

# Задралын дулаанаа идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай, төвдөө ойлгогчтой, өндөр температурын хийн хөргөлттэй реакторын голомтын дизайны судалгаа

С.Одмаа<sup>1,2,\*</sup>, Т.Жамъянсүрэн<sup>2</sup>, Н.Норов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Хими, биологийн инженерчлэлийн тэнхим, Хэрэглээний шинжлэх ухаан, инженерчлэлийн сургууль, Монгол улсын их сургууль

<sup>2</sup>Цөмийн физикийн судалгааны төв, Монгол улсын их сургууль

Энэ ажилд задралын дулаанаа идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай, төвдөө ойлгогчтой, өндөр температурын хийн реакторын голомтын дизайны судалгааг гүйцэтгэж, голомтын нейтроник үзүүлэлтэд өөр өөр зузаантай төвийн ойлгогч нөлөөг авч хэлэлцэв.

PACS numbers: 28.41.Ak, 28.50.

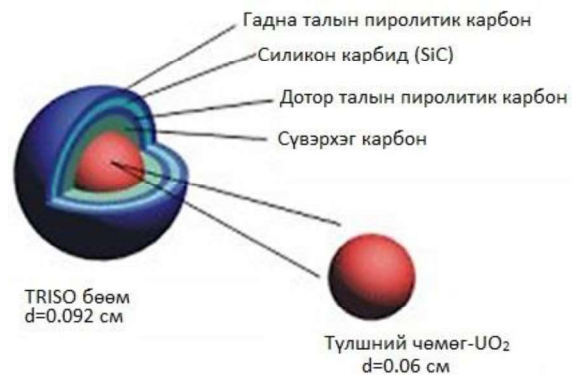
Key words: задралын дулаанаа идэвхгүйгээр зайлуулах чадвар, төвийн ойлгогч, ӨТХР, голомтын дизайн.

## I. ОРШИЛ

Сүүлийн жилүүдэд дэвшилтэт технологитой, төрөлхийн буюу идэвхгүй шинж чанартай бага, дунд чадлын цөмийн эрчим хүчний реакторын голомтын дизайны судалгааг дэлхийн олон орны судлаачид ихээр сонирхож шинэ төрлийн эрчим хүчний реакторуудын судалгаа хийж байна. Ялангуяа 2011 онд Японы Фүкүшима Дайичи цөмийн станцад гарсан ослын дараагаар задралын дулаанаа идэвхгүйгээр буюу байгалийн үндсэн хуульд тулгуурлан зайлуулах шинж чанартай реакторын дизайн хийх хандлага ихэссэн.

Өндөр температурын, хийн хөргөлттэй реактор (ӨТХР) нь өндөр температурыг даах чадвартай керамик давхаргууд бүхий TRISO түлш, дулаан багтаамж өндөртэй бал чулуун голомт, гелий инертийн хийн хөргүүртэй учраас ердийн бус ажиллагааны үед голомт болон хөргүүрийн температур хурдан ихэсэхгүй тул осолд хүргэх магадлал багатай байдгаараа IV-р үеийн реакторын нэг төрөл болон судлагдаж байна [1]. ӨТХР нь TRISO түлш хэрэглэдэг учраас цөмийн зэвсгийг дэлгэрүүлэхгүй шинж чанар өндөртөйд тооцогддог, уг түлшний шаталтын хэмжээ одоогийн байдлаар дэлхий дээр ажиллаж буй ихэнх реакторууд буюу II, III-р үеийн реакторуудынхаас ураны эдийн засгийн хувьд бараг 3 дахин их ач холбогдолтой юм [2-4]. TRISO түлш нь түлшний чөмөг гэгдэх ураны ислэн бөмбөлгийг олон төрлийн давхаргаар бүрж (Зураг 1) дэвшилтэт дизайнтай болгосноор 1600 °C (1873 K) хүртэлх өндөр температурыг

даах чадвартай юм [4]. Иймд үүнийг ӨТХР-ийн түлш болгон ашиглах болсон. Түлшний температур энэ хязгаарт хүрэхгүй тохиолдолд цацраг идэвхт хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүд түлшнээс болон голомтоос цаашилбал реактораас гадагш алдагдахгүй байх нөхцөл бүрдэнэ.



Зураг 1. TRISO бөөм, түлшний давхаргууд.

