

# Бага чадлын, хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын дизайныг сайжруулах судалгаа

Г.Нарантунгалаг<sup>1,\*</sup>, С.Одмаа<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Цөмийн физикийн судалгааны төв, Монгол Улсын Их Сургууль

<sup>2</sup> Хими, биологи инженерчлэлийн тэнхим, Хэрэглээний Шинжлэх Ухааны Их Сургууль, Монгол Улсын Их Сургууль

Энэ ажилд 100 МВт чадалтай хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын чадлын түгэлтийг жигдлэх, анхны илүүдэл реактивитиг дарах судалгааг хийсэн. Голомтын чадлын түгэлтийг жигдлэхийн тулд түлшний савааны радиусыг өөрчлөн, голомтыг гурван бүс болгон загварчилсан. Түүнчлэн голомтод нейтрон шингээх хөндлөн огтлол ихтэй шатан шингээгч материал (ШШМ) болох  $NrN$  савааг нэмж голомтын нейтроник үзүүлэлтэд нөлөөлж байгаа нөлөөг судалсан. Уг судалгааны ажилд тасралтгүй энергитэй нейтроны харилцан үйлчлэлийг Монте Карло аргаар тооцоолдог SERPENT-2.1.30 компьютерийн кодыг цөмийн өгөгдлийн сан JEFF-3.1.1-ийн хамт ашиглав. Судалгааны үр дүнгээс харахад 3 бүс дэх түлшний савааны радиусын зөрүү 0.05 см байхад голомтын нейтроник шинж чанар муудахгүйгээр чадлын пикийн факторын өөрчлөлт жигд хэвээрээ байсан. Цаашлаад  $NrN$  савааг голомт даяар жигд ачаалахад чадлын пикийн фактор багасч, нейтроник үзүүлэлтүүд сайжирч байгааг олов.

Түлхүүр үг: Хар тугалган хөргүүр, хурдан нейтроны реактор, Нейтроник анализ, Шатан шингээгч материал, Чадлын түгэлт, Илүүдэл реактивити, Эффектив нейтрон үржүүлэгч фактор, Чадлын пикийн фактор.

## 1. ОРШИЛ

Цөмийн эрчим хүчний реакторыг голомтод хуваагдал явуулж байгаа нейтроны энергиэс нь хамаарч дулааны болон хурдан нейтроны реактор гэж ангилдаг. Өдгөө хамгийн өргөн ашиглагддаг хөнгөн усан хөргүүртэй реактор нь дулааны нейтроны реактор юм. Гэхдээ хурдан нейтроны реакторын тоо нэмэгдсээр байна. Хурдан нейтроны реакторын онцлог нь дулааны реакторын ашигласан түлшин дэх урт настай, цацраг идэвх өндөртэй минор актиноидуудыг (МА) шатааж (трансмутаци) богино настай болон тогтвортой изотоп үүсгэн хаягдлын хэмжээг бууруулдаг оршино. Түүнчлэн хурдан нейтроны реакторт нейтроныг удаашруулах шаардлагагүй учир байгалийн ураны 99.3%-ийг эзэлдэг  $^{238}\text{U}$  изотопыг түлш болгон ашигладаг. Тиймээс ураны байгалийн нөөцийг үр ашигтайгаар ашиглах, уран баяжуулах төвөгтэй, үнэтэй процессоос зайлсхийх боломжтой болдог. Реакторын дизайны хөгжлийн хамгийн сүүлийн буюу дэвшилтэт, IV-р үеийн реакторууд нь аюулгүй ажиллагаатай, эдийн засгийн үр ашигтай, ашигласан түлшний хаягдал багатай, ашигласан түлшийг цөмийн зэвсгийн материал болгон ашиглах боломжгүй зэрэг

шаардлагуудыг хангасан байдаг. Тиймээс ч дэлхийн улс орнууд эдгээр реакторыг хамгийн үр ашигтай эрчим хүчний эх үүсвэр гэж үзэн судалгаа хийж байна. IV-р үеийн реакторт зургаан дизайныг сонгон судалж байгаагийн гурав нь хурдан нейтроны реактор байна [1]. Энэ нь хурдан нейтроны реактор аюулгүй байдлын сайжруулсан шинж чанартайгаас гадна эдийн засгийн үр ашигтайгаас шалтгаалж байна. Хурдан нейтроны реакторт нейтрон удаашруулах ба шингээх хөндлөн огтлол багатай хий болон шингэн металл (хайлмал натри, хар тугалга, хар тугалга-висмут) хөргүүрийг ашигладаг. Хар тугалга нь дулаан дамжуулах шинж чанар сайтай, нейтрон шингээх болон удаашруулах хөндлөн огтлол багатай, мөн нейтроны сайн ойлгогч болдог шинж чанартай. Мөн натри болон хар тугалга-висмут хөргүүртэй харьцуулахад химийн идэвх султай учир аюулгүй байдлын давуу шинж чанартай [2].

Реакторын голомтын дизайныг хийхдээ критик төлөвт ажиллах циклийн хугацаа урт ба циклийн төгсгөлд түлшний шаталт ихтэй байхаар загварчилдаг. Аюулгүй байдлын зүгээс голомтын чадлын пикийн факторын (PPF) утга

\* Electronic address: narantungalag.g@num.edu.mn

бага бөгөөд жигд тархалттай байх, реактор ажиллаж эхлэх үеийн (РАЭҮ) илүүдэл реактивити бага байх, реактивитийн өөрчлөлт жигд байх зэрэг шаардлагуудыг тавьдаг. Тиймээс энэ ажлын зорилго нь бидний өмнөх ажлаар загварчилсан [3] 100 МВт чадалтай, хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын чадлын түгэлтийг жигдлэх болон илүүдэл реактивитиг дарах замаар дизайны аюулгүй байдлын сайжруулах болно.

