

VVR-KN, IRT-4M түлштэй судалгааны реакторын урьдчилсан нейтроник анализ

Х. Дашням^{*}, А. Цэндсүрэн^а

^аМонгол Улсын Их Сургууль, Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв

Уг судалгааны ажлаар 6МВт чадалтай VVR-KN түлштэй VVR-K, 10МВт IRT-4M түлштэй LVR-15 Rez судалгааны реакторын нейтроник тооцооллыг SERPENT-2.1.30 Монте-Карло код, ENDF-B.VII/1 цөмийн өгөгдлийн сан ашиглан хийв. Реакторууд 19.75wt% баяжуулалттай UO_2 -Al түлш ашигладаг ба хөнгөнцагаан бүрээстэй, усан удаашруулагч, бериллий ойлгогчтой бөгөөд реакторын голомт тус бүрийн энгийн загварыг тооцоолол хийхэд ашигласан. Урьдчилсан нейтроник анализаар VVR-KN түлштэй VVR-K реакторт эффектив нейтрон үржүүлэгч факторын утга реактор ажиллаж эхлэх агшинд 1.0822 ± 0.0008 , дулааны нейтроны урсгал 3.61343×10^{13} н/см²с, IRT-4M түлштэй LVR-15 реакторт 1.1247 ± 0.0003 , дулааны энергитэй нейтроны урсгал 4.38744×10^{13} н/см²с гэж тооцоолов.

Түлхүүр үгс: Цөмийн судалгааны реактор, нейтроны урсгал, нейтрон үржүүлэгч фактор, VVR-KN, IRT-4M

I. ОРШИЛ

Судалгааны реакторууд нь цөмийн реакторт ашиглаж болох төрөл бүрийн түлшийг судлах, практик мэдлэг олж авах, материал судлал, изотоп үйлдвэрлэл зэрэг олон талын хэрэглээтэй байдаг. Олон Улсын Атомын Энергийн Агентлаг (ОУАЭА)-ийн мэдээлснээр дэлхийн 72 улсад 847 судалгааны реактор байдгаас 54 улс 227 судалгааны реактор ашиглаж байна. Мөн 18 улс шинээр 24 судалгааны реактор барихаар төлөвлөсөн байна [1].

Судалгааны реакторууд Цөмийн Цахилгаан Станц (ЦЦС)-тай харьцуулахад өндөр баяжуулалттай түлш хэрэглэдэг. Баяжуулалтаар нь Өндөр баяжуулалттай уран (Highly-enriched uranium (HEU), $\text{U}^{235} > 20\text{wt}\%$), Бага баяжуулалттай уран (Low-enriched uranium (LEU), $\text{U}^{235} < 20\text{wt}\%$) гэсэн хоёр төрөлд ангилдаг бөгөөд төрөл бүрийн түлшний дизайнд ашигладаг. ~93wt% (U^{235}) баяжуулалттай HEU түлшийг анхны судалгааны реакторууд хэрэглэж байсан [2]. Өндөр баяжуулалттай HEU түлшийг зэвсгийн зориулалтаар ашиглах боломж өндөр гэж үзсэнтэй холбоотойгоор АНУ-ын Эрчим хүчний яам (U.S. Department of Energy) Аргонны

Үндэсний Лабораторид (Argonne National Laboratory) өндөр баяжуулалттай түлш хэрэглэдэг судалгааны реакторуудыг LEU түлш рүү шилжүүлэх Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR) төслийг 1978 онд хэрэгжүүлж эхлүүлсэн байна [3].

Энэхүү төслөөр U^{235} -ын баяжуулалтыг 19.75wt%-руу буулгах зорилго тавьсан бөгөөд баяжуулалт 15-20wt% байх түлшийг ашиглахад плутони үүсэх хэмжээ хамгийн бага байхын зэрэгцээ критик масс, нейтроны гаралт хангалтгүй түвшинд байх хэмжээ болох нь тогтоогджээ [4]. Энэ нь тухайн цөмийн түлшийг зэвсгийн зориулалтаар ашиглах боломжийг хязгаарлах гол нөхцөлүүд болно. Одоогийн байдлаар судалгааны реакторт U-ZrH_x , $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$, UO_2 , $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$, $\text{UO}_2\text{-Al}$, U , MOX, $\text{U}_3\text{Si-Al}$, $\text{UAl}_x\text{-Al}$, $\text{UO}_2\text{-TRISO}$, $\text{U}_7\text{Mo-Al}$, $\text{UO}_2\text{-Mg}$, $\text{U}_4\text{O}_9\text{-PE}$, $\text{UO}_2\text{-PE}$, $\text{U}_3\text{O-PE}$, Uranyl Nitrate, Uranyl Sulfate, UAl гэх мэт түлшний материалын судалгаа хийгдэхээс гадна ихэнх реакторууд цацраг идэвхт изотоп үйлдвэрлэж байна [5].