Бага, дунд чадлын реактор нь цахилгаан сүлжээний багтаамж багатай, цахилгаан эрчим хүчний хэрэгцээ өсөн нэмэгдэж байгаа, хөгжиж буй манайх шиг орнуудад тохиромжтой ба ийм чадлын ӨТХР-ийг байр орон сууц халаах, хүнд хөнгөн үйлдвэрийг технологийн дулаанаар хангах, устөрөгч үйлдвэрлэн устөрөгчийн машин ашиглах боломж зэрэг бүрдсэнээр агаарын бохирдлыг бууруулах, эрчим хүчний дэд бүтэц байгуулах зэрэгт хамгийн тохиромжтой шийдэл байж болно.

Бид өмнөх судалгааны ажлуудаар реакторыг амжилттай унтраасны дараа голомтод

\* Electronic address: odmaa@seas.num.edu.mn

хуримтлагдсан хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийн задралаас үүсэх задралын дулааныг идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай, голомтын төвдөө ойлгогчийн нэг блоктой, газар дээр байрлах призмэн ОТХР-ийн дизайны параметруудийн хамаарлыг гарган авсан [5-8]. Энэ ажилд 100 МВт чадлын, төвдөө долоон ойлгогчин блоктой, цагираган хийцтэй, призмэн ОТХР-ийн голомтын дизайныг хийж, реакторын нейтроник анализийг гүйцэтгэн критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэн, дизайныг оновчтой болгох зорилго тавив. Гарган авсан голомтын дизайны үзүүлэлтүүдийг төвдөө ойлгогчгүй, хатуу цилиндр голомттой, призмэн блок төрлийн ОТХР-ийн голомтын дизайны үзүүлэлтүүд болон төвдөө ойлгогчийн нэг блоктой тохиолдолтой харьцуулж, төвийн ойлгогчийн зузааны нөлөөг авч хэлэлцэв. Реактор ажиллах үеийн илүүдэл реактивитийг дарахын тулд “шатдаг хорлолт материал-ШХМ” (burnable poison) бүхий бөөмсийг голомтод жигд нэмж өгөх замаар реактивитийн хугацааны өөрчлөлтийг нэгэн жигд болгох тооцооллуудыг гүйцэтгэж анализ хийв.

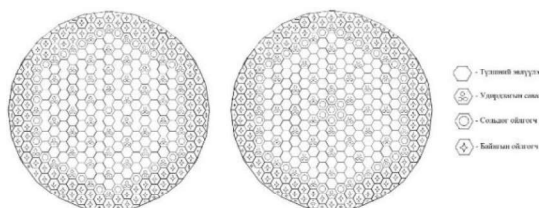
## II. ГОЛОМТЫН ДИЗАЙН

Голомт нь түлшний эвлүүлгийн, удирдлагын савааны, ойлгогчийн гэсэн өөр өөр дизайнтай ч, ижил хэмжээстэй зургаан өнцөгт призмэн блокуудаас бүрдэх ба эдгээрийг давхарлан өрж 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 дамжууллын тооцоолол гүйцэтгэн өмнөх ажилд [5-8] гарган авсан. Үүнтэй адил аргаар төвдөө 0.5 м радиустай графитан ойлгогчтой (голомтын давхарга бүрд төвдөө ойлгогчийн долоон блок агуулсан) 100 МВт чадлын, 1123 К температурт ажиллах ОТХР-ийн голомтын хэмжээсийг (радиус болон өндөр) олсоныг Хүснэгт 1-д өгөв. Голомтыг бүрдүүлэх дээрх гурван төрлийн блокын хэмжээ болон дизайн нь Японы Атомын Энергийн Агентлагт ажиллах буй Өндөр температурын тест реакторын голомтыг бүрдүүлэх блокуудтай адил 58 см-ийн өндөртэй, 36 см өргөнтэй болно [4,9-12]. Эдгээр блокын хэмжээсийг өөрчлөөгүй тул эдгээрээс бүрдсэн голомтын хэмжээс бага зэрэг өөрчлөгдөж болно. Гэхдээ голомтын