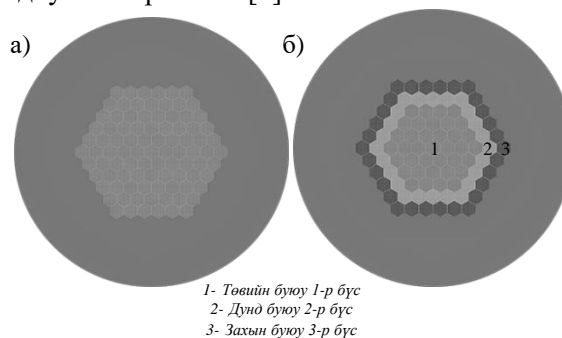
## 2. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Өмнөх ажилд гүйцэтгэсэнээр, 100 МВт чадалтай, хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын дизайныг загварчилж нейтроник анализыг хийхэд реактор ажиллаж эхлэх үеийн (РАЭҮ) голомтын илүүдэл реактивити  $\Delta k/k=0.035$  байсан. Цаашлаад д голомтын төвийн эвлүүлгүүд их чадал үйлдвэрлэж байсан ба зах хэсэгт үүсэх чадлын хэмжээ бага байсан [3]. Голомтын чадлын түгэлт жигд байх нь аюулгүй байдлын чухал үзүүлэлтүүдийн нэг юм. Тиймээс ажлын эхний хэсэгт түлшний эвлүүлгүүдийн үйлдвэрлэх чадлын зөрүүг багасгахын тулд голомтыг өөр өөр радиустай түлшний саваа бүхий эвлүүлгүүдээс тогтсон гурван бүс болгон загварчилсан. Үүний дараа 3 бүстэй голомтын илүүдэл реактивитиг дарж, критик утгатай илүү ойрхон болгох судалгаа хийсэн. Үүний тулд нейтрон шингээх огтлол өндөртэй шатан шингээх материал (ШШМ) ашигласан ба тэдгээрийн онцлог шинж чанар, давуу болон сул талуудыг дараагийн хэсэгт авч үзсэн. Судалгаанд тасралтгүй энергитэй нейтроноор явагдах харилцан үйлчлэлийг Монте Карло аргаар тооцоолдог SERPENT-2.1.30[4] кодыг JEFF-3.1.1[5] цөмийн өгөгдлийн сантай хамт ашигласан бөгөөд тооцооллын нөхцөлийг мөн энэ бүлгийн сүүл хэсэгт оруулав.

### 2.1. Голомтын чадлын түгэлтийг жигдлэх

Реакторын голомт дахь чадлын түгэлтийг тооцоолсноор хаана илүү их чадал үйлдвэрлэж, дулаан их үүсэж байгааг тодорхойлдог. Чадлын түгэлтийг жигдлэх хэд хэдэн арга байдаг. Жишээлбэл, түлшний баяжуулалтыг өөрчилж голомтыг бүсчлэх, их чадал үйлдвэрлэж байгаа хэсэгт шингээгч материал нэмж оруулах, удирдлагын савааг шаардлагатай хэмжээгээр

голомтод оруулах, мөн ойлгогч ашиглах гэх мэт. Өмнөх ажилд гүйцэтгэсэнээр, 100 МВт чадалтай голомтын хамгийн их чадал голомтын төвд үүсэж байгаа учир тухайн хэсгийн түлшний савааны радиусыг багасгаж чадлыг бууруулна, харин голомтын зах хэсгээр үйлдвэрлэж байгаа чадлын хэмжээ бага учир тэр хэсэгт түлшний савааны радиусыг нэмж үйлдвэрлэх чадлыг нэмэгдүүлнэ. Голомтын төв хэсэгт арай бага радиустай түлшний саваануудаас бүрдсэн эвлүүлгүүд, дунд хэсэгт төвийн буюу 1-р бүсээс арай их радиустай түлшний саваа бүхий эвлүүлгүүд, харин захын буюу 3-р бүсийн түлшний эвлүүлгүүд хамгийн том радиустай түлшний саваануудтай байна. Голомтыг гурван бүс болгоход ОХУ-ын 300МВт чадалтай хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны Брест-Од-300 реакторын голомттай адил гадна талын хоёр давхаргийн үлшний эвлүүлгийн савааны радиусыг өөрчилсөн[6].



Зураг 1. 100МВт чадалтай хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын а) адил түлшний савааны радиустай б) 3 бүстэй голомтын хөндлөн зүсмэгийн зураг.

Үүнээс гадна голомтын чадлын пикийн фактор (PPF) гэх хэмжигдэхүүний хугацааны өөрчлөлтийг авч үзэх шаардлагатай. PPF гэдэг нь тухайн хэсгийн үйлдвэрлэж байгаа чадлыг голомтын үйлдвэрлэж байгаа дундаж чадалд харьцуульсан харьцааны хамгийн их утгаар тодорхойлогддог. Аюулгүй байдлын анализыг хийхэд реакторын ажиллагааны турш PPF-ыг тодорхойлох зайлшгүй шаардлагатай байдаг. Хэрвээ PPF өндөр гарвал багасгах шаардлагатай. Өмнөх ажилд гүйцэтгэсэн адил радиустай түлшний саваа бүхий эвлүүлгүүдээс тогтсон 100 МВт чадалтай хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын дизайны хөндлөн зүсмэгийг Зураг 1а-д, чадлыг жигдлэхийн тулд гурван бүс болгож

загварчилсан голомтын хөндлөн зүсмэгийн зургийг Зураг 1б-д тус тус дүрслэв.

## 2.2. Шатан шингээгч материал

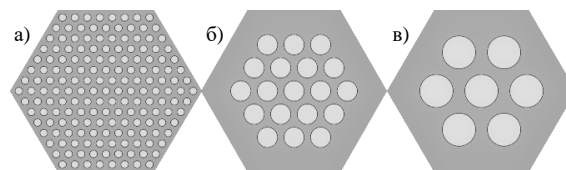
Реакторыг тодорхой хугацаагаар ажиллуулах, хуваагдлаар үүсэх шимэгч бүтээгдэхүүнүүдээс шалтгаалж сабкритик төлөвт орохоос сэргийлж, ажиллаж эхлэх үед голомтын эффектив нейтрон үржүүлэгч факторыг ( $k_{эфф}$ ) нэгээс их, голомт суперкритик нөхцөлд буюу голомтод илүүдэл нейтронтой (реактивити) байхаар дизайныг хийдэг. Тухайн илүүдэл реактивитиг дарахын тулд голомтод удирдлагын савааг оруулах, хөргүүрт нейтрон шингээдэг борын уусмал хийх эсвэл голомтод (түлшинд) нейтрон шингээх хөндлөн огтлол ихтэй ШШМ-ыг нэмж ашигладаг. Удирдлагын саваагаар илүүдэл реактивитиг хянахад голомтын гүнд оруулж, гаргах механик хөдөлгөөн хийдэг ба энэ нь голомтын үйл ажиллагаанд нөлөөлж зарим хэсгийн урсгалыг хэт их, заримыг бага болгох аюултай. Хөргүүрт нейтрон шингээгч хөндлөн огтлол ихтэй уусмал нэмэхэд уусмалын нөлөөгөөр хөргүүрийн шинж чанар өөрчлөгдөж дулаан дамжуулалт, ойлгох шинж чанар зэрэгт нөлөөлөх, мөн илүүдэл реактивитид маш алгуур нөлөөлөх ба усан хөргүүртэй хөнгөн усан реакторт тохиромжтой учир энэ ажилд хэрэглээгүй. Түлшинд ШШМ-ыг жигд хольж нэмснээр түлшний шинж чанарыг өөрчлөхөөс гадна ашигласан түлшин дэх элементүүдийг ялгаж авахад төвөгтэй болдог. Тиймээс энэ ажлаар ШШМ-ыг саваа хэлбэрээр ашигласан.

