

Бага чадлын, хайлмал давсан хөргүүртэй реакторын

ГОЛОМТЫН ДИЗАЙНЫ НЕЙТРОНИК АНАЛИЗ

Т.Жамъянсүрэн^{a,b*}, С. Одмаа^{a,b}

^aЦөмийн физикийн судалгааны төв, Монгол улсын их сургууль

^bИнженер технологийн сургууль, Монгол улсын их сургууль

t.jamiyansuren@num.edu.mn

Энэхүү ажлаар 100 МВт дулааны чадалтай, хоёр урсгалтай Хайлмал Давсан Хөргүүртэй Үржүүлэгч Реактор (MSBR)-ын голомтын дизайныг хийж, Serpent кодоор нейтроник анализыг гүйцэтгэв. Тооцооллын үр дүнгээс харахад реактор нь бал чулуун удаашруулагчийн нөлөөгөөр дулааны нейтроны спектрээр ажиллаж, ²³²Th-ийн резонансын шингэлтийг ашиглан түлш үржүүлэх боломжтойг харуулж байна. Реактор ажиллаж эхлэх үед $k_{\text{эф},0} = 1.28 \Delta k/k$ байсан хэдий ч, түлш сэлгэлтгүй (batch) горимд ажиллахад ²³³Pa- изотопын хагас задралын хугацаа, голомтод үүсэж буй хуваагдлын бүтээгдэхүүний нөлөөллөөс хамаарч 50 хоногийн дараа критикээс доогуур төлөвт орж байна. Гэвч хувиргалтын харьцаа (Conversion Ratio) хугацаа өнгөрөх тусам нэмэгдэж 1.0-ээс их байгаа нь уг реактор онолын хувьд түлш үржүүлэн шатаах боломжтой нь харагдаж байна.

Түлхүүр үг: хоёр урсгалтай хайлмал давсан хөргүүртэй үржүүлэгч реактор, Serpent код, хувиргалтын харьцаа, түлшээ үржүүлэн шатаах

I. ОРШИЛ

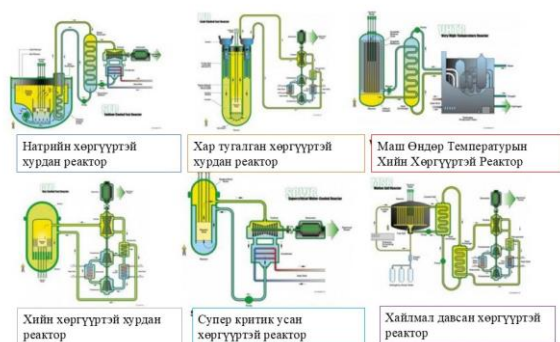
Хүн төрөлхтний хөгжил дэвшил, амьдралын чанар нь хямд бөгөөд хүртээмжтэй эрчим хүчнээс шууд хамааралтай. Гэвч өнөөдөр ашиглаж буй эрчим хүч үйлдвэрлэлийн дийлэнх нь дэлхийн уур амьсгалын өөрчлөлтөд нөлөөлж буй хүлэмжийн хийг ялгаруулж байна. Иймд эрчим хүчний хүртээмжийг нэмэгдүүлэх, үүний зэрэгцээ байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөллийг бууруулах гэсэн хоёрдмол сорилттой тулгарч байна. Сүүлийн жилүүдэд хиймэл оюун ухааны хэрэглээ, түүний хүрээнд өгөгдлийн төвийг ихээр байгуулж байгаа нь эрчим хүчний хэрэгцээ, шаардлагыг хурдацтайгаар өсгөн нэмэгдүүлж байна. Эрчим хүчний хэрэгцээтэй холбоотойгоор цөмийн эрчим хүчний реакторыг ашиглан эрчим хүч үйлдвэрлэх, реакторыг шинээр барих, шинэ төрлийн реакторыг зохион бүтээх ажлыг төрийн болон хувийн компаниуд их сургуулиудтай хамтран гүйцэтгэж байна.

Цөмийн эрчим хүч нь хүлэмжийн хий ялгаруулдаггүй онцлогоороо хүн төрөлхтөнд тулгараад буй дэлхийн дулаарал, уур амьсгалын өөрчлөлтийг зогсооход чухал ач холбогдолтой болохыг олон улсын эрдэмтэн, судлаачид онцолдог ба энэ нь цаашлаад эрчим

