

Маш өндөр температурын хийн хөргүүртэй реакторын голомтын дизайны судалгаа

Б.Хөхсүвд^{1,2,*}, С.Одмаа^{1,2}, Т.Жамъянсүрэн²

¹Хими, биологийн инженерчлэлийн тэнхим, Хэрэглээний шинжлэх ухаан, инженерчлэлийн сургууль, Монгол улсын их сургууль

²Цөмийн физикийн судалгааны төв, Монгол улсын их сургууль

Энэхүү судалгааны ажлаар дэвшилтэт дизайнтай, 100 МВт чадалтай, Маш Өндөр Температурын Хийн-хөргүүртэй Реакторын (МӨТХР) голомтын дизайныг хийж, нейтроник анализыг гүйцэтгэн критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг хийв. Энд уламжлалт TRISO түлшин дээр ZrC давхарга нэмсэн 20% баяжуулалттай сайжруулсан түлш TRIZO ашигласан. Сайжруулсан түлштэй голомтын дизайны үр дүнг уламжлалт TRISO түлштэй Өндөр Температурын Хийн Реактор (ӨТХР)-ын голомтын дизайнтай харьцуулахад реакторын ажиллах жил буурч байсан хэдий ч түлшний шаталт ихэсч байсан. Үүний шалтгааныг тодруулахын тулд ZrC давхаргын зузааныг өөрчлөн шинэ тооцооллуудыг гүйцэтгэв. Мөн ураны оксид түлшийг ураны оксикарбид түлшээр сольж, түүний нейтроник анализыг хийж харьцуулав. Уг судалгааны ажилд тасралтгүй энергитэй нейтроны харилцан үйлчлэлийг Монте Карло аргаар тооцоолдог Японы Атомын Энергийн агентлагаас хөгжүүлсэн компьютерийн код болох MVP2.0, MVPBURN-ийг цөмийн өгөгдлийн сан JENDL-4.0-ийн хамт ашиглав.

Түлхүүр үгс: МӨТХР, ZrC агуулсан сайжруулсан түлш TRIZO, сольдог ойлгогч, ураны оксикарбид түлш, нейтроник анализ.

I. ОРШИЛ

Дэлхий даяар эрчим хүчний хэрэгцээ ихсэх тусам цөмийн эрчим хүчний хэрэглээ улам нэмэгдэж байна. Өнөөгийн цөмийн эрчим хүчний станцууд нь тогтвортой зардлаар эрчим хүчийг үйлдвэрлэж, дэлхий дахинд тулгамдаж буй хамгийн том асуудлын нэг болох нүүрстөрөгчийн ялгаруулалтыг багасгахад томоохон нөлөө үзүүлэхээс гадна маш олон давуу талуудтай. Ийм шалтгааны үүднээс IV үеийн дэвшилтэт дизайнтай, аюулгүй ажиллагаатай цөмийн эрчим хүчний реакторуудын голомтын дизайны судалгааг олон улсын судалгааны төвүүд болон их сургуулийн эрдэмтэн, судлаачид ихэд сонирхон хийх болсон. IV үеийн реакторууд эдийн засгийн өндөр үр ашигтай, аюулгүй ажиллагааг сайжруулсан, хаягдлын хэмжээг багасгасан, цөмийн зэвсгийн материал дэлгэрүүлэхээс хамгаалагдсан байхаар загварчлагдсан байна [1]. Маш өндөр температурын хийн-хөргүүртэй реактор (МӨТХР) нь IV үеийн реакторын нэг болон судлагдаж байгаа ба үүнд голомтын дизайны хийцийн материалууд чухал ач холбогдолтой. МӨТХР нь өндөр температурт

аюулгүй ажиллагааг сайжруулсан олон давхаргат TRIZO түлш, дулаан багтаамж өндөртэй бал чулуун голомт болон гелийн инертийн хийн хөргүүртэй учраас ердийн бус ажиллагааны үед ч голомт ба хөргүүрийн температур хурдан ихсэхгүй тул осолд хүргэх магадлал багатай байдаг [2, 3]. Мөн МӨТХР-ийн гол сайжруулалт нь ZrC агуулсан сайжруулсан TRIZO түлш бөгөөд уг түлш нь түлшний чөмөгт үүссэн хуваагдлын хатуу болон хий хэлбэртэй бүтээгдэхүүнийг гадагш алдахгүй барих олон давхаргаас бүрдэнэ. Эдгээр давхаргууд нь маш өндөр температурт буюу 1600°C-т түлшний механик шинж чанарыг алдагдуулахгүй [3]. Энэ нь аюулгүй ажиллагааны горимыг хангах ба түлшийг үр ашигтай шатах боломжийг өгч ингэснээр ашигласан болон ашиглагдаагүй түлшийг бусад зориулалтаар хэрэглэгдэхийг хязгаарлана. Цаашлаад, бал чулуун удаашруулагч нь нейтроны шингээлт бага, цацрагийн нөлөөгөөр материалын бүтцийн өөрчлөлт бага, дулаан дамжуулах чадвар сайн, дулаан багтаамж өндөртэй байдаг. Хийн хөргүүрийн хувьд мөн дулаан багтаамж өндөртэй, нейтрон шингээлтийн хөндлөн огтлол багатай ба химийн шинж чанарын хувьд