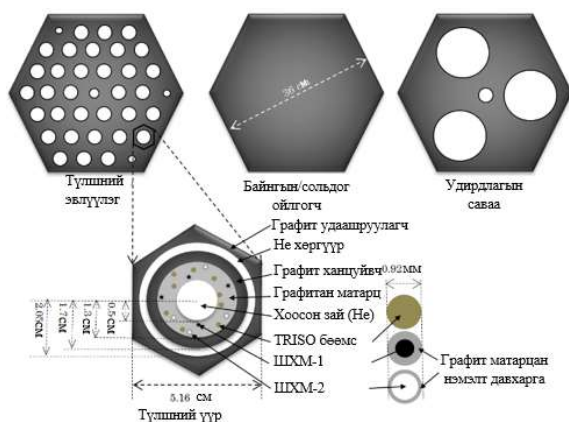
жинхэнэ эзэлхүүнтэй ойролцоо эзэлхүүнтэй байхаар эквивалент хэмжээсийг олсон ба эдгээрийг мөн Хүснэгт 1-д өгөв. Түлшний эвлүүлгийн блок нь 33 түлшний саваанаас бүрдэх ба нэг түлшний саваа нь  $^{235}\text{U}$  изотопын 20% баяжуулалттай, ураны исэл ( $\text{UO}_2$ ) бүхий TRISO бөөмсийг агуулдаг [4,9-12]. Бидний өмнөх ажлуудад төвдөө ойлгогчгүй болон нэг ойлгогчин блоктой реакторын голомтын дизайнд энэхүү блокуудыг ашигласан болно [13-15]. Хүснэгт 1-д голомтын дизайны бусад үндсэн үзүүлэлтүүдийг бас үзүүлэв. Зураг 2-д голомтын, Зураг 3-т голомтыг бүрдүүлэгч блокуудын хөндлөн зүсмэгийг харуулав. Зураг 3-т харуулсан түлшний үүр дэх цагираган хийцтэй, графитан матарцад TRISO бөөмс нь нэг түлшний блокын эзэлхүүний 30% байхаар шигтгэж үйлдвэрлэдэг.

Хүснэгт 1. Голомтын үндсэн үзүүлэлтүүд

Реакторын дулааны чадал, МВт	100	
Голомтын температур, °C	850	
Төвийн ойлгогчийн радиус/зузаан, м	0.18/0.36	0.5/1.08
Дулаан дамжууллын тооцооллоос олсон голомтын радиус/өндөр, м	2.5/6.24	2.53/6.32
Голомтын эквивалент радиус/өндөр, м	2.47/6.38	2.52/6.38
Дундаж чадлын нягт ( $\text{Вт}/\text{см}^3$ )	0.82	
Түлш	$\text{UO}_2$	
Баяжуулалт (wt%)	20%	
Хөргүүрийн материал	Helium gas	
Ойлгогчийн зузаан, м:	Дээд, доод	0.58
	Хажуу	0.87
Түлшний эвлүүлгийн тоо	1452	1452
Давхаргын тоо	11	11
Нэг давхаргад байх удирдлагын савааны тоо:		
Голомт дотор	36	30
Ойлгогчинд	24	24
Нэг давхаргад байх төвийн/гаднах сольдог ойлгогчин блокын тоо	1/24	7/24



Зураг 2. Голомтын хэвтээ зүсмэг. а) төвдөө ойлгогчийн нэг блоктой [7,8], б) төвдөө ойлгогчийн долоон блоктой.



Зураг 3. Голомтыг бүрдүүлэгч блокууд.

### III. НЕЙТРОНИК АНАЛИЗ

Энэхүү ажилд тасралтгүй энергитэй нейтроны харилцан үйлчлэлийг Монте Карло аргаар тооцоолдог, Японы Атомын Энергийн Агентлагийн хөгжүүлсэн компьютерийн код болох MVP2.0 [16], MVPBURN [17]-ийг цөмийн урвалын өгөгдлийн сан JENDL3.3 [18]-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 дэх нейтрон үржүүлэгч эффектив фактор ( $k_{eff}$ )-ыг тооцоолохдоо голомт дотор үүссэн нейтроннуудын санамсаргүй алхалтуудыг тооцоолохын тулд тэдний мөрийн уртыг үнэлэх, мөргөлдөөний нягтыг үнэлэх, болон аналог үнэлэгч (...) гэсэн үндсэн гурван факторыг тооцон үзэж хамгийн их магадлалтай утгаар тооцдог [15]. Монте Карло арга нь голомтод үүссэн нейтроноор үүсэх харилцан үйлчлэлийн процессуудын санамсаргүй үзэгдлийг үнэлдэг тул тооцооллыг хамгийн оновчтой болгох нөхцлийг бодлого тус бүрт тогтоох шаардлагатай байдаг. Манай голомтын тооцооллын хувьд реакторт үүссэн нэг нейтрон 50000 ялгаатай харилцан үйлчлэл (түүхийн тоо=50000) хийнэ, нийтдээ хуваагдлын 100 нейтрон (хуваагдлын нейтроны тоо=100)-ий санамсаргүй харилцан үйлчлэлийг авч үзэхээр тооцооллыг гүйцэтгэсэн. Статистик боловсруулалтын үр дүнг сайжруулахын тулд эхний 20 нейтроны харилцан үйлчлэлийг тооцоогүй болно.