хүчний хямд эх үүсвэр, олон талын зориулалтаар ашиглаж болох зэргээрээ эрчим хүчний бусад эх үүсвэрээс давуу талуудтай. Өнөөгийн цөмийн эрчим хүчний салбарт зонхилж буй Хөнгөн усан реактор (LWR) нь нүүрстөрөгчийн ялгарал багатай ч өөр олон томоохон сорилттай тулгарсаар байна. Тухайлбал, одоогийн реактор нь байгалийн ураны нөөцийн маш бага хэсгийг ашигладаг бөгөөд урт хугацаанд цацраг ялгаруулдаг хаягдлыг ихээр үйлдвэрлэдэг. Түүнчлэн Three-mile island, Чернобылийн, Фүкүшима Daiichi реакторын зэрэг томоохон ослоуд нь цөмийн эрчим хүчний аюулгүй байдалд олон нийтийн итгэх итгэлийг бууруулсан. Эдгээр асуудлыг шийдвэрлэхийн тулд "IV үеийн" (Generation IV) гэж нэрлэгддэг шинэ үеийн цөмийн реакторын үзэл баримтлалыг хөгжүүлж эхэлсэн. Цөмийн реактор нь зөвхөн эрчим хүчийг тогтвортойгоор үйлдвэрлээд зогсохгүй хүн, байгаль орчинд аюулгүй, байгалийн нөөцийг үр ашигтайгаар ашиглаж, хаягдал бага үүсгэх зэрэг үндсэн шаардлагуудыг хангаж чаддаг. Тиймээс ч эдийн засгийн үр ашигтай, аюулгүй байдлын хувьд баталгаатай, багахан түлш ашиглан хэрэгцээт эрчим хүчийг үйлдвэрлэдэг, цөмийн хаягдлын хэмжээ бага мөн цөмийн зэвсгийг үл дэлгэрүүлэх

онцлогтой дизайн бүхий дэвшилтэт цөмийн реакторын судалгааг өнөөг хүртэл хийж байна.

Дараах зургаан дизайныг дээрх шаардлагуудыг ханган ирээдүйн эрчим хүчний хэрэгцээг үйлдвэрлэж чадна гэж үзээд дэвшилтэт буюу "IV үеийн" реакторууд гэж үзэж байна. Үүнд Маш өндөр температурын реактор (VHTR), Хийн хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор (GFR), Натри хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор (SFR), Хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор (LFR), Суперкритик усан хөргүүртэй реактор (SCWR), Хайлмал давсан хөргүүртэй реактор (MSR) орно[1-2]. Реактор тус бүрийн ерөнхий схемийг Зураг 1-д өгөв.



Зураг 1. "IV үеийн" цөмийн эрчим хүчний реактор системийн бүдүүвч.

Эдгээрээс хайлмал давстай цөмийн реакторууд (MSR) нь Дэвшилтэт IV үеийн цөмийн эрчим хүчний реактораас хамгийн ирээдүйтэй хувилбарын нэгээр тооцогддог. Тэдгээрийн давуу тал нь өндөр температурт ажиллах боломж, дулааны үр ашиг өндөр, онлайнар түлш боловсруулах ба задралын бүтээгдэхүүнийг багасгах боломж, мөн эрчим хүчний аюулгүй ажиллагааг үндсээр нь шинэ түвшинд хүргэх онцлог шинжүүдтэй [3]. Манай орны тохиолдолд хамгийн гол тулгардаг асуудал нь хөрөнгө оруулалт болон усны нөөцийн асуудал. Тиймээс ч их чадлын болон усан хөргүүртэй реактор сонгохоос зайлсхийж бага чадлын буюу 100-300 МВт чадалтай, хий эсвэл металл хөргүүртэй эрчим хүчний реактор нь илүү тохиромжтой гэж бид үзэж байна. Бид өмнө нь 100 МВт дулааны чадалтай төвдөө ойлгогчтой, задралын дулааныг идэвхгүйгээр зайлуулах шинж чанартай Өндөр температурын хийн

хөргүүртэй (HTGR) реакторын голомтын дизайныг хийж, критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэж нейтроникийн, дулааны гидравликийн үзүүлэлтийг гарган авсан [4-7]. Тиймээс энэ удаад өмнөх судалгааны ажлын туршлага дээр үндэслэж шингэн төлөвт буй хайлмал давсыг хөргүүр болон түлшний зориулалтаар ашигладаг хайлмал давсан реакторыг сонгон Монголд тохиромжтой эсэхийг судалж байна. Энэ ажлын онцлог нь Монголд өмнө нь судлагдаж байгаагүй, хайлмал давсан реакторын голомтын дизайныг анх удаа гүйцэтгэх, дулааны чадлыг 100 МВт болгон багасгаж, түлшний нийт эзлэхүүнийг бууруулснаар хаягдлын хэмжээг багасгах, түүнчлэн манай оронд тохиромжтой дараагийн реакторын дизайныг хөгжүүлэх боломжийг эрэлхийлж буйд оршино. Энэ ажлын зорилго нь 100 МВт дулааны чадалтай, хоёр урсгалтай MSBR-ын голомтын дизайныг хийж, нейтроник үзүүлэлтийг гарган авах юм. Энэхүү өгүүллийн II бүлэгт судалгааны арга зүй, MSBR реакторын үндсэн үзүүлэлт болон тооцооллыг нөхцөлийг, III бүлэгт нейтроникийн тооцооллын үр дүн болох критик байдал, хувиргалтын харьцаа болон нейтроны энергийн спектр зэргийг харуулав.