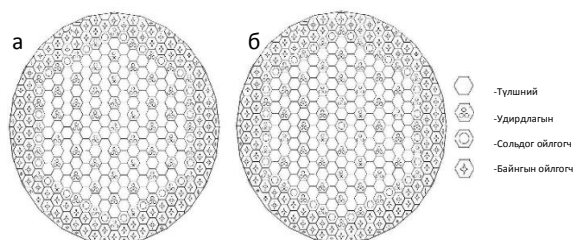
* Electronic address: b.khukhsuvd@gmail.com

инертийн хий, фазын өөрчлөлтгүй, гаралтын температурыг ихэсгэснээр дулааны үр ашигтай байдлыг нэмэгдүүлдэг зэрэг онцлог шинж чанаруудтай. Өмнө нь гүйцэтгэсэн судалгааны ажлуудад реакторыг амжилттай унтраасны дараа голомтод хуримтлагдсан хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийн задралаас үүсэх дулааныг идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай, голомтын төвдөө ойлгогчгүй болон ойлгогчтой, газар дээр байрлах призмаан ӨТХР-ийн голомтын дизайны параметруудийн хамаарлыг гарган авсан байдаг [4, 5]. Бидний энэ ажилд дизайны ижил параметртай, 100 МВт чадлын МӨТХР-ийн голомтын дизайныг гүйцэтгэн, нейтроник анализ хийж, критик байдлын болон түлшний шаталтыг тодорхойлж, өмнөх судалгааны ажлын уламжлалт TRISO түлштэй ӨТХР-ийн үр дүнтэй харьцуулах зорилго тавив.

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

A. Голомтын дизайн

Төвдөө ойлгогчтой болон ойлгогчгүй МӨТХР-ийн голомт нь хяналтын саваа, байнгын болон сольдог ойлгогч, түлшний блокуудаас бүрдэнэ. Эдгээр зургаан талт блокын хэмжээ болон дизайныг Японы Атомын Энергийн Агентлагын өндөр температурын тест реакторын голомтыг бүрдүүлэх блокуудтай адилханаар загварчилсан [6-9]. Төвдөө ойлгогчгүй болон ойлгогчтой МӨТХР-ийн голомтын үндсэн үзүүлэлтийг Хүснэгт 1-т, голомтын хөндлөн зүсмэгийг Зураг 1-т тус тус харуулав. Өмнөх [4, 5] ажилд гарган авсан параметрийн нөхцлөөс тус хоёр голомтын хэмжээсүүдийг тодорхойлсон.



Зураг 1. Голомтын хэвтээ зүсмэг а) Төвдөө ойлгогчгүй МӨТХР-ийн голомтын дизайн б) Төвдөө ойлгогчийн нэг блоктой МӨТХР-ийн голомтын дизайн.

Хүснэгт 1. Хоёр голомтын үндсэн үзүүлэлтүүд.

Үзүүлэлтүүд	Төвдөө ойлгогчгүй дизайн	Төвдөө ойлгогчтой дизайн
-------------	--------------------------	--------------------------

Реакторын дулааны чадал, МВт	100	
Голомтын температур, °C	850	
Голомтын эффектив өндөр, м	6.38 [1]	6.38 [2]
Голомтын эквивалент радиус, м	2.46 [1]	2.47 [2]
Дотоод ойлгогчийн радиус, м	0	0.18/0.36
Дээд болон доод ойлгогчийн зузаан, м	0.58	0.58
Хажуугийн ойлгогчийн зузаан, м	0.39	0.87
Дундаж чадлын нягт, Вт/см ³	0.82	
Хөргүүрийн материал	Гелийн хий	
Түлш	UO ₂	
Түлшний баяжуулалт (wt%)	20	
Түлшний блокны нийт тоо	1452	
Давхаргын тоо	11	
Удирдлагын савааны тоо голомтонд/гадаад ойлгогчинд	407/264	396/264
Дотоод/гадаад ойлгогчийн нийт блокны тоо	0	11/264