### III.A. Төвийн ойлгогчийн зузааны нөлөө

Хүснэгт 2. Нэгэн жигд голомтуудын нейтроник анализын үр дүн.

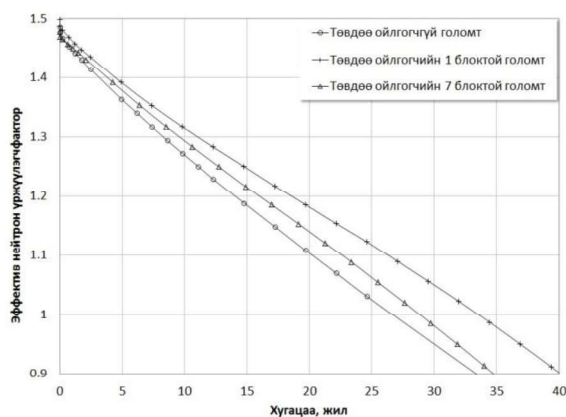
N	$K_{eff,0}$ (алдаа %)	ХИУ $\Delta k/k$ (%)	$t_{голомт}$ (жил)	$V_{түлш,t}$ (ГВт*өдөр/тн)
0 [15]	1.4862 (0.0205)	32.70	25.4	100.0
1 [8]	1.4973 (0.0537)	33.21	33.5	135.0
7	1.4779 (0.0573)	32.34	28.5	135.0

Тайлбар:

N	Нэг давхаргад байх төвийн сольдог ойлгогчин блокын тоо
$K_{eff,0}$ алдаа	Реактор ажиллаж эхлэх үеийн $K_{eff}$ 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

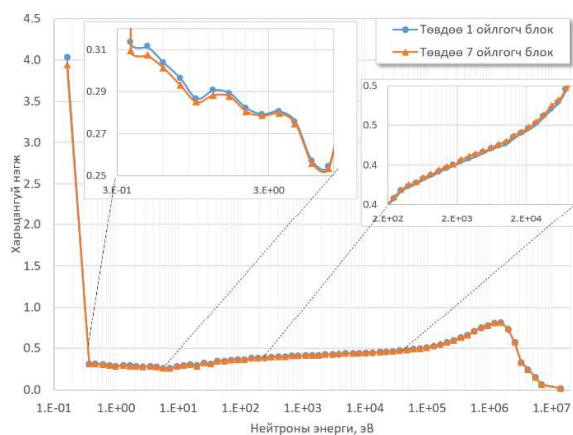
Өмнөх ажилд төвдөө нэг ойлгогчин блоктой, 20%-ийн U235-ийн жигд агууламжтай голомтын тохиолдолд голомтын критик байдал болон түлшний шаталтын үр дүнг харуулсан [7,8]. Эдгээр үр дүнд төвийн ойлгогчин блокын зузааны нөлөөг авч үзэхийн тулд энэ ажлаар төвдөө долоон ойлгогчин блоктой голомтын дизайныг хийн нейтроник анализ хийв. Төвдөө ойлгогчгүй болон хоёр өөр зузаантай ойлгогчтой голомтын критик байдал болон түлшний шаталтын үр дүнг харьцуулан Зураг 4 болон Хүснэгт 2-д харуулав.

Эдгээр үр дүнгээс харвал голомтын төвд ойлгогч байрлуулахад түүн рүү сарнисан нейтроннууд голомт руу буцаж ойн хуваагдал нэмж явуулж байгаа тул реактор ажиллаж эхлэх үеийн нейтроныг үржүүлэгч эффектив фактор ихэсч байна.

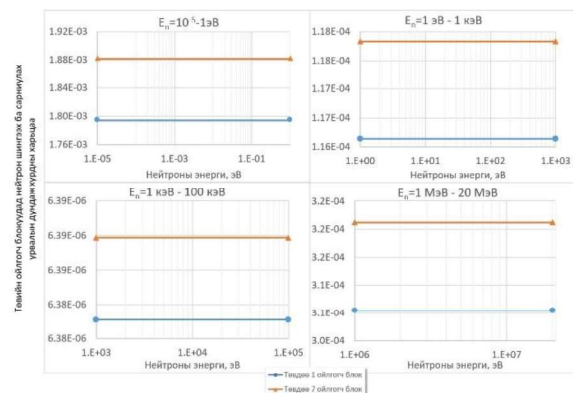


Зураг 4. Нейтрон үржүүлэх эффектив фактор нь реакторын ажиллах хугацаанаас өөрчлөгдөх нь.