Нейтроны урсгалыг тооцоолох нь тухайн реакторын голомтод ямар энергитэй нейтрон хэр их хэмжээтэй ямар байрлалд байгааг тодорхойл

* Electronic address: dashnyam.kh@num.edu.mn

боломж олгодог. Энэ нь шарлагын сувгийн байрлалыг тодорхойлох, хамгаалалтын тооцоо хийх, изотоп үйлдвэрлэлийн хэмжээг тооцоолох зэрэгт чухал ач холбогдолтой. Харин эффектив нейтрон үржүүлэгч фактор нь тухайн реакторыг тогтвортой ажиллахуйц хангалттай нейтроны тоотой эсэхийг тодорхойлж өгнө. Уг параметр дараах гурван тохиолдолд реакторын төлөвийг илэрхийлнэ.

1. $k_{\text{eff}} > 1$ критикээс дээгүүр (суперкритик) – реактор тогтвортой ажиллахад шаардлагатай нейтроноос илүү их нейтрон хуваагдах урвалаас үүсэж байгааг илтгэх ба энэ нь хуваагдах урвал хурдсаж реакторын чадал нэмэгдэхэд нөлөөлнө.
2. $k_{\text{eff}} = 1$ критик – реактор тогтвортой ажиллаж байгааг илэрхийлнэ.
3. $k_{\text{eff}} < 1$ критикээс доогуур (субкритик) – реактор тогтвортой ажиллахад шаардлагатай хэмжээнээс бага нейтрон хуваагдах урвалаас үүсэж байгааг харуулах ба энэ нь хуваагдах урвал удааширч реакторын чадал буурахад нөлөөлнө.

Монгол Улсын Их Сургуулийн харьяа Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв (ЦФСТ)-д өмнө нь судалгааны реакторын нейтроник анализыг Японы Атомын Энергийн Агентлагаас хөгжүүлэн гаргасан Монте-Карло арга дээр суурилсан MVP/GMVP ашиглан судалгааны реакторын голомтын дизайны ажил [6], судалгааны реакторын дэд бүтцийн ажлууд [7-8] хийгдэж байсан.

Харин SERPENT код ашиглан судалгааны реакторын тооцоолол хийгдэж байгаагүй. Уг код нь ЦФСТ-д лицензтэй учир дээрх ажлыг олон улсад хэлэлцүүлэх, мөн тооцооллын үр дүнг харьцуулах зорилгоор гүйцэтгэж байна. Тиймээс, энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь LEU түлшний ангилалд багтах $\text{UO}_2\text{-Al}$ түлштэй, Оросын Холбооны Улс (ОХУ)-ын хөгжүүлсэн VVR-KN болон IRT-4M түлшний багцтай судалгааны реакторуудын голомтын нейтроник анализ хийж гарган авсан үр дүнгээ тухайн реакторуудын дээр хийсэн өмнөх судалгааны ажилтай харьцуулах юм.

