрон шингээн $U^{238+n} \rightarrow U^{239} \xrightarrow{\beta^-} Np^{239} \xrightarrow{\beta^-} Pu^{239}$ хувирлаар Pu²³⁹ хуваагдагч изотопыг байнга үүсгэж байдаг. Байгалийн уран эсвэл ядуурсан уран түлш ашиглах хурдан реакторт Pu²³⁹ цөм нь баяжуулсан түлш ашиглах дулааны реакторынхаас илүү хурдтай үүсч, түлш болон шатна. Ажиллагааны ийм нөхцөл хангагдсан реакторт үлдэх ашигласан цөмийн түлшний найрлага зэвсэг болгон ашиглах боломжгүй болдог, мөн хаягдлын цацраг идэвхийн хэмжээ багасах давуу талтай юм. Судлаачид түлшээ үржүүлэн шатаадаг хурдан реакторын голомтын дизайны хэд хэдэн хувилбарыг судалжээ. Үүнд TWR [2-3], CANDLE [4-5], мөн шаардагдах

¹ Email: sodmaal@num.edu.mn; sodmaal@gmail.com

хамгийн бага шаталттай түлшийг 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 бэрхшээл учирдаг. Голомтыг критик төлөвт ажиллуулахын тулд голомт дэх нейтроны үүсэл болон алдагдлын хооронд тэнцвэр тогтсон байх ёстой. Энэ тэнцвэрийг барих нэг арга нь түлшний эвлүүлгүүдийг сэлгэх замаар голомтын нейтроны урсгал ихтэй байрлалд хуваагдагч изотопын (Pu^{239} гэх мэт) концентрац өндөртэй түлшийг байнга байрлуулах явдал юм. Энэ санааг Японы Токиогийн Шинжлэх Ухааны Институтийн профессор Тору Обарагийн судалгааны баг дэвшүүлж, түлш болон хөргүүрийн материалын янз бүрийн хослол бүхий голомтыг өөр өөр сэлгээний схемтэйгээр түлшээ үржүүлэн шатаах ажиллагааны горимыг ханган ажиллахыг судласан байна [8-10].

Бид өмнөх ажлаараа түлш болон хөргүүрийн материалын ямар хослолд голомт дэх нейтроны тоо илүү их байх талаарх параметрийн судалгаа [11], мөн нейтроны тоог нэмэгдүүлэх дизайны боломжийн судалгаа [12] зэргийг гүйцэтгэсэн. Эдгээр судалгаанд үндэслэн ураны нитрид эсвэл цахиурт уран түлштэй шингэн натри хөргүүртэй, сэлгээний схемтэй хурдан реакторын голомтын дизайн хийж, түлшээ үржүүлэн шатаах горимд тогтвортой ажиллах боломжтойг харуулсан [13-16].

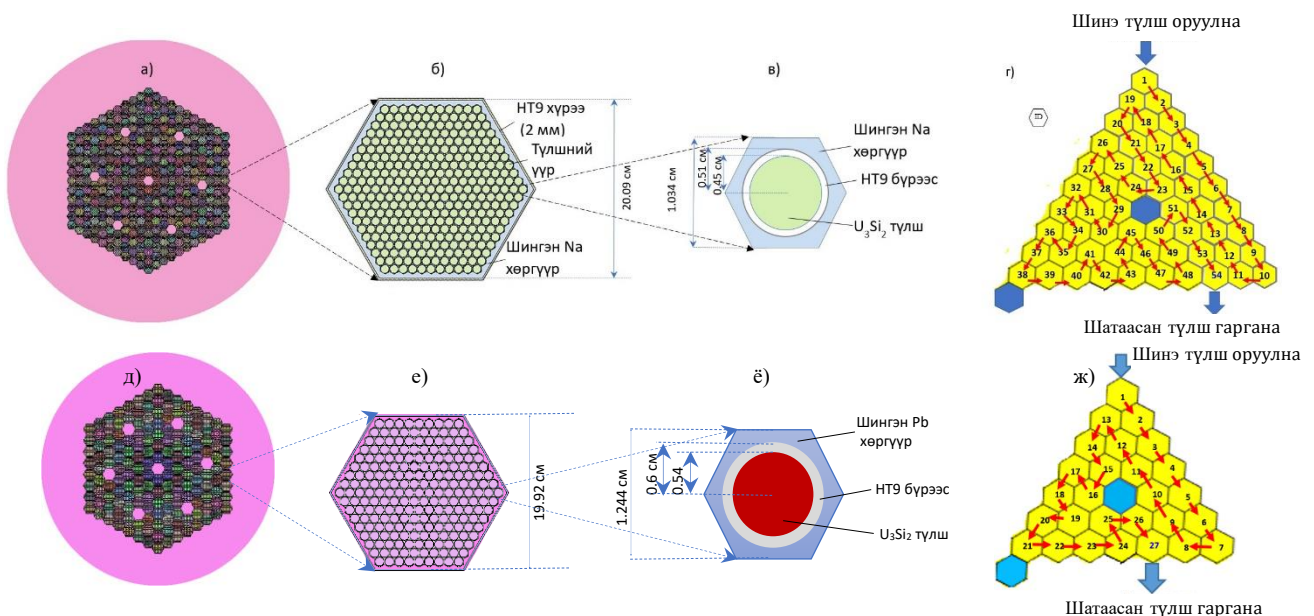
Цахиурт уран U_3Si_2 түлш нь физик нягт нхтэй тул ураны атомын нягт өндөр. Иймд үүнийг ихэвчлэн судалгааны реакторт ашигладаг ба эрчим хүчний реакторт ашигласан туршлага

бараг байхгүй. Хэдийгээр энэ түлшний хайлах температур нь ураны карбид ба ураны исэл түлшнийхтэй харьцуулбал бага ч, түүний дулаан дамжуулах чадвар болон дулаан багтаамж нь температураас хамаарч ихэсэх тул ослын үед түлшний төвийн температурыг бууруулах давуу талтай [17-18].

Натри хөргүүрийн хувьд хүчилтөрөгчтэй орчин эсвэл агаарт гал үүсэх, дэлбэрэх аюултай ч үүнийг ашигласан туршлага арвин, харин хар тугалгын хувьд дээрх эрсдэл байхгүй ч, ажиллуулж ашигласан туршлага байхгүй. Шингэн натри болон хар тугалга нь нейтроны алдагдал болон дулаан зайлуулах шинж чанараараа ялгаатай [19-20] тул ижил чадал үйлдвэрлэхэд эдгээр хөргүүр бүхий голомтын дизайн ялгаатай байх бөгөөд нейтроникийн ба аюулгүй ажиллагааны гүйцэтгэлийг харьцуулах шаардлагатай. Иймд энэ ажлын гол зорилго нь ураны нягт өндөртэй U_3Si_2 түлш бүхий хар тугалга хөргүүртэй, сэлгээний схемтэй, түлшээ үржүүлэн шатаах горимд тогтвортой ажиллах хурдан реакторын эхлэл голомтын дизайн хийж, гүйцэтгэлийг тодорхойлж, натри хөргүүртэй реакторын үзүүлэлттэй харьцуулна.