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

II.1 Хайлмал давсан хөргүүртэй үржүүлэгч реактор

MSR нь дэвшилтэт IV үеийн цөмийн эрчим хүчний реакторын хамгийн ирээдүйтэй хувилбарын нэг ба давуу тал нь өндөр температурт ажиллах боломж, дулааны үр ашиг өндөр, ажиллаж байх үеийн түлш цэнэглэлт ба задралын бүтээгдэхүүнийг зайлуулах боломж, мөн эрчим хүчний аюулгүй ажиллагааг үндсээр нь шинэ түвшинд хүргэсэн зэрэг юм. АНУ-ын Oak Ridge National Laboratory (ORNL)-д 1960-аад онд амжилттай туршсан Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) нь шингэн давсан түлш, бал чулуун удаашруулагч бүхий дулааны нейтроны спектртэй реакторын боломжийг нотолсон анхны бодит реактор байсан. Хайлмал давсан реактор нь шингэн төлөвт буй хайлмаг давсыг хөргүүр болон түлшний зориулалтаар ашиглагдаараа бусад реактораас эрс ялгаатай. Уламжлалт реактор нь хатуу түлш ашигладаг

бол MSR нь цөмийн түлшийг (уран, тори зэрэг) хайлмал давсанд уусгасан хэлбэрээр ашигладаг. Энэхүү технологи нь дараах үндсэн давуу талуудыг бий болгодог [8].

1. Аюулгүй байдал:

- Хатуу түлш нь цацрагийн болон температурын нөлөөгөөр хэврэгших, хөөх, гэмтэх зэрэг асуудал үүсдэг бол шингэн түлш нь цацрагийн нөлөөгөөр бүтцийн гэмтэл үүсдэггүй тул реакторын голомтод удаан хугацаагаар ашиглах боломжийг олгодог.

- Голомтын температур нэмэгдэх үед давсны нягт буурч, тэлэлт явагдсанаар илүүдэл дулааныг голомтоос идэвхгүй системээр зайлуулах боломжтой. Мөн реакторыг өндөр даралтгүйгээр, ердийн даралттай ойролцоо нөхцөлд (600°C-700°C) ажиллуулах боломжтой.

2. Түлшийг үр ашигтай шатаах ба хаягдлыг бууруулах:

- Түлшний битүү циклээр ажиллах боломжтой. Реактороос гаргасан ашигласан түлшийг дахин боловсруулж, бүх актинидыг (уран, плутоний гэх мэт) ялган авч голомтод дахин ашиглах боломжийг олгодог. Энэ процесс нь зөвхөн хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг хаягдалд үлдээдэг. Ингэснээр хаягдлын цацраг идэвхийг үл тооцох хугацааг 300,000 жилээс 300 жил хүртэл богиносгох боломжтой.

- Реактор ажиллаж байх үед үүссэн Хе мэтийн хий хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг тасралтгүй зайлуулах боломжтой. Хе хуваагдлын бүтээгдэхүүн нь нейтроныг залгин реакторыг үр ашигтай ажиллуулах боломжийг бууруулдаг тул тасралтгүй зайлуулснаар түлшийг үр ашигтай шатаах боломжтой болно.

3. Хөргүүр:

- Түлш өөрөө хөргүүрийн үүрэг гүйцэтгэдэг тул дулаан дамжууллын асуудлыг шийдвэрлэж, реакторын голомтын төвөгтэй хийцийг илүү хялбар болгодог. Хатуу түлш нь ихэнх тохиолдолд илүүдэл дулаанаа дулаан дамжуулал болон цацаргалтаар голомтоос зайлуулдаг бол шингэн түлш нь өөрийн конвекцийн урсгалаар дулаанаа зайлуулж чаддаг. Энэ нь дулаан солилцоог илүү үр ашигтай болгодог.

- Уламжлалт реакторын түлшний бүрээс нь түлш ба хөргүүр хоорондын дулаан дамжууллыг хязгаарладаг талтай. Харин хайлмал давсан реакторын түлш нь шингэн төлөвт байдаг тул шууд дулаан зөөгч болдог. Түүнчлэн хайлмал давс нь шингэн металл болон хийн хөргүүртэй харьцуулахад дулаан багтаамж өндөртэй байдаг тул реакторын голомтын температурыг тогтвортой барих боломжийг нэмэгдүүлдэг.

Энэхүү судалгаанд шингэн түлштэй, бал чулуун удаашруулагч/ойлгогчтой, хоёр өөр шингэний урсгалтай үржүүлэгч реакторын сонгодог загвар болох Хайлмал давсан хөргүүртэй үржүүлэгч реактор (MSBR(2f))–ын голомтын дизайныг [9] жишиг загвар болгон авсан. Уг реактор нь тори-уран (Th-U)-ы битүү циклтэй, түлш үржүүлэн шатаах коэффициент өндөр, урт настай цацраг идэвхт хаягдлын хэмжээг хамгийн бага түвшинд байлгах боломжтой IV үеийн реакторын нэг загвар юм.

Уг реакторын үндсэн үзүүлэлтийг Хүснэгт 1-д, харин голомтын геометр хэмжээс болон материалын найрлагыг Хүснэгт 2-т тус тус үзүүлэв.