II. АРГА ЗҮЙ

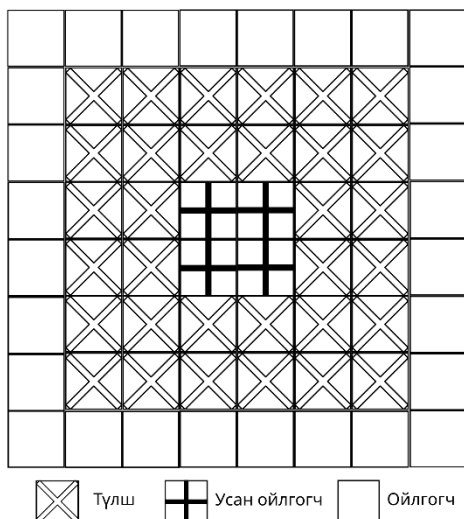
A. Голомтын дизайн

IRT-4M

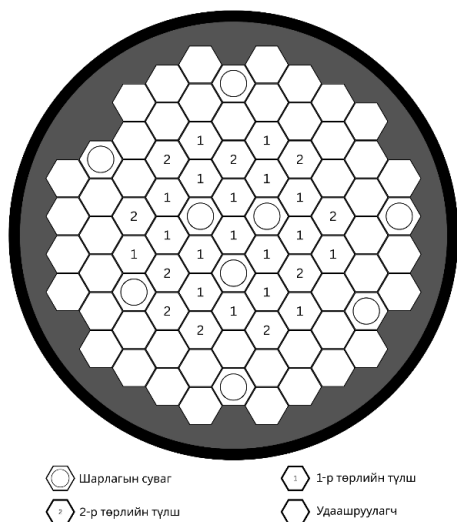
Бүгд Найрамдах Чех улсын VR-1, LVR-15 Rež болон Узбекистан улсын VVR-SM TASHKENT судалгааны реакторуудад хэрэглэдэг энэхүү түлшний багц нь 8-н давхар квадрат хэлбэрийн түлштэй [9-11]. Судалгааны зорилгоос хамаарч голомтод байрлах түлшний багцын тоо өөрчлөгддөг ч ерөнхий геометрийн хувьд квадрат хэлбэртэй байдаг. Энэ судалгааны ажилд LVR-15 Rež реакторын голомтыг авч үзсэн бөгөөд Зураг 1-д харуулснаар голомтын төвд 4 түлшний багцийг 2×2 байрлалтай нийлүүлсэнтэй тэнцэх урт, өргөн, өндөртэй хөнгөн усан ойлгогч, 32 түлшний багцаас бүрдэх ба бүхэлд нь бериллий ойлгогч хүрээлсэн байна. Голомт дотор шарлагын суваг байхгүй бөгөөд реакторын гадна талд хөндлөн чиглэлд шарлага хийх боломжтой. Зарим тохиолдолд төв хэсэг дэх усан ойлгогчийн оронд нейтроны тоог нэмэгдүүлэх зорилготой цилиндр хэлбэртэй хөнгөн цагаан бүрээстэй, 92.2wt%-н U^{235} баяжуулалттай гурван саваа ашигладаг [12].

VVR-KN

Энэ түлш нь Казахстан улсын VVR-K судалгааны реакторт ашиглагддаг бөгөөд хоёр төрөл байна. Нэгдүгээр төрөл(1) нь 7 давхар зургаан өнцөгт түлшний дотор нэг цилиндр түлш байрласан, харин хоёрдугаар төрөл(2) нь 5 давхар зургаан өнцөгт түлш төвдөө удирдлагын саваа байрласан хийцтэй байна. Давхар бүрийн хооронд 1.5см радиустай хөнгөн цагаанаар хийгдсэн, хагас цилиндр хэлбэртэй түлшний багцыг эвдрэлээс хамгаалах зориулалттай бүрээс байрладаг. Голомтод байрлуулах хоёр төрлийн түлшний тоо судалгааны зорилгоос хамаарч харилцан адилгүй байдаг. Энэ судалгаанд авч үзсэн голомт (1)-р төрлийн 18, (2)-р төрлийн 10 түлшний багцаас бүрдэх ба шарлагын сувгийн тоо 10 байна [13]. Зураг 2-д голомтын зургийг харуулав.



Зураг 1. LVR-15 Rež реакторын голомтын хэвтээ зүсмэг



Зураг 2. VVR-K реакторын голомтын хэвтээ зүсмэг

Хүснэгт 1. LVR-15, VVR-K реакторуудын үзүүлэлт

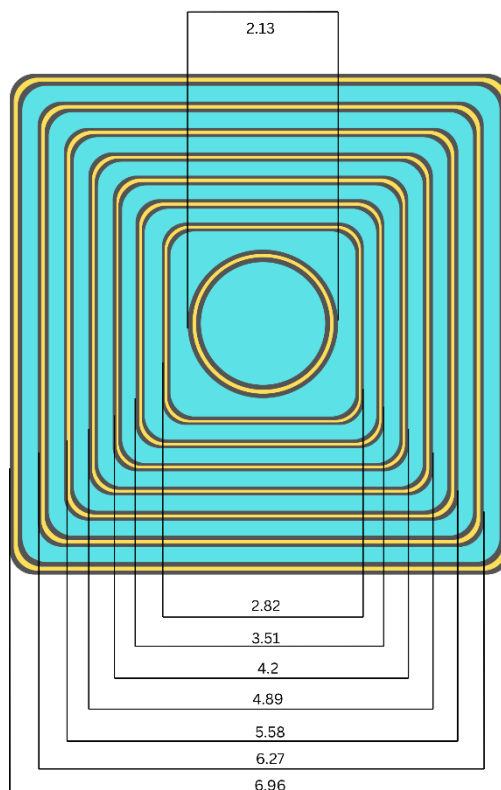
	LVR-15 Rež	VVR-K
Голомтын өндөр, см	60	60
Голомтын диаметр, см	57.2	80
U ²³⁵ -н баяжуулалт, %	19.75	19.75
Чадал, МВт	10	6
Хөргөх арга	Байгалийн конвекц	
Түлшний зузаан, см	0.07	0.07
Бүрээсийн зузаан, см	0.045	0.045
Түлшний элементийн төв хоорондын зай, см	7.15	6.93