Шатан шингээгч материалууд нейтроныг шингээгээд реакторын үйл ажиллагаанд нөлөөлөхгүй тогтвортой эсвэл арай бага шингээх огтлолтой изотопыг үүсгэдэг байх ёстой. Хамгийн өргөн ашиглагддаг ШШМ нь  $B_4C$ ,  $Gd_2O_3$ ,  $Er_2O_3$ , зэрэг материалууд юм. Тэдгээрийн гол нейтрон шингээгч элементийн онцлог шинж чанарыг Хүснэгт 1-д харуулав.

Хүснэгт 1. ШШМ-ын үзүүлэлт [7]

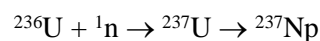
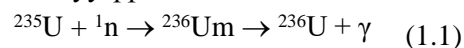
	B	Gd	Er
Нейтрон шингээх гол изотоп	$^{10}B$	$^{157}Gd$	$^{167}Er$
Байгалийн тархалт, %	18.8	47.8	22.7
Нейтрон шингээх урвал	(n,α)	(n,γ)	(n,γ)
Дулааны энергигэй нейтрон шингээх урвалын хөндлөн огтлол, [барн]	4010	180000	700

Энэ ажлаар ШШМ-ын эвлүүлгийг Зураг 2-т харуулсан 3 өөр хэлбэрээр бэлдсэн ба эдгээр бүрт байх ШШМ-ын эзлэхүүн ижил. ШШМ-д  $B_4C$ ,  $Gd_2O_3$ ,  $Er_2O_3$  материалуудыг авч үзсэн. Тооцооллын үр дүнг Хэсэг 3.2-т харуулав.



Зураг 2. Голомтын төвд байрлуулсан ШШМ-ын эвлүүлгийн хэлбэрүүд а) Хэлбэр-1, б) Хэлбэр-2, в) Хэлбэр-3.

Хурдан нейтроны реакторт МА-ыг ШШМ болгон ашиглах тохиолдол байдаг. Учир нь МА-ыг түлш болгон голомтод ачаалахад анхны илүүдэл реактивитиг сайн дарах бөгөөд реактор ажиллагааны сүүл үед голомтод эерэг реактивити нэмдэг. Энэ нь голомтын критик нөхцөлд ажиллах хугацааг ( $t_{голомт}$ ) уртасгах давуу талтай. Нөгөө талаас, реакторт ашигласан түлшний цацраг идэвхийн тодорхой хувийг Am, Np, Cm зэрэг МА-ууд эзэлдэг ба эдгээр элементүүдийг ялгаж авснаар ашигласан түлшний цацраг идэвхийг нэг эрэмбээр бууруулдаг [8]. Түүнчлэн дээрх элементүүдийг нэгэн жигд болон жигд бусаар түлштэй хольж анализ хийхэд Np элемент нь хамгийн сайн трансмутацид орж байсан [9] ба хурдан нейтроны реакторын голомтын реактивитийн өөрчлөлтийг сайн дарж, удирдлагын савааны шаардлагыг багасгасан [10]. Тиймээс энэ ажилд NpN-ийг ШШМ болон түлш болгон ашиглахаар голомтод нэмж, ийм ШШМ-ийн эвлүүлгийн хамгийн тохиромжтой дизайныг олж судалсан. Np нь байгальд байхгүй бөгөөд  $^{237}Np$  изотоп нь реакторын голомтод (1.1)-д үзүүлсэн хоёр схемийн дагуу үүсдэг.



Тооцоололд NpN дэх  $^{237}Np$  изотопыг 100% баяжуулсан буюу зөвхөн  $^{237}Np$  изотоп байгаа гэж үзсэн. NpN-ийг өмнөх хэсэгт дурдсан уламжлалт ШШМ-ийн адил саваа хэлбэрээр голомтод оруулсан. Голомтын төвд хамгийн их чадал үйлдвэрлэж байгаа учраас зөвхөн төв хэсгийн эвлүүлэгт NpN савааг нэмж ачаалсан. Цаашлаад NpN-ийн гурван саваатай эвлүүлгийг голомтод олноор нэмэн анализыг хийсэн. NpN

саваа бүхий голомтын зураг болон үр дүнг Хэсэг 3.3-т авч үзсэн.

### 2.3. Тооцооллын нөхцөл

SERPENT нь Монте Карло аргад үндэслэн тасралтгүй энергитэй бөөмийн шилжилтийг санамсаргүй алхалтад үндэслэн тооцож олдог компьютерийн код юм. Тооцоололд ашигласан нөхцөлийг Хүснэгт 2-д жагсаав.

Хүснэгт 2. Тооцооллын нөхцөл.

Голомтын гадна хилийн нөхцөл	Шингээгч
Алдааг бууруулах зорилгоор үр дүнд хэрэгсэхгүй циклийн тоо	100
Тооцоолол хийгдэж байгаа идэвхтэй циклийн тоо	1000
Нэг циклд үүсэж байгаа нейтроны тоо	10000

Реакторын голомтод үүссэн нейтрон голомтын захаас гадагш алдагдаж буцаж орж ирэхгүй учир шингээгч хилийн нөхцөлийг авсан. Тооцооллын хугацааг багасгахын тулд 16 компьютерт нэгэн зэрэг гүйцэтгэсэн.

