

# Маш өндөр температурын хийн хөргүүртэй реакторын голомтын дизайны судалгаа: өөр өөр бөөм түлштэй голомтуудын харьцуулалт

Б.Хөхсүвд<sup>1\*</sup>, С.Одмаа<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Цөмийн физикийн судалгааны төв, Монгол улсын их сургууль

<sup>2</sup> Хими, биологийн инженерчлэлийн тэнхим, Хэрэглээний шинжлэх ухаан, инженерчлэлийн сургууль, Монгол улсын их сургууль

Энэхүү судалгааны ажлаар 100 МВт дулааны чадлын төвдөө ойлгогчтой, ZrC агуулсан TRISO эсвэл SiC агуулсан TRISO бүхий найман өөр хийцийн дэвшилтэт түлштэй Маш Өндөр Температурын Хийн-хөргүүртэй Реактор (МӨТХР)-ын голомтын нейтроник үзүүлэлтүүдийг харьцуулан судлав. 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. Судалгааны үр дүнгээс харахад TRISO төрлийн түлш агуулсан, төвдөө ойлгогчтой, МӨТХР-ийн нейтроник үзүүлэлтүүд нь TRISO төрлийн түлш агуулсан төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ийнхаас илүү сайжирсныг олж тайлбарлав.

Түлхүүр үг: МӨТХР, TRISO, TRIZO, түлшний давхаргууд, нейтроник үзүүлэлтүүд

## I. ОРШИЛ

Дэлхий нийтэд тулгамдаж буй байгаль, орчинд сөргөөр нөлөөлж байгаа олон асуудлууд дундаас цаг агаарын өөрчлөлтийг бууруулахын тулд, дэлхийн дулаарлыг зогсоохын тулд үр дүнтэй арга хэмжээ авах шаардлагатай байна. Нүүрс, байгалийн хий, газрын тос зэрэг шатах түлшийг ашиглан цахилгаан эрчим хүчийг үйлдвэрлэх үйл ажиллагаа нь хүлэмжийн хийг ихээр ялгаруулж, дэлхийн дулаарлыг үүсгэх гол шалтгаан болдог ба үүнийг зогсоон, эрчим хүчээ найдвартай, тогтвортой хангах арга зам нь цөмийн эрчим хүчийг хэрэглэх юм. Цөмийн эрчим хүчний реактор систем нь I, II, III гэсэн үе шаттайгаар хөгжиж ирсэн ба одоо хөгжлийн IV үеийн реакторуудын дизайны судалгаа хийгдэж байна. Энэ үед хамаарах реакторууд нь аюулгүй ажиллагаатай, эдийн засгийн үр ашигтай, ашигласан түлшний хаягдал багатай, цөмийн зэвсэг үл дэлгэрүүлэх бодлогод нийцэхээр загварчлагдах ба үүнд дэлхийн улс орнуудын гаргасан реакторын загваруудаас зургаан технологийг сонгон судалж байна. Эдгээр дэвшилтэт реакторын нэг болох Маш өндөр температурын хийн-хөргүүртэй реактор (МӨТХР) нь бал чулуун удаашруулагчтай, гелийн хийн хөргүүртэй дулааны реактор юм. Бусад дэвшилтэт реактортай харьцуулбал МӨТХР-ын давуу тал нь хийн гаралтын

температур маш өндөр буюу 1000°C хүрдэг тул эрчим хүч үйлдвэрлэхээс гадна устөрөгчийг үйлдвэрлэх, төрөл бүрийн процессийг дулаанаар хангах боломжтой оршино. Ийм өндөр температурт хүрэхэд түлшний дизайн чухал үүрэг гүйцэтгэнэ. Түүнчлэн реакторыг ажиллах температурт хүргэх түлшний зайлшгүй шаардлага нь аюулгүй байдлыг хангах явдал юм. TRISO гэгдэх олон давхар бөмбөлөг түлш нь өндөр температурт бүрэн бүтэн байдлаа алдахгүй, аюулгүй ажиллагаатай болох нь туршилтаар батлагдсан. Энэ түлшний хамгийн төв хэсэг байх жижиг бөмбөлөгийг түлшний чөмөг гэх ба түүний гадуур бал чулуун (Buffer, PyC, OPyC) болон цахиурт карбид (SiC) материал бүхий дөрвөн давхарга бүрхэн байрладаг. Эдгээр давхарга нь ямар ч нөхцөлд хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг гадагш алдахгүй, тогтоон барих үүрэгтэй. МӨТХР-ын түлшний хөгжлийн эхэн үеийн шатанд BISO түлшийг ашиглаж байсан ба энэ нь хуваагдагч түлшний чөмгийн гадуурх бал чулуун давхаргуудаас бүрдэнэ. Хэдий давхарган бүтэцтэй ч гэлээ эдгээр давхаргууд нь хуваагдах урвалаас үүсэх хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийг хангалттай барьж чадахгүй байсны улмаас одоогийн TRISO түлш болон хөгжсөн. TRISO түлшний хувьд SiC давхарга нь өндөр нягттай бал чулуун давхаргуудын завсарт байрладаг. Реакторын хөгжлийн үе шаттай зэрэгцэн олон улсын