Б. Түлшний дизайн

Түлшний дизайн бүр ОХУ-д анхлан хийгдсэн бөгөөд ²³⁵U – 19.75wt% баяжуулалттай. UO₂-Al түлшний материал нь UO₂, Al гэсэн материалуудын хольц ба UO₂-н жингийн эзлэх хувь түлшний багцын хийцээс шалтгаалан өөр өөр байна. Уг түлшний материалыг Тархмал түлш (Dispersed Fuel) гэж нэрлэдэг. Түлш бүр хөнгөн цагаан бүрээс, хөнгөн усан удаашруулагч, графит эсвэл бериллий ойлгогчтой. Хүснэгт 2-д эдгээр материалуудын тооцоололд ашигласан утгуудыг харуулав.

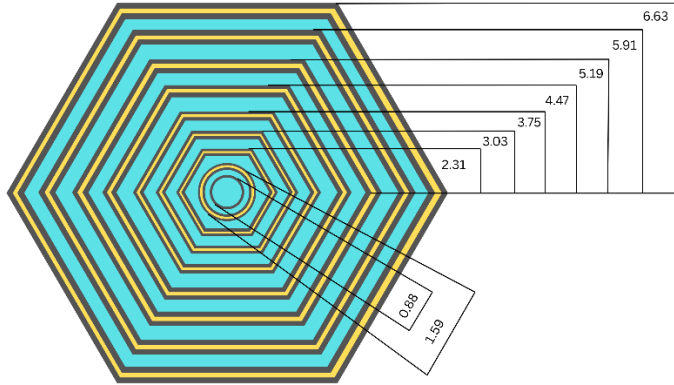
Хүснэгт 2. Бүрээс, удаашруулагч, ойлгогчын параметрууд

	Химийн нэгдэл	Масс нягт, $\frac{г}{см^3}$	Атомын нягт, $\frac{1}{бн см}$
Хөнгөн цагаан бүрээс	Al	2.69997	0.060261
Хөнгөн ус	H ₂ O	0.999726	0.100281
Бериллий	Be	1.848	0.123620

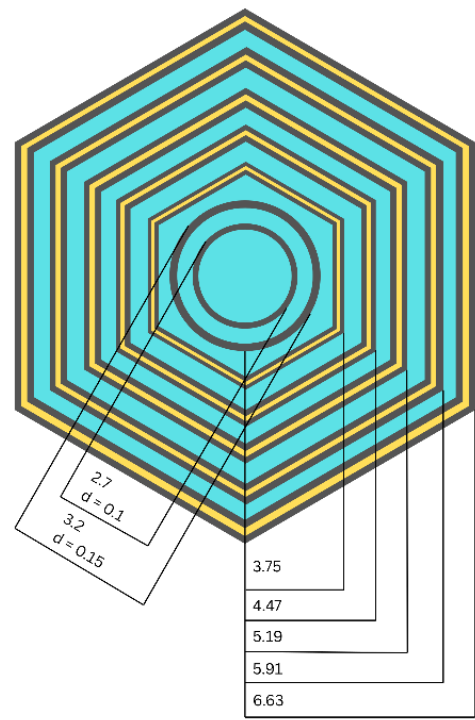


Зураг 3а. IRT-4M түлшний багц

VVR-KN түлшний багц дэх Al, UO₂-н эзлэхүүн, жин, нүх сүвний эзлэх хувиуд тодорхой биш бөгөөд сүүлийн үед хийгдсэн судалгааны ажлууд ховор байна. Тиймээс нүх сүвний эзлэх хувийг тооцоолгүйгээр элемент бүрийн атомын нягт, жингийн эзлэх хувийг тухайн түлшний багц дэх U-ны нягтаас хамааруулан тооцоолсон [13]. Харин IRT-4M түлшний материалын параметруудийг [12]-с авав. Тооцоололд ашигласан утгуудыг Хүснэгт 3-д харуулав. Зураг 3а-д IRT-4M түлшний багц, Зураг 3б, в-д VVR-KN түлшний багцуудыг хэмжээсийг [см] нэгжтэйгээр харуулав.



