

Жигд бус голомттой, цагираган өндөр температурын хийн хөргөлттэй реакторын нейтроник анализ

Т.Жамьянсүрэн^{a,*}, С.Одмаа^{a,b}

^aЦөмийн физикийн судалгааны төв, Монгол улсын их сургууль

^bХими, биологийн инженерчлэлийн тэнхим, Хэрэглээний шинжлэх ухаан, инженерчлэлийн сургууль, Монгол улсын их сургууль

Реакторыг амжилттай унтраасны дараа голомтод хуримтлагдсан хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийн задралаас үүсэх дулааныг идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай, цагираган хийцтэй, төвдөө нэг ойлгогчин блоктор, призмэн блокуудаас бүрдэх 100 МВт дулааны чадалтай, 1123 К температурт ажиллах ӨТХР-ийн голомтын дизайныг хийж түлш, шатдаг хорлолт материал жигд байх үеийн нейтроник үзүүлэлтүүдийг өмнөх ажилд гарган авсан. Энэхүү ажилд голомтын дизайныг илүү оновчтой болгохын тулд түлш, шатдаг хорлолт материалын агууламжыг жигд бус болгон өөрчилж реактивитийн хугацааны өөрчлөлтийг бууруулах тооцооллуудыг гүйцэтгэн, реактор ажиллах нийт хугацааны туршид үүссэн бага хэмжээний реактивитийг удирдлагын савааг голомтод оруулах замаар хангалттай хэмжээнд бууруулж, чадлын пикийн факторын түгэлтийг жигд болгосон. Түүнчлэн реактивитийн температурын болон чадлын коэффициентыг үнэлэв.

Түлхүүр үг: шатдаг хорлолт материал, удирдлагын саваа, реактивитийн температурын коэффициент, реактивитийн чадлын коэффициент.

1. ОРШИЛ

Цөмийн эрчим хүчийг нийтийн хэрэгцээнд ашиглаад хагас зуун жилийг үдсэн хэдий ч цөмийн эрчим хүчний реакторын аюулгүй байдлыг бүрэн хангах тал дээр асуудалтай байсаар ирсэн. 2011 онд Фүкүшима Дай-ичи цөмийн цахилгаан станцын ослын дараанаас дэвшилтэт дизайнтай, аюулгүй байдлын шаардлагыг өндөр түвшинд хангасан бага, дунд чадлын реакторын голомтын дизайнуудыг сонирхон судлах нь ихэссэн. Дэвшилтэт дизайнтай буюу IV үеийн гэж нэрлэгдэх цөмийн эрчим хүчний реакторууд нь аюулгүй байдлыг хангах тал дээр төрөлхийн аюулгүй шинж чанартай буюу байгалийн хуулиар өөрийгөө зохицуулж удирддаг загварын шийдлүүд дээр үндэслэж байгаа нь дэвшилтэт реакторын шинэ шийдэл болж байна. Ялангуяа түлш, хийцийн материалын физик, химийн шинж чанар тэдгээрийн хоорондын зохицол, дулаан зөөгчийн шинэ шийдэл, осол болох нөхцөлүүдийг багасгах боломжууд зэргийг бүгдийг нь багтаасан дизайныг боловсруулж байна [1].

Бидний судалж байгаа Өндөр Температурын Хийн Хөргөлттэй Реактор (ӨТХР) нь өндөр температурыг (1873 К) даах чадвартай керамик

давхаргууд бүхий TRISO түлш, дулаан багтаамж өндөртэй бал чулуун голомт, гели инертийн хийн хөргүүртэй учраас хэвийн бус ажиллагааны үед голомт болон хөргүүрийн температур хурдан ихсэхгүй, осолд хүргэх магадлал бага байдаг. Ялангуяа бал чулуу нь нейтрон шингээлт бага, цацрагийн нөлөөллөөс болж материалын өөрчлөлт нь бага буюу тогтмол, дулаан дамжуулах чадвар сайн, дулаан багтаамж өндөртэй зэрэг онцлогуудтай. Үүнээс гадна бал чулуу нь нейтроны эдийн засгийг сайжруулснаар ажиллах хугацааг уртасгадаг[2]. Бид өмнөх судалгааны ажлуудаар реакторыг амжилттай унтраасны дараа голомтонд хуримтлагдсан хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийн задралаас үүсэх дулааныг идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай, голомтын төвдөө нэг блокон ойлгогчтой, газар дээр байрлах призм төрлийн ӨТХР-ийн дизайны параметруудийн хамаарлыг гарган авч 100 МВт-ийн дулааны чадалтай, 2.49 м голомтын эквивалент радиустай, 6.38 м эффектив өндөртэй, төвийн ойлгогчийн радиус 0.18 м, голомтын дундаж чадлын нягт 0.82 Вт/см³ байх, 20% баяжуулсан UO₂ бүхий TRISO түлш ашигласан голомтын дизайныг хийж, критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэсэн. Үүний дараа реактор ажиллаж эхлэх үеийн илүүдэл