Б. Түлшний дизайн

МӨТХР-ийн түлш нь сайжруулсан TRISO буюу түлшний чөмгийг бүрхсэн 5 давхаргатай. (Зураг 2а). Уг түлш нь 1446°C-д 500 өдөр шарагдахад хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийг гадагш алдалгүйгээр механик болоод аюулгүй ажиллагааны шинж чанарыг багтаасан дэвшилтэт дизайн юм [3]. Зураг 2б-д ердийн TRISO түлшний зүсмэгийг харуулав. Бид мөн уг судалгааны ажлаар сайжруулсан TRISO түлшний ураны диоксид чөмгийг ураны оксикарбид түлшний чөмгөөр сольж, үр дүнг харьцуулав. Карбид түлш нь оксид түлшнээс ялгаатай нь дулаан дамжуулах чадвар сайтай. Түүнчлэн өндөр температурт түлшний нүүлг хийдэггүйгээс гадна түлшний давхаргуудтай харилцан үйлчлэл багатай [10].



Зураг 2а. Сайжруулсан TRISO түлшний зүсмэг.



Зураг 2б. Ердийн TRISO түлшний зүсмэг.

В. Нейтроник анализ

Энэхүү ажилд нейтроник анализын тооцооллыг тасралтгүй энергитэй нейтроны харилцан үйлчлэлийг Монте Карло аргаар тооцоолдог, Японы атомын энергийн Агентлагийн хөгжүүлсэн компьютерийн код болох MVP2.0 [11], MVPBURN [12]-ийг цөмийн урвалын өгөгдлийн сан JENDL4.0 [13]-ийн хамт ашиглан гүйцэтгэв. 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 [11] кодоор реакторын голомт дэхь эффектив нейтрон үржүүлэх фактор ($K_{эфф}$)-ыг тодорхойлохдоо голомт дотор үүссэн нейтонуудын санамсаргүй алхалтуудыг тэдний мөрийн урт, мөргөлдөөний нягт зэргийг үнэлэх замаар үр дүнг гаргана. Тооцоолол хийхдээ реакторт үүссэн нэг нейтрон 50000 ялгаатай харилцан үйлчлэл хийнэ, нийтдээ хуваагдлын 100 нейтроны санамсаргүй харилцан үйлчлэлийг авч үзсэн. Статистик боловсруулалтын үр дүнг сайжруулахын тулд эхний 20 нейтроны харилцан үйлчлэлийг тооцоогүй болно. Реакторын голомтын нейтроник анализын тооцоолол бүр дээрх нөхцлөөр явагдсан.

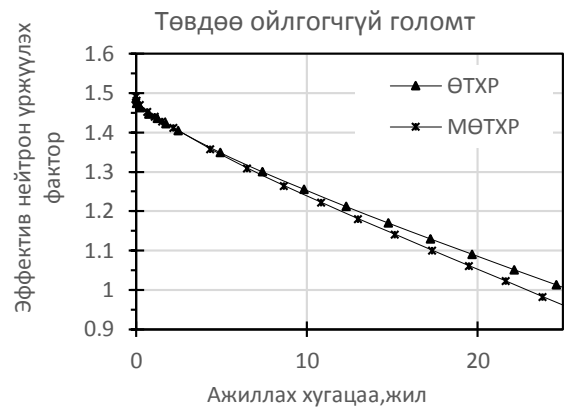
III. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

А. ZrC давхаргын нөлөө

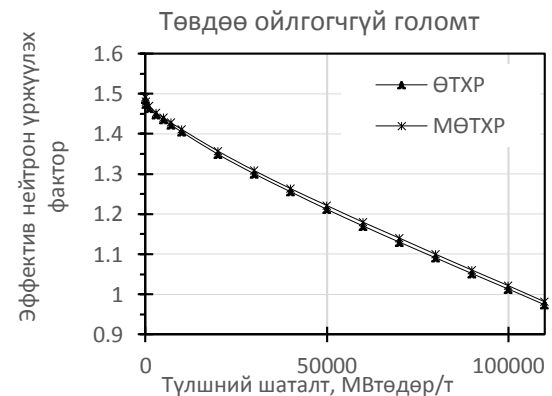
100 МВт дулааны чадалтай, 850°C температурт ажиллаж байгаа төвдөө ойлгогчгүй болон ойлгогчтой МӨТХР-ийн голомтын нейтроник анализын үр дүнг Хүснэгт 2 болон Зураг 3, 4-д харуулав.