Хүснэгт 1. MSBR(2f) реакторын үндсэн үзүүлэлтүүд [9]

| | |
|---------------------------------------|---|
| Дулааны чадал, МВт | 100 |
| Дулааны үр ашиг (АҮК), % | 43–45 |
| Хөргүүр | Түлшний давс (LiF-BeF ₂ -ThF ₄ -UF ₄) |
| Хөргүүрийн урсгал | Шахуурга + байгалийн конвекц |
| Түлш | UF ₄ (²³³ U) |
| Үржүүлэгч материал | ThF ₄ (²³² Th) |
| Удаашруулагч | Реакторт зориулсан тусгай зориулалтын бал чулуу |
| Реакторын голомтын их биеийн материал | Никель суурилсан хайлш (Hastelloy-N) |
| Ажиллагааны температур, °C | 650–700 |
| Ажиллагааны даралт | ≈ 1 бар (атмосфер) |

MSBR-т шингэн төлөвт буй фторын давсыг түлш болон хөргүүр болгон ашигладаг. Энэ нь уламжлалт хатуу түлшний бүрээс материалаас үүсэлтэй дулаан дамжууллын хязгаарлалтыг арилгаж өндөр температурт тогтвортой ажиллах боломжийг бүрдүүлдэг. Реакторын систем нь ердийн даралтанд

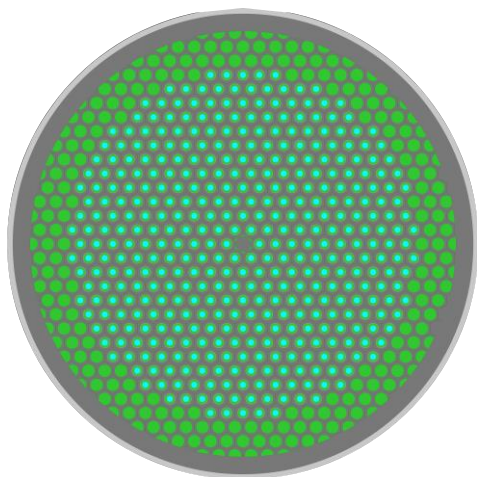
ажилладаг тул голомтод үүсэх өндөр даралтаас үүсэх ослын эрсдэлийг бууруулдаг давуу талтай.

Хүснэгт 2. Голомтын геометр хэмжээс [9]

| | |
|--|---------|
| Голомтын өндөр, м | 4.04 |
| Голомтын диаметр, м | 3.05 |
| Үржүүлэгч бүсийн зузаан, м | 0.38 |
| Ойлгогчийн зузаан, м | 0.15 |
| Түлшний давсны нийт эзлэхүүн, м ³ | 10.5 |
| Үржүүлэгч давсны эзлэхүүн, м ³ | 19.9 |
| Түлшний сувгийн дундаж радиус, см | 5–7 |
| Графитын эзлэх хувь, % | ≈ 85 |
| Давсны эзлэх хувь, % | ≈ 15 |
| ²³³ U-ийн анхны хэмжээ, кг | ≈ 253 |
| ²³² Th-ийн анхны хэмжээ, тн | ≈ 40–50 |

II.2. ТООЦООЛЛЫН НӨХЦӨЛ

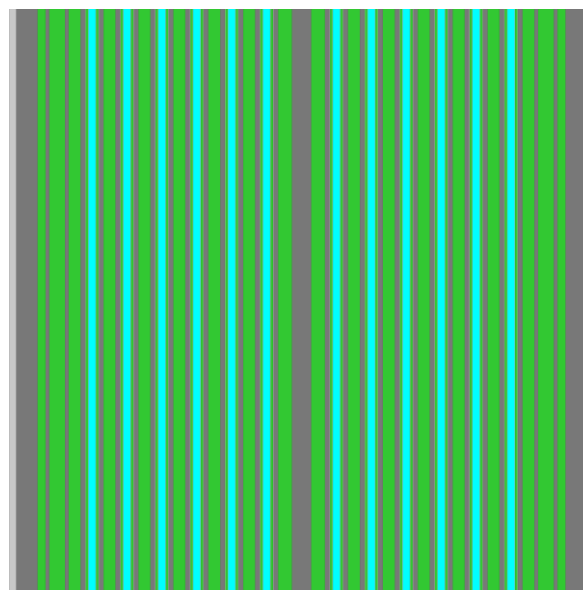
Бидний тооцооллодоо ашигласан хайлмал давсан хөргүүртэй реакторын дизайныг анх АНУ-ын Оак Ридж лабораторид хөгжүүлсэн. Тухайн үед түлш болон үржүүлэгч давсыг тусгаарлах материалын технологийн хязгаарлагдмал байдлаас шалтгаалан MSBR-ийн хоёр урсгалтай загварчлал зогсож, улмаар нэг урсгалтай дизайны хөгжүүлэлт зонхилох болсон. Гэвч 2000-аад оноос хойш материалын технологийн судалгаанд гарсан дэвшил, ялангуяа түлш тусгаарлагч материалын чанар сайжирснаар хоёр шингэний урсгалтай загварыг дахин хөгжүүлж эхэлсэн [8].