II. ТОГТВОРТОЙ ТӨЛӨВИЙН АНАЛИЗ

Бидний өмнөх ажилд 750 МВт дулааны чадал үйлдвэрлэх, 85% онолын нягттай цахиурт уран түлштэй, натри хөргүүртэй, түлшээ үржүүлэн шатаадаг хурдан реакторын голомтын тогтвортой төлөвийн анализыг гүйцэтгэн, эхлэл голомтын дизайныг хийж нейтроникийн



Зураг 1. а), д) Голомтын, б), е) түлшний эвлүүлгийн, в), ё) түлшний үүрийн хөндлөн зүсмэг, г), ж) голомтын 1/6 хэсгийн түлшний эвлүүлгийн сэлгээний схем

гүйцэтгэлийг үнэлсэн [15-16]. Энэ ажилд хөргүүрээ хар тугалгаар солин ижил чадлын, 85% онолын нягттай цахиурт уран түлштэй түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторын голомтын тогтвортой төлөвийн анализ хийн өмнөх ажлын үр дүнтэй харьцуулав.

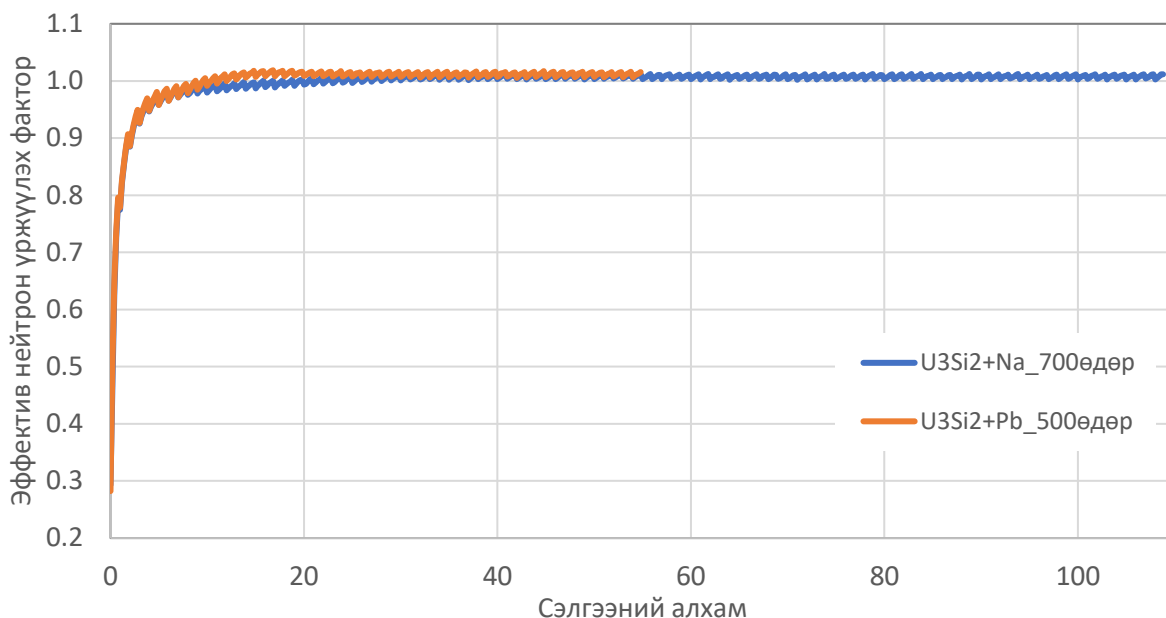
Хар тугалга хөргүүртэй голомтын үндсэн үзүүлэлтийг натри хөргүүртэй голомтынхтой харьцуулан Хүснэгт 1-д харуулав. Шингэн натри ба хар тугалга хөргүүртэй голомтын түлшний үүр, эвлүүлэг болон голомтын хөндлөн огтлол болон 1/6 тэгш хэмтэй голомтод түлшний эвлүүлгийг сэлгэн байрлуулах схемийг харгалзан Зураг 1а-1г ба Зураг 1д-1ж -д харуулав. Зураг 1г, 1ж-д харуулсан түлшний эвлүүлэг дэх тоо (ID) нь харгалзах байрлалын дугаарыг төлөөлнө.

Эхлээд голомт даяар шинэ түлш бүхий эвлүүлгүүдийг байрлуулан тодорхой хугацааны (сэлгээний интервал) турш 750 МВт дулааны чадал үйлдвэрлэнэ. Нэг сэлгээний үргэлжлэх зохимжит хугацаа натри ба хар тугалга хөргүүртэй голомтод харгалзан 700 өдөр [15] ба 500 өдөр байсан. Натри нь хар тугалгатай харьцуулбал нейтрон сарниулах огтлол нь өндөр

тул натри хөргүүртэй голомтоос нейтроны алдагдал их байдаг. Иймд хоёр реактор яг адил 750 МВт чадал үйлдвэрлэхийн тулд натри хөргүүртэй голомт дэх түлшний хэмжээ их, шатах хугацааг арай уртаар сонгож Pu^{239} хуваагдагч цөмийг хангалттай хэмжээгээр үйлдвэрлэн, хуваагдалд оруулсан нөхцөлд голомт критик горимд ажиллаж байна. Хоёрдугаар сэлгээнд 1-р байрлалд гаднаас шинээр түлш ачаалж, анх уг байрлалд байсан түлшний эвлүүлгийг ID-2 луу, 2-р байрлалд байсныг нь ID-3 луу гэх зэргээр голомтын төвийн муж руу сэлгэн байрлуулсаар натри хөргүүртэй голомтын хувьд 54-р байрлалд, хар тугалга хөргүүртэй бол 27-р байрлалд байрласан түлшний эвлүүлгийг голомтоос гаргана. Энэ мэтээр анхны голомтын бүх түлшний эвлүүлэг голомтоос гарах үеийг сэлгээний нэг цикл гэх бөгөөд натри ба хар тугалга хөргүүртэй реакторын голомтууд харгалзан 54 ба 27 сэлгээний дараа эхний бүтэн цикл дуусна. Ингээд хоёр бүтэн сэлгээний цикл (натри эсвэл хар тугалга хөргүүртэй голомтод харгалзан 108 эсвэл 54 сэлгээ) явуулсны эцэст эдгээр голомтын

Хүснэгт 1. Голомтын үндсэн үзүүлэлтүүд

Параметр	Na хөргүүртэй [15-16]	Pb хөргүүртэй
Дулааны чадал (МВт)	750	
Голомтын өндөр (см)	180	140
Аксиал чиглэлийн давхаргын тоо	9	7
Голомтын эквивалент радиус (см)	200	143
Радиал чиглэлийн бүсийн тоо	10	7
1/6 голомт дэх түлшний эвлүүлгийн тоо	54	27
Хөргүүрийн суваг буюу удирдлагын савааны эвлүүлгийн тоо	7	
Нэг эвлүүлэг дэх түлшний үүрийн тоо	331	217
Түлшний эвлүүлгийн алхам (см)	20.09	19.92
Түлшний материал	U_3Si_2	
Түлшний баяжуулалт	Байгалийн уран	
Хөргүүр материал	Натри	Хар тугалга
Бүрээс материал	HT9 ган	
Түлшний савааны радиус (см)	0.45	0.54
Бүрээсийн гаднах радиус (см)	0.51	0.6
Түлшний үүрийн алхам (см)	1.034	1.244
Хүрээний зузаан (см)	0.2	
Түлшний эвлүүлэг хоорондын зай (см)	0.2	
Хүрээний материал	HT9 steel	
Түлшний нягт	Онолын нягтын 85%	
Түлшний дундаж температур (К)	800	
Бүрээсийн дундаж температур (К)	700	
Хөргүүрийн дундаж температур (К)	700	
Дээд ба доод талын ойлгогчийн зузаан (м)	1	
Радиал ойлгогчийн зузаан (м)	1.5	
Ойлгогчийн материал	Натри	Хар тугалга