Улмаар төвд ойлгогч байрлуулснаар голомтын амьдрах хугацаа болон түлшний шаталт ихэсч байна. Харин төвийн ойлгогчийн зузаан 0.18 м-ээс 0.5 м болж ихэсэхэд дээрх хэмжигдэхүүнүүд ялимгүй багасч байна. Эдгээр реактор нь ижил чадалтай, голомтын эзэлхүүн нь адил, түлшний тоо хэмжээ болон хуваагдагч изотопын агууламж нь ч ижил болно. Ялгаа нь зөвхөн төвийн ойлгогчийн зузаан хоёр өөр. Төвийн ойлгогчийн зузаан ихэсэхэд нейтроник үзүүлэлтүүд буурч байгаагийн шалтгааныг тайлбарлахын тулд уг хоёр реакторын голомтоорх нейтроны спектр болон урвалын хурдуудыг харьцуулан Зураг 5 болон 6-д харуулав. Зураг 5-аас харахад реактор ажиллаж эхлэх үед төвдөө нэг ойлгогчтой голомтод илүү олон дулааны нейтонууд (10-5 эВ-3 эВ), төвдөө долоон ойлгогчтой голомтод харьцангуй олон хурдан нейтонууд (3 эВ-20 МэВ) байна.



Зураг 5. Реактор ажиллаж эхлэх үед төвдөө нэг болон долоон ойлгогчийн блокторй голомтуудын нейтроны спектр.



Зураг 6. Реактор ажиллаж эхлэх үед төвдөө нэг болон долоон ойлгогчийн блокторй голомтуудын төвийн блокуудад нейтрон шингээх болон сарниулах урвалын дундаж хурдуудын харьцаа.

Ерөнхийдөө 20°C температурт буй графитад дулааны нейтроны нүүлтийн урт нь ойролцоогоор 62 см байдаг [19]. Дулааны нейтроны диффузийн коэффициент нь температураас үл хамаардаг, харин шингээлтийн огтлол нь температураас шугаман хамаардаг. Иймд 850°C температурт ажиллаж байгаа манай реакторын голомтын тохиолдолд дулааны нейтроны нүүлтийн урт нь дээрх утгаас багасна гэсэн үг. Тэгэхээр төвийн ойлгогчийн зузаан уг материал дэх диффузийн уртаас их бол голомтоос энэ муж руу сарниж орж ирсэн нейтонууд түүнд шингээгдсэнээр буцаж голомт руу сарниж орох магадлал нь буурах ба энэ нь Зураг 6-д харуулсан төвийн графитан ойлгогч блокт нейтроны шингээгдэх болон сарних урвалын огтлолын харьцаа төвдөө долоон ойлгогчтой голомтод харьцангуй их байгаагаас харагдана.

III.B. Илүүдэл реактивитийг бууруулах

Өмнөх хэсэгт харуулсан тооцооллын үр дүнг харахад реактор ажиллаж эхлэх үед илүүдэл реактивити ( $\Delta k/k$ ) маш өндөр ( $>28\% \Delta k/k$ ) байна. Үүнийг бууруулах олон арга байдгаас бидний өмнөх ажилд төвдөө ойлгогчгүй голомтын тохиолдолд түлшний блокт ШХМ-ын бөөмсийг нэмж өгөх нь үр дүнтэй байсан [14,15]. Графит матарцад шигтгэж буй түлшний болон ШХМ-ийн бөөмсийг ялгаж тооцоолоход MVP 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 нөгөөгөөс бага бол түүнд Зураг 3-т харуулснаар гадуур нь нэмэлт давхарга нэмж өгсөн. 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 нь харагдсан [15].

Иймд төвдөө ойлгогчтой хоёр реакторын голомтын илүүдэл реактивитийг бууруулж, ажиллагааны турш реактивитийн өөрчлөлт болон чадлын түгэлтийг жигдлэхийн тулд  $B_4C$  болон  $Gd_2O_3$  бөөмсийг түлшний блокын графит матарцанд нэгэн жигд нэмж, эдгээрийн

тохиромжтой агууламж болон радиусыг олох тооцооллуудыг гүйцэтгэв. Энэ хоёр материалын үндсэн шинж чанаруудыг бусад ШХМ-уудынхтай харьцуулан Хүснэгт 3-д харуулав. Эдгээр тооцооллд ашигласан бөөмсийн параметрууд болон голомтын нейтроник анализын үр дүнг Хүснэгт 4 болон Зураг 7-д харуулав.