\* Electronic address: khukhsuvd@num.edu.mn

эрдэмтэн судлаач нар уг түлшийг маш өндөр температурт аюулгүй ажиллуулах талаар олон төрлийн судалгаа хийж байгаа ба үүнд үндсэн TRISO түлшний SiC давхаргын механик үзүүлэлтүүд 1500°C-ийн маш өндөр температурт муудаж байсан учраас уг түлшний илүү дэвшилтэт технологийг эрэлхийлж байна. Иймд уг түлшийг маш өндөр температурт аюулгүй ажиллуулахын тулд түлшин дэхь SiC материалыг өөр тохирох материалаар солих шаардлага тулгарч, дэвшилтэт түлшний хэд хэдэн санааг дэвшүүлэн, тэдгээрийг цөмийн цацрагаар шарж аюулгүй байдлын судалгааг хийж байна. Эдгээр дэвшилтэт дизайнд нэмэлт ZrC болон SiC агуулсан түлшнүүд хамаарах ба цацрагаар шарсан үр дүнг харьцуулахад ZrC агуулсан TRISO түлшний үзүүлэлт сайн байсан. Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд янз бүрийн нэмэлт давхаргатай дэвшилтэт түлштэй МӨТХР-ын голомтын нейтроник тооцооллыг гүйцэтгэн, тэдгээр үзүүлэлтүүдийг харьцуулан судлах зорилго тавив. Ингэснээр МӨТХР-д тохирох аюулгүй ажиллагаатай, нейтроник үзүүлэлт сайтай түлшний боломжит хувилбарыг сонгох боломжтой юм.

## II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Дэвшилтэт түлш бүхий МӨТХР-ын нейтроник үзүүлэлтийг судлахын тулд тасралтгүй энергитэй нейтроны харилцан үйлчлэлийг Монте Карло аргаар тооцоолдог Японы Атомын Энергийн агентлагаас хөгжүүлсэн компьютерийн код болох MVP2.0 [1], MVPBURN [2]-ийг цөмийн өгөгдлийн сан JENDL-4.0[3]-ийн хамт ашиглан гүйцэтгэв. Бид өмнөх судалгааны ажлаараа TRISO түлштэй төвдөө ойлгогчтой болон төвдөө ойлгогчгүй МӨТХР-ын голомтын нейтроник анализийг хийсэн [4]. Энэ ажилд төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтод янз бүрийн дэвшилтэт түлшийг ачаалан, голомтуудын нейтроник үзүүлэлтийг судлав. Үүнд голомтын геометрийн үзүүлэлт болон тооцооллын нөхцөл нь өмнөх судалгааны ажилтай ижил болно. MVP 2.0 [1] кодоор реакторын голомтын нейтроник үзүүлэлтийг тооцоолохдоо голомт дотор үүссэн нейтроннуудын санамсаргүй алхамыг мөрийн урт, мөргөлдөөний нягт, болон бусад аналог үнэлэгчүүдийг ашиглан статистикээр үнэлдэг.

Тооцоолол хийхдээ реакторт үүссэн нейтрон бүр 50000 ялгаатай харилцан үйлчлэл хийнэ гээд хуваагдлын 100 нейтроны нийт 5000000 санамсаргүй харилцан үйлчлэлийг авч үзсэн. Статистик боловсруулалтын үр дүнг сайжруулахын тулд эхний 20 нейтроны харилцан үйлчлэлийг тооцоогүй болно. Төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ийн голомтын үндсэн үзүүлэлтийг Хүснэгт 1-т харуулсан. Төвдөө ойлгогчтой, 100 МВт дулааны чадалтай МӨТХР-ын нейтроник анализийг гүйцэтгэхдээ түлшний хийцийн загвараас хамааруулан 3 хэсэгт хуваан, үр дүнг харьцуулав. Нэгдүгээр хэсэг нь адил диаметртай сайжруулсан TRISO түлштэй, төвдөө ойлгогчтой голомтын тооцооллоос бүрдэнэ.

*Хүснэгт 1. Төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын дизайны үндсэн үзүүлэлтүүд.*

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

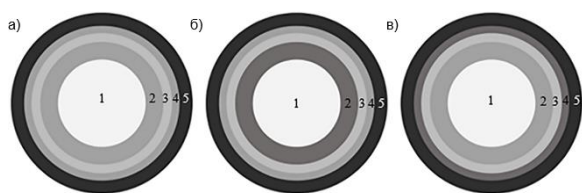
Хоёрдугаар хэсэгт, нэмэлт ZrC давхарга агуулсан TRISO түлштэй, харин гуравдугаар хэсэгт, нэмэлт SiC давхаргатай TRISO түлштэй, төвдөө ойлгогчтой голомтын тооцооллыг гүйцэтгэсэн.

## III. ТҮЛШНИЙ ДИЗАЙН

### *IIIa. Адил диаметртай, сайжруулсан TRISO түлшний дизайн*

Энэ хэсэгт уламжлалт TRISO түлшнээс гадна хоёр өөр дизайн хамаарах ба түлшний бүтцийг Зураг 1-т харуулав. Зураг 1-т харуулсанчлан ZrC агуулсан TRISO түлшнүүдийн давхаргын тоо, давхаргын зузаан харгалзан адил болно.

Хүснэгт 2-т адил диаметртэй, сайжруулсан түлшний геометр хэмжээсийг өгөв.



Зураг 1. Адил диаметртэй, сайжруулсан TRISO түлшний бөөмийн зүсмэг. а) Түлш-1, б) Түлш-2, в) Түлш-3.