* Electronic address: t.jamiyansuren@gmail.com

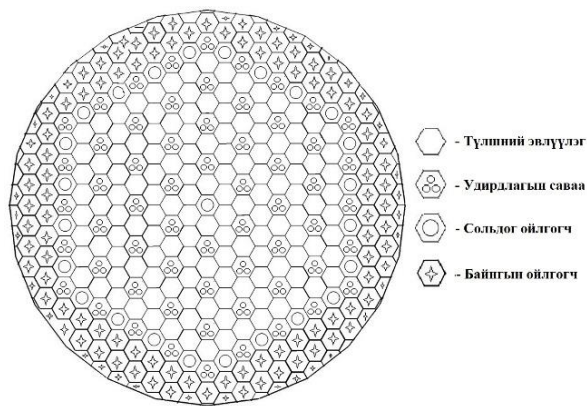
реактивитийг бууруулахын тулд шатдаг хорлолт материал бүхий бөөмсийг голомтонд жигд агууламжтайгаар нэмж өгөх замаар реактивитийн хугацааны өөрчлөлтийг жигдрүүлэх оролдлогын тооцооллуудыг хийсэн [3, 4].

Энэ ажилд голомтыг илүү оновчтой болгож ажиллах хугацааны турш илүүдэл реактивити болон чадлын пикийн факторын түгэлтийг жигд болгохын тулд голомт дахь түлш болон шатдаг хорлолт материалын агууламжийг өөрчлөх замаар тооцоолол хийв. Реактор ажиллах хугацааны турш реактивити бага зэрэг их байсныг бууруулахын тулд голомтонд удирдлагын саваа оруулан реактивитийн өөрчлөлтийг багасган, жигдрүүлсэн болно. Үүний дараа реактивитийн температурын болон чадлын коэффициентийг үнэлэв.

Энэхүү ажилд Японы Атомын Энергийн Агентлагаас хөгжүүлсэн тасралтгүй энергитэй нейтроны шилжилтийг Монте Карло аргаар тооцоолдог MVP2.0 [5] болон MVPBURN [6] компьютерийн кодуудыг цөмийн урвалын өгөгдлийн сан JENDL-4.0 [7]-ийн хамт ашиглан бүх нейтроник тооцооллыг хийсэн.

2. ГОЛОМТЫН ДИЗАЙН

Бид голомтын дизайндаа Японы Атомын Энергийн Агентлагын хөгжүүлсэн 30 МВт дулааны чадалтай Өндөр Температурын Тест Реакторын (ӨТТР) голомтыг бүрдүүлэгч түлшний эвлүүлгийн, удирдлагын савааны болон ойлгогчийн блокуудыг (өргөн = 36 см, өндөр = 58 см) ашигласан ба эдгээр зургаан өнцөгт призмэн блокуудыг давхарлан өрж цагираг хэлбэрийн голомтыг үүсгэнэ [3, 4, 9]. Тооцоололд эдгээр блокын хэмжээсийг өөрчлөөгүй тул эдгээрээс бүрдсэн голомтын хэмжээс дизайны параметруудийн хамаарлаас үнэлсэн утгуудаас бага зэрэг ялгаатай байж болно. Гэхдээ голомтын жинхэнэ эзлэхүүнтэй адил эзлэхүүнтэй байхаар эквивалент радиус болон эффектив өндрийн хэмжээсийг авсан [3]. Голомтын үндсэн үзүүлэлтүүдийг Хүснэгт 1-д, голомтын хөндлөн зүсмэгийг Зураг 1-д тус тус харуулав.



Зураг 1. Голомтын хэвтээ зүсмэг.