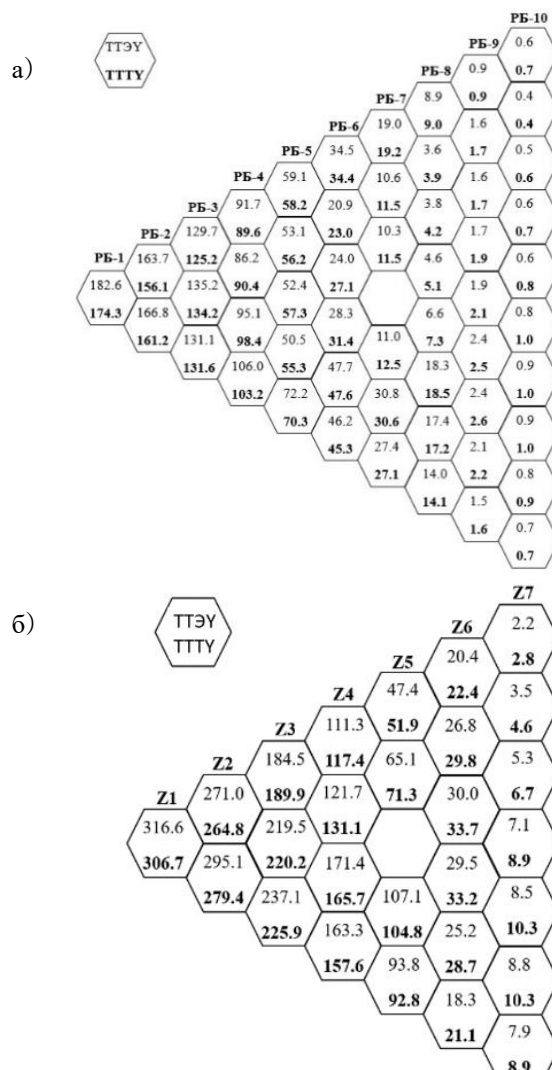
Зураг 2. Эффе́ктив нейтрон үржүүлэх фактор сэлгээний алхмаас хамаарах өөрчлөлт

нөхцөл байдал тогтвортой төлөвт хүрсэн эсэхийг шалгахын тулд түлшний шаталтын тооцоолол гүйцэтгэв.

Хоёр голомтын түлшний шаталтын тооцооллыг тасралтгүй энергитэй нейтонууд голомтын материалтай харилцан үйлчлэхийг Монте Карло аргаар тооцоолдог SERPENT 2.1 код [21], цөмийн өгөгдлийн ENDF-B/VII.0 санг [22] ашиглан тооцооллыг ижил нөхцөлд гүйцэтгэсэн. Энд сэлгээний алхам бүрт 50000 нейтрон голомтод байна гэсэн нөхцөл тавин, голомтын материалуудтай санамсаргүй харилцан үйлчлэл хийн 750 МВт дулааныг үйлдвэрлэхэд нейтроникийн үзүүлэлтүүд хэрхэн өөрчлөгдөхийг харуулах үр дүнг гарган авсан. Ийм харилцан үйлчлэлийг нийтдээ 200 удаа давтсан ба эхний 50-ийг нь үр дүнгийн статистик алдааг багасгах үүднээс тооцоогүй. Голомтын мужуудын ажиллагааны үеийн температурыг Хүснэгт 1-д мөн өгөв.

Энэ тооцооллоор голомтоос удирдлагын савааны бүх эвлүүлгийг гаргасан үед голомт критик төлөвт хүрч, түлшээ үржүүлэн шатаах горимд хүрсэн эсэхийг шалгав.

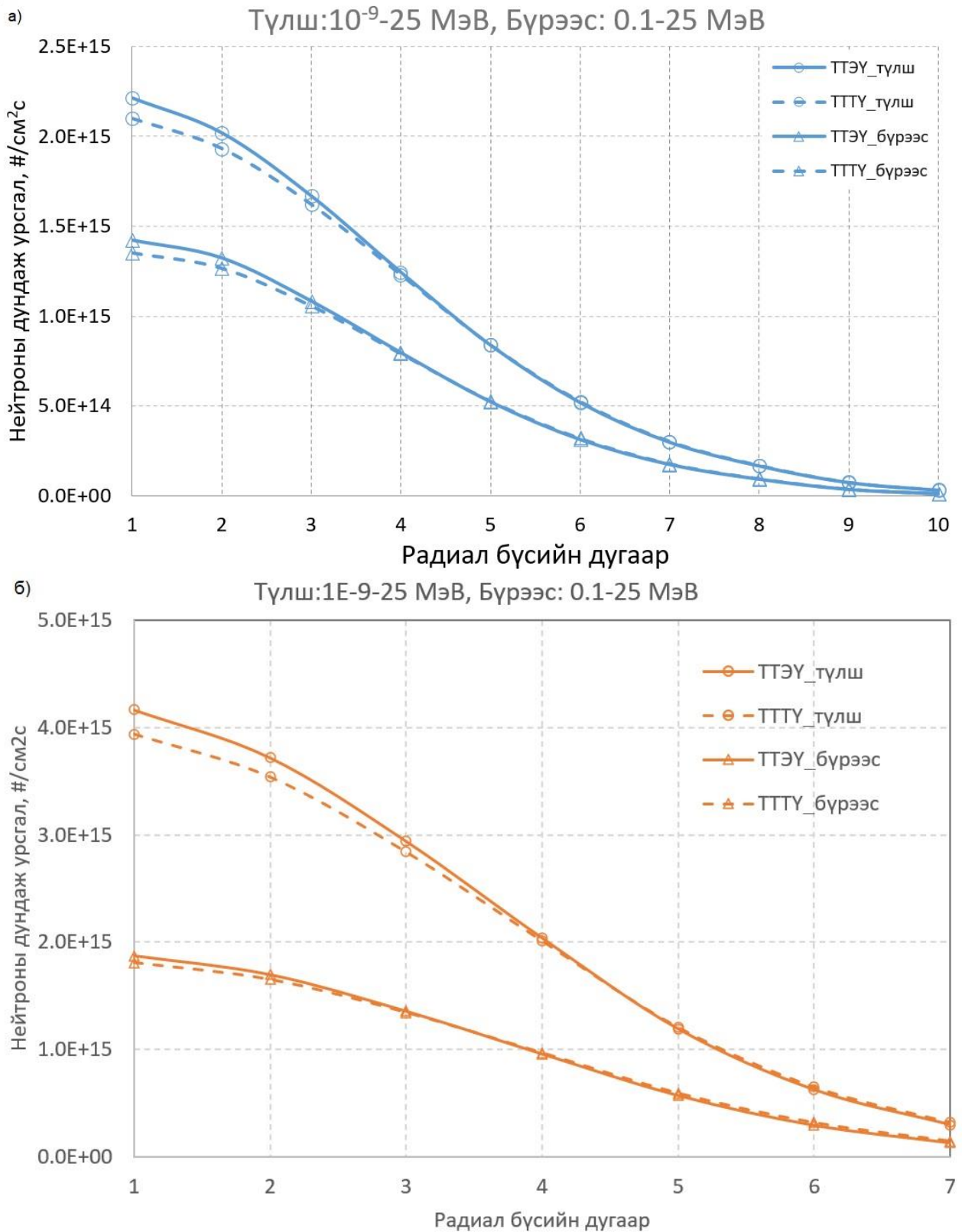
Хоёр голомтын эффе́ктив нейтрон үржүүлэх факторын өөрчлөлтийг сэлгээний алхмаас хамааруулан Зураг 2-т харуулав. Эхэндээ реактор критикээс доогуур төлөвт байх ба хуваагдагч изотопын концентрац өндөртэй түлшийг нейтроны урсгал ихтэй голомтын байрлалд сэлгэн байрлуулснаар нейтроны тоо алгуур ихэсч, критик төлөвт хүрч, голомтын тэнцвэрийн төлөвт эффе́ктив нейтрон үржүүлэх факторын утга 1-ээс их болохыг Зураг 2-оос харж болно. Мөн тэнцвэрт төлөвт түлшний