## 3. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

### 3.1. Голомтын чадлын түгэлтийг жигдлэх тооцооллын үр дүн

Адил радиустай түлшний саваа бүхий эвлүүлгээс тогтсон 100 МВт чадалтай хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны

реакторын голомтын чадлын түгэлтийг жигдэлж, PPF-ыг багасгахын тулд Хэсэг 2.1-т дурдсан аргаар буюу түлшний савааны радиусыг өөрчилж голомтыг 3 бүс болгон загварчилсан. Түлшний савааны радиусыг өөрчлөхдөө түлш болон хөргүүрийн эзлэхүүний харьцаа анхны голомтынхтой адил буюу 0.38 утгыг өөрчлөхгүй авч үзсэн. Түүнчлэн голомтыг бүс болгон хуваахдаа Зураг 1а-д харуулсанчлан эхний дөрвөн давхаргад байгаа 37 эвлүүлгийг 1-р буюу төвийн бүс, дараагийн давхаргын 24 эвлүүлгийг 2-р бүс, хамгийн гаднах давхаргын 30 эвлүүлгийг 3-р бүс болгон хуваасан. Түлшний савааны радиус хоорондын зөрүүг  $a$  гэж тэмдэглэвэл  $r_2 = r_1 + a$ ,  $r_3 = r_2 + a$  гэж тодорхойлогдоно. Энд  $r_1, r_2, r_3$  нь харгалзан төвийн, дунд, захын бүсийн түлшний савааны радиус. Энэ ажлаар  $a = 0.01, 0.02, \dots, 0.1$  см гэж аван, голомтын 3 бүс дэх түлшний савааны радиусын 10 өөр утгын үед тооцоолол явуулж хамгийн тохиромжтой радиусын хэмжээг олсон. Хүснэгт 3-т энэ 10 тохиолдлын түлшний саваануудын радиус болон харгалзах голомтын нейтроник анализын үндсэн үр дүнг харуулав. Радиусын зөрүү ихсэхэд РАЭҮ-ийн  $K_{эфф,0}$  буурах боловч голомтын ажиллах хугацаа  $t_{голомт}$  мөн буурсан. Энэ нь голомтын төвд үүсэх нейтроны хэмжээ багасаж, харин захад ихээр үүсэж байгаа нейтрон нь голомтын төв рүү орж хуваагдал явуулахаасаа илүүтэй гадагш алдагдах нь их байгаатай холбоотой.

Хүснэгт 3. Чадлын түгэлтийг жигдлэхийн тулд 3 бүс болгон хуваасан голомтын тооцооллын үр дүн.

	$a$	$V(\text{түлш}) / V(\text{хөргүүр})$	$r_1$ [см]	$r_2$ [см]	$r_3$ [см]	$K_{эфф,0}$	$t_{голомт}$ [жил]
Голомт	-	0.38	0.415			1.0349	20
Голомт1	0.01	0.38	0.4057	0.4157	0.0425	1.0284	24
Голомт2	0.02	0.38	0.3962	0.4162	0.4362	1.0246	21
Голомт3	0.03	0.38	0.3865	0.4165	0.4465	1.0197	18
Голомт4	0.04	0.38	0.3767	0.4167	0.4567	1.0163	15
<b>Голомт5</b>	<b>0.05</b>	<b>0.38</b>	<b>0.3666</b>	<b>0.4166</b>	<b>0.4666</b>	<b>1.0118</b>	<b>12</b>
Голомт6	0.06	0.38	0.3564	0.4164	0.4764	1.0093	9
Голомт7	0.07	0.38	0.346	0.416	0.486	1.0055	6
Голомт8	0.08	0.38	0.3355	0.4155	0.4955	1.0045	3
Голомт9	0.09	0.38	0.3247	0.4147	0.5047	1.0030	2
Голомт10	0.10	0.38	0.3138	0.4138	0.5138	1.0031	1

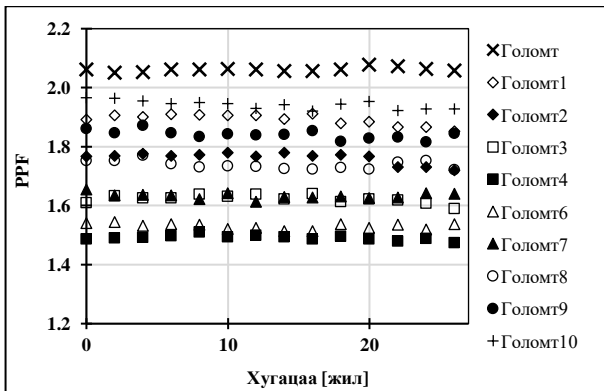
Хүснэгт 3-т үзүүлсэн өөр өөр радиустай саваа бүхий 3 бүстэй голомтын чадлын пикийн факторыг тооцоолсон үр дүнг Зураг 3-т харуулав. Радиусын зөрүү 0.05 байх Голомт 5-д

PPF нь реактор ажиллах хугацааны турш жигд бөгөөд хамгийн бага буюу 1.4 утга орчимд байна. Тиймээс Голомт 5-ийг аюулгүй байдлын үүднээс хамгийн тохиромжтой дизайн гэж үзэн,

100 МВт чадалтай, нэгэн төрөл бус голомтын үндсэн дизайнаар сонгон авч дизайны сайжруулалтыг нь гүйцэтгэв. Голомт 5-ийн үндсэн хэмжээсийг Хүснэгт 4-т өгөв.

Хүснэгт 4. 100 МВт чадалтай, нэгэн төрөл бус голомтын хэмжээс.

Түлшний эвлүүлгийн тоо (1-р бүс/2-р бүс/3-р бүс)	37/24/30
Түлшний савааны радиус (1-р бүс/2-р бүс/3-р бүс) [мм]	0.366/0.416/0.466
Голомтын өндөр [см]	110
Голомтын радиус [см]	178.5



Зураг 3. Ялгаатай радиус бүхий түлшний саваатай, 3 бүстэй голомтын чадлын пикийн факторын өөрчлөлт.

Нэгэн төрөл бус голомтыг загварчлахдаа нэгэн төрөл голомтын нийт түлш ба хөргүүрийн эзлэхүүний харьцааг хадгалсан учир голомтын

Хүснэгт 5. ШШМ материал нэмсэн тооцооллын үр дүн.

ШШМ-ын эвлүүлгийн хэлбэр	ШШММатериал	$V_{ШШМ}/V_{Түлш}$	РАЭУ-ийн $K_{эфф.0}$	$\Delta k/k_{ХИУ}$	$t_{ГОЛОМТ}$ [ЖИЛ]	Циклийн төгсгөлд түлшний шаталт [ГВт*өдөр/тн]
ШШМ-гүй		-	$1.0118 \pm 0.0003$	0.0118	12	
Хэлбэр- 1	$V_4C$	0.00865	$0.9897 \pm 0.0004$	-0.0104	-	-
	$Gd_2O_3$		$1.0026 \pm 0.0004$	0.0026	1	3.3352
	$Er_2O_3$		$1.0021 \pm 0.0004$	0.0021	3	10.006
Хэлбэр- 2	$V_4C$	0.00865	$0.9962 \pm 0.0004$	-0.0038	-	-
	$Gd_2O_3$		$1.0024 \pm 0.0004$	0.0024	2	6.6705
	$Er_2O_3$		$1.0029 \pm 0.0004$	0.0029	3	10.006
Хэлбэр- 3	$V_4C$	0.00865	$0.9965 \pm 0.0004$	-0.0035	-	-
	$Gd_2O_3$		$1.0017 \pm 0.0004$	0.0017	2	6.6705
	$Er_2O_3$		$1.0031 \pm 0.0004$	0.0031	3	10.006

$V_4C$  -н нейтрон шингээгч гол изотопийн ( $^{10}B$ ) хэмжээ буюу атомын нягт их ( $1.04155E-01$  атом/барн-см) учир  $V_4C$  материалын нейтрон

нийт өндөр болон радиус өөрчлөгдөхгүй, зөвхөн түлшний савааны радиус өөрчлөгдөнө.