Хүснэгт 2. 100 МВт чадлын МӨТХР болон ӨТХР-ийн голомтуудын нейтроник анализын үр дүн.

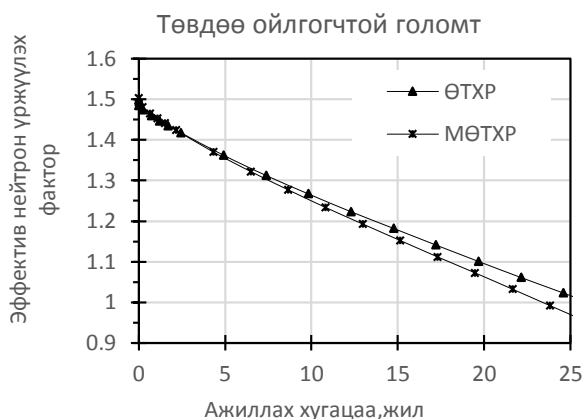
Реакторын төрөл	$K_{эфф}$, (алдаа%)	Голомтын ажиллах хугацаа(жил)	Түлшний шаталт (ГВт*өдөр/тн)
Төвдөө ойлгогчгүй ӨТХР [4]	1.4862 (0.0205)	24.4	100.0
Төвдөө ойлгогчгүй МӨТХР	1.4921 (0.0228)	22.8	106.0
Төвдөө ойлгогчтой ӨТХР [5]	1.4977 (0.0183)	26.4	106.0
Төвдөө ойлгогчтой МӨТХР	1.5025 (0.0207)	23.4	108.0



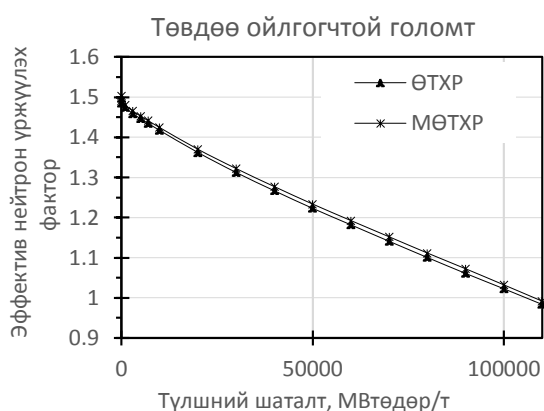
Зураг 3а. Төвдөө ойлгогчгүй ӨТХР болон МӨТХР-ийн голомтын эффектив нейтрон үржүүлэх факторын хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт.



Зураг 3б. Төвдөө ойлгогчгүй ӨТХР болон МӨТХР-ийн голомтын эффектив нейтрон үржүүлэх факторын түлшний шаталтнаас хамаарсан өөрчлөлт.



Зураг 4а. Төвдөө ойлгогчтой ӨТХР болон МӨТХР-ийн голомтын эффектив нейтрон үржүүлэх факторын хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт.



Зураг 4б. Төвдөө ойлгогчтой ӨТХР болон МӨТХР-ийн голомтын эффектив нейтрон үржүүлэх факторын түлшний шаталтнаас хамаарсан өөрчлөлт.