Хүснэгт 1. Голомтын үндсэн үзүүлэлтүүд

Дулааны чадал, МВт	100
Голомтын температур, К	1123
Төвийн ойлгогчийн радиус/зузаан, м	0.18/0.36
Дулаан дамжууллын тооцооллоос олсон голомтын радиус/өндөр, м	2.5/6.24
Голомтын эквивалент радиус/өндөр, м	2.47/6.38
Дундаж чадлын нягт (Вт/см ³)	0.82
Түлш	UO ₂
Баяжуулалт (wt%)	20%
Хөргүүрийн материал	Гелийн хий
Ойлгогчийн зузаан, м:	
· Дээд, доод	0.58
· Гадна захын	0.87
Түлшний эвлүүлгийн тоо	1452
Давхаргын тоо	11
Нэг давхаргад байх удирдлагын савааны тоо:	
· Голомт	36
· Ойлгогч	24
Нэг давхаргад байх төвийн/гаднах сольдог ойлгогчин блокын тоо	1/24

3. НЕЙТРОНИК АНАЛИЗ

3.1 Түлш шатдаг хорлолт материал жигд бус түгэлттэй үеийн тооцоолол

Бидний ашиглаж байгаа MVP2.0 код нь санамсаргүй процессийг тооцдог Монте Карло аргад үндэслэн бөөмсийн харилцан үйлчлэлийн процессуудын санамсаргүй үзэгдлийг үнэлдэг тул бодлого тус бүрт хамгийн оновчтой болгох нөхцлийг тогтоох шаардлагатай байдаг. Манай голомтын тооцооллын хувьд реакторт үүссэн нэг нейтрон 50000 ялгаатай харилцан үйлчлэл хийнэ, нийтдээ хуваагдлын 100 нейтроны санамсаргүй харилцан үйлчлэлийг авч үзэхээр нөхцлийг сонгосон. Статистик боловсруулалтын

үр дүнг сайжруулахын тулд эхний 20 нейтроны харилцан үйлчлэлийг тооцоогүй болно. Нейтроник тооцоолол бүрийг бүтэн голомтод гүйцэтгэсэн.

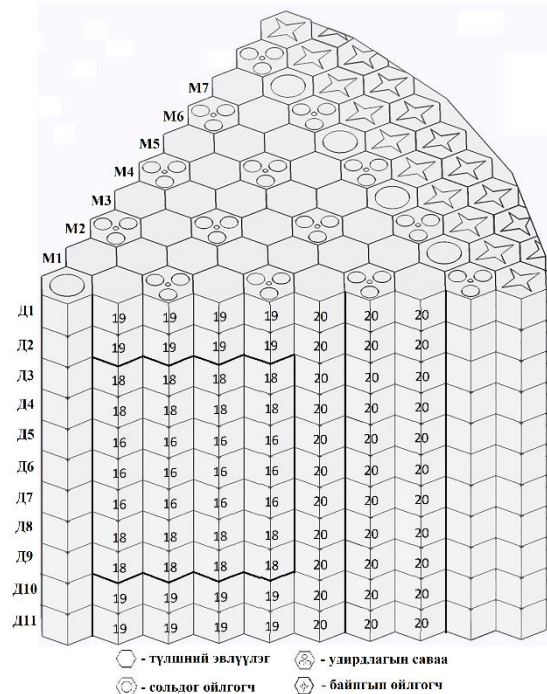
Реакторыг ажиллаж байх нийт хугацааны туршид критик төлөвт байх шаардлагатай. Ингэснээр реакторыг аюулгүй ажиллуулах үндсэн нөхцлийг хангаж байна гэж үздэг. Өмнөх ажилд [3, 4] гарган авсан дүнгээс харвал голомт даяар түлш, шатдаг хорлолт материалын агууламж жигд тохиолдолд реактор ажиллаж эхлэх үеийн эффектив нейтрон үржүүлэх фактор ($K_{эфф}$) буурсан хэдий ч, реактор ажиллах нийт хугацааны мужид илүүдэл реактивити үүсч, голомт дахь чадлын пикийн факторын түгэлт нь жигд бус хэвээр байсан (Зураг 3,4-т бас харуулав).

Хүснэгт 2. Голомт даяарх түлшний баяжуулалтын тархалтын хамгийн оновчтой нөхцөл. Д-давхарга, М-муж.