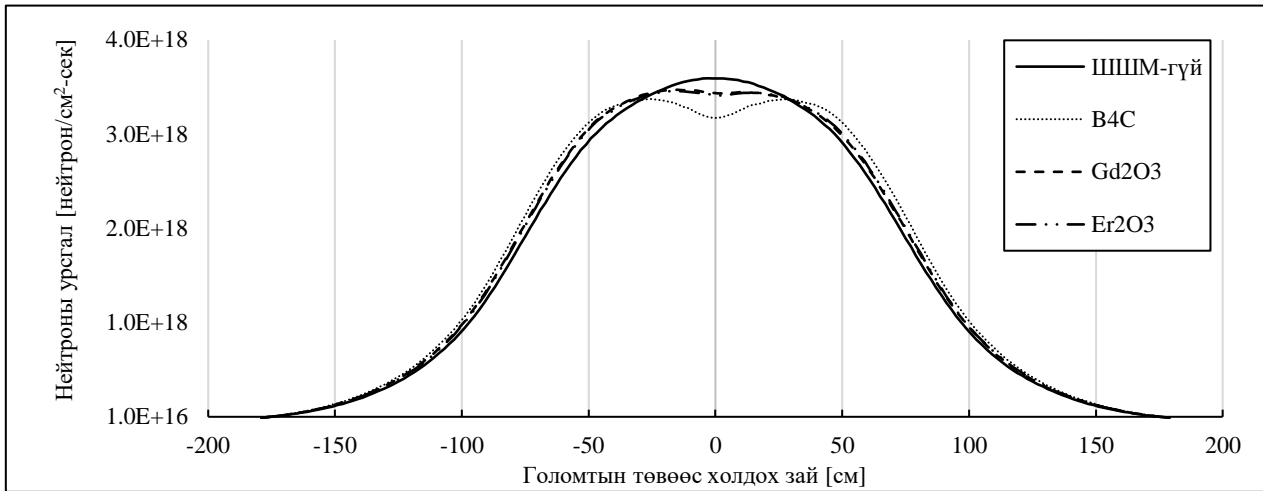
### 3.2. ШШМ оруулсан тооцооллын үр дүн

Голомтын төвийн эвлүүлэгт  $V_4C$ ,  $Gd_2O_3$ ,  $Er_2O_3$ , гэсэн гурван өөр ШШМ-ыг Зураг 2-д үзүүлсэн хэлбэртэйгээр эвлүүлэг болгон бэлдэж голомтод ачаалан, нөлөөллийг нь судлав. Үүнд  $V_4C$  дэх  $^{10}B$  баяжуулалтыг 90%,  $Gd_2O_3$  ба  $Er_2O_3$  материалын изотопуудыг байгалийн тархалттайгаар тооцсон. Эдгээр ШШМ-ын эзлэхүүн бүгд адил ба ШШМ-ын эзлэхүүнийг түлшний эзлэхүүнд харьцуулсан харьцаа 0.00865 байв. Хүснэгт 5-д гурван өөр ШШМ-ыг гурван өөр дизайнтайгаар голомтын төвд байрлуулахад нейтроник үзүүлэлтэд хэрхэн нөлөөлөхийг харуулав. Үр дүнгээс харахад голомтод  $V_4C$  нэмэхэд анхны илүүдэл реактивитиг хамгийн их дарж, РАЭУ-ийн  $K_{эфф.0}$  нь нэгээс доош буюу голомт критикээс доогуур сабкритик төлөвт орсон. Харин  $Gd_2O_3$ ,  $Er_2O_3$  материалуудын нөлөө ойролцоо байсан. Тухайлбал, Хэлбэр -1 байдлаар нэмсэн ШШМ-тай голомтын илүүдэл реактивитийн хамгийн их утга харгалзан 0.0026 ба 0.0021 байсан бол Хэлбэр-2 тохиолдолд 0.0024 ба 0.0029 болсон. Голомтын ажиллах хугацаа  $t_{ГОЛОМТ}$  мөн дээрх хоёр ШШМ-тай голомтын хувьд ойролцоо утгатай байна (Хүснэгт 5).

шингээх макро хөндлөн огтлолд нөлөөлж материалын нейтрон шингээх огтлолыг нэмэгдүүлдэг. Үүнтэй адил шалтгаанаар  $^{157}Gd$

изотопийн нейтрон шингээх микро хөндлөн огтлол өндөр боловч изотопийн атомын нягт бага ( $8.47759E-03$  атом/барн-см) учир  $Gd_2O_3$  материалын нейтрон шингээх хөндлөн огтлол буурсан. Тиймээс  $B_4C$  материал голомтын анхны

илүүдэл реактивитийг илүү сайн дарж байна. Энэ шинж чанар нь голомтын хурдан нейтроны ( $E_n=0.1-10$  МэВ) урсгалын үр дүнд мөн адил ажиглагдсан (Зураг 4).

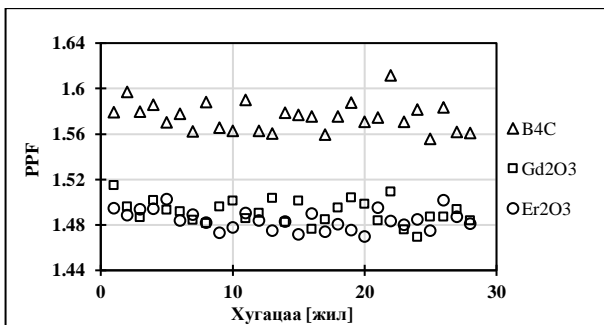


Зураг 4. ШШМ-уудыг Хэлбэр-1 дизайнтайгаар ачаалсан голомтын РАЭҮ-ийн хурдан нейтроны урсгал.