Зураг 3б. VVR-KN (1)-р түлшний багц



Зураг 3в. VVR-KN (2)-р түлшний багц

Хүснэгт 3. Түлшний параметрууд

Түлшний нэр	Түлшин дэх U-ны нягт, г/см ³	Түлшний багцад агуулагдах ²³⁵ U-ны масс, гр		Al	U-235	U-238	O
IRT-4M	2.6	278.4	Атомын нягт, $\frac{1}{\text{бн см}}$	3.95046E-02	1.31550E-03	5.27775E-03	1.31865E-02
			Жингийн эзлэх хувь, %	37.50000	10.87822	44.20136	7.42043
VVR-KN	2.8	(1)-р багц 252.6	Атомын нягт, $\frac{1}{\text{бн см}}$	4.17882E-02	1.41683E-03	5.68426E-03	1.42022E-02
		(2)-р багц 201.9	Жингийн эзлэх хувь, %	37.07900	10.95149	44.49910	7.47041

В. ТООЦООЛЛЫН НӨХЦӨЛ

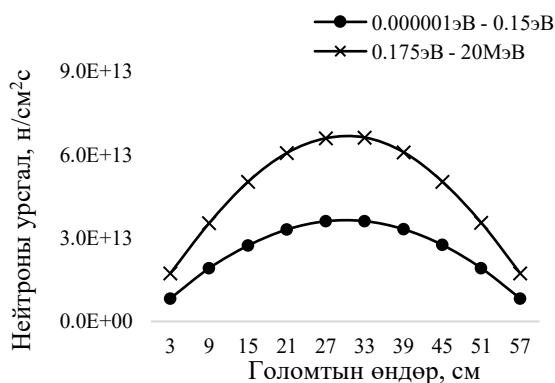
Голомтын эффектив нейтрон үржүүлэгч фактор, нейтроны урсгалыг Монте-Карло аргад үндэслэсэн тасралтгүй энергитэй бөөмийн

харилцан үйлчлэлийг тооцоолдог SERPENT-2.1.30 код ашиглан тооцоолсон [14]. Мөн тооцоололд ENDF-B.VII/1 цөмийн өгөгдлийн санг ашигласан [15]. SERPENT-2.1.30 кодоор тооцоо хийхэд нэг цикл дэх нейтроны тоо

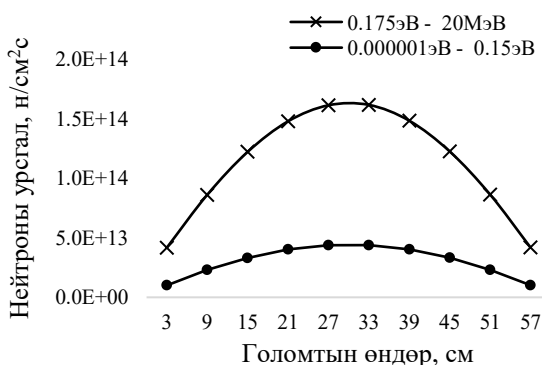
10000, циклийн тоо 200, идэвхгүй циклийн тоо 50 байхаар сонгов. Энэхүү нөхцөлийг тооцоолол явагдах серверийн ачаалалд тохиромжтой, алдааны муж 0.1 - 0.3% хооронд байхаар сонгон авсан. Нейтроны урсгалыг тооцоолохдоо реакторын голомтыг аксиал чиглэлийн дагуу 10 хэсэгт хувааж хэсэг тус бүрд нейтроны энергийг хурдан энергийн муж 0.175эВ - 20МэВ, дулааны энергийн муж 0.000001эВ - 0.15эВ гэсэн хоёр мужид ангилан тооцоолол хийв.

III. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Төрөл бүрийн судалгааны реакторуудад олон төрлийн түлшний материал судлагдсаар байна. Энэхүү судалгааны ажлаар ОХУ-ын ханган нийлүүлдэг IRT-4М, VVR-KN түлшний багц ашигладаг LVR-15 Rež, VVR-K судалгааны реакторуудын нейтроны урсгал, эффектив нейтрон үржүүлэгч факторын утгыг SERPENT-2.1.30 код ашиглан тооцоолов.