Хүснэгт 3. ШХМ-ийн үндсэн шинж чанарууд.

ШХМ	Гол шингээгч цөмүүд	Гол шингээгч цөмийн агууламж, wt %	Нягт, г/см <sup>3</sup>	Дулааны нейтрон (0.0253 эВ) булаах огтлол (барн)	Хайлах цэг, °C
B <sub>4</sub> C	<sup>10</sup> B	90*	2.52	3837	2450
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<sup>155</sup> Gd, <sup>157</sup> Gd	14.8, 15.65	7.4	60740, 253700	2330
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<sup>167</sup> Er	22.95*	8.64	660	1400
CdO	<sup>113</sup> Cd	12.22	8.15	20760	1400

\*Гол шингээгч изотопыг баяжуулсан

ШХМ-ийн бөөмсийн диаметр болон тэдний нийт эзэлхүүнийг түлшний нийт эзэлхүүнд харьцуулсан харьцаа гэсэн хоёр параметрийг

Хүснэгт 4. ШХМ-тай нэгэн жигд голомтуудын нейтроник анализын үр дүн.

N	ШХМ-ууд: ШХМ <sub>1</sub> ШХМ <sub>2</sub>	d <sub>ШХМ</sub> (см)	V <sub>түлш</sub> /V <sub>ШХМ</sub>	Голомт дэх бөөмсийн эзлэх нийт хувь, % (үүнээс түлш ШХМ <sub>1</sub> ШХМ <sub>2</sub> -ийн эзлэх хувь)	Кэфф.0 (алдаа, %)	ХИУ Δk/k (%)	t <sub>голомт</sub> (жил)	V <sub>түлш,t</sub> (ГВт*өд өр/тн)
0 [15]	байхгүй	-	-	0.3000 (100 0 0)	1.4862 (0.0205)	32.70	25.4	100.0
	B <sub>4</sub> C	0.02	140	0.3733	1.0264 (0.0351)	3.06	18.6	75.0
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	490	(80.37 15.27 4.36)				
1 [8]	байхгүй	-	-	0.3000 (100 0 0)	1.4973 (0.0537)	33.21	33.5	135.0
	B <sub>4</sub> C	0.02	140	0.3733	1.0326 (0.031)	7.89	31.8	129.5
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	490	(80.37 15.27 4.36)				
	B <sub>4</sub> C	0.02	130	0.3813	1.0047 (0.07)	6.93	31.4	127.5
7	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	400	(78.67 16.10 5.23)				
	байхгүй	-	-	0.3000 (100 0 0)	1.4779 (0.0573)	32.34	28.5	135.0
	B <sub>4</sub> C	0.02	140	0.3733	1.0234 (0.0289)	6.90	24.7	116.5
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	490	(80.37 15.27 4.36)				
	B <sub>4</sub> C	0.02	130	0.3733	1.0033 (0.0338)	6.00	23.9	112.5
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	510	(79.57 16.28 4.15)				

Тайлбар:

d<sub>ШХМ</sub>- ШХМ бөөмсийн диаметр

V<sub>түлш</sub>/V<sub>ШХМ</sub>- голомт дэх түлш болон ШХМ-ийн эзэлхүүний харьцаа

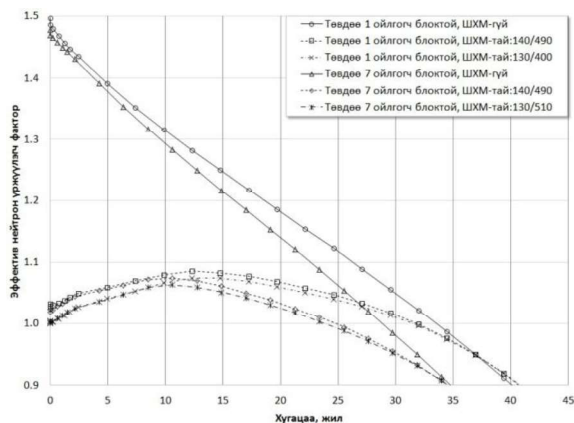
Хүснэгт 4 болон Зураг 7-д харуулснаар төвдөө ойлгогчийн нэг блоктой голомтод ШХМ-ийн бөөмсийг нэмж өгөхөд реактор ажиллаж эхлэх үеийн илүүдэл реактивити 33.21%-аас 6.93% болтол, харин төвдөө ойлгогчийн долоон блоктой голомтын хувьд 32.34%-аас 6% болж