Хүснэгт 2. Адил диаметртэй сайжруулсан TRISO түлшний геометр хэмжээс

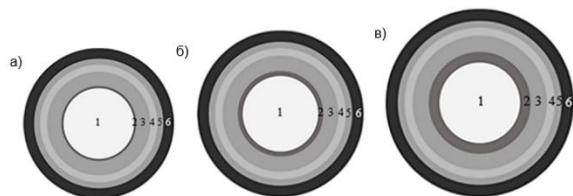
Хэмжээ Түлш	Радиус, мкм	Зузаан, мкм			
	298.5	60	30	25	45
Түлш-1	Түлшний чөмөг	Buffer	IPyC	SiC	OPyC
Түлш-2		ZrC бүхий Buffer			
Түлш-3		Buffer	ZrC		

Түлш-1 нь үндсэн TRISO түлшний дизайн, Түлш-2-д сүвэрхэг бүтэцтэй Buffer давхаргын эзлэхүүний 40 %-ийг эзэлж байхаар ZrC материалыг жигд тархалттайгаар нэмж өгсөн [5], Түлш-3 нь SiC давхаргыг ZrC-ээр сольсон дизайн юм. Түлш-2-ыг 1500°C-ийн өндөр температурт, 12000 цаг орчим цөмийн цацрагаар шарахад Ag болон Eu зэрэг хуваагдлын бүтээгдэхүүн тодорхой хэмжээгээр алдагдаж байсан [6].

**IIIб. Нэмэлт ZrC агуулсан TRISO түлшний дизайн**

Ердийн TRISO түлш өмнө дурдсанчлан 5 давхаргатай ч маш өндөр температурт (>1700 °C) механик шинж чанар муудаж, бүрэн бүтэн байдал нь алдагддаг [6]. Тиймээс TRISO бүрмэл түлшний маш өндөр температурт ажиллах чадварыг дээшлүүлэхийн тулд SiC давхаргаас илүү үзүүлэлттэй материалын шаардлага гарсан ба ZrC материалыг түлшний чөмгийн гадуур буюу сүвэрхэг давхаргын дотуур бүрж 1500°C температурт 500 өдрийн турш цөмийн цацрагаар шарах үед ямар ч хуваагдлын бүтээгдэхүүн алдагдахгүй байсан [6]. Тийм ч учраас уг нэмэлт ZrC агуулсан TRISO түлш нь аюулгүй байдлын шинж чанараараа дэвшилтэт түлшний нэг гэж үзэж болно. Энэ түлшний дизайнд нэмэлт ZrC давхаргыг түлшний чөмгийн гадуур бүрсэн байдлаар загварчилсан ба Зураг 2-г харуулснаар тооцоололд нэмэлт ZrC зузааныг 10 мкм (Түлш-

4), 20 мкм (Түлш-5), эсвэл 40 мкм (Түлш-6) гэж сонгосон. Хүснэгт 3, Зураг 2-г харуулсанчлан ZrC нэмэлт давхаргаас бусад давхаргын материал, зузааныг өөрчлөөгүй .



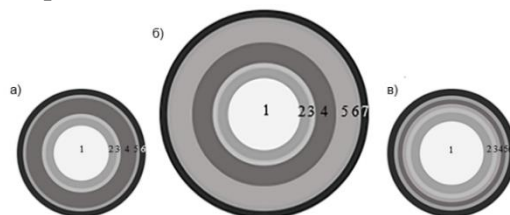
Зураг 2. Нэмэлт ZrC давхарга бүхий сайжруулсан TRISO түлшний зүсмэг. а) Түлш-4, б) Түлш-5, в) Түлш-6.

Хүснэгт 3. Нэмэлт ZrC агуулсан сайжруулсан TRISO түлшний геометр хэмжээс.

Хэмжээ Түлш	Радиус, мкм	Зузаан, мкм				
	Түлшний чөмөг	ZrC	Buffer	IPyC	SiC	OPyC
Түлш-4	298.5	10	60	30	25	45
Түлш-5		20				
Түлш-6		40				

**IIIв. SiC агуулсан TRISO түлшний дизайн**

Уламжлалт TRISO түлшин дэх SiC давхарга нь түлшний бат бөх байдлыг хангах үндсэн үүрэгтэй ч хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдтэй харилцан үйлчлэлд ордог. Үүнээс үүдэх эвдрэл гэмтлээс урьдчилан сэргийлэхийн тулд нэмэлт SiC давхаргуудтай дэвшилтэт түлшний загвар бий болсон. Зураг 3-т эдгээр түлшний бүтцийг Хүснэгт 4-т геометр хэмжээсийг тус тус харуулав. Түлш-7 нь нэмэлт 120 мкм зузаантай SiC+PyC давхаргатай бөгөөд үндсэн SiC давхаргын дотор талд байрлана. Түлш-8-ын загвар нь өмнөх загвартай ижил боловч 120 мкм зузаантай нягт PyC давхарга нь SiC+PyC болон SiC давхаргын хооронд нэмэлтээр байрлана. Түлш-9-ын хувьд нэмэлт SiC давхарга орсон болно. Эдгээр SiC агуулсан дэвшилтэт түлшинд нэг цагийн турш 1500°C температурт цөмийн цацрагийн шарлагаас шалтгаалсан гэмтэл үүсээгүй болно [6].



Зураг 3. Нэмэлт SiC агуулсан сайжруулсан TRISO түлшний зүсмэг. а) Түлш-7, б) Түлш-8, в) Түлш-9.

Хүснэгт 4. SiC агуулсан TRIZO түлшний геометр хэмжээс.