Түлшний баяжуулалт (%)							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Д1	19	19	19	19	20	20	20
Д2	19	19	19	19	20	20	20
Д3	18	18	18	18	20	20	20
Д4	18	18	18	18	20	20	20
Д5	16	16	16	16	20	20	20
Д6	16	16	16	16	20	20	20
Д7	16	16	16	16	20	20	20
Д8	18	18	18	18	20	20	20
Д9	18	18	18	18	20	20	20
Д10	19	19	19	19	20	20	20
Д11	19	19	19	19	20	20	20

Тиймээс голомт даяарх түлш, шатдаг хорлолт материалын агууламжийг өөрчлөн реактор ажиллах нийт хугацааны турш голомт даяарх илүүдэл реактивити, чадлын пикийн факторын түгэлтийг жигд болгох шаардлагатай. Чадлын пикийн фактор нь голомтын тухайн хэсгийн үйлдвэрлэх локал чадлын нягтыг дундаж чадлын нягтыг харьцуулсан харьцаагаар тодорхойлогдох ба голомтын хаана байрлаж байгаагаас шалтгаалан түлшний баяжуулалт болон нейтрон шингээгч огтлол өндөртэй материалын агууламжийг өөрчлөх замаар реактор ажиллах хугацааны турш реактивити болон чадлын пикийн факторын түгэлтийг жигдрүүлэх боломжтой. Голомтыг хэвтээ тэнхлэгийн дагуу долоон муж, босоо тэнхлэгийн

дагуу арван нэгэн давхарга буюу нийт 77 хэсэгт хуваан тооцооллуудыг гүйцэтгэсэн. Голомт дахь хэсэг тус бүрийн түлшний баяжуулалтын хамгийн оновчтой нөхцлийг Хүснэгт 2-т, голомтын зургааны нэг хэсгийн гурван хэмжээст зургийг Зураг 2-т харуулав.



Зураг 2. 1/6 голомтын гурван хэмжээст зураг: Д-давхарга, М-муж.

Зураг 4-д харуулсанчлан түлш, шатдаг хорлолт материал голомтод жигд агууламжтай үед голомтын төв хэсэгт чадлын пикийн фактор хамгийн их байгааг бид өмнөх ажилд харуулсан [4,8]. Учир нь голомтын төвд ойлгогч байрлуулснаар түүн рүү сарнисан нейтонууд голомтруу буцаж ойн хуваагдал нэмж явуулж байгаа тул тухайн хэсгийн дулааны энергитэй нейтроны тоо огцом ихсэж байна. Тиймээс төвийн ойлгогчийн ойролцоо байрлах түлшний баяжуулалтыг бууруулж, шатдаг хорлолт материалын агууламжийг өөрчилснөөр реактор ажиллах хугацааны турш реактивитийн өөрчлөлтийг тогтвортой байлгаж, чадлын пикийн факторын түгэлтийг жигдрүүлсэн. Реакторын голомтыг илүү оновчтой болгох үндсэн зорилго нь реакторыг ажиллах хугацааны туршид критик төлөвт байлгах, чадлын пикийн факторын түгэлтийг жигд байлгах учиртай. Реактор критик төлөвт ажилласнаар агшин зуурын критик ослоос зайлсхийж чадна.

Хүснэгт 3. Төвдөө ойлгогчтой реакторын нэгэн жигд болон нэгэн жигд биш голомтын нейтроник тооцооллын үр дүн.