өөрчлөх замаар тохиромжтой агууламжийг олдог. Төвдөө ойлгогчгүй реакторын тохиолдолд ШХМ-ийн бөөмсийн хамгийн тохиромжтой параметрууд болох В4С-ийн диаметр 0.02 см, эзэлхүүний харьцаа 140 ба Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ийн диаметр 0.02 см, эзэлхүүний харьцаа 490-ийг төвдөө ойлгогчтой реакторуудын анхны параметр болгож үзэхэд ийм агууламжтай ШХМ 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 хоёр реакторт тохирох утгуудыг олохын тулд дахин олон тооцоолол гүйцэтгэн Хүснэгт 4-д хамгийн оновчтойг нь өгөв. Хүснэгт 4-ийн тавдугаар баганад голомт дэх нийт бөөмсийн нийт эзлэх хувь болон үүнээс тухайн бөөмсийн эзлэх хувийг харуулсан. Энд өмнөх хэсэгт дурдсанчлан, бүх дизайнд түлшний бөөмс нь нийт голомтын 30%-ийг эзэлж байгаа болно.

бууруулж чадсан байна. Энэ үед реактор ажиллах хугацаанд дээрх хоёр голомтын илүүдэл реактивити аажим ихэссээр хамгийн ихдээ 31.4% болон 23.9% болоод алгуур багассан байна. Энэ нь түлш болон ШХМ-ийн нэгэн төрөл агууламжтайгаар голомтын дизайн



хийх нь тийм ч оновчтой биш гэдгийг харуулна. 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 олон тооцооллуудыг гүйцэтгэх болно. Голомтод ШХМ нэмсэнээр голомт дэх түлшний нэг циклийн үргэлжлэх хугацаа болон түлшний шаталт хорогдож байгаагийн учир нь голомтод үүссэн нейтроны зарим хэсэг нь эдгээр хорлолт материалд шингэж байгаагаас шалтгаална.



Зураг 7. ШХМ-гүй болон ШХМ-тай голомтын нейтрон үржүүлэгч эффектив фактор нь реактор ажиллах хугацаанаас өөрчлөгдөх нь.

Төвдөө ойлгогчтой реакторын голомт дэх түлшний нэг циклийн үргэлжлэх хугацаа болон түлшний шаталт нь адил нөхцөлд ажиллаж буй ижил чадлын төвдөө ойлгогчгүй реакторынхоос их байгаа нь Хүснэгт 4-өөс харагдана. Энэ нь өмнөх хэсэг III.A-д тайлбарласан төвийн ойлгогчид ойсон нейтонууд буцаж голомт руу ордогдоос шалтгаалж байна.

## ДҮГНЭЛТ

1. Энэ ажилд 100 МВт чадлын, төвдөө долоон ойлгогчин блоктор, цагираган хийцтэй, призмэн ОТХР-ийн голомтын дизайныг хийж, реакторын нейтроник анализийг гүйцэтгэн критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэв.
2. Төвдөө ойлгогчин блоктор голомтын дизайны үзүүлэлтүүдийг төвдөө ойлгогчгүй, хатуу цилиндр голомттой, призмэн блок төрлийн ОТХР-ийн голомтын дизайны үзүүлэлтүүдтэй харьцуулахад голомт дэх түлшний нэг циклийн үргэлжлэх хугацаа уртасч, түлшний шаталт ихэсч байгааг олж, тайлбарлав.

3. Төвийн ойлгогчин блокын зузаан нэмэгдэхэд голомтын нейтроник анализын үр дүнгүүд бага зэрэг багасч байна. Энэ нь ойлгогчийн зузаан нейтроны нүүлтийн уртаас ихэсэхэд голомт руу сарниж орох нейтроны хэмжээ түүнд шингээгдэх хэмжээнээс багассантай холбоотойг тайлбарлав.
4. Төвдөө ойлгогчтой реакторын голомтод хоёр өөр ШХМ-ийн бөөмсийг жигд нэмж өгөх замаар ажиллах үеийн илүүдэл реактивитийг дарах боломжтойг харуулав.
5. Цаашид реактивитийн хугацааны өөрчлөлтийг нэгэн жигд болгохын тулд түлш болон ШХМ-ийн бөөмсийн агууламжийг өөрчлөн тооцооллуудыг гүйцэтгэх шаардлагатай байна.