Зураг 2. Голомтын хөндлөн зүсэлт

Тиймээс анхны загвар болох түлш, үржүүлэгч материал нь тусдаа сувгаар урсдаг, хоорондоо тусгаарлагчтай реакторын голомтын дизайныг хийж Монте Карло аргад суурилсан SERPENT 2.1.30 [10] кодыг ашиглан нейтроник анализыг

гүйцэтгэв. Тооцоололд ENDF-B/VII [11] цөмийн өгөгдлийн санг ашиглав. Монте Карло арга нь голомтод үүссэн нейтроноор явагдах харилцан үйлчлэлийг санамсаргүйгээр тооцдог тул тооцооллыг хамгийн оновчтой нөхцөлийг бодлого тус бүрд тогтоох шаардлагатай байдаг. Тооцооллын статистик алдааг хангалттай бага байлгахын тулд нэг удаагийн тооцоололд нейтроны нийт 1 сая (10000×100) харилцан үйлчлэлийг авч үзсэн. Голомтын дизайны хөндлөн болон босоо зүсэлтийг Зураг 2 ба Зураг 3-т өгөв.



Зураг 3. Голомтын босоо зүсэлт

Эдгээр зурагт түлшний бүсийг цайвар ногоон өнгөөр дүрсэлсэн ба энэ нь зургаан өнцөгт нэг түлшний үүрт байрлах, ²³³U-аар баяжуулсан түлшний давс болно. Харин үржүүлэгчийн бүс нь ногоон өнгөтэй ба түлшний сувгийн гадна талаар урсах ²³²Th агуулсан байна. Мөн саарал өнгөөр удаашруулагчийг харуулсан ба бал чулуун матриц болно.

III. НЕЙТРОНИК АНАЛИЗ

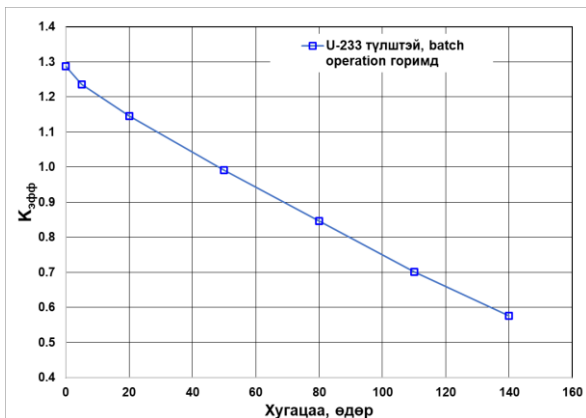
Голомтын нейтроник тооцооллыг гүйцэтгэхдээ түлш болон давсны найрлагыг өөрчлөөгүй боловч реакторын түлш ашиглалтын нөхцөлийг өөрчилсөн. Өмнөх ижил төстэй судалгаануудад [12,13] дурдсанаар реактор ажиллах үеийн горим нь түлшний шаталтаас үүсэх хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүд болох ¹³⁵Xe, ¹⁴⁹Sm-ийг ялган авч ²³²Th-ийг түлшний давсанд нэмэх байдлаар тооцооллыг гүйцэтгэсэн байдаг. Бидний тохиолдолд реакторын анхны нейтроник

үзүүлэлтүүдийг тодорхойлох зорилгоор ямар нэг нэмэлт процессыг хийхгүйгээр тооцооллын нөхцөлөө сонгосон ба бүх тооцооллыг түлш сэлгэлтгүй горимд хийгдсэн.

Реактор нь ажиллаж байх нийт хугацаандаа критик төлөвт байх шаардлагатай. Ингэснээр реактор тасралтгүй ажиллах үндсэн нөхцөлийг хангаж байна гэж үздэг ба голомтод үүсэж байгаа болон алдагдаж (шингэх болон гоожих замаар) байгаа нейтроны харьцангуй хэмжээгээр илэрхийлэгдэнэ. Эффектив нейтрон үржүүлэх факторыг дараах томъёогоор тооцоолдог:

$$K_{\text{эфф}} = \frac{\text{Голомтод үүссэн нейтроны тоо}}{\text{Голомтоос алдагдсан нейтроны тоо}}$$

Анх ачаалсан түлшээр ажиллах реакторын реактивити хугацаа өнгөрөхөд хэрхэн өөрчлөгдөхийг Зураг 4-т харуулав.