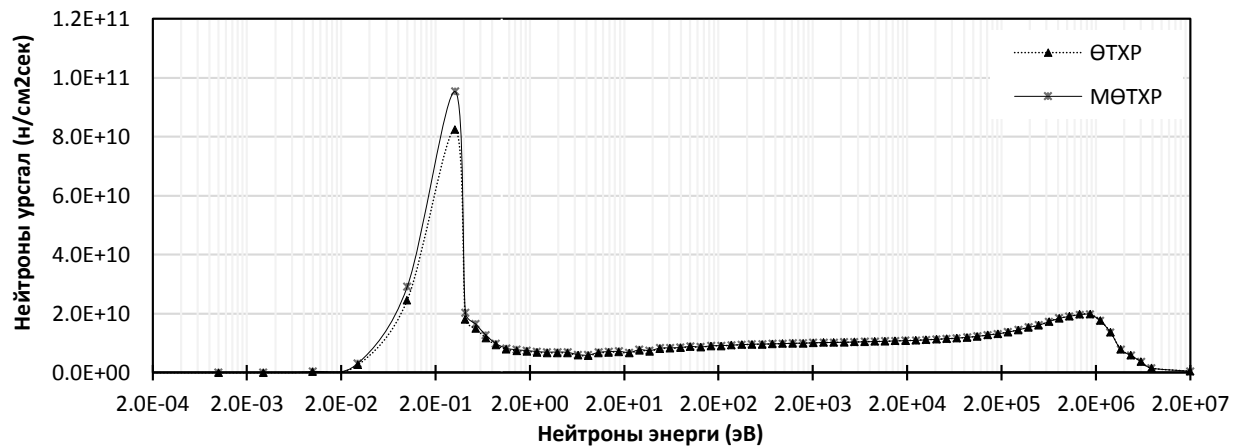
Үр дүнгээс харахад нэмэлт ZrC давхаргын нөлөөгөөр реакторын ажиллагааны эхэн үед эффектив нейтрон үржүүлэх фактор болон түлшний шаталт ихэсч байсан хэдий ч реакторын ажиллах жил багассан. Мөн төвийн ойлгогчийн нөлөөгөөр нейтроник үр дүнгүүд сайжирсан учраас дараагийн анализуудыг төвдөө ойлгогчтой реакторын голомт дээр хийв. Уламжлалт TRISO түлштэй, төвдөө ойлгогчтой реакторын дизайныг өмнөх судалгааны ажлаар гүйцэтгэж, судалсан [5].

Сайжруулсан TRISO түлш ашигласнаар реакторын ажиллах жил багасч, түлшний шаталт ихэссэн үр дүнгийн шалтгааныг тайлбарлахын тулд ZrC нэмэлт давхаргатай, давхаргагүй TRISO түлштэй төвдөө ойлгогчтой реакторын голомтоорх нейтроны урсгал болон хуваагдлын урвалын хурдыг харьцуулав. Зураг

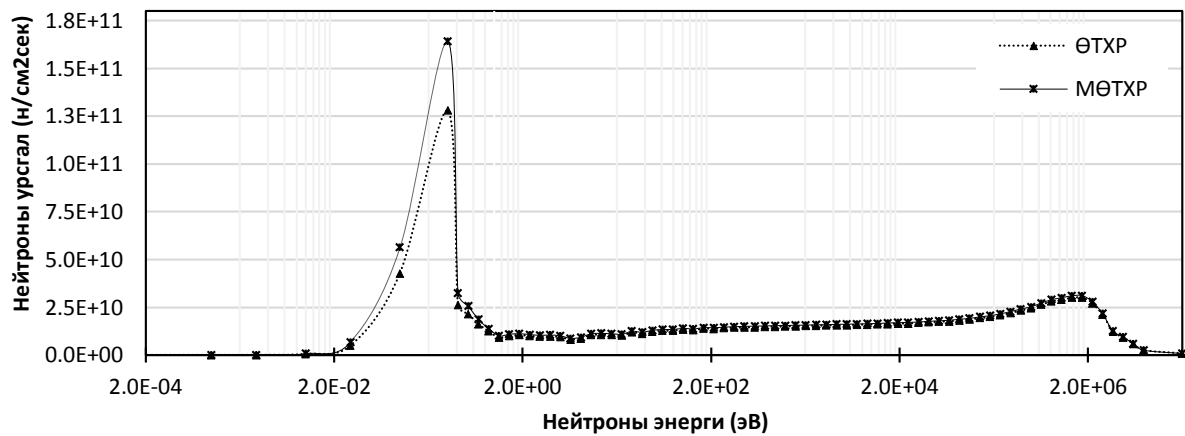
5а болон 5б-д реакторын ажиллагааны эхэн болон сүүл үеийн МӨТХР болон ӨТХР-ийн нейтроны урсгалыг харуулав. Зургаас ZrC давхаргын нөлөөгөөр нейтроны урсгал нь реакторын ажиллагааны турш нейтроны энергийн бүх мужид арай өндөр байгаа нь харагдана. Үүний учир нь ZrC давхарга нь нейтрон шингээх биш харин сарниулан ойлгож байгааг харуулна. Харин Зураг 6а, 6б нь ӨТХР болон МӨТХР-ийн реакторын ажиллагааны эхэн болон сүүл үед голомт даяарх ^{235}U изотопын хуваагдах урвалын хурдыг харуулж байна. Сайжруулсан TRISO түлштэй голомтын хувьд ^{235}U изотопын хуваагдах урвалын хурд арай илүү байгаа нь энд дулааны нейтроны өндөр урсгалтай холбоотой. Тиймээс Хүснэгт 2-т харуулснаар МӨТХР-ийн ажиллагааны эхэн үеийн эффектив нейтрон үржүүлэх фактор нь ӨТХР-тэй харьцуулахад бага зэрэг илүү байна. МӨТХР-ийн ажиллагааны сүүл үед ^{235}U изотопын хуваагдах урвалын хурд ч, нейтроны урсгал ч өндөр байгаа нь МӨТХР-ийн түлшний шаталт ӨТХР-тай харьцуулахад их болохын шалтгаан болно. МӨТХР-ийн хувьд нейтроны өндөр урсгалаас болж реакторын ажиллах жил бага зэрэг буурсан.