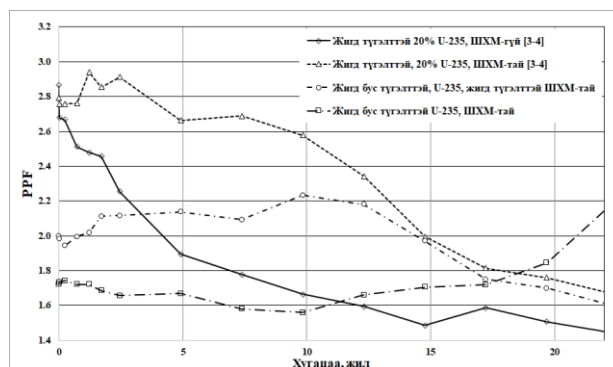
№	Голомтын хэсэг	Түлшний баяжуулалт (wt%)	В ₄ С		Gd ₂ O ₃		Кэфф.0 (алдаа, %)	Δk/k-ийн ХИУ (%)	t _{голомт} (жил)	PPF-ийн ХИУ
			D _{ШХМ} (см)	V _{Түлш} /V _{ШХМ}	D _{ВР} (см)	V _{Түлш} /V _{ШХМ}				
1	Төвдөө	20	-	-	-	-	1.4977 (0.02)	33.23	26.4	2.87
	Дундаа									
	Захдаа									
2	Төвдөө	20	0.02	140	0.02	490	1.0337 (0.03)	3.83	19.9	2.94
	Дундаа									
	Захдаа									
3	Төвдөө	16-18	0.02	140	0.02	490	1.0096 (0.02)	2.57	19.3	2.23
	Дундаа	19-20								
	Захдаа	20								
4	Төвдөө	16-18	0.02	99	0.02	400	1.0067 (0.03)	0.94	22.0	1.85
	Дундаа	19-20		138		490				
	Захдаа	20		171		800				

Тайлбар:

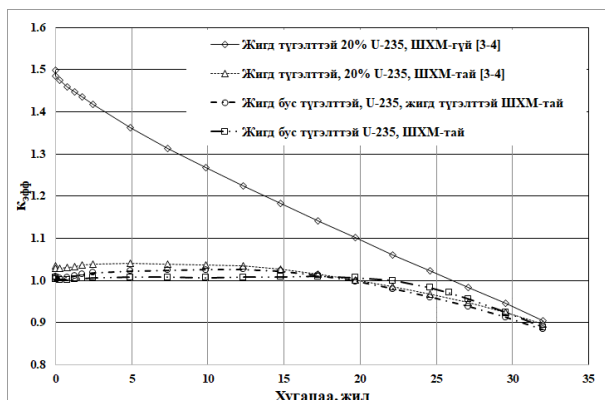
ШХМ – Шатдаг хорлолт материал
D_{ШХМ}- ШХМ бөөмсийн диаметр

V_{Түлш}/V_{ШХМ}- голомт дэх түлш болон ШХМ-ийн эзэлхүүний харьцаа
ХИУ-хамгийн их утга
PPF –чадлын пикийн фактор

Голомт дахь түлш, шатдаг хорлолт материалын жигд бус түгэлттэй үеийн тооцооны үр дүнгээс харвал реактор ажиллаж байгаа хугацааны нийт муж дахь илүүдэл реактивити жигдэрч ХИУ нь 33.23(Δk/k %)-аас 0.94(Δk/k %) хүртэл буурч голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлт нэгэн жигд болсон. Реактор ажиллах хугацааны туршид Кэфф утгын жигд бус түгэлттэй үеийн нейтроник тооцооллын үр дүнг Хүснэгт 3 болон Зураг 4-д тус тус өгөв. Голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлтийг хугацаанаас хамааруулан Зураг 4-д үзүүлэв.



Зураг 4. Реактор ажиллах нийт хугацааны турши дахь голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлт.



Зураг 3. Реактор ажиллах нийт хугацааны турши дахь эффектив нейтрон үржүүлэх факторын өөрчлөлт.

3.2 Голомт руу удирдлагын саваа оруулах замаар илүүдэл реактивитийг бууруулах

Түлш болон шатдаг хорлолт материалын жигд бус түгэлттэй голомтын дизайныг гүйцэтгэсний дараа голомтын нийт ажиллах хугацаанд Кэфф буурсан хэдий ч, бага хэмжээний илүүдэл реактиви (>0.65 % Δk/k) хугацааны зарим мужид үүссэн хэвээр байна. Тиймээс илүүдэл реактивитийг дарахын тулд голомтод удирдлагын савааг оруулж болно. Удирдлагын савааны блок нь ӨТТР-ийн удирдлагын савааны дизайнтай адилхан [3, 4, 9]. ӨТХР-ийн голомтын дизайны тооцоололд ашиглагдаж байгаа удирдлагын савааны блоконд байх гурван нүх нь нейтрон шингээгч материалаар дүүргэгдсэн байдаг [3, 4, 8].