Голомтын төвийн эвлүүлэгт ШШМ ачаалж байгаа учир төвийн нейтроны урсгалд өөрчлөлт орсон.  $B_4C$ -ийн нейтрон шингээх макро хөндлөн огтлол бусад материалуудтай харьцуулахад их учир  $B_4C$ -г нэмсэн голомтын урсгал илүү буурсан. Харин  $Gd_2O_3$ ,  $Er_2O_3$  материалыг нэмсэн голомтын нейтроны урсгал ШШМ нэмээгүй голомттой харьцуулахад буурсан боловч  $B_4C$  харьцуулахад бага хэмжээгээр буурсан.

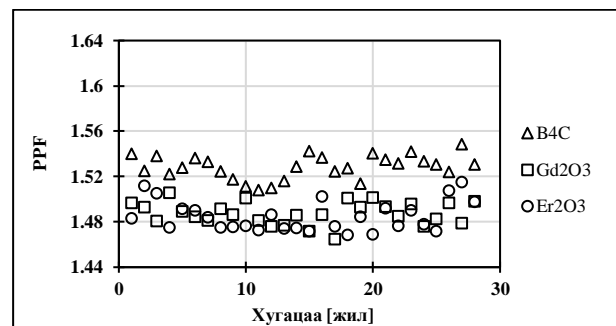
Зураг 5-д гурван өөр дизайнтайгаар ШШМ нэмсэн голомтуудын PPF-ын хугацааны өөрчлөлтийг харуулав.

голомтын PPF нь дунджаар 1.5 байна. Учир нь голомтод нэмсэн ШШМ-ууд нейтроны урсгалд нөлөөлж, цаашлаад голомтын чадлын түгэлтийн зөрүүг нэмэгдүүлсэн.

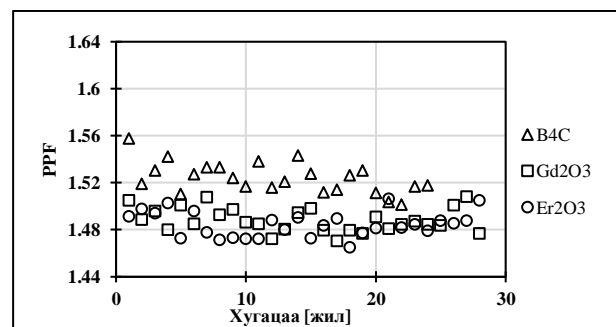


Зураг 5а. ШШМ-уудыг Хэлбэр-1 дизайнтайгаар ачаалсан голомтын чадлын пикийн факторын хугацааны өөрчлөлт.

Зураг 3-ийн харуулснаар ШШМ нэмээгүй Голомт-5-ын PPF нь реактор ажиллах хугацааны турш дунджаар 1.43 утгатай байсан. ШШМ-уудыг Хэлбэр-1 дизайнтайгаар голомтод ачаалахад  $B_4C$  бүхий голомтын PPF өсөж 1.6 орчим болсон бол  $Gd_2O_3$ ,  $Er_2O_3$  материалтай



Зураг 5б. ШШМ-уудыг Хэлбэр-2 дизайнтайгаар ачаалсан голомтын чадлын пикийн факторын хугацааны өөрчлөлт.



Зураг 5в. ШШМ-уудыг Хэлбэр-3 дизайнтайгаар ачаалсан голомтын чадлын пикийн факторын хугацааны өөрчлөлт.

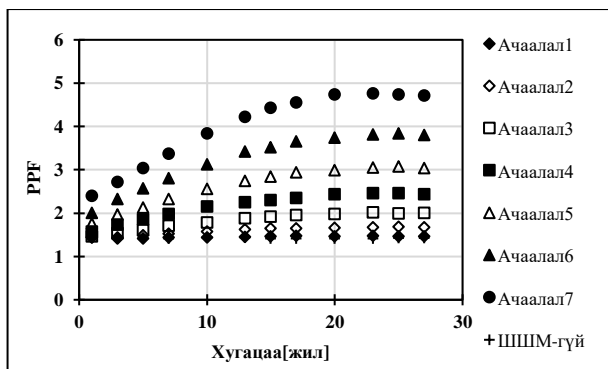
Хэлбэр 2 болон Хэлбэр 3-аар ШШМ-г нэмсэн голомтын PPF-ийн утга ойролцоо буюу  $B_4C$

материал нэмсэн голомтын дундаж PPF-н утга 1.54 орчим байсан ба нөгөө хоёр материалын хувьд тус тус 1.49 болон 1.51 гэсэн утгатай байна. Хоёр материалын PPF-ийн зөрүүг нарийвчлан харвал  $\text{Er}_2\text{O}_3$  нэмсэн голомтын PPF хамгийн бага байна.

ШШМ нэмэхэд голомтын PPF нэмэгдэж, анхны илүүдэл реактивити буурч,  $t_{\text{голомт}}$  багасаж, циклийн төгсгөлийн түлшний шаталтын утга буурсан. Тиймээс бидний загварчилсан хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторт эдгээр ШШМ ашиглах нь нейтроникийн болоод аюулгүй байдлын зүгээс давуу тал болж Хүснэгт 6. Голомтын төвийн эвлүүлэгт  $\text{NpN}$  савааг ачаалсан тооцооллын үр дүн.

	$\text{NpN}$ савааны тоо	РАЭҮ-ийн $K_{\text{эфф.0}}$	$\Delta k/k_{\text{ХИУ}}$	$t_{\text{голомт}}$ (ЖИЛ)	Циклийн төгсгөлд түлшний шаталт [ГВт*өдөр/тн]	$V(\text{NpN})$ [см <sup>3</sup> ]
ШШМ-гүй голомт	-	1.0118±0.0004	0.0118	12	39.679	
Ачаалал1	7	1.0111±0.0004	0.0111	11	36.373	324.9
Ачаалал2	19	1.0102±0.0004	0.0102	11	36.363	881.9
Ачаалал3	37	1.0086±0.0004	0.0086	13	42.965	1717.5
Ачаалал4	61	1.0083±0.0004	0.0083	13	68.477	2831.6
Ачаалал5	91	1.0076±0.0004	0.0076	16	52.841	4224.2
Ачаалал6	127	1.0072±0.0004	0.0072	18	59.544	5895.3
Ачаалал7	169	1.0070±0.0004	0.0070	22	72.58	7845

Үр дүнгээс харахад  $\text{NpN}$  савааны тоо нэмэгдэхэд  $\text{NpN}$ -ийн эзлэхүүн нэмэгдэж анхны илүүдэл реактивити багассан. Харин голомтын  $t_{\text{голомт}}$  болон циклийн төгсгөлд түлшний шаталтын утга нэмэгдэж нейтроник үзүүлэлтүүд сайжирсан боловч PPF-ын үр дүнд эсрэгээрээ нөлөөлсөн (Зураг 6).



