

Задралын Дулаанаа Идэвхгүйгээр Зайлуулах Чадвартай, Төвдөө Ойлгогчтой ба Ойлгогчгүй Өндөр Температурын Хийн Хөргөлттэй Реакторын Дизайны Параметруудийн Харьцуулсан Судалгаа

С.Одмаа^{1,2},* Г.Энхбаатар², Н.Норов^{1,2}

¹Хими, биологийн инженерчлэлийн тэнхим, Хэрэглээний шинжлэх ухаан, инженерчлэлийн сургууль, Монгол улсын их сургууль

²Цөмийн физикийн судалгааны төв, Монгол улсын их сургууль

Энэ ажилд задралын дулаанаа идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай, төвдөө ойлгогчтой, өндөр температурын хийн реакторын дизайны параметруудийн хоорондын хамааралт нөхцлийг гарган авч, үүнийг төвдөө ойлгогчгүй реакторынхтай харьцуулав.

I. ОРШИЛ

Өндөр температурын, хийн хөргөлттэй реактор (ӨТХР) нь өндөр температурыг даах чадвар өндөртэй керамик давхаргууд бүхий TRISO түлш, дулаан багтаамж өндөртэй бал чулуун голомт, гелий инертийн хийн хөргүүртэй учраас ердийн бус ажиллагааны үед голомт болон хөргүүрийн температур хурдан ихэсэхгүй тул осолд хүргэх магадлал багатай байдгаараа IV-р үеийн реакторын нэг төрөл болон судлагдаж байна [1]. ӨТХР нь TRISO түлш хэрэглэдэг учраас цөмийн зэвсгийг дэлгэрүүлэхгүй шинж чанар өндөртөйд тооцогддог, уг түлшийг үр ашигтай шатааж эрчим хүч үйлдвэрлэдэг тул цацраг идэвхт хаягдлын хэмжээ багасч, эдийн засгийн хувьд ач холбогдолтой юм [2-4].

ӨТХР-ийн TRISO түлш аюулгүй байх дизайны температурын дээд хязгаар нь 1873 К [3] байх ба түлшний температур энэ хязгаарт хүрэхгүй тохиолдолд цацраг идэвхт хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүд түлшнээс, голомтоос, реактораас гадагш алдагдахгүй байх нөхцөл бүрдэнэ. Бидний өмнөх судалгааны ажлуудад реактор унтарсны дараа голомтод хуримтлагдсан хуваагдлын бүтээгдэхүүнүүдийн цөмийн задралын улмаас үүсэх задралын дулааныг идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай хатуу цилиндр голомттой, призмэн блокон төрлийн ӨТХР-ийн дизайны параметруудийн хамаарлыг гарган авсан [5-8]. Ер нь, цөмийн реакторын голомтод үүссэн дулааныг гадны ямар нэг хүчний тусламжтайгаар ажиллах идэвхтэй системүүд (жнь, хөргүүрийн системийн шахуургууд), байгалийн хуулинд тулгуурласан идэвхгүй системүүд (жнь, агаарын конвекцоор хөргөх хоолойнууд) ашиглах болон дулаан дамжих байгалийн үндсэн механизмуудад (дулаан дамжуулал, дулаан

цацаргалт, байгалийн конвекц) тулгуурлан голомтоос зайлуулдаг.