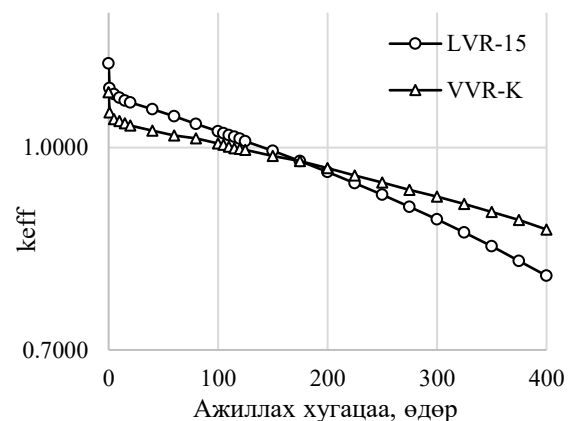


Зураг 4а. VVR-KN түлштэй VVR-K реакторын голомтын аксиал чиглэлийн дагуух нейтроны урсгал



Зураг 4б. IRT-4М түлштэй LVR-15 реакторын голомтын аксиал чиглэлийн дагуух нейтроны урсгал

VVR-KN түлштэй VVR-K реакторын аксиал чиглэлийн дагуух дулааны энергитэй нейтроны хамгийн их урсгал Зураг 4а-д харуулсанаар голомтын өндрийн 27-33см хэсэгт 3.61343×10^{13} н/см²с, мөн тухайн хэсэгт хурдан нейтроны хамгийн их урсгал харгалзах бөгөөд 6.62727×10^{13} н/см²с байна. IRT-4М түлштэй LVR-15 реакторын хувьд дулааны энергитэй нейтроны хамгийн их урсгал төвийн байрлал буюу голомтын өндрийн 27-33см хэсэгт 4.38744×10^{13} н/см²с ба хурдан нейтроны урсгал 1.62003×10^{14} н/см²с байгааг Зураг 4б-с харж болно. Монте-Карло аргад суурилсан MVP/GMVP-II симуляцын код, JENDL-3.3 цөмийн өгөгдлийн сан ашиглан 10МВт чадалтай, голомтын хийц адил, түлшин дэх U-ны нягтыг 3.0 г/см³ байх голомтод нейтроник тооцооллыг гүйцэтгэсэн [6] ажилд дулааны энергийн муж $1.0 \times 10^{-5} \text{эВ} < E_n < 6.02 \times 10^{-1} \text{эВ}$ хооронд авахад нейтроны урсгал 1.65×10^{14} н/см²с байна.



Зураг 4в. Реактор ажиллах хугацаанаас хамаарсан эффектив нейтрон үржүүлэгч фактор (VVR-K, LVR-15 реакторт тооцоолсон утгуудыг харгалзан гурвалжин, цэгээр тэмдэглэв)

VVR-K реактор ажиллаж эхлэх үед эффектив нейтрон үржүүлэгч факторын утга Зураг 4в-д харуулснаар 1.0822 ± 0.0008 , критикээс доогуур түвшинд хүрэх хугацаа 140 өдөр бол LVR-15 реакторт 1.1247 ± 0.0003 бөгөөд критикээс доогуур түвшинд очих хугацаа 120 өдөр байна. VVR-KN түлштэй VVR-K реакторт бидний тооцоолсон k_{eff} утга [16] ажилаар гарсан авсан 1.0836 ± 0.0002 үр дүнтэй ойролцоо байна. LVR-15 реакторын k_{eff} -г туршилтаар эсвэл код

ашигласан тооцоолсон ямар нэгэн судалгааны ажил байхгүй бөгөөд реактор критик түвшинд хүрэхэд шаардагдах түлшний багцын тоог 28 байна [17]. Энэ нь бидний судалгаанд авч үзсэн 32 түлшний багцаас бүрдэх LVR-15 реакторын голомт хангалттай критик түвшинд ажиллаж болохыг харуулна.