Зураг 4. MSBR-ын голомтын нейтрон үржүүлэх эффектив факторын утга ажиллах хугацаанаас өөрчлөгдөх нь

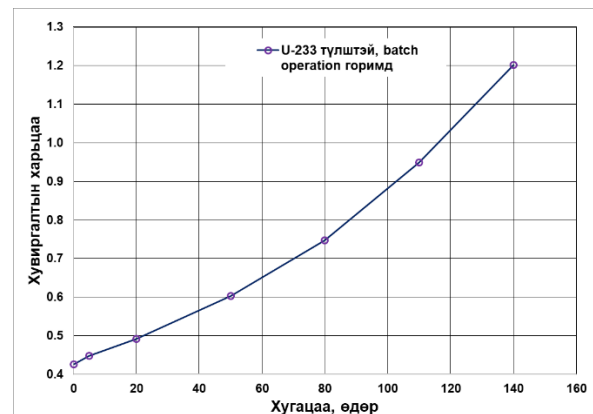
Тооцооллын үр дүнгээс харахад реактор ажиллаж эхлэх үеийн эффектив нейтрон үржүүлэх фактор ($K_{\text{эфф}}$) 1.2778 ± 0.0009 байна. Анх реакторын голомтод ачаалсан ^{233}U реакторыг асаахад хангалттай хэмжээний илүүдэл реактивити үүсгэж чадаж байна. Гэсэн хэдий ч 50 хоног ажилласны дараа $K_{\text{эфф}} < 1$ бага болж байна. Реактор ажиллаж эхлэх үед $K_{\text{эфф}} > 1$ байгаа нь реакторын үржүүлэгч хэсэгт байх ^{232}Th изотоп дээр нейтрон тусаж түлшийг үржүүлэх процессыг эхлүүлэхэд хангалттай ба голомтод үүсэж буй ^{135}Xe , ^{149}Sm гэх мэт нейтрон залгих хуваагдлын бүтээгдэхүүний шимэгч нөлөөг давахад тустай. Энэхүү хоёр урсгалтай MSBR дизайны нейтроник анализыг SERPENT кодоор гүйцэтгэсэн үр дүн нь Rykhlevskii [13] нарын

жишиг дизайн дээр суурилсан ба нейтроник параметруудийн тооцооллын үр дүнтэй хэлбэрийн хувьд төстэй байна. Тухайлбал, түлш сэлгэлтгүй горимд ажиллах үед ^{135}Xe -ийн хордлогоос хамаарч $K_{\text{эфф}}$ огцом буурч байгаа зүй тогтол нь бусад ижил төстэй судалгаагаар батлагдаж байна.

Энэ төрлийн реакторт хуваагдахуйц изотоп нь хуваагдагч изотоп болон хувирч байгааг илэрхийлэх “хувиргалтын харьцаа (XX)-ийг олох нь чухал. $XX > 1.0$ байх нь эдийн засгийн хувьд байгалийн нөөцийг бүрэн ашиглах боломжийг олгохоос гадна, реактор ажиллаж байх хугацаанд реактивитийг урт хугацаанд тогтвортой байлгах, аюулгүй байдлыг хангах үндэс болдог. Хувиргалтын харьцааг дараах харьцаагаар олдог:

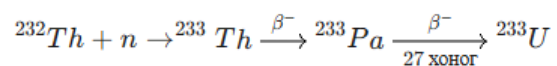
$$XX = \frac{\text{үүсэж байгаа хуваагдагч материалын хэмжээ}}{\text{шатаж байгаа хуваагдагч материалын хэмжээ}}$$

Тооцооллоор гарган авсан хувиргалтын харьцаа хугацаа өнгөрөхөд хэрхэн өөрчлөгдөхийг Зураг 5-д өгөв.



Зураг 5. Хувиргалтын харьцааны өөрчлөлт

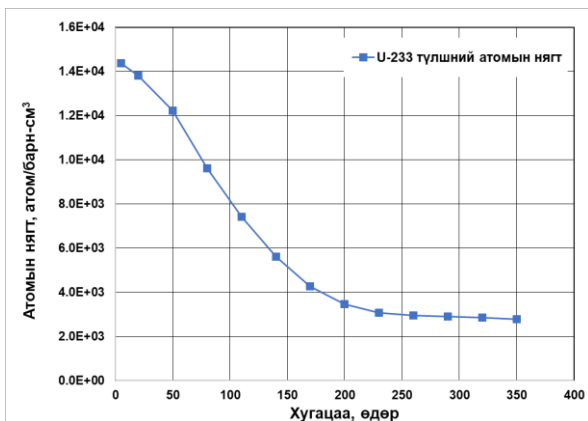
Үр дүнгээс харахад XX нь реактор ажиллаж эхлэх үед 0.43 байсан бол хугацаа өнгөрөх тусам тасралтгүй өсөж 115 дэх өдөр $XX > 1.0$ болсон байна. Торийн циклд түлш үржих процесс нь дараах гинжин урвалаар явагдана:



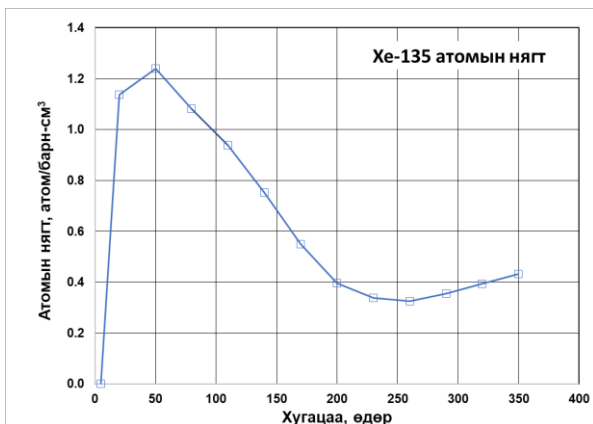
Эндээс харахад үржүүлэгч дэх торийн изотоп нейтрон шингээсний дараа шууд хуваагдагч түлш ^{233}U -ийг үүсгэхгүй ба 27 хоногийн хагас задралын хугацаатай ^{233}Pa -ыг эхлээд үүсгэж байна. Реактор ажиллаж эхлэх үед $XX = 0.43$ байгаа нь үржүүлэгчид хангалттай хэмжээний