№	Давхарга/Түлш	Түлш-7	Түлш-8	Түлш-9
1	Түлшний чөмөг	298.5		
2	Buffer	60		
3	IPyC	30		
4	SiC+PyC <sub>a,b</sub> SiC <sub>c</sub>	120	120	25
5	SiC <sub>a</sub> PyC <sub>b,c</sub>	25	120	30
6	OPyC <sub>a</sub> SiC <sub>b,c</sub>	45	25	25
7	OPyC	-	45	45

#### IV. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

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

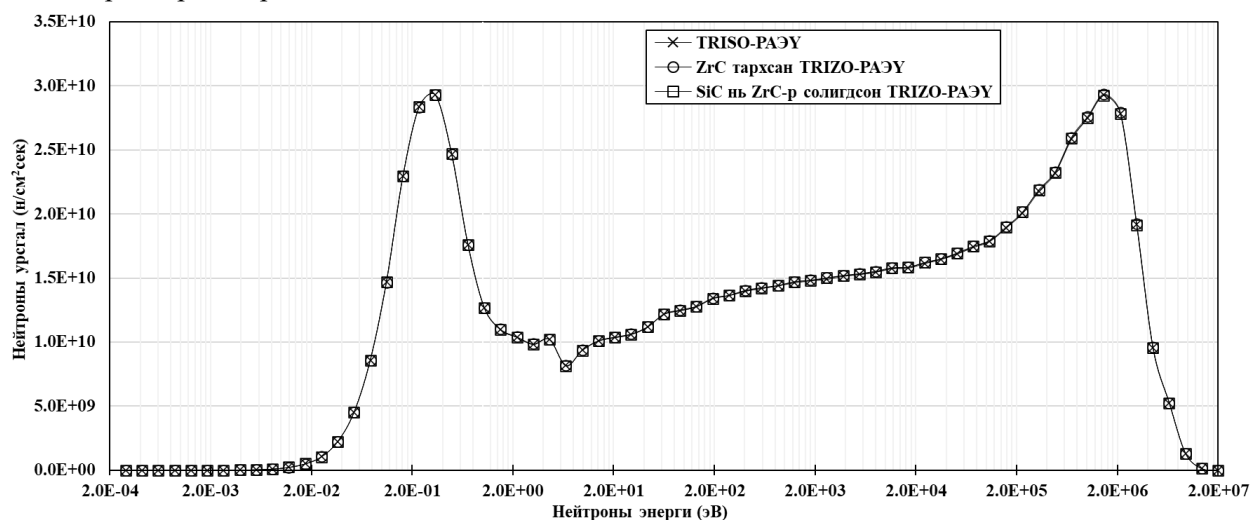
Энэ хэсэгт нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлштэй МӨТХР-ын голомтын нейтроник тооцооллыг гүйцэтгэн нейтроник үр дүнг Хүснэгт 5-д харуулав. Үр дүнгээс харвал, үндсэн TRISO түлштэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын эффе́ктив нейтрон үржүүлэх фактор ( $k_{эфф}$ ) 1.4977 (0.02%) түлшний шаталт 106 ГВт\*өдөр/тн, реакторын ажиллах жил 26 жил орчим байхад сүвэрхэг бүтэцтэй buffer давхаргад ZrC материал жигд тархсан TRIZO түлштэй төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын  $k_{эфф}=1.4962$  (0.02%) түлшний шаталт 106 ГВт\*өдөр/тн реакторын ажиллах жил 26 жил, SiC давхаргыг ZrC-аар сольсон TRIZO түлштэй МӨТХР-ын голомтын хувьд  $k_{эфф}=1.4962$  (0.02%) түлшний шаталт 106 ГВт\*өдөр/тн, реакторын ажиллах жил 26 жил

тус тус байна. Нейтроник үзүүлэлт ойролцоо гарсан энэ үр дүнг тайлбарлахын тулд МӨТХР-ын голомт даяарх реакторын ажиллагааны эхэн (РАЭҮ) болон сүүл (РАСҮ) үеийн нейтроны урсгал болон нейтрон үүсэх хурдыг харгалзан Зураг 4 болон Зураг 5-д харуулав. Янз бүрийн түлшний дизайнтай МӨТХР-ын голомт тус бүр адил тооны буюу нийтдээ 29 тэрбум орчим TRIZO бөөм агуулсан байна. Энэ нь түлшний эзлэхүүн болон түлшний эзлэх хувь нь адил учраас юм.

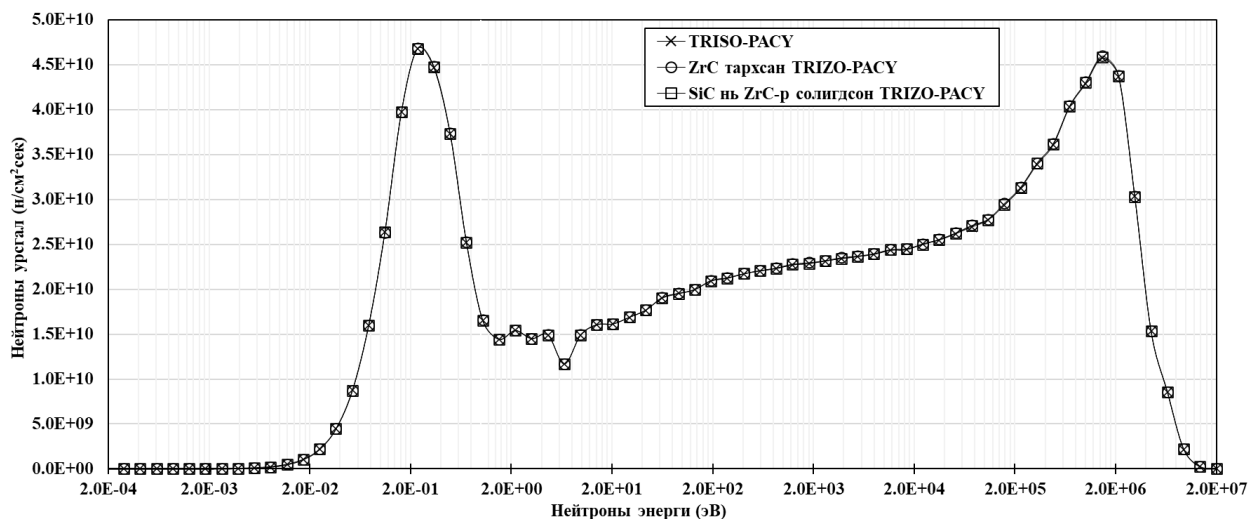
Хүснэгт 5. Төвдөө ойлгогчтой ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын нейтроник анализын үр дүн.