## ТАЛАРХАЛ

Энэ ажил нь Солонгосын Ахисан түвшний судалгааны Солонгос сан болон МУИС-ийн Азийн судалгааны төвийн санхүүжилтээр хэрэгжиж буй “Бага чадлын эрчим хүч, дулааны дэвшилтэт цөмийн реакторын судалгаа” төслийн хүрээнд хийгдсэн болно.

## НОМ ЗҮЙ

- [1] The Generation IV International Forum. Very-High Temperature Reactor (VHTR), [Cited 2016 October] Available from: [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_42153/very-high-temperature-reactor-vhtr](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42153/very-high-temperature-reactor-vhtr); 2000.
- [2] Hicks T.E et al. Modular HTGR safety basis and approach. INL/EXT-11-22708. USA: Idaho National Laboratory; 2011.
- [3] Kroeger P.G. Safety evaluations of accident scenarios in HTGRs. Nucl. Eng. and Design 1990; 122: 443-452.
- [4] Hayashi K et al. Assessment of fuel integrity of HTTR and its permissible design limit. JAERI-M-89-162. Japan: JAERI; 1989.
- [5] S.Odmaa and G.Enkhbaatar. Comparative study of design parameters of HTGR for passive decay heat removal. Journal of Mongolian Physics Society. Issue No 2, 2016, pp481-489, Ulaanbaatar, Mongolia.
- [6] С.Одмаа, Г.Энхбаатар, Н.Норов. Задралын дулаанаа идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай, төвдөө ойлгогчтой ба ойлгогчгүй хийн хөргөлттэй реакторын дизайны параметруудийн харьцуулсан

- судалгаа. МУИС, Физик. 23 (455) 2016, 77-84.
- [7] Т.Жамъянсүрэн, С.Одмаа, Н.Норов, Б.Мөнхбат. Бага чадлын өндөр температурын хийн реакторын голомтын дизайны судалгаа. Залуу судлаачдын эрдэм шинжилгээний бага хурал. Байгалийн ухааны салбар. 2016.10.29. Хүрэлтогоот-2016 эрдэм шинжилгээний хурлын эмхтгэл. Улаанбаатар. хх24-28.
- [8] 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)441-448.
- [9] Saito S et al. Design and safety consideration in the HTTR. *Energy* 1991; 16(1/2): 449-458.
- [10] Saito S et al. Design of HTTR. JAERI-1332. Japan: Japan Atomic Energy Research Institute; 1994.
- [11] Shiozowa S et al. Overview of HTTR design features. *Nucl. Eng. and Design* 2004; 233: 11-21.
- [12] Evaluation of HTGR Performance: Benchmark Analysis Related to Initial Testing of the HTTR and HTR-10, IAEA-TECDOC 1382. IAEA: Vienna; 2003.
- [13] S.Odmaa and T.Obara. Conceptual Design for a Small Modular District Heating Reactor for Mongolia. *Mongolia Ann. Nucl. Energy* (IF: 1.02), 47, pp210-215 (2012); <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2012.04.013>
- [14] Odmaa S, Obara T. Possible design in long-life small prismatic HTGR for passive decay heat removal. *J. of Nucl. Sci. Eng* 2014; 177: 97-109. <http://dx.doi.org/10.13182/NSE13-22>
- [15] S.Odmaa and T.Obara. Neutronic and thermo-hydraulic analyses of a small, long-life HTGR for passive decay-heat removal. *Journal of Nuclear Science and Technology* (IF: 1.118), 52, Issue 12,
- [16] Nagaya Y et al. MVP/GMVP II: general purpose Monte Carlo code for neutron and photon transport calculations based on continuous energy and multigroup methods. JAERI-1348. Japan: Japan Atomic Energy Research Institute; 2005.
- [17] Okumura K et al. MVP-BURN user's manual. Japan: Atomic Energy Agency; 2005.
- [18] Shibata K et al. Japanese evaluated nuclear data library-JENDL-3.3: *J Nucl Sci Technol*. 2002; (39) 11: 1125-1136.2015, pp1519-1529. <http://dx.doi.org/10.1080/00223131.2015.1017546>.
- [19] J.R.Lamarsh. Introduction to Nuclear Reactor Theory. Textbook. American Nuclear Society. 2002.