^{233}Pa хуримтлагдаж амжаагүй, мөн хуримтлагдсан нь задарч ^{233}U болж амжаагүй байгааг харуулж байна. Тиймээс реактор ажиллах эхний 30-50 хоногт шинэ түлшний үүсэх хурд нь шатах хурдаа гүйцэхгүй байгаа тул үүний нөлөөгөөр $k_{\text{эфф}} < 1$ бага болж байна. Үүний шалтгааныг тайлбарлахын тулд голомтод үүссэн ^{233}U , ^{135}Xe изотопын хэмжээ болон нейтроны урсгалыг авч үзье.

Түлшний шаталтын үр дүнгээс харахад реакторын голомтод байх ^{233}U түлшний хэмжээ эрс буурсан ба реактор ажиллаж эхлэх үед голомтод ачаалсан түлшний хэмжээ 14.4 кг байсан бол $k_{\text{эфф}} \approx 1$ болох үе буюу 50 дахь хоногт 9.6 кг болсон ба 80 дахь хоногт анх ачаалсан түлшний 50% нь шатаж дууссан байна. Үүнээс харахад голомтын үржүүлэгч бүс дэх торийн үржүүлэх процесс нь ^{233}U түлшний шаталтын хурдыг нөхөж чадахгүй байгааг харуулж байна. ^{233}U изотопын атомын нягтын хугацааны хамаарлыг Зураг 6-д өгөв.



Зураг 6. ^{233}U изотопын атомын нягтын хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт

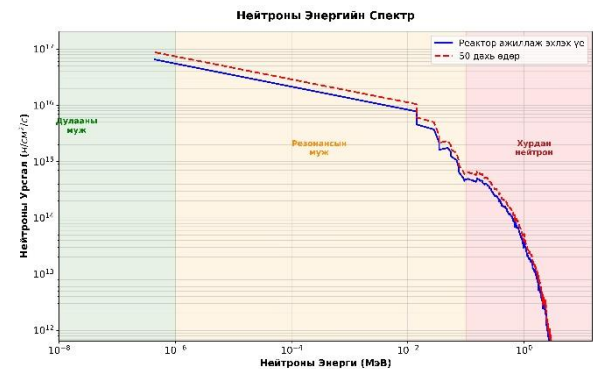


Зураг 7. ^{135}Xe изотопын атомын нягтын хугацаанаас хамаарсан өөрчлөлт

Түүнчлэн голомтод хуримтлагдсан ^{135}Xe изотопын хуримтлалыг реактор ажиллах хугацааны мужид авч үзэхэд (Зураг 7) реактор ажиллаж эхэлснээс хойш 5 хоногт хамгийн өндөр буюу тэнцвэрт утгадаа хүрч цаашид тогтмол сөрөг нөлөө үзүүлж байна.

^{135}Xe изотоп нь голомтод ихээр хуримтлагдсанаар хуваагдах гинжин урвал тасралтгүй явах нөхцөлийг хязгаарлаж $k_{\text{эфф}} < 1$ бага болоход нөлөөлсөн ба энэ төрлийн реакторыг тогтвортой ажиллуулахын тулд хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг голомтоос тасралтгүй зайлуулах систем зайлшгүй шаардлагатайг харуулж байна.

Тооцооллоор гарган авсан реакторын голомт даяарх нейтроны энергийн спектрийг Зураг 8-д өгөв. Зургаас харахад тус реактор нь дулааны нейтроны спектрээр ажиллах горимтой болох нь тодорхой ажиглагдаж байна. Тухайлбал, энергийн $E < 1$ эВ мужид нейтроны урсгал хамгийн өндөр утгандаа хүрсэн ба бал чулуун удаашруулагч хурдан нейтроныг үр дүнтэйгээр удаашруулж чадаж байна.



Зураг 8. Реактор ажиллаж эхлэх болон 50 дахь өдрийн голомт даяарх нейтроны спектр

Түүнчлэн тухайн энергийн мужид нейтроны урсгал хамгийн өндөр байгаа нь ^{233}U түлшний хуваагдлын огтлол их байх нөхцөлийг бүрдүүлж, гинжин урвалыг тогтвортой явуулж байна. Үүнээс гадна 1 эВ - 100 кэВ энергийн мужид нейтроны урсгал огцом унасан ба үржүүлэгч бүс болон түлшинд агуулагдах ^{232}Th изотопын резонансын шингээлттэй шууд холбоотой юм. Энэ нь физик утгаараа нейтроны хорогдол байгаа мэт харагдавч MSBR-ийн хувьд $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$ хувиргалтын процесс буюу түлш үржүүлэх процесс идэвхтэй явагдаж буйг харуулж байна.

ДҮГНЭЛТ

1. Энэ ажилд 100 МВт дулааны чадалтай, хоёр урсгалтай MSBR-ийн голомтын дизайныг хийж, голомтын критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэв.
2. MSBR -ийн голомт нь бал чулуун удаашруулагч ашиглаж байгаа учраас дулааны нейтроны спектр нь харьцангуй өндөр ба дулааны энергитэй нейтроноор ^{233}U түлшийг үр дүнтэйгээр шатааж, резонансын энергитэй нейтроноор ^{232}Th изотопыг ^{233}U түлш болгон хувиргах (үржүүлэх) боломжтойг харуулж байна.
3. Реактор ажиллаж эхлэх үеийн илүүдэл реактивити өндөр буюу $k_{\text{эф},0} = 1.2778$ байгаа боловч түлш сэлгэлтгүй горимд ажиллахад 50 хоногийн дараа критикээс доогуур төлөвт шилжиж байна. Энэ нь тори-ураны циклийн онцлог болох ^{233}Pa -ийн хагас задралын хугацаа болон голомтод хуримтлагдах хуваагдлын бүтээгдэхүүний шимэгч залгилтаас үүдэлтэй болохыг харуулав.
4. Хувиргалтын харьцаа нь реактор ажиллах хугацааны явцад өсөж, 115 дахь хоногт 1.0-ээс давж байгаа нь уг реактор онолын хувьд түлш үржүүлэх бүрэн боломжтойг илтгэнэ. Гэвч реакторыг тогтвортой, урт хугацаанд ажиллуулахын тулд химийн боловсруулалтын системийг ашиглаж, хуваагдлын бүтээгдэхүүнийг тасралтгүй зайлуулах, шинээр үүссэн түлшийг ялган авч голомтод эргүүлэн оруулах горим тооцооллыг үргэлжлүүлэх шаардлагатай.
5. Цаашид уг судалгааг үргэлжлүүлэн, реакторын аюулгүй ажиллагааны параметруудийг тодорхойлох, химийн боловсруулалтын горимыг тооцож, түлш ачаалах, сэлгэх хурдыг оновчлох замаар реакторыг критик төлөвт урт хугацаанд ажиллуулах загварчлалыг гүйцэтгэхээр төлөвлөж байна.

ТАЛАРХАЛ

Энэхүү ажил нь МУИС-ийн Инженер Технологийн Сургуулийн “Судалгааны туслах ажиллуулах” гэрээний дагуу хийгдсэн бөгөөд ажлыг санхүүжүүлсэн МУИС-ИТС-д талархал илэрхийлье. Ажлын бүх тооцооллыг МУИС-ийн Цөмийн Физикийн Судалгааны Төвд байрлах МИНАТО-СЕРВЕР дээр хийж гүйцэтгэв.

АШИГЛАСАН ХЭВЛЭЛ

- [1] IAEA. Power reactor information system.
- [2] IAEA. Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data. International Atomic energy agency, Vienna.
- [3] <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/molten-salt-reactors-msr>
- [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] S.Odmaa, T.Jamiyansuren, O.Toru etc., Design parameters in an annular, prismatic HTGR for passive decay heat removal. Annals of Nuclear Energy. 111 (2018) 441-448.
- [6] Odmaa Sambuu, Jamiyansuren Terbish. Burnable poison optimized on a long-life, annular HTGR core. Nuclear Engineering and Technology. Vol 54, issue 8, August 2022. p-3106-3116. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.03.022>
- [7] Jamiyansuren Terbish, Odmaa Sambuu. Geometrical shape and self-shielding effect of burnable poison particles on pin-in block type HTGR neutronic performance. Nuclear Engineering and Technology. Vol 56, issue 6, June 2024. p-2388-2394. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.01.050>
- [8] Alexander, L.G. Nuclear Aspects of Molten-salt reactors. In MacPherson, H.G., Fluid Fuel reactors, Atoms for peace, 1958.
- [9] B. A. Hombourger, Conceptual Design of a Sustainable Waste Burning Molten Salt Reactor, Ph.D. dissertation, École

Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL),
Switzerland, 2018.

- [10] J. Leppänen, Serpent-a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup calculation code, VTT Technical Research Centre of Finland (2015)
- [11] M.B. Chadwick et al., ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology, Nuclear data sheets, 107.12.2931 (2006).
<https://doi.org/10.1016/j.nds.2006.11.001>
- [12] J. Krepel, B. Hombourger, and K. Mikityuk, "Fuel cycle performance of the Molten Salt Fast Reactor," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 60, pp. 141–152, 2013
- [13] A. Rykhlevskii and K. D. Huff, "Modeling and simulation of the molten salt breeder reactor with the SERPENT 2 Monte Carlo code," in *Proceedings of the Physics of Reactors Conference (PHYSOR 2018)*, Cancun, Mexico, April 2018.