Дээрх хоёр судалгааны реакторуудын голомтын өндөр ижил бөгөөд диаметрийн хувьд VVR-K реактор илүү өргөн юм. Зураг 4а, 4б-с харахад IRT-4М түлштэй LVR-15 реакторын хурдан нейтроны урсгал 1.62003×10^{14} н/см²с байгаа нь VVR-KN түлштэй VVR-K реакторт тооцоолсон хурдан нейтроны урсгалаас (6.62727×10^{13} н/см²с) их болох нь харагдана. Харин дулааны энергитэй нейтроны урсгалын хувьд VVR-KN түлштэй VVR-K реакторт 3.61343×10^{13} н/см²с гэж тооцоолсон бөгөөд ижил реакторын голомтод хийсэн тооцооллоор дулааны энергитэй нейтроны урсгал 1.9×10^{14} н/см²с байна [18]. Уг судалгааны ажилд авч үзсэн LVR-15 реакторын голомт нь төвдөө нейтроны урсгалыг нэмэгдүүлэх зорилготой 5 ширхэг 92.2wt% баяжуулалттай “IRE + OK cell” ашигласан нь дээрх зөрүү үүсэх гол шалтгаан болсон байх боломжтой. Түүнчлэн бидний тооцоолсон утга IRT-4М түлштэй LVR-15 реакторт тооцоолсон 4.38744×10^{13} н/см²с утгаас бага байна. Бага тооцоолсон шалтгаан нь голомт дэх дулааны нейтроны урсгал тухайн реакторт ашиглаж буй нэг түлшний багцад агуулагдах ²³⁵U-ны масс (Хүснэгт 3), голомтод ачаалласан түлшний тоо, удаашруулагч материал, хөргүүр зэргээс ихээхэн шалтгаалдагтай холбон тайлбарлаж болно. Хүснэгт 3-д харуулсанчлан IRT-4М түлшний багцад агуулагдах ²³⁵U-ны масс нь VVR-K реакторт агуулагдах массаас их байна. Мөн LVR-15 реакторын голомтод 32 ширхэг IRT-4М түлшний багц ачаалласан бол VVR-K реакторт (1) төрлийн 18, (2) төрлийн 10 түлш буюу нийт 28 түлшний багц ачааллаж тооцоолол хийснээс харвал VVR-K реакторын дулааны нейтроны урсгал LVR-15 реакторт тооцоолсон утгаас их гарах боломжтой байна.

Реактор критикээс доогуур түвшинд хүрэх хугацаа LVR-15 реакторт 120 өдөр бол VVR-K реакторт 140 өдөр байх нь Зураг 4в-с харагдана.

Мөн IRT-4М түлшний нягт VVR-KN түлшний нягтаас бага хэдий ч түлш болон голомтын дизайн нь k_{eff} өндөр гарахад нөлөөлж байна. Хэдийгээр VVR-K реактор ажиллаж эхлэх үед LVR-15 реактороос бага k_{eff} -г тооцоолсон ч 175 өдрийн дараачаар LVR-15 реактор VVR-K реакторт тооцоолсон утгаас бага болж эхэлж байгааг Зураг 4в-с ажиглаж болно.

Судалгаанд авч үзсэн LVR-15, VVR-K реакторуудын нейтроны урсгалыг Зураг 4а, Зураг 4б-с харвал голомтод нейтроны энерги 0.175эВ - 20МэВ мужид харяалагдах хурдан энергитэй нейтроны урсгал 0.000001эВ - 0.15эВ дулааны энергийн мужид орших нейтроны урсгалаас их байна. Дулааны энергитэй нейтонууд нь ²³⁵U хуваагдлаас үүссэн хурдан энергитэй нейтонууд удаашруулагчид удааширч энергийг алдсаны үр дүнд үүсдэг бол дээрх хоёр реакторын голомт хуваагдлаас үүссэн хурдан нейтонуудыг хангалттай хэмжээнд удаашруулж чадахгүй байх боломжтой. Өөрөөр хэлвэл реакторын голомт жижиг гэсэн үг юм. Гэхдээ энэ үр дүнг нарийн тодруулахын тулд цаашдын судалгаагаар голомт даяарх нейтроны энергийн спектрийг гаргаж авах нь зүйтэй.

IV. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар IRT-4М түлштэй LVR-15 Rež, VVR-KN түлштэй VVR-K судалгааны реакторуудын нейтроны урсгал, нейтрон үржүүлэгч фактор (k_{eff})-ийг тодорхойлов. Реактор тус бүрд хурдан нейтроны урсгал дулааны энергитэй нейтроны урсгалаас их байгааг тогтоов. LVR-15 реакторын хурдан, дулааны энергитэй нейтроны урсгал VVR-K реакторын урсгалаас их үр дүн гарсан бөгөөд реакторын чадлаас хамаарч байна. Түүнчлэн реактор LVR-15 реактор түлшээ дахин цэнэглэхгүйгээр 120 өдөр, VVR-K реактор 140 өдөр ажиллах боломжтой байна. Мөн LVR-15 реакторын k_{eff} утга реактор ажиллах эхлэх агшинд VVR-K реакторынхоос өндөр байсан хэдий ч 175 өдрийн дараачаар бага утгатай болж эхэлсэн. Энэ нь ашиглаж буй түлшний багцын дизайн, тэдгээрийн тоо, баяжуулалт, голомтын дизайн зэргээс хамаарч байна. Цаашид реакторуудын голомтыг илүү нарийн

хийцтэйгээр тооцоо хийж тооцооллын чанарыг сайжруулах шаардлагатай.