В. ZrC давхаргын зузааны нөлөө

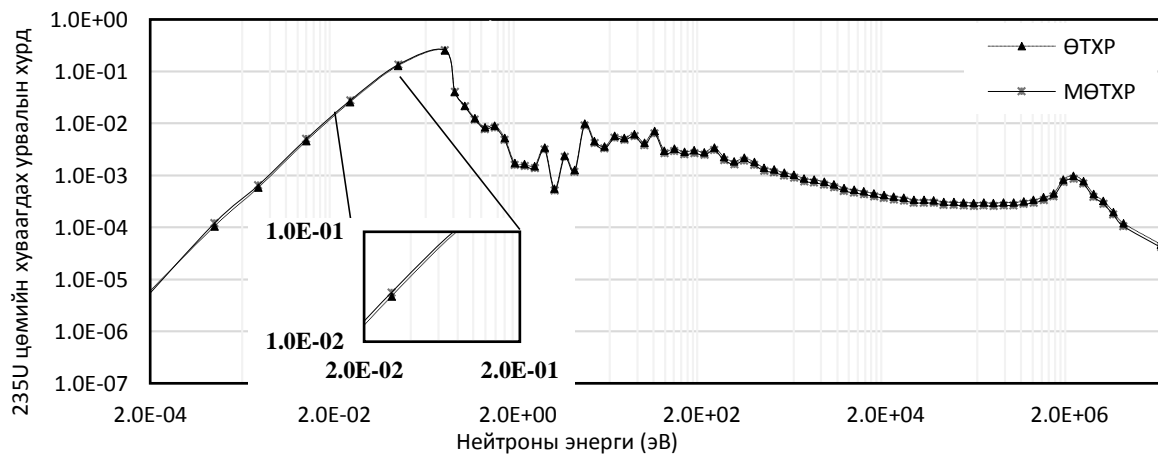
Бид дараагийн тооцоололдоо төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ийн түлшний ZrC давхаргын 20 мкм зузааныг 10 мкм, 40 мкм болгон өөрчилж, түүний нейтроник анализын үр дүнг Хүснэгт 3 болон Зураг 7-д харуулав. Үр дүнгээс харахад түлшний ZrC давхаргын зузаан нэмэгдэх тусам голомтын түлшний нэг циклийн үргэлжлэх хугацаа багасч байсан хэдий ч реактор ажиллаж эхлэх үеийн эффектив нейтрон үржүүлэх фактор болон түлшний шаталт ихэсч байсан. ZrC давхаргын зузаан ихэсэхэд хуваагдагч материалын дэргэд нейтроныг сарниулж, удаашруулан ойлгох материалын хэмжээ ихэссэнээр ^{235}U -ын хуваагдал хурдтай явагдаж, нейтроны урсгал ихэснэ. Үүнтэй холбоотойгоор дээрх үр дүн гарна.



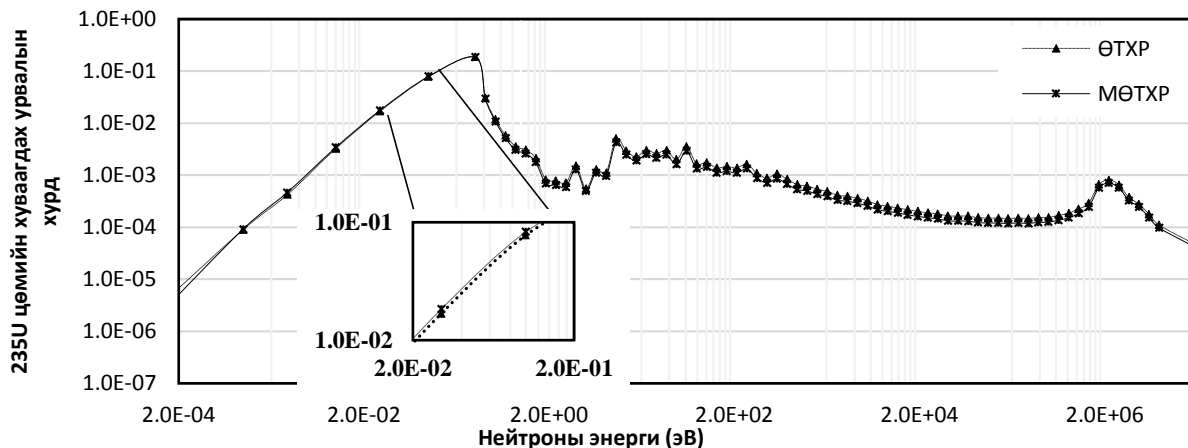
Зураг 5а. Төвдөө ойлгогчтой ӨТХР болон МӨТХР-ийн ажиллагааны эхэн үеийн нейтроны спектр.