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

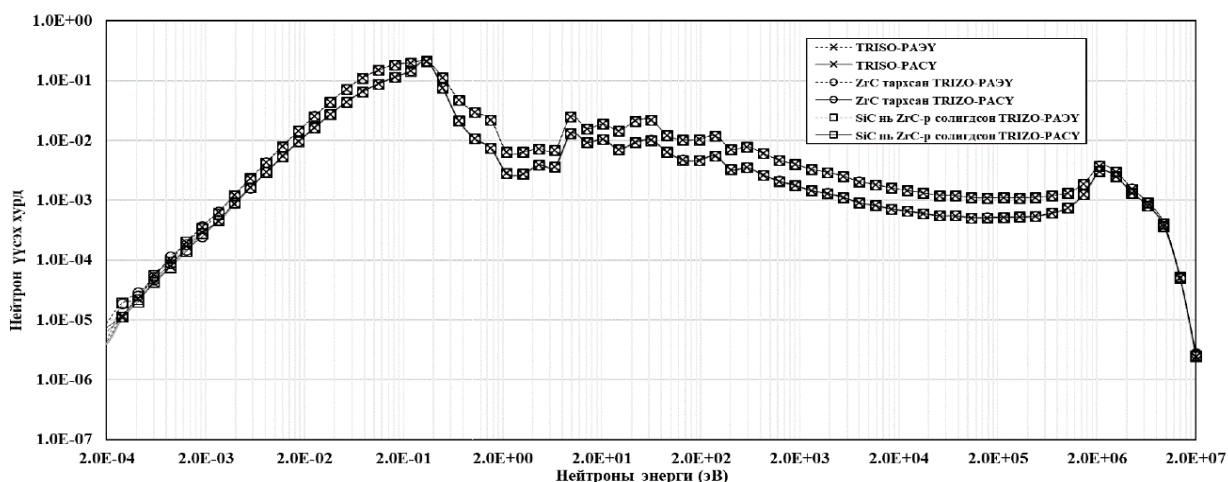
Зураг 4 болон 5-д өгөгдсөн үр дүнгээс харвал голомт даяарх нейтроны урсгал бүх энергийн туршид ялгаагүй байгаа нь Хүснэгт 5-д байгаа нейтроник үр дүнгүүд ойролцоо байгаагийн шалтгаан болно. Мөн адил хуваагдагч цөмүүд ижил хэмжээгээр голомтонд ачаалсантай холбоотойгоор голомт тус бүрт нейтрон үүсэх хурдууд ижил байна.(Зураг 6).



Зураг 4. Төвдөө ойлгогчтой ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голомт даяарх РАЭҮ-ийн энергиэс хамаарсан нейтроны урсгалын өөрчлөлт.



Зураг 5. Төвдөө ойлгогчтой ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ы голомт даяарх PACU-ийн энергиэс хамаарсан нейтрон нейтроны урсгалын өөрчлөлт.



Зураг 6. Төвдөө ойлгогчтой ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ы голомт даяарх энергиэс хамаарсан нейтрон үүсэх хурдын өөрчлөлт.

**IVб. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голомт**

Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC давхаргатай дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын нейтроник анализын үр дүнг энэ хэсэгт авч үзэв. Бид өмнөх судалгааны ажлаар төвдөө ойлгогчгүй болон төвдөө ойлгогчтой тохиолдлуудад ийм төрлийн түлштэй МӨТХР-ын голомтын тооцоолол хийн, анхан шатны нейтроник анализын үр дүнг гарган авч байсан [4] ба энэ удаад JENDL4.0 [3] цөмийн өгөгдлийн сан дахь Zr-ын атом массыг ашиглан тооцооллыг дахин гүйцэтгэж, нейтроник анализын шинэчлэгдсэн үр дүнг хүснэгт 6-д харуулав. Үр дүнгээс харахад нэмэлт ZrC давхаргын зузаан нэмэгдэх тусам  $k_{эфф}$  болон түлшний шаталт