Зураг 3. а) Шингэн натри, б) шингэн хар тугалга хөргүүртэй голомтын ТТЭУ ба ТТТУ-д голомтын 1/6 хэсэг дэх дундаж чадлын нягтын ($Вт/см^3$) 2D түгээлт

шатаалтын турш чадлын нягт болон нейтроны урсгалын түгэлт өөрчлөгдөхгүй байх ёстой. Голомт ийм тэнцвэрт төлөвт хүрсэн л бол төвдөө нейтроны урсгал өндөр байж, түлшээ үржүүлэн

шатаах горимоо тасралтгүй хадгалдаг. Хоёр голомтод харгалзан сэлгээний 108 болон 54 дугаар төлөвийг тэнцвэрийн төлөв гэж авч үзэв. Тэнцвэрийн энэ төлөвт хоёр голомтын илүүдэл



Зураг 4. Тэнцвэрт төлөвийн эхэн ба төгсгөлд түлш ба бүрээсийн материалд нейтроны дундаж урсгалын радиал түгэлт. а) Na хөргүүртэй голомт, б) Pb хөргүүртэй голомт

реактивитийн хамгийн их утга ойролцоогоор 1.12 % ба 1.50 % байгаа ба удирдлагын савааны эвлүүлгийг голомт руу оруулах замаар үүнийг бууруулж болно.

Зураг 3-д хоёр голомтын тэнцвэрт төлөвийн эхэн ба төгсгөл үе (ТТЭҮ ба ТТҮ)-ийн дундаж чадлын нягтын утгыг хоёр голомтын 1/6 хэсгийн түлшний эвлүүлэгт харуулав. Тэнцвэрт төлөвийн турш тухайн эвлүүлгийн үйлдвэрлэх чадлын нягт бараг тогтмол байна. Харин голомтын төв хэсэгт болон захад харгалзан хуваагдагч изотопын концентрац багатай ба ихтэй түлш байнга байрлах тул чадлын нягтын утга төв рүүгээ өндөр, зах руугаа бага байна. Зураг 4а, 4б-д хоёр голомтын ТТЭҮ ба ТТҮ-д түлш болон бүрээсийн материалаар урсах нейтроны дундаж урсгалын радиал түгэлтийг харуулав. Энд түлшний мужаар 10^9 -25 МэВ буюу бүх энергитэй нейтроны урсгалыг, харин бүрээсийн мужаар 100 кэВ-25 МэВ энергитэй нейтроны урсгалыг (учир нь, үүнийг бүрээсийн атом тутамд үүсэх шилжилтийн тоо, DPA тооцоолоход ашиглана) харуулав.

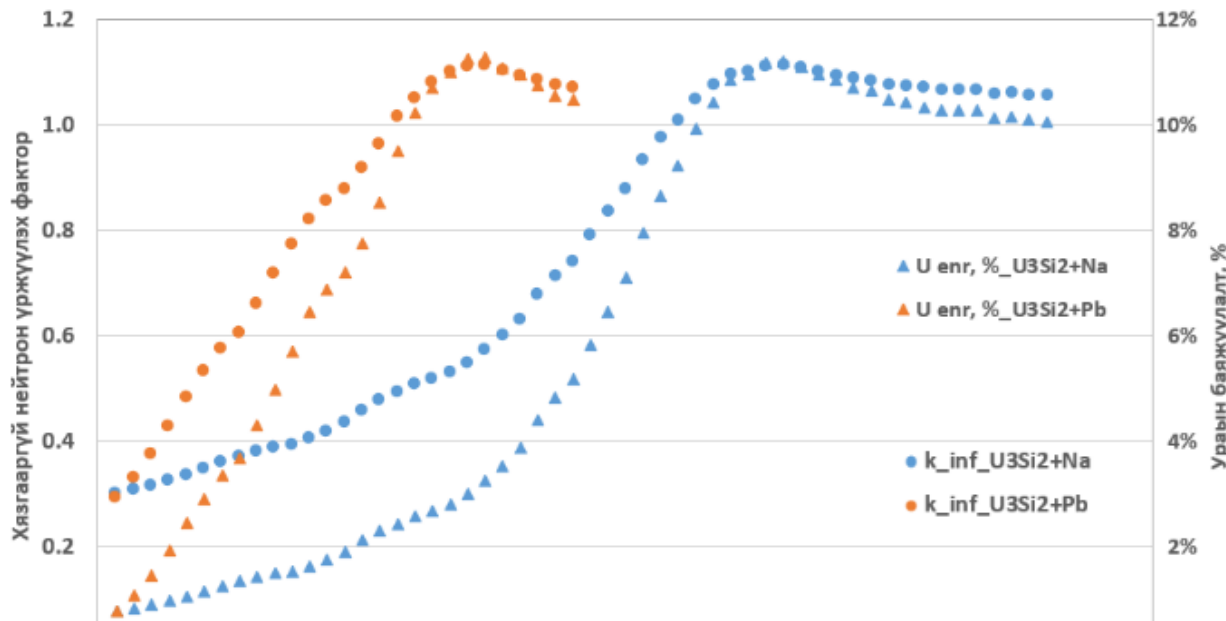
Зураг 4-аас харвал ТТЭҮ ба ТТҮ-д урсгалын түгэлтийн муруйнд ялгаа маш бага байгаа нь голомт түлшээ үржүүлэн шатаан ажиллах горимд хүрснийг батлана. Бүтэн хоёр сэлгээний дараа голомтоос гаргасан түлшний эвлүүлэг дэх түлшний шаталтын дундаж утга болон түлшний бүрээст үүссэн эвдрэлийн хамгийн их утгыг үнэлэхэд харгалзан харгалзан 234 МВт/кгХМ (ХМ-хүнд метал буюу уран, плутони) ба 659 DPA байв. Эдгээр нь шингэн натри хөргүүртэй голомтын хувьд харгалзан 243 МВт/кгХМ (ХМ-