Зураг 5б. Төвдөө ойлгогчтой ӨТХР болон МӨТХР-ийн ажиллагааны сүүл үеийн нейтроны спектр.



Зураг 6а. Төвдөө ойлгогчтой ӨТХР болон МӨТХР-ийн ажиллагааны эхэн үед ^{235}U цөмийн хуваагдах урвалын хурд.



Зураг 6б. Төвдөө ойлгогчтой OTXP болон MOTXP -ийн ажиллагааны сүүл үед ^{235}U цөмийн хуваагдах урвалын хурд.

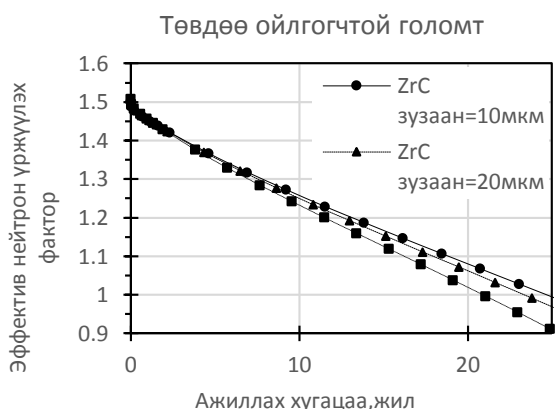
Хүснэгт 3. MOTXP голомтын гүйцэтгэлд ZrC давхаргын зузааны нөлөөлөл.

ZrC давхаргын зузаан	Kэфф. (алдаа%)	Голомтын ажиллах хугацаа(жил)	Түлшний шаталт (ГВт*өдөр/тн)
10 мкм	1.5010 (0.0187)	24.7	107.0
20 мкм	1.5025 (0.0207)	23.4	108.0
40 мкм	1.5072 (0.0213)	20.9	109.2

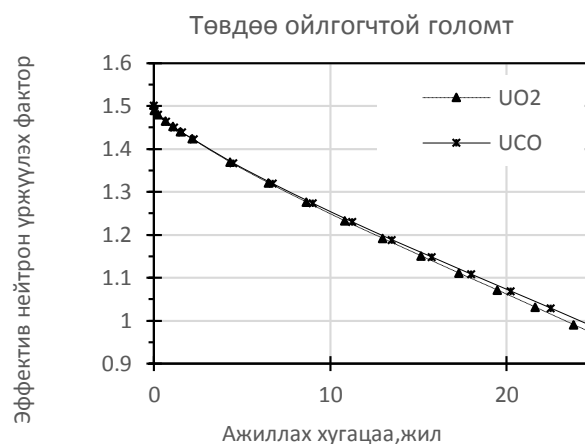
нейтрон үржүүлэх фактор болон түлшний шаталт бага зэрэг буурсан ба үр дүнг Хүснэгт 4 болон Зураг 8а, 8б-д харуулав.

Хүснэгт 4. UCO чөмөгтэй TRIZO түли бүхий төвдөө ойлгогчтой MOTXP -ийн голомтын нейтроник анализын үр дүн.