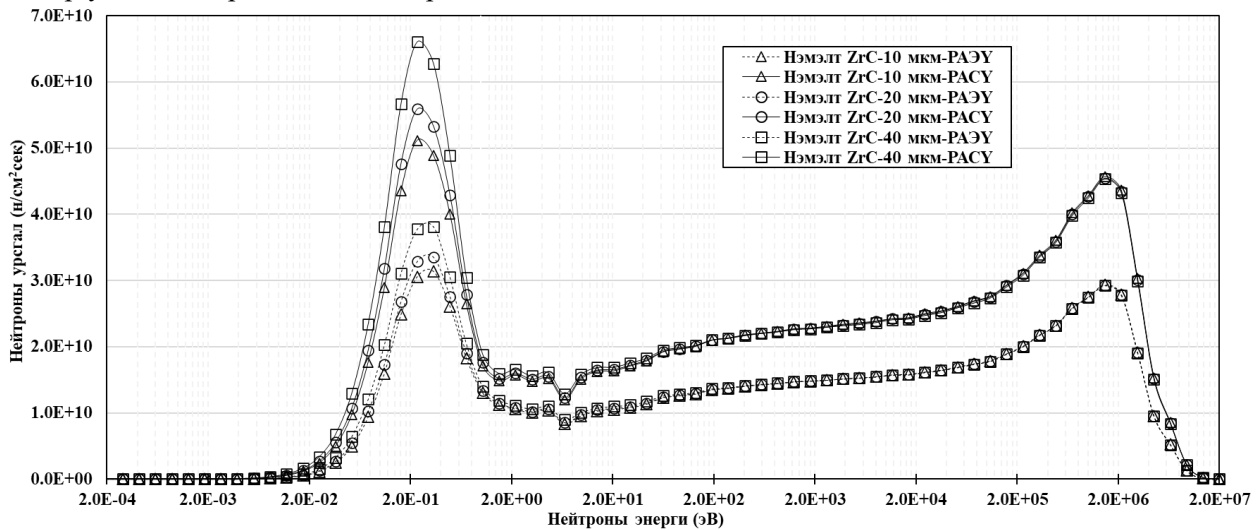
ихсэн, реакторын ажиллах жил буурч байна. Энэ үр дүнг тайлбарлахын тулд голомт даяарх нейтроны урсгал,  $^{235}\text{U}$  изотопын хорогдох хэмжээ, харимхай сарнилын хурдыг авч үзэн Зураг 7-9-т тус тус харуулав.

Хүснэгт 6. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын нейтроник анализын үр дүн.

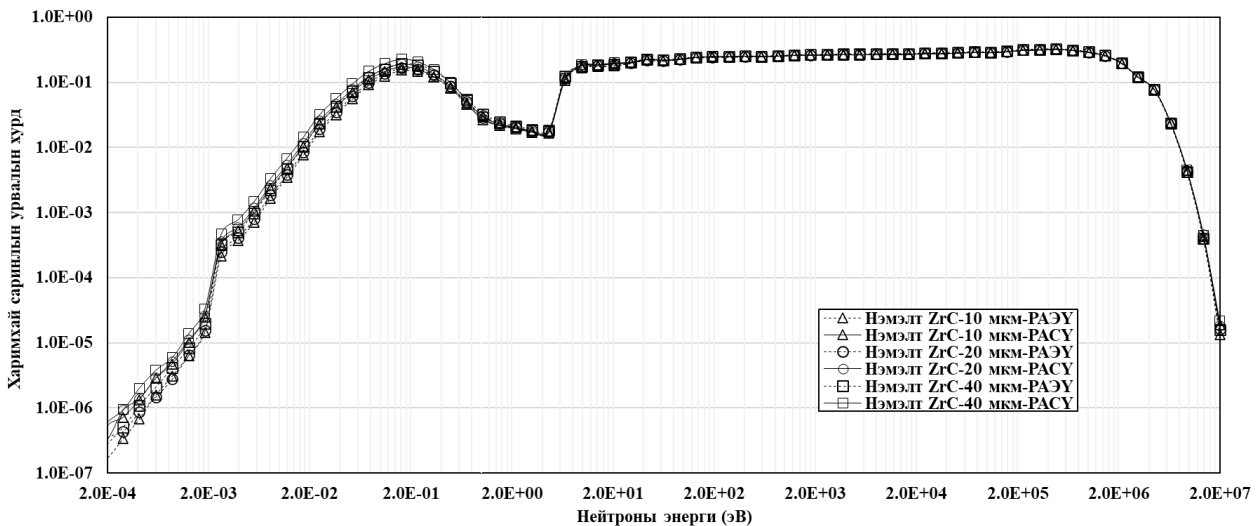
Түлшний төрөл	ZrC давхаргын зузаан	$k_{эфф,0}$ (алдаа %)	Голомтын ажиллах хугацаа (жил)	Түлшний шаталт (ГВт*өдөр/тн)
Түлш -4	10 мкм	1.4994 (0.02)	~25	107
Түлш -5	20 мкм	1.5039 (0.02)	~23	108
Түлш -6	40 мкм	1.5068 (0.02)	~21	109

Зураг 7-д голомт даяарх нейтроны урсгалыг энергис нь хамааруулан харуулсан бөгөөд түлшин дэх ZrC-ын давхаргын зузаан 40 мкм байхад нейтроны урсгал реакторын ажиллагааны туршид хамгийн их байна. Нейтроны урсгал өндөр байна гэдэг нь цөмийн гинжин урвал эрчимтэй явагдаж, түлшний шаталт ихсэхийг илэрхийлэх ба Хүснэгт 6-д харуулсан  $k_{эфф}$  болон түлшний шаталт их байхын шалтгаан юм. Мөн реакторын ажиллах жил багассан нь түлшний шаталт их байгаатай холбоотой. Илүү нарийвчлан харвал нейтроны спектр улам зөөлөрсөн байх нь харагдаж байна.