хүнд метал буюу уран, плутони) ба 721 DPA байсан [16]. Энд 100 кэВ-ээс өндөр энергитэй $2 \cdot 10^{21}$ н/см² нейтроны урсацаар бүрээсийг шарахад 1 DPA эвдрэл үүснэ гэж тооцов [23]. HT-9 ган материалын хувьд цацрагийн эвдрэлийн хүлцэх хязгаарыг үнэлсэн судалгаа цөөхөн байгаа ба энэ утгыг TerraPower компани тайландаа 650 DPA гэж үнэлсэн байна [3]. Хар тугалга хөргүүртэй тэнцвэрт голомтын түлшний бүрээсийн эвдрэл одоогийн хязгаар дотор байгаа бол натри хөргүүртэй бага зэрэг өндөр байгаа ч цаашдын судалгаагаар энэ хязгаар 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 төлөвт (натри хөргүүртэй голомтод 108-р сэлгээ, хар тугалга хөргүүртэй голомтод 54-р сэлгээ) хүрсэн голомтын түлшний эвлүүлэг тус бүрийн реактивититэй тэнцүү утгатай байхаар шинэ түлшний тохирох баяжуулалтыг критик байдлыг тодорхойлох тооцооллыг гүйцэтгэж олно. Эхлээд тэнцвэрт төлөвт хүрсэн голомтын элементийн найрлагатай түлшний эвлүүлэг бүрийг радиал чиглэлд хязгааргүй хилийн нөхцөлтэйгээр, босоо чиглэлд бодит голомттой адил хилтэй хязгааргүй систем гэж үзэн нейтрон үржүүлэх факторыг гарган авна. Дараа нь эдгээртэй адил утга өгөхүйц ураны баяжуулалтын хэмжээг түлшний эвлүүлэг тус



Зураг 5. Шингэн натри болон хар тугалга хөргүүртэй эхлэл голомтын 1/6 хэсгийн түлшний эвлүүлэг дэх U_3Si_2 -ийн ураны баяжуулалт болон эвлүүлэг бүрт харгалзах хязгааргүй нейтрон үржүүлэх факторын утга

бүрийн олохын тулд критик байдлын тооцооллыг дахин гүйцэтгэнэ.

Ийм аргаар эхлэл хоёр голомтыг бүрдүүлэх түлшний эвлүүлэг бүрийн U_3Si_2 түлшний баяжуулалтын утга болон ийм баяжуулалттай эвлүүлэг тус бүрийн хязгааргүй нейтрон үржүүлэх факторын утгыг Зураг 5-д харуулав.

Зураг 5-аас харвал голомтын төв хэсгийн түлшний эвлүүлэг хамгийн их баяжуулалттай бөгөөд энэ нь натри ба хар тугалга хөргүүртэй голомтод харгалзан 38 ба 21-р байрлал дэх түлшний эвлүүлэгт 11.18 % ба 11.24 %, харин захын ID-1 байрлалд байрлах түлшний эвлүүлгийн хамгийн бага буюу 0.73 % ба 0.74% байна. Тэнцвэрт төлөвт хүрсэн голомтын төв рүү хуваагдагч изотоп ихээр үүссэн эвлүүлгүүд байрлах тул эхлэл голомтын төв хэсэгт баяжуулалт өндөр түлш байрлах нь тодорхой юм.

3.2. Эхлэл голомтын түлшний шаталтын анализ

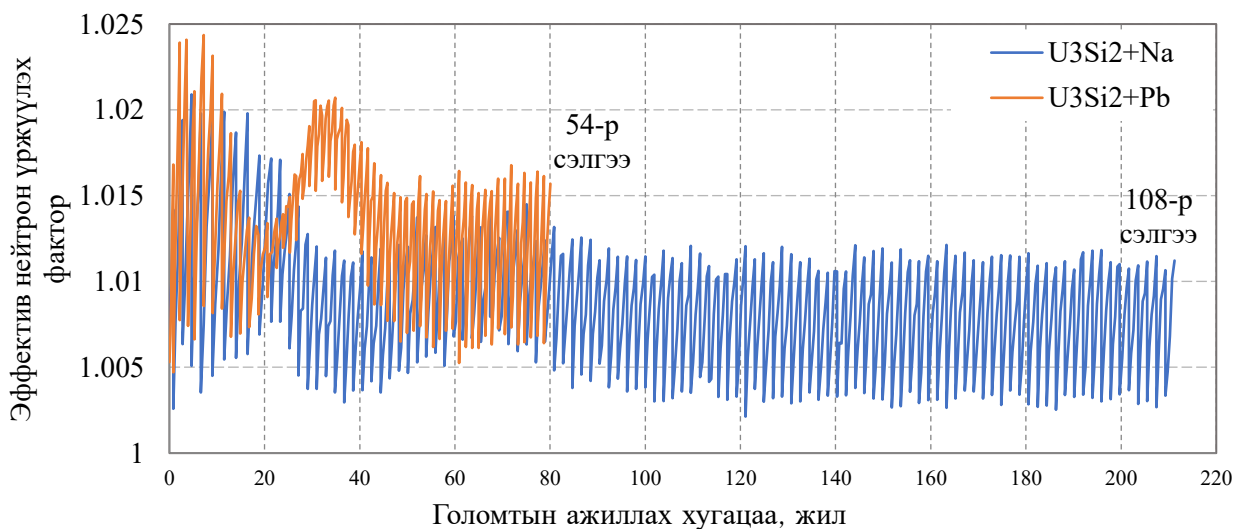
Өмнөх хэсэг 3.1-д олсон найрлага бүхий түлшний эвлүүлэгтэйгээр эхлэл голомтын түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэж, уг голомт түлшээ үржүүлэн шатаах горимыг ханган критик төлөвт ажиллах нөхцлийг олох шаардлагатай. Өмнөх ажилд [16] эхлэл голомтыг бүтэн хоёр циклийн турш критик төлөвт ажиллуулсан, тэнцвэрт төлөвт хүргэх аргыг дэлгэрэнгүй тайлбарласан ба энэ аргаар сэлгээний интервалыг нь өөрчлөн тохируулж, хоёр голомтын эффектив нейтрон үржүүлэх факторын өөрчлөлтийг Зураг 6-д хамтад нь харуулав. Натри хөргүүртэй голомтын хувьд эхний алхамд 300 өдөр, дараагийн гурван алхмын турш 700 өдөр, 5-11-р алхамд 900 өдөр, үлдсэн алхамуудад 700 өдрийн интервалтайгаар, харин хар тугалга хөргүүртэй голомт эхний алхамд 300 өдөр,

дараагийн гурван алхмын турш 500 өдөр, 5-13-р алхамд 700 өдөр, үлдсэн алхамуудад 500 өдрийн интервалтай ажиллахад тэнцвэрт төлөвт хүрч тогтвортой ажиллаж байна.

Өмнөх ажилд [16] өгүүлснээр эхлэл голомт тогтвортой төлөвт хүрсэн л бол гомтын гүйцэтгэлийн үзүүлэлтүүд өмнөх хэсэг 2-ийн анализын үр дүнтэй адил түлшээ үржүүлэн шатаах горимыг дэмжиж ажилладаг.

Өмнөх хэсэг II-т гүйцэтгэсэн тогтвортой төлөвийн тооцооллод үнэлсэн бүрээсийн DPA-ийн хамгийн их утга 659 болон түлшний шаталтын дундаж утга 234 МВт-өдөр/кгХМ-тай адил байсан. Плутонийн изопотын харьцаанд Pu^{240} -ийн эзлэх хувь 18-30% хооронд байсан нь реакторт ашиглаж болох түвшинд байгаа нь голомтоос гаргасан түлшний эвлүүлгээс плутонийг ялган цөмийн зэвсэг болгон ашиглах боломжгүй болгоно [24]. Хоёр голомтын хувьд голомтоос гаргасан түлшний эвлүүлгийн шаталтын утгад үндэслэн түлшний циклийн тооцоо хийн дүнг Хүснэгт 2-д харьцуулан харуулав. Хар тугалга хөргүүртэй эхлэл голомтын хэмжээ натри хөргүүртэй голомтынхоос маш бага тул анх ачаалсан ураны нийт хэмжээ ойролцоогоор 3 дахин бага байгаа ба сэлгээний хугацаа ялгаатай тул 750 МВт чадлыг жилийн турш үйлдвэрлэхэд шаардагдах ураны хэмжээ ойролцоо байна.