ТАЛАРХАЛ

ЦФСТ-ийн Минато Кластер Сервер дээр тооцооллыг хийж гүйцэтгэв.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] IAEA (2025). Research Reactor Database (RRDB). <https://nucleus.iaea.org/rrdb/home>
- [2] World Nuclear Association. (2024, May 21). Research reactors. <https://world-nuclear.org/>
- [3] Travelli, A. (1997). The RERTR program (pp. p. 29–34). European Nuclear Society.
- [4] Glaser, A. (2005). About the enrichment limit for research reactor conversion: Why 20%? (p. 12 p.).
- [5] Jamison, L., Kim, Y., Hofman, G., Shehee, T., & Karay, Nicholas (2022). Research and Test Reactor Fuels. <https://doi.org/10.2172/1890226>
- [6] А.Цэндсүрэн, Г.Дамдинсүрэн, С.Даваа, Б.Мөнхбат. (2022). Монгол улсад тохиромжтой цөмийн сургалт, судалгааны реакторын голомтын дизайны судалгаа. *Scientific Transaction of the National University of Mongolia. Physics*, 30(527), 24–30. <https://doi.org/10.22353/physics.v30i527.647>
- [7] С.Одмаа, Н.Норов, Г.Хүүхэнхүү, С.Даваа. (2022). Монгол Улсад Тохиромжтой Судалгааны Реактор Сонгох Асуудалд. *Scientific Transaction of the National University of Mongolia. Physics*, 16(355), 100–108. <https://doi.org/10.22353/physics.v16i355.303>
- [8] Ч.Сайханбаяр, Б.Мөнхбат, Д.Баатархүү, Г.Дамдинсүрэн, Г.Хүүхэнхүү, М.Одсүрэн. (2022). Бага чадлын судалгааны реактор дээр нейтрон идэвхжилийн шинжилгээ хийх боломж. *Scientific Transaction of the National University of Mongolia. Physics*, 33(562), 40–47. <https://doi.org/10.22353/physics.v33i562.929>
- [9] Czech Technical University in Prague (2017). Training Reactor VR-1. <http://www.reaktor-vr1.cz/en/about-us/vr-1>
- [10] Kysela, J., Ernest, J., & Marek, M. (2005). LVR-15 reactor performance and transformation to low enriched fuel (p. 10 p.).
- [11] Yusupov, D. D., & Abdullaev, R. A. (2017). Operation experience of the VVR-SM research reactor of the Nuclear Physics Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (p. p. 7). AO GNTs NIIAR.
- [12] Antonio Dambrosio, Marek Ruščák, Guido Mazzini, Alis Musa (2018), Neutronic analysis of the LVR-15 research reactor using the PARCS code, *Annals of Nuclear Energy*, 117.p 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.03.009>.
- [13] Hanan, Nelson A., & Garner, Patrick L. (2015). Neutronic, Steady-State, and Transient Analyses for the Kazakhstan VVR-K Reactor with LEU Fuel: ANL Independent Verification Results. <https://doi.org/10.2172/1214274>
- [14] J. Leppanen, et al., T. (2015). The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*, 82, p. 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>
- [15] Chadwick, M B, Herman, Micheal W, Oblozinsky, Pavel, Dunn, Michael E, Danon, Y, Kahler, A, Smith, Donald L, Pritychenko, B, Arbanas, Goran, Arcilla, r, Brewer, R, Brown, D A, Capote, R, Carlson, A D, Cho, Y S, Derrien, Herve, Guber, Klaus H, Hale, G M, ... Young, P C (2011). ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data. *Nuclear Data Sheets*, 112(12). <https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
- [16] Arinkin, F., Gizatulin, S., Zhotabaev, Z., Kadyrzhanov, K., Koltochnik, S., Chakrov, P., Chekushina, L., Vatulin, A., Dobrikova, I., Suprun, V., Egorenkov, P., Nasonov, V., Ryazantsev, E.,

- Zhantikin, T., & Talanov, S. (2004). Feasibility study of the WWR-K reactor conversion to low-enriched fuel (p. [1 p.]).
- [17] Koleska, Michal & Broz, Vladimir & Ernest, Jaroslav & Kysela, Jan & Marek, Milan & Rychucky, Jiri. (2011). Completed Conversion of the LVR-15 Research Reactor.
- [18] Shaimerdenov, Asset & Sairanbayev, Darkhan & Gizatulin, Sh & Romanova, N & Aitkulov, Magzhan & Tulegenov, Murat & Bugybay, Zhanar & Baitelesov, S. (2022). Computational analysis of a neutron trap in the center of the WWR-K reactor core for irradiation tests of large-sized objects. Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. 6. 38-46. <https://doi.org/10.32523/ejpfm.2022060104>.