Түлшний чөмгийн төрөл	Kэфф. (алдаа%)	Голомтын ажиллах хугацаа(жил)	Түлшний шаталт (ГВт*өдөр/тн)
UO_2	1.5025 (0.0207)	23.4	108.0
UCO	1.5014 (0.0191)	24.2	107.4



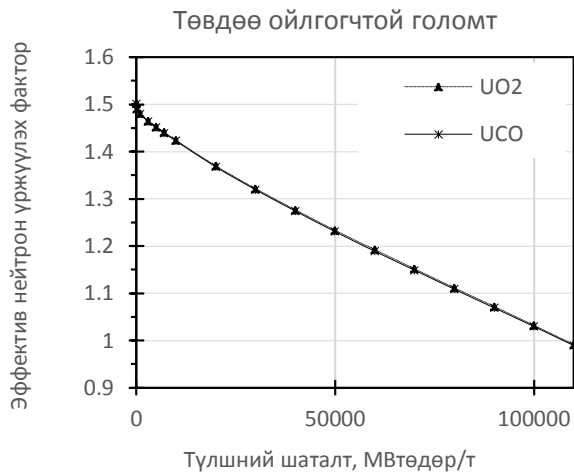
Зураг 7. Төвдөө ойлгогчтой MOTXP -ийн голомтын эффектив нейтрон үржүүлэх факторын хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлтөд ZrC давхаргын зузаан нөлөөлөл нь.



Зураг 8а. Өөр өөр чөмөг бүхий TRIZO түлштэй, төвдөө ойлгогчтой MOTXP -ийн голомтын эффектив нейтрон үржүүлэх факторын хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт.

С. TRIZO түлшний чөмөгт UCO ашиглах нь

Ураны оксид түлшийг ураны оксикарбид түлшээр сольж, нейтроник анализын үр дүнг харьцуулахад карбидын нөлөөнөөс болж голомтын ажиллах хугацаа уртасч, эффектив



Зураг 8б. Өөр өөр чөмөг бүхий TRIZO түлштэй, төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ийн голомтын эффектив нейтрон үржүүлэх факторын түлшний шаталтнаас хамаарсан өөрчлөлт.

IV. ДҮГНЭЛТ

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

2. МӨТХР-ийн нейтроник анализын үр дүнг ӨТХР-ийн үр дүнтэй харьцуулахад реакторын ажиллах жил багассан хэдий ч эффектив нейтрон үржүүлэх фактор болон түлшний шаталт ихэсч байгааг олж тайлбарлав.

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

4. Төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ийн TRIZO бүхий түлшний ураны оксид чөмгийг ураны оксикарбид чөмгөөр сольж, тооцоолол хийн нейтроникийн үр дүнг гаргаж авав.

V. ТАЛАРХАЛ

МУИС-ЦФСТ-ийн МИНАТО кластер серверийн тогтвортой ажиллагааг хангаж, тооцоолол явуулах боломж олгосон МУИС-ХШУИС-ийн дэд профессор Б.Мөнхбатад талархал илэрхийлж байна.

НОМ ЗҮЙ

[1] Very-High Temperature Reactor (VHTR), The Generation IV International Forum, [Cited 2016 October], Available from: <http://www.gen-4.org/gif/jcms>

/c_42153/very-high-temperature-reactor-vhtr, (2000).

- [2] HAYASHI K., et al.: Assessment of Fuel Integrity of HTTR and Its Permissible Design Limit, Japan: JAERI-M-89-162, (1989).
- [3] R.J.M Konings: Comprehensive nuclear material, Vol 3, 215-236, (2012)
- [4] ODMAA, S., et al: Neutronic and Thermo-Hydraulic Analysis of a Small, Long-Life HTGR for Passive Decay-Heat Removal, Journal of Nuclear Science and Technology, (2015)
- [5] ODMAA, S., et al: Design Parameters in an Annular, Prismatic HTGR for Passive Decay Heat Removal, Annals of Nuclear Energy, (2018)
- [6] SAITO, S., et al.: Design and Safety Consideration in the HTTR, Energy, (1991)
- [7] SAITO, S., et al.: Design of HTTR, JAERI-1332, Japan: Japan Atomic Energy Research Institute, (1994)
- [8] SHIOZOWA, S., et al.: Overview of HTTR Design Features, Nucl. Eng. And Design, (2004)
- [9] Evaluation of HTGR Performance: Benchmark Analysis Related to Initial Testing of the HTTR and HTR-10, IAEA-TECDOC 1382, IAEA: Vienna, (2003)
- [10] CHARLES M. BARNES et al.: Fabrication process and product quality improvements in advanced gas reactor UCO kernels, Proceedings of the 4th International Topical Meeting High Temperature Reactor Technology HTR2008, USA, (2008)
- [11] 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)
- [12] OKUMURA, K., et al.: MVP-BURN User's Manual, Japan: Atomic Energy Agency, 2005
- [13] SHIBATA, K., et al.: Japanese Evaluated Nuclear Data Library-JENDL-4.0, A New Library for Nuclear Science and Engineering, J.Nucl.Sci.Tech, 48(1). 1-30, (2011).