1 МВт-ийн дулааны чадал үйлдвэрлэх LWR реактор түлшний задгай ба битүү циклээр ажиллах бол шаардлагатай ураны хэмжээ харгалзан 61 кг/жил ба 38 кг/жил, LMFBR реакторын хувьд 0.5 кг/жил байдаг [25]. Харин адил чадал үйлдвэрлэх U_3Si_2 түлштэй түлшээ үржүүлэн шатаах реактор натри ба хар тугалга



Зураг 6. Эхлэл голомтийн эффектив нейтрон үржүүлэх фактор сэлгээний алхмаас хамаарч өөрчлөгдөх нь

хөргүүртэй бол шаардагдах ураны хэмжээ нь харгалзан 0.25 г/жил [16] ба 0.24 г/жил болно. Энэ нь түлшээ үржүүлэн шатаах реактор ураныг маш үр дүнтэй ашиглаж болохыг баталж байна.

Хүснэгт 2. Түлшний циклийн тооцооллын дүн

Ураны хэмжээ	Na хөргүүртэй [16]	Pb хөргүүртэй
Анхны эхлэл голомт	118тнU=7тнN U+111тнEU	43.4тнU=3тн NU+40.4тнEU
1-р сэлгээнд	438 кг/жил	326кг/жил
2-4 сэлгээнд	188 кг/жил	195 кг/жил
5-11/ 5-13 сэлгээнд	146 кг/жил	140 кг/жил
12-108/14-54 сэлгээнд	188 кг/жил	195 кг/жил

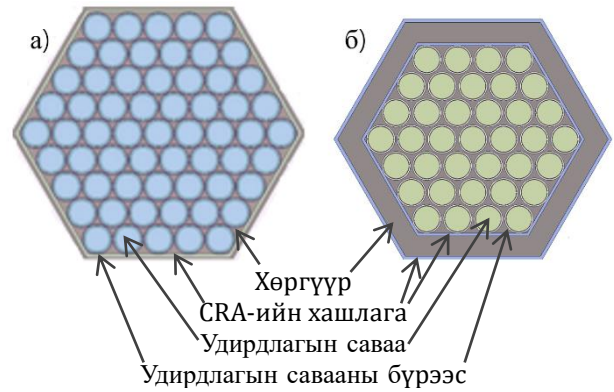
IV. ГОЛОМТЫН АЮУЛГҮЙ АЖИЛЛАГААНЫ ЧАНАР

Энэ хэсэгт хоёр голомтын аюулгүй ажиллагааны шинж чанарыг тодорхойлж харьцуулна. Энд голомтын удирдлагын савааны үнийг олох ба халуун сувгийн температурыг үнэлнэ.

4.1. Удирдлагын савааны үнэ

Удирдлагын саваа (CR)-ны эвлүүлэг (CRA)-ийн материалын мэдээллийг Хүснэгт 3-д, шингэн натри ба хар тугалга хөргүүртэй голомтуудад харгалзах CRA-ийн хөндлөн огтлолыг Зураг 8-д харуулав. Тэнцвэрт төлөвт хүрсэн голомтуудыг илүүдэл реактивити ойролцоо байсан ба натри хөргүүртэй голомтын хэмжээ том байсан тул цөөхөн саваатай CRA-ээр унтраах боломжгүй байсан. Иймд CRA-ийн дотоод хүрээ хашлагын оронд саваанууд нэмж нэг CRA-д 61 саваа байрлуулав. Харин хар тугалга хөргүүртэй голомтын хэмжээ жижиг тул давхар метал хүрээтэй 37 саваа бүхий CRA-ээр голомтыг удирдах боломжтой байв.

Удирдлагын савааны үнийн тооцооллыг хамгийн их үнэтэй байх төвийн эвлүүлэг гацсан, бусад 6 эвлүүлгийг голомт хамгийн их илүүдэл



Зураг 8. а) Натри, б) хар тугалга хөргүүртэй голомтод ашигласан CRA-ийн хөндлөн зүсмэг

Хүснэгт 3. CRA-ийн үзүүлэлт

CRA-ийн параметр	Na хөргүүртэй голомт	Pb хөргүүртэй голомт
Эвлүүлэг дэх CR-ын тоо	61	37
CR-ын материал	B_4C (90% ^{10}B)	
CR-ын нягт	Онолын нягтын 90%	
CR-ын радиус (мм)	10.15	9.15
CR-ын материал болон бүрээсийн хоорондох дүүргэгч хий	He	
Дотоод ба гадаад хүрээ хашлагын хоорондох зай (мм)	-	16.3
CR-ын бүрээсийн дотоод радиус (мм)	11.4	10.4
CR-ын бүрээсийн гадаад радиус (мм)	12.4	11.4
CR-ын савааны алхам (мм)	25.2	24.3
CRA-ын алхам (мм)	198.9	148.8
CRA-ын гадаад алхам (мм)	200.9	200

Хүснэгт 4. CRA-ийн үнэ

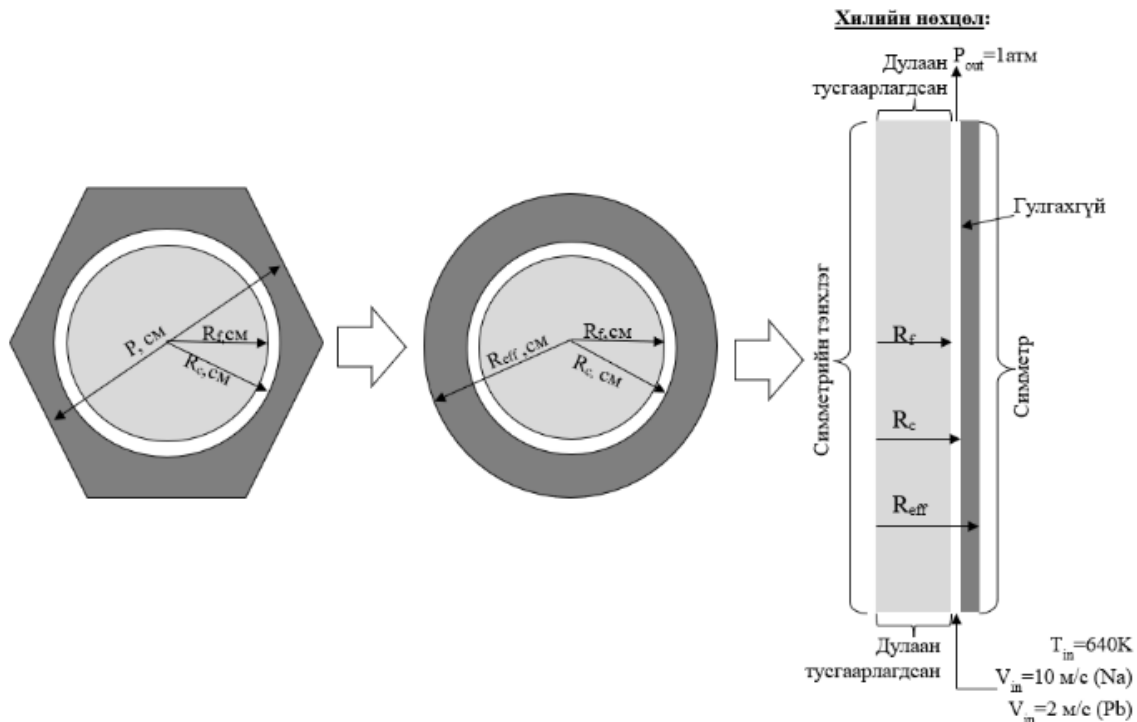
ХИ k_{eff} -тэй төлөв	k_{eff} (CRA оруулаагүй)	ρ (CRA оруулаагүй)	k_{eff} (6CRA оруулсан)	ρ (6CRA оруулсан)	6CRA-ны үнэ, %
Na	1.0209 ± 0.0004	0.0205	0.9992 ± 0.0004	-0.0008	-2.1%
Pb	1.0244 ± 0.0004	0.0238	0.9789 ± 0.0004	-0.0216	-4.6%