Эхлээд реакторын ажиллах хугацаанд голомт руу удирдлагын савааг ижил хэмжээтэй оруулсан. Дараа нь түлшний шаталтын алхам дахь эффектив нейтрон үржүүлэх факторын

утгаас хамаарч голомтод оруулах хэмжээг өөрчлөн тооцооллуудыг явуулж хамгийн оновчтой нөхцлийг олов. Гарган авсан үр дүнг хүснэгт 4-д өгөв.

Хүснэгт 4. Төвдөө ойлгогчтой реакторын голомтын илүүдэл реактивити удирдлагын савааг голомт руу оруулан гүнээс хамаарч өөрчлөгдөх нь.

№	1		2		3		4		
	t	d (см)	Δk/k(%)	d (см)	Δk/k(%)	t	d (см)	Δk/k(%)	d (см)
0.00	0	0	0.67	1	0.45	0.00	0	0.67	1
0.02	0	0	0.28	1	0.11	0.02	0	0.28	1
0.25	0	0	0.17	1	-0.07	0.25	0	0.17	1
0.74	0	0	0.17	1	-0.06	0.74	0	0.17	1
1.23	0	0	0.29	1	0.11	1.23	0	0.29	1
1.72	0	0	0.43	1	0.24	1.72	0	0.43	1
2.46	0	0	0.68	1	0.47	2.46	0	0.68	1
4.92	0	0	0.77	1	0.61	4.92	0	0.77	1
7.38	0	0	0.70	1	0.48	7.38	0	0.70	1
9.84	0	0	0.70	1	0.48	9.84	0	0.70	1
12.30	0	0	0.78	1	0.60	12.30	0	0.78	1
14.76	0	0	0.88	1	0.72	14.76	0	0.88	1
17.22	0	0	0.94	1	0.70	17.22	0	0.94	1
19.68	0	0	0.66	1	0.39	19.68	0	0.66	1

Тайлбар: t- реакторын ажилласан хугацаа, d- удирдлагын саваануудыг голомт руу оруулсан гүн

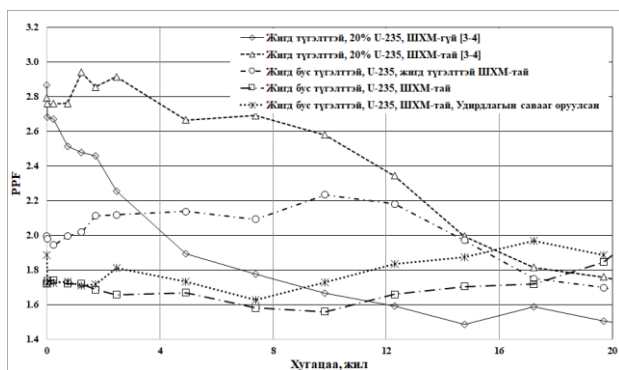
Голомтод удирдлагын савааг оруулахад тухайн хэсгийн нейтроны урсгал бага зэрэг өөрчлөгдөж түүнээс хамаарч тухайн хэсэг дэх чадлын пикийн фактор өөрчлөгддөг. Тиймээс удирдлагын савааг голомтод оруулах үед голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлтийг давхар хянаж байх шаардлагатай. Манай тохиолдолд голомтод удирдлагын савааг оруулсан хэдий ч савааны голомтод орсон хэмжээ бага учраас түүнээс хамаарч чадлын пикийн фактор өөрчлөгдөх хэмжээ маш бага байсан. Удирдлагын савааг голомтод оруулсны дараах голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлтийг Зураг 5-д харуулав.

3.3 Реактивитийн температурын болон чадлын коэффициент

Реактор ажиллаж байх үед реактивитид нөлөөлөх хүчин зүйлийн нэг нь голомтын температур юм. Голомтын температураас хамаарч реактивити хир зэрэг өөрчлөгдөхийг реактивийн температурын өөрчлөлт харуулдаг. Өөрчлөлтийн хэмжээ, үзүүлэх нөлөөлөл нь реакторын аюулгүй байдал болон хяналтанд чухал ач холбогдолтой байдаг. Реакторын голомтын чадал болон температур өөрчлөгдснөөр эффектив нейтрон үржүүлэх фактор дагаж өөрчлөгддөг. Голомтын температур ихэсч, чадал буурахад $K_{эфф}$ буурах ба үүнийг реактивитийн температурын сөрөг коэффициент гэж нэрлэдэг. Реактивитийн температурын коэффициент нь дараах томъёогоор илэрхийлэгддэг.