Нейтроны спектр зөөлөрсөн байна гэдэг нь дулааны энергитэй нейтроны тоо ихэсч, хурдан нейтроны тоо багассаныг илэрхийлэх ба дулааны энергитэй нейтроны тоо ихсэх нь хуваагдлыг ихэсгэж, үүнтэй зэрэгцээгээр  $k_{эфф}$  болон түлшний шаталт их байх өөр нэг үндэс болно. Үүнтэй зэрэгцээгээр Зураг 10-т харуулснаар ZrC давхаргын зузаан 40 мкм байх тохиолдолд хуваагдагч изотоп болох  $^{235}\text{U}$  изотопын хорогдох хувь бусад тохиолдлуудаас их байна. Энэ нь гинжин урвал эрчимжиж, түлшний шаталт тэр хэмжээгээр ихэссэний баталгаа болж байна.



Зураг 7. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түли бүхий МӨТХР-ын голомт даяарх энергис хамаарсан нейтроны урсгалын өөрчлөлт.



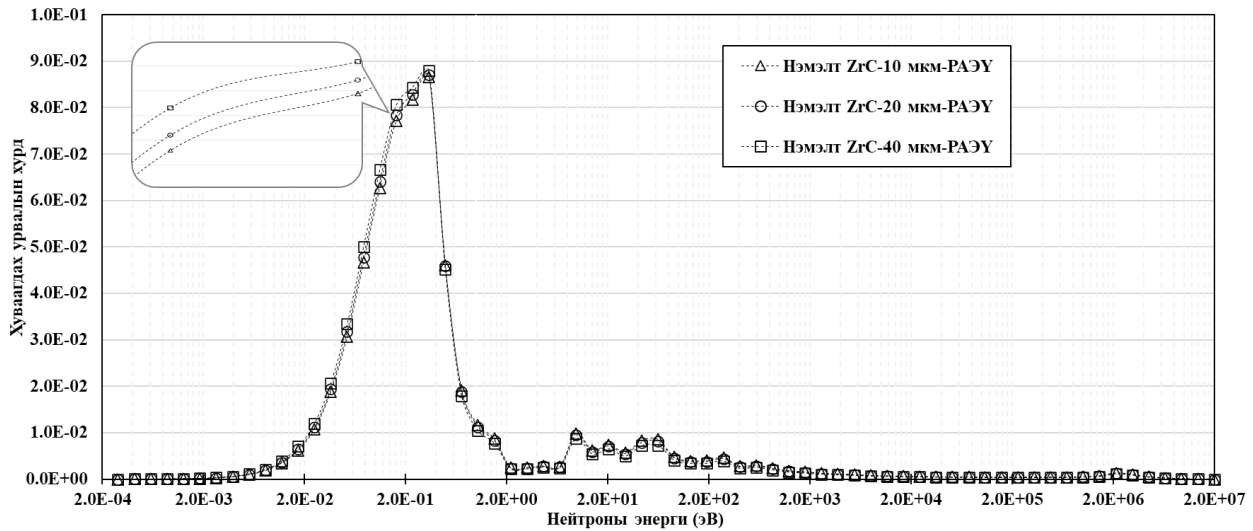
Зураг 8. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRIZO түли бүхий МӨТХР-ын голомт даяарх энергис хамаарсан харимхай сарнилын урвалын хурд.

Зураг 8 болон 9-т харуулсан үр дүнгээс реакторын ажиллагааны бүх үед нэмэлт ZrC давхаргын зузаан хамгийн ихтэй дэвшилтэт

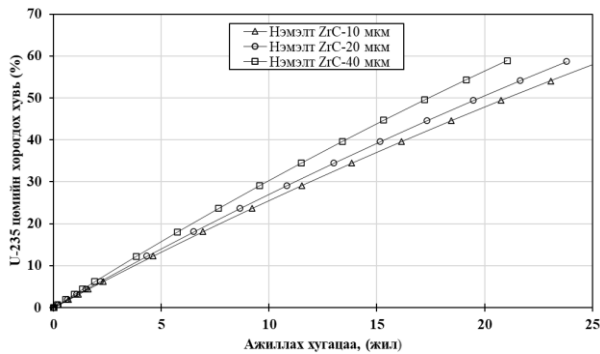
TRIZO бүхий төвдөө ойлгогчтой голомтын харимхай сарнилын урвалын хурд болон хуваагдах урвалын хурдууд хамгийн их байна.

Харимхай сарнилын урвалын хурд их байна гэдэг нь урвалаас үүсэх хурдан нейтроныг удаашруулах процесс хурдан явагдахыг илэрхийлнэ. Удаашрах процесс хурдан явагдах нь хуваагдах урвалын хурд ихсэх шалтгаан болно. Тийм ч учраас ZrC давхаргын зузаан ихсэх тусам нейтрон хурдан удааширч,

хуваагдах урвал эрчимтэй явагдаж,  $k_{эфф}$  болон түлшний шаталт ихэсч, түлш эрчимтэй шатах тусам голомт дахь хуваагдагч изотопыг хувь хэмжээ буурч, реакторын ажиллах жил багасахад хүргэж байна.



Зураг 9. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRISO түлш бүхий МӨТХР-ын голомт даяарх энергиэс хамаарсан хуваагдах урвалын хурд.



Зураг 10. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт ZrC агуулсан дэвшилтэт TRISO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын U-235 изотопын хугацаанаас хамаарсан хоргодох хувь.

Хүснэгт 7. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт SiC агуулсан дэвшилтэт TRISO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын түлшний дизайнаас хамаарсан голомтонд ачаалсан түлшний тоо.