реактивитетэй байх үед амжилттай оруулсан гэсэн хязгаарын нөхцөлд гүйцэтгэсэн. Голомт руу орж буй байрлалаас хамаарч удирдлагын саваануудын үнэ (реактивитийг сөрөг болгох чадвар) нь ялгаатай байдаг бөгөөд голомтын төвд нейтроны урсгал хамгийн өндөр байдаг тул төвийн удирдлагын эвлүүлэг хамгийн их үнэтэй, реакторын удирдлагын чухал хэсэг байдаг. Тооцооллын үр дүнг Хүснэгт 4-д өгөв. Хамгийн их илүүдэл реактивити нь шингэн натри хөргүүртэй эхлэл голомтын хувьд 5-р сэлгээний төгсгөлд, шингэн хар тугалга хөргүүртэй голомтын тухайд 7-р сэлгээний төгсгөлд харгалзаж байна. Үр дүнгээс харахад хоёр голомтын ажиллагааны үед шаардлага гарвал захын 6 CRA-аар амжилттай унтраах боломжтой байна.

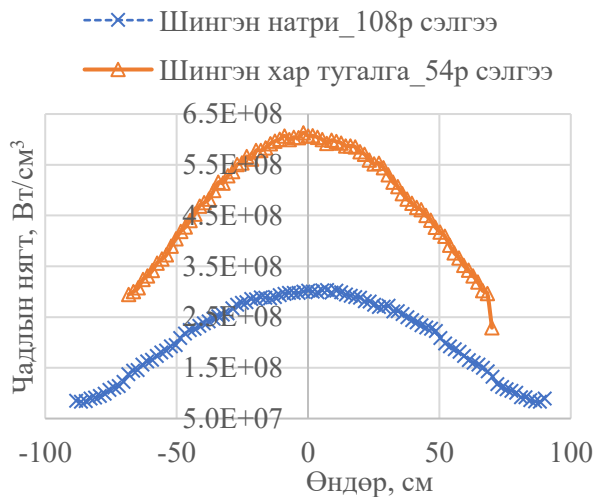
4.2. Халуун сувгийн дулааны гидравликийн анализ

Аюулгүй ажиллагааны шинж байдлыг шалгах дараагийн тооцоолол нь голомтын хамгийн их чадал үйлдвэрлэж буй түлшний үүрт дулааны гидравликийн анализ гүйцэтгэж, түлшний үүрийн мужуудын хамгийн их температур аюулгүйн хязгаарт хүрэхгүйгээр, хуваагдлын дулааныг хөргүүрт амжилттай дамжуулахыг харуулах явдал юм.нэ тооцооллыг COMSOL multiphysics [26] программын дулаан зайлуулах модулийг ашиглан халуун сувгаар урсах хөргүүрийг тогтуун гэж үзэн гүйцэтгэсэн.

Тооцооллын модулд тохируулж хялбарчлахын тулд хамгийн халуун бодит түлшний үүрийн зургаан өнцөгт геометрийг эффектив диаметртай тэнхлэгийн симметр цилиндр болгон өөрчлөв. Ингэснээр тооцооллын мужийн зөвхөн хамгийн гаднах гадаргуун хэлбэр өөрчлөгдөх бөгөөд энэ нь мужуудийн хамгийн их температурын утгад нөлөөлөхгүй. Зураг 9-д тооцоололд ашигласан геометрийн хөндлөн ба босоо зүсмэгийг харуулав. Түлшний үүр лүү орж буй хөргүүрийн оролтын температур шингэн натри ба хар тугалга хөргүүртэй түлшний үүрт адил 640 К, гаралтын даралт адил 1 атм байсан, харин хөргүүрийн оролтын хурд нь шингэн натри болон хар тугалган хөргүүртэй голомтын хувьд харгалзан 10 м/с ба 2 м/с болно [27-29]. Хурдны эдгээр утга нь түлшний метал бүрээс болон голомтын хийцийн материалтай шингэн метал харилцан үйлчилснээр исэлдүүлж, зэврүүлэх процессийн хурдыг хязгаарлах дээд тогтоогдсон нийтлэг утга болно. Зураг 10-д өмнөх III хэсэгт авч үзсэн эхлэл голомтын түлшний шаталтын үр дүнгээс гарган авсан тэнцвэрт төлөвийн хамгийн халуун түлшний үүрийн босоо чиглэлийн дагуух чадлын нягтын түгэлтийн хоёр голомтод харьцуулан харуулжээ. Хар тугалга хөргүүртэй голомтын хэмжээ натри хөргүүртэй голомтынхоос бага тул ижил чадал үйлдвэрлэхийн тулд түлшний нэг үүрт харгалзах чадлын нягт нь төдийчинээ өндөр байгаа нь харагдана.



Зураг 9. Түлшний үүрийн дулаан зайлуулах тооцооллын геометрын хөндлөн ба босоо зүсмэг



Зураг 10. Шингэн натри ба хар тугалга хөргүүртэй, эхлэл голомтын тэнцвэрт төлөвийн хамгийн халуун түлшний үүр дэх аксиал чадлын нягтын түгэлт

Халуун сувгийн тогтвортой төлөвийн дулааны зайлуулах тооцооллоор түлш, бүрээс, хөргүүрийн мужийн температурын хамгийн нх утга нь шингэн натри хөргүүртэй голомтод харгалзан 613°C , 574°C , 569°C байсан [29] бол шингэн хар тугалга хөргүүртэй голомтод харгалзан 1457°C , 1387°C , 1374°C гэж үнэлэгдсэн нь эдгээр материалыг хайлах болон буцлах температуруудаас маш бага байв [29]. Хар тугалга хөргүүртэй реакторын хувьд хөргүүр хайлах гол асуудал биш, харин температурын зарим утгаас хийцийн материалд эвдрэл гэмтэл ажиглагдаж эхэлдэг ба энэ температурын босго утга нь зарим төрлийн ган материалд 750°C утгаас эхэлдэг байна [30-33]. Ийм өндөр температурт бүрээс зэвэрч элэгдэн бүрэн бүтэн байдал нь алдагдвал түлшнээс цацраг идэвхт бодис хөргүүр рүү алдагдах, ослын тохиолдолд орчинд тархах эрсдэлтэй. Хэрэв энэ утгыг хөргүүрийн аюулгүй ажиллагааны температурын хязгаар утга гэж үзвэл хар тугалга хөргүүртэй голомтын ажиллагааны үеийн дутагдалтай үзүүлэлт энэ болох байна.