Зураг 6. Голомтын төвийн эвлүүлэгт  $\text{NpN}$  түлш ачаалсан голомтын чадлын пикийн факторын тооцооллын үр дүн.

Төвийн эвлүүлгийн  $\text{NpN}$  түлштэй савааны тоо нэмэгдэхэд РАЭҮ-д голомтын төв хэсгийн үйлдвэрлэх чадал багасаж, захын эвлүүлгийн үйлдвэрлэх чадлын хэмжээ ихэсдэг. Харин

чадахгүй байна. Тиймээс голомтын анхны илүүдэл реактивитиг дарах өөр аргуудыг судалж үзэх шаардлагатай болсон. МА-уудыг ШШМ болгон ашиглаж болдог учраас МА-уудыг ашиглаж голомтод хэрхэн нөлөөлж байгааг судалсан.

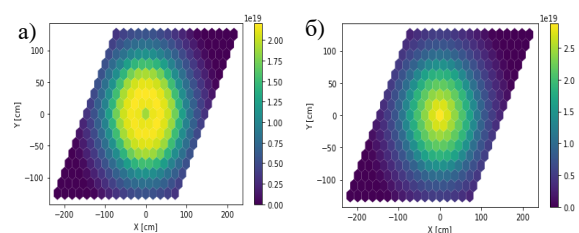
### 3.3. $\text{NpN}$ түлш нэмсэн тооцооллын үр дүн

Голомтын хамгийн их чадал голомтын төвд үүсэж байгаа учир тооцооллын эхний хэсэгт голомтын төвийн эвлүүлэгт  $\text{NpN}$  савааг хэд хэдээр нь нэмж нөлөөг судлав. Уг тооцооллын үр дүнг Хүснэгт 6-д өгсөн ба Зураг 6-д PPF-ын хугацааны өөрчлөлтийг харуулав.

РАСҮ-д төвийн эвлүүлгийн үйлдвэрлэх чадал нэмэгдэж захын эвлүүлгүүдийн үйлдвэрлэх чадал буурдаг. Учир нь реакторын ажиллагааны турш  $^{237}\text{Np}$  изотоп нейтрон шингээж, улмаар доорх (1.2) задралын схемд харуулсанчлан  $^{238}\text{Pu}$ -ийг үүсгэх учир голомтын төвийн эвлүүлэгт хуваагдагч изотопын хэмжээ нэмэгддэг.

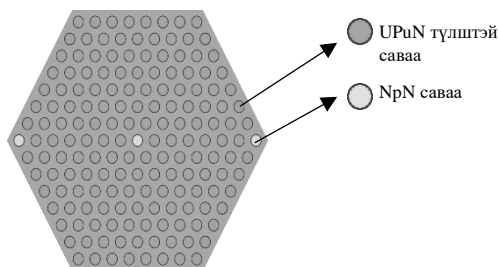


Ачаалал 7 буюу 169  $\text{NpN}$  саваатай төвийн эвлүүлэгтэй голомтын РАЭҮ болон РАСҮ-ийн нейтроны урсгалын түгэлтийг Зураг 7-д харуулав. Уг голомтын  $\text{NpN}$  бүхий төвийн эвлүүлэгт нейтроны урсгал эхэндээ бага байснаа 27 жилийн дараа буюу РАСҮ-д нэмэгдэж байна.



Зураг 7. Ачаалал 7-н голомтын нейтроны урсгал а) РАЭҮ-д б)РАСҮ-д.

Голомтын зөвхөн төвийн эвлүүлэгт NpN савааг цөөн цөөн нэмэхэд PPF нэмэгдэж байгаа учир уг савааг төвийн нэг эвлүүлэгт бус, голомтын олон эвлүүлэгт ачаалж, тэдгээрийг тэгш хэмтэйгээр голомтод ачаалсан. Ингэхдээ түлшний нэг эвлүүлэгт NpN-ийн гурван савааг Зураг 8-д харуулснаар ачаалсан.

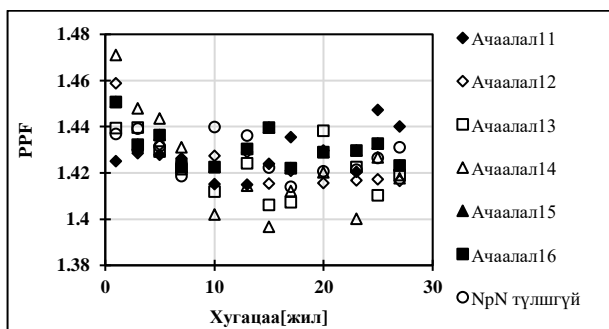


Зураг 8. NpN-ийн гурван савааг ачаалсан түлшний эвлүүлэг.

Хүснэгт 7. Гурван NpN саваатай эвлүүлгийг голомтод ачаалсан загварууд ба харгалзах нейтроник анализын үр дүн.

	Гурван NpN саваатай эвлүүлгийн тоо			РАЭҮ-ийн $K_{эфф.0}$	$\Delta k/k_{хиу}$	$t_{голомт}$ (жил)	Циклийн төгсгөлд түлшний шаталт [ГВт*өдөр/тн]	V(NpN) [см <sup>3</sup> ]
	1-р бүс	2-р бүс	3-р бүс					
ППМ-гүй голомт	-	-	-	1.0118±0.0004	0.0118	12	39.679	
Ачаалал11	1			1.0117±0.0004	0.0117	12	37.804	139.26
Ачаалал12	7			1.0099±0.0004	0.0099	12	39.668	974.82
Ачаалал13	19			1.0065±0.0004	0.0065	12	39.649	2645.95
Ачаалал14	37			1.0027±0.0004	0.0027	10	33.017	5152.64
Ачаалал15	37	24		0.9983±0.0004	-0.0016	-	-	9468.76
Ачаалал16	37	24	30	0.9922±0.0004	-0.0078	-	-	16236.66

Энэ нь ойролцоо эзлэхүүнтэй Ачаалал4 буюу төвийн эвлүүлгийн 61 саваанд NpN түлш ачаалсан дизайнтай харьцуулахад нейтроник үзүүлэлтүүд ойролцоо боловч PPF бага байна. Тодорхойлбол, Ачаалал4-н хамгийн их PPF нь 2.43 утгатай бол Ачаалал13-д тухайн утга 1.42 байсан.