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

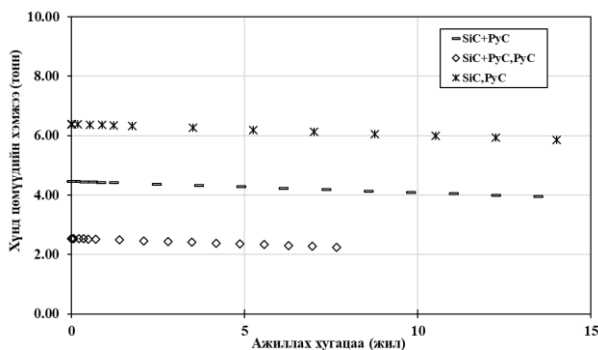
Хүснэгт 8. Төвдөө ойлгогчтой нэмэлт SiC агуулсан дэвшилтэт TRISO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын нейтроник анализын үр дүн.

Түлшний төрөл	Нэмэлт давхарга	$k_{эфф}$ (алдаа%)	Голомтын ажиллах хугацаа (жил)	Түлшний шаталт (ГВт*өдөр/тн)
Түлш-7	SiC+PuC	1.5161 (0.02)	~13	110
Түлш-8	SiC+PuC, PuC	1.4699 (0.02)	~6.5	90
Түлш-9	SiC, PuC	1.5111 (0.02)	~19	110

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

Уламжлалт TRISO түлшний дизайныг ZrC материал ашиглан дэвшилтэт болгохоос гадна бас дахин SiC давхаргыг нэмж агуулсан дэвшилтэт дизайн материал талаасаа судлагдсан байдгийг өмнө дурдсан. Ийм гурван төрлийн дэвшилтэт түлштэй, төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын нейтроник анализыг энэ хэсэгт авч үзэв. Хэсэг IIIв-д өгүүлснээр ийм түлшний нэмэлт SiC давхаргын зузаан ялгаатай

тул голомт даяарх нийт бөмбөлөг түлшний эзлэх хувь өөр болох тул нийт түлшний тоо өөр байхыг Хүснэгт 7-д харуулав. Хүснэгт 8-д эдгээр голомтын нейтроник анализын үр дүнг, Зураг 10-д голомт тус бүрийн хугацаанаас хамаарсан хүнд цөмүүдийн хэмжээг харуулав. Хүснэгт 7-д харуулсанчлан хамгийн зузаан буюу SiC+PyC, PyC давхаргатай TRISO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтонд хамгийн бага тооны түлш ачаалсан байна. Энэ нь хэрэв нэмэлт давхаргын зузаан их байх тусам нэгж түлшний эзэлхүүн томсоно. Түлшний эзэлхүүн томсох тусам бага тооны түлш голомтонд ачаалсантай холбоотой. Тиймээс голомтын нейтроник анализын үр дүн тухайн нэмэлт давхаргын зузаанаас буюу голомтонд ачаалсан хуваагдагч изотопын хэмжээнээс хамааран SiC+PyC, PyC нэмэлт давхаргатай тохиолдолд реакторын ажилланааы эхэн үеийн кэфф, голомтын ажиллах хугацаа, түлшний шаталт тус бүр хамгийн бага үзүүлэлттэй байна. Зураг 11-т мөн адил анх ачаалсан түлшний хэмжээнээс болж, хамгийн их түлш ачаалсан SiC, PyC давхаргатай TRISO түлш бүхий голомтонд реакторын ажиллагааны туршид хүнд цөмүүдийн хэмжээ хамгийн их байхад эсэргээрээ хамгийн бага тооны түлштэй (SiC+PyC, PyC давхаргай) голомтын хувьд тэр хэмжээний бага хүнд цөмүүд үүсжээ.



Зураг 11. Төвдөө ойлгогтой нэмэлт SiC агуулсан дэвшилтэт TRISO түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын хүнд цөмүүдийн хэмжээний хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт.

#### IV. ДҮГНЭЛТ

1. Энэ ажилд 100 МВт чадлын төвдөө ойлгогчтой найман төрлийн дэвшилтэт түлш бүхий МӨТХР-ын голомтын дизайныг хийж, реакторуудын нейтроник анализ гүйцэтгэн

критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэв.

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

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

#### V. ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааны ажил нь “Монголд тохиромжтой дэвшилтэт цөмийн реакторын харьцуулсан судалгаа” сэдэвт төслийн хүрээнд хийгдсэн ба санхүүжүүлсэн БСШУСЯ, ШУТ санд талархал илэрхийлье. Мөн судалгааны ажлын бүх тооцооллыг МУИС-ЦФСТ-ийн МИНАТО кластер сервер дээр гүйцэтгэв.

#### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] Nagaya, Y., Okumura, K., Mori, Takamasa., Nakagawa Mayasuki. 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).
- [2] Okumura K., Nagaya, Y., Mori, Takamasa. MVP-BURN User's Manual, Japan: Atomic Energy Agency, 2005.
- [3] Shibata, K., Iwamoto, O., Nakagawa, Ts., Iwamoto, N., Ichihara, A., 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). doi: 10.1080/18811248.2011.9711675
- [4] Odmaa, S., Khukhsuvd, B., Munkbat, B., et al. Preliminary neutronic analyses on VHTR core design. ISSN2185-0577, 9(2), 200-205, (2019).
- [5] Kazuo, M., Toru, O., Kousaku, F., Michio, Shi., et al. Fission product behavior in Triso-coated UO2 fuel particles. Journal of nuclear materials, 208, 266-281, (1194).
- [6] R.J.M Konings: Comprehensive nuclear material, Vol 3, 215-236, (2012).