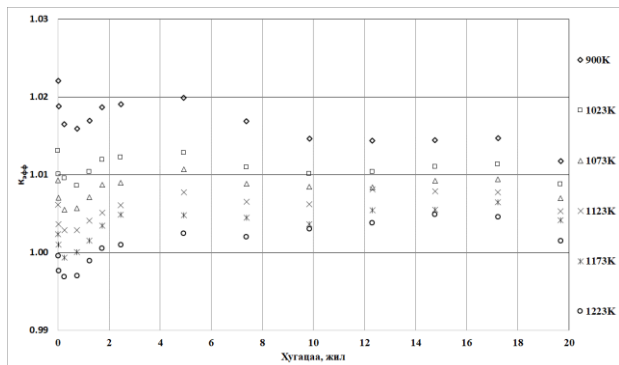
$$\alpha_T = \frac{dp}{dT}$$

Төвдөө ойлгогчтой 100 МВт чадалтай 1123К температурт ажиллаж байгаа ӨТХР-ийн реактивитийн температурын коэффициентыг үнэлэхийн тулд өмнө гүйцэтгсэн тооцооллын үндсэн нөхцлүүд хэвээр хадгалагдаж, зөвхөн голомтын температурыг 50 К-ээр өөрчилж



Зураг 5. Голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлт хугацаанаас хамаарч өөрчлөгдөх нь.

тооцооллуудыг гүйцэтгэж реактивитийн температурын коэффициентийг олов. Реакторын ажиллах хугацааны турш эффектив нейтрон үржүүлэх фактор температураас хамаарсан хамаарлыг Зураг 6-д болон Хүснэгт 5-д харуулав.



Зураг 6. Эффектив нейтрон үржүүлэх фактор температураас хамаарч өөрчлөгдөх нь.

Үр дүнгээс харвал эффектив нейтрон үржүүлэх факторын температурын хамаарал нь эхний 10 жилийн турш өндөр хэлбэлзэлтэй байгаа ба үүнээс хойш илүү тогтвортой болсон байна. Голомтын температураас хамаарч нейтроны энергийн спектр өөрчлөгддөг. Реактор ажиллах тусам голомт дэх U^{238} -аас үүсэх Pu^{239} болон Pu^{241} ихээр хуримтлагдаж дулааны энергитэй нейтроныг шингээх тул хугацааны сүүл үед $k_{эфф}$ үл ялиг буурч тогтвортой болж байна. Реактор ажиллах хугацааны турш реактивитийн коэффициентийн хамгийн их, хамгийн бага болон дундаж утгыг Хүснэгт 5-д бас харуулав.

Хүснэгт 5. Реактивитийн температурын коэффициент.

$V_{түлш,t}$ ГВтӨ/т н	α_T (pcm/K)				
	900K	1023K	1073K	1173K	1223K
10	-1.27	-0.54	-0.24	0.09	0.37
40	-0.83	-0.34	-0.19	0.20	0.23
80	-0.64	-0.30	-0.14	0.09	0.28
ХИУ	-0.61	-0.19	-0.02	0.29	0.48
ХБУ	-1.56	-0.60	-0.30	0.09	0.22
ДУ	-1.06	-0.43	-0.19	0.18	0.34

Тайлбар:

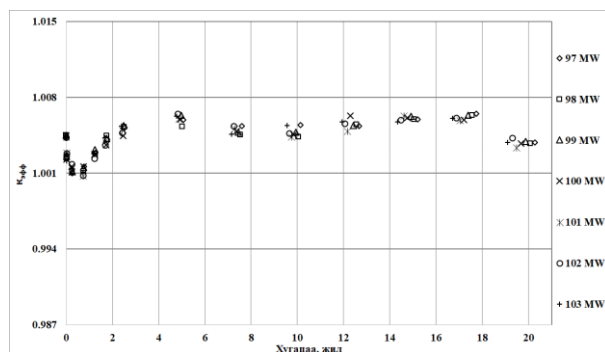
$V_{түлш,t}$	Түлшний шаталт	ХБУ	Хамгийн бага утга
ХИУ	Хамгийн их утга	ДУ	Дундаж утга