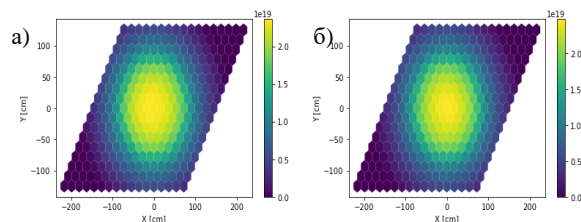


Зураг 9. NpN-ийн гурван саваатай эвлүүлгийг давхарга давхаргаар нэмсэн голомтын чадлын пикийн факторын тооцооны үр дүн.

NpN саваатай эвлүүлгийг голомтод зургаан загвараар ачаалсан (ачаалал11-16) ба эдгээр голомтын нейтроник тооцооллын үр дүнг Хүснэгт 7 болон Зураг 9-д үзүүлэв.

NpN түлшийг ачаалсан эвлүүлгийн тоо нэмэгдэхэд голомтын РАЭҮ-ийн  $K_{эфф.0}$  буурсан ба  $t_{голомт}$  өөрчлөгдөөгүй. Гэвч түлшний эвлүүлгийн тоо нэмэгдэж 61 (Ачаалал 15) болон 91 (Ачаалал 16) болоход голомт критик нөхцөлд хүрээгүй (Хүснэгт 7). Ачаалал13 буюу 1-р бүсийн 19 түлшний эвлүүлэгт NpN-ийн гурван саваа нэмсэн үед үндсэн голомтын  $t_{голомт}$  өөрчлөгдөхгүй боловч анхны илүүдэл реактивити 0.0065 болж багассан. Түүнчлэн эдгээр голомтын PPF-ын утга бүгд NpN түлшгүй голомтын утгаас бага байна (Зураг 9).

NpN түлшийг жигд ачаалсан Ачаалал 13-ийн РАЭҮ болон РАСҮ-ийн голомтын нейтроны урсгалыг Зураг 10-д харуулсан. NpN түлшийг голомтод жигд ачааллахад нейтроны урсгал голомтын төвд их байгаа ба энэ хандлага реакторын ажиллах хугацааны турш хадгалагдаж байна.



Зураг 10. Ачаалал 13-н голомтын нейтроны урсгал а) РАЭҮ-д б) РАСҮ-д.

Эдгээр үр дүнгээс харахад NpN түлшийг нэгэн дор их хэмжээгээр бус голомт даяар жигд ачаалахад нейтроник үзүүлэлт муудахгүйгээр аюулгүйн шинж чанар нь сайжирч байна.



**ДҮГНЭЛТ**

100 МВт чадалтай хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын чадлын түгэлтийг жигдлэх болон анхны илүүдэл реактивитиг дарах тооцооллыг хийж дараах дүгнэлтүүдэд хүрлээ.

1. 100 МВт чадалтай хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын чадлын түгэлтийг жигдэлж, чадлын пикийн факторыг багасгахын тулд голомтыг харгалзан 37, 24, 30 тооны эвлүүлгүүдтэй 3 бүс болгон хуваасан. Ингэхэд тэдгээр бүс дэх түшний савааны радиусын зөрүү 0.05 см байхад чадлын пикийн факторын утга хамгийн бага буюу 1.4 утгатай байв.
2. Голомтын төвийн эвлүүлэгт  $\text{V}_4\text{C}$ ,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Er}_2\text{O}_3$ , гэсэн уламжлалт ШШМ-уудыг гурван өөр хэлбэрээр ачаалж анализ хийхэд  $\text{V}_4\text{C}$  нейтроныг их шингээж анхны илүүдэл реактивитиг хамгийн сайн дарсан.
3. Голомтод уламжлалт ШШМ нэмэхэд анхны илүүдэл реактивитиг бууруулж байгаа боловч голомтын PPF-т муугаар нөлөөлж байгааг олж тайлбарлав.
4.  $\text{NpN}$ -ийг голомтын зөвхөн төвийн эвлүүлэгт нэмэхэд нейтроник үзүүлэлтэд сайнаар нөлөөлж байгаа боловч PPF-ийн утгыг 5 хүртэл нэмэгдүүлсэн.
5.  $\text{NpN}$ -ийг голомтод нэг дор их хэмжээгээр биш нэгэн жигд ачаалахад голомтын ажиллах хугацаа өөрчлөгдөхгүй ч анхны илүүдэл реактивити сайн дарагдаж, PPF-ийн хэмжээ буурч байгааг олсон.

**ТАЛАРХАЛ**

Энэхүү ажлын бүх тооцооллыг МУИС-ийн Цөмийн Физикийн Судалгааны Төвд байрлах МИНАТО-СЕРВЕР дээр хийж гүйцэтгэв. Мөн энэхүү ажил нь “Монголд тохиромжтой дэвшилтэт цөмийн реакторын харьцуулсан судалгаа” сэдэвт төслийн хүрээнд хийгдсэн бөгөөд санхүүжүүлсэн БСШУСЯ, Шинжлэх ухаан, технологийн санд талархал илэрхийлье.

**АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ**

- [1] GEN-IV. International Forum, Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems, 2014.
- [2] NEA and OECD, Handbook on Lead-Bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies. OECD, pp. 32-37, (2015).
- [3] Г.Нрантунгалаг. 100МВт чадалтай хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын нейтроникийн судалгаа. Монгол улс. (2019).
- [4] Leppanen, J. & et al. A Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, VTT Technical Research Centre of Finland. (2015).
- [5] OECD/NEA Data Bank. The JEFF-3.1.1 Nuclear Data Library, OECD/NEA Data Bank, (2009).
- [6] H. Khalil., M. J. Lineberry., J. E. Cahalan et al. Preliminary Assessment of BREST Reactor Design and Fuel Cycle Concept. U.S Department of Energy: USA, 2000.
- [7] V.S.Volkov, A.S.Luk'yanov, V.V.Chapkunov, V.P.Shevyakov, & V.S. Yamnikov. Use of Burnable poisons in nuclear reactors. Atomnaya Energiya, 11 (2), pp 109-125, (1961).
- [8] Salvatores M. Nuclear fuel cycle strategies including partitioning and transmutation. Nucl. Eng. Des.1235. pp. 805-816, (2005)
- [9] Timothee Kooyman, Laurent Buiron, Gerald Rimpault. A comparison of curium, neptunium and americium transmutation feasibility. Annals of Nuclear Energy. 112. Pp 748-758. (2018).
- [10] Hoai-Nam TRAN, Yasuyoshi KATO. Minor actinide transmutation as burnable poison and fuel in supercritical-CO<sub>2</sub>-cooled and Na-cooled fast reactor cores. International conference on Reactor Physics, Nuclear Power: A Sustainable Switzerland, September 14-19, 2008.