V. ДҮГНЭЛТ

1. Энэхүү ажлаар 750 МВт-ду чадлын, U_3Si_2 түлштэй хар тугалга хөргүүртэй, түлшний
2. эвлүүлгийг сэлгэн байрлуулах схемтэй, түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторын эхлэл голомтын дизайн хийж, үзүүлэлтийг шингэн натри хөргүүртэй реакторынхтай харьцуулав.
3. Хоёр голомтын нейтроникийн, дулааны гидравликийн, аюулгүй ажиллагааны анализуудыг гүйцэтгэн цахиурт уран

түлштэй, түлшээ үржүүлэн шатаах горимд ажиллан тэнцвэрт төлөвт хүрч байгааг харуулав.

4. Хоёр реакторыг ажиллуулахад эхний болон хоёрдугаар 60 жилд харгалзан ойролцоогоор 11 тн ба 12 тн уран шаардлагатайг тогтоов.
5. Ердийн ажиллагааны үед шингэн хар тугалга хөргүүртэй реакторын бүрээс зэврэх урвал явагдах эрсдэлтэй байгаа тул:
 - реакторын чадлыг бууруулах,
 - хөргүүрийн оролтын хурдыг нэмэгдүүлэх,
 - шинэ хийцийн материал сонгох,
 - бүрээсээс урсах дулааны урсгалыг ихэсгэх
 зэрэг замаар бүрээс зэврэх урвал явагдах босго температурт хүргэхгүй байх боломжтой.
6. Энэ ажилд үндэслэн цахиурт уран түлштэй, хар тугалга хөргүүртэй, түлшээ үржүүлэн шатаах, бага чадлын реакторыг удаан хугацаанд, аюулгүй ажиллуулж болно.

VI. ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааны ажлыг МУИС-ийн P2025-4997 дугаартай “Түлшээ үржүүлэн шатаадаг (B&B) бага чадлын реакторын голомтын дизайны судалгаа-III” сэдэвт төслийн хүрээнд МУИС дэх Азийн судалгааны төвийн санхүүгийн дэмжлэгтэйгээр гүйцэтгэв.

VII. АШИГЛАСАН ХЭВЛЭЛ

1. International Atomic Energy Agency, Power reactor information system, <https://pris.iaea.org/pris/> (current as of Dec.05, 2025).
2. T. ELLIS, et al., TWRs: A truly sustainable and full-scale resource for global energy needs. Proceedings of ICAPP'10, San Diego, 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 CANDLER, *Proc. Physor 2000*, Pittsburgh, Pennsylvania, 2000, American Nuclear Society (2000).
5. H. SEKIMOTO, Application of CANDLER 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 боломжууд. МУИС, ФИЗИК. № 35 (594), 2024, хх1-8. <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. Odmaa Sambuu, Van Khanh Hoang, Tsendsuren Amarjargal, Toru Obara. Fuel cycle features of RFBB fast reactor with advanced fuel. *Journal of Nuclear Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/00223131.2025.2455051>.
17. M.R. FINLAY, et al., Irradiation behaviour of uranium silicide compounds, *J. Nucl. Mat.*, **325**, 118-128 (2004).
18. J.T. WHITE, et al., Thermophysical properties of U_3Si_2 to 1773 K, *J. Nucl. Mat.*, **464**, 275-2280 (2015).
19. IAEA-TECDOC-1569. Liquid metal cooled reactors: experience in design and operation. IAEA, 2007
20. Encyclopedea of Nuclear Energy. Russell E.Stachowski. Commercial nuclear power reactors and their design-Introduction. Elsevier, 2021, 153-156 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819725-7.00116-1>
21. J. LEPPÄNEN, Serpent—a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, VTT Technical Research Centre of Finland (2015).
22. 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).
23. Edited by D.G. CACUCI, *Handbook of Nuclear Engineering*. Vol.6, p.555. Springer (2010).
24. B. PELLAUD, Proliferation Aspects of Plutonium Recycling, *J. of Nucl. Mat. Management*, Vol XXXI, No. I, 30-38 (2002).
25. Lamarsh, J, R., Baratta, A, J., 2001. Introduction to nuclear engineering, 3rd edition. Prentice Hall, p.196.
26. COMSOL AB, 2020, COMSOL-5.6. Multiphysics Modelling, Finite Element Analysis, and Engineering Simulation Software, <https://www.comsol.com> (current as of June, 2021).
27. Huaming Li, et.al., Thermodynamic properties of liquid sodium under high pressure. *AIP Advances* **7**, 045305 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4980023>
28. Tucek, K., et al., 2006. Comparison of sodium and lead-cooled fast reactors regarding reactor physics aspects, severe safety and economical issues, *Nucl. Eng. Des.*, **236**, 1589-1598
29. Sobolev, V., 2011. Database of thermophysical properties of liquid metal coolants for GEN-IV, SCK-CEN-BLG-1069, Scientific report of the Belgian Nuclear Research Centre, Belgium.
30. Piotr Mazgaj., et al. 2014. "Comparison of simple design of sodium and lead cooled fast reactor cores." *Journal of power tech.* **94** (Nuclear issues) 16-26
31. Ferroni, P., et.al. 2022. The Westinghouse Lead Fast Reactor: Design Overview and Update on Development Activities," FR22: IAEA-CN-291/528, Westinghouse non-proprietary class-3.
32. Bassini, S. *et al.* 2021. Exposure Tests of Different Materials in Liquid Lead for LFRs: Effect of the Dissolved Oxygen on Corrosion. In: TMS 2021 150th Annual Meeting &

Exhibition Supplemental Proceedings. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65261-6_57

Low-Alloyed FeCrAl Steels in Liquid Lead at 750 °C. Oxidation of Metals (2019) 91:511–524. <https://doi.org/10.1007/s11085-019-09896-z>

33. DOMSTEDT, P., LUNDBERG, M., SZAKALOS, P., Corrosion Studies of

Comparison of the breed-and-burn fast reactor core design with U₃Si₂ fuel

Abstract

A breed-and-burn (B&B) fast reactor is an advanced type of nuclear power reactor. By building and utilizing it, it can use natural or low-enriched uranium fuel, which can solve many problems, such as efficiently using uranium resources, reducing the amount of spent nuclear fuel, and compensating the shortage of the expensive spent nuclear fuel reprocessing plant.

Liquid sodium and lead have different features on neutron loss and heat removal characteristics, so to produce the same power, the core design with these coolants must be different and the neutronic performances have to be compared.

Therefore, the main objective of this work is to design and compare a breed-and-burn fast reactor core with sodium or lead coolants, using high-density uranium silicide (U₃Si₂) fuel. Uranium silicide fuel has been used primarily in research reactors and may be competitive with metal fuel, the traditional fuel for fast reactors.

In this work, the design of the start-up core of a 750 MW, uranium silicide (U₃Si₂) fueled, liquid sodium or liquid lead cooled, breed-and-burn fast reactor with a shuffling scheme was designed, fuel burnup analysis was performed, and neutronic parameters were determined and compared.