Үүнээс гадна реакторын аюулгүй байдлыг илэрхийлдэг өөр нэг коэффициент нь реактивитийн чадлын коэффициент юм. Энэ нь реакторын чадал нэгж хэмжээгээр өөрчлөгдөхөд

реактивити хир зэрэг өөрчлөгдөхийг харуулах ба дараах байдлаар илэрхийлдэг.

$$\alpha_p = \frac{d\rho}{dP}$$

ӨТХР-ийн чадлыг 97 МВт-аас 103 МВт-ийн хооронд өөрчлөн, үндсэн нөхцлийг хэвээр хадгалан тооцооллуудыг явуулж реактивитийн чадлын коэффициентийг тодорхойлсон. Реакторын чадлаас хамаарч эффектив нейтрон үржүүлэх факторын хугацаанаас хамаарсан хамаарлыг Зураг 7-д, реактивитийн чадлын коэффициентийг Хүснэгт 6-д өгөв. Үр дүнгээс харахад чадлын өөрчлөлт эффектив нейтрон үржүүлэх факторт нэгэн утгатай өөрчлөлт үзүүлэхгүй байна. Реакторын чадлыг ихэсгэснээр агшин зуур түлшний температур нэмэгдэж үүний үр дүнд хөргүүрийн температур ч дагаж ихэсдэг. Эдгээр температурын өөрчлөлтөөс нейтроны спектр, хөргүүрийн нягт, урвалын огтлол өөрчлөгдсөнөөр голомтын реактивити өөрчлөгддөг. Дээрх өөрчлөлтүүд нь реактивитид эерэг, сөрөг нөлөө үзүүлдэг.



Зураг 7. Реакторын чадлын өөр өөр утганд эффектив нейтрон үржүүлэх факторын хугацааны өөрчлөлт.

Хүснэгт 6. Реактивитийн чадлын коэффициент.

$V_{түлш,t}$ ГВт Ө/тн	α_T (pcm/MВт)					
	97	98	99	101	102	103
10	-0.80	-0.84	-0.97	-0.55	-0.28	-0.88
40	-0.90	0.17	-0.25	0.21	-0.14	-0.83
80	-0.09	0.03	-0.16	0.43	-0.51	-0.08
ХИУ	0.98	0.84	0.91	1.45	0.77	0.56
ХБУ	-0.90	-0.89	-0.97	-0.59	-0.55	-0.88
ДУ	-0.15	0.04	-0.16	0.12	-0.05	-0.06

Тайлбар: тэмдэглэлгээнүүд Хүснэгт 5-ынхтай адил

4. ДҮГНЭЛТ

1. Энэ ажилд голомтын дизайныг илүү оновчтой болгохын тулд түлш, шатдаг хорлолт материалын агууламжыг өөрчлөх замаар жигд бус түгэлттэй болгон илүүдэл реактивитийн утгыг $0.78\Delta k/k(\%)$ хүртэл бууруулж реакторын голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлтийг жигдрүүлэв.
2. Реактор ажиллах хугацаанд реактивитийг ерөнхийдөө жигд болгосон боловч бага хэмжээний илүүдэл реактивитийг дарахын тулд голомт руу удирдлагын саваа оруулж хамгийн их реактивитийн утгыг $0.65 \Delta k/k(\%)$ -аас бага болгож, голомт даяарх чадлын пикийн факторын түгэлтийн хамгийн их утгыг 1.97 болгож жигдлэв.
3. Реактивитийн температурын болон чадлын коэффициентуудыг үнэлэв.

ТАЛАРХАЛ

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

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] Fourth Generation reactor concept M. Ragneb 3/11/2014
- [2] The status of graphite development for gas cooled reactors IAEA-TECDOC-690
- [3] 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.
- [4] С. Одмаа, Т. Жамъянсүрэн, Н. Норов. Задралын дулаанаа идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай, төвдөө ойлгогчтой, өндөр температурын хийн хөргөлттэй реакторын голомтын дизайны судалгаа. МУИС, Физик.25(478) 2017, 34-40
- [5] 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.
- [6] Okumura K et al. MVP-BURN user's manual. Japan: Atomic Energy Agency; 2005.

- [7] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura: "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol.. 48(1), 1-30(2011).
- [8] 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, 52, Issue 12, 2015, pp1519-1529. <http://dx.doi.org/10.1080/00223131.2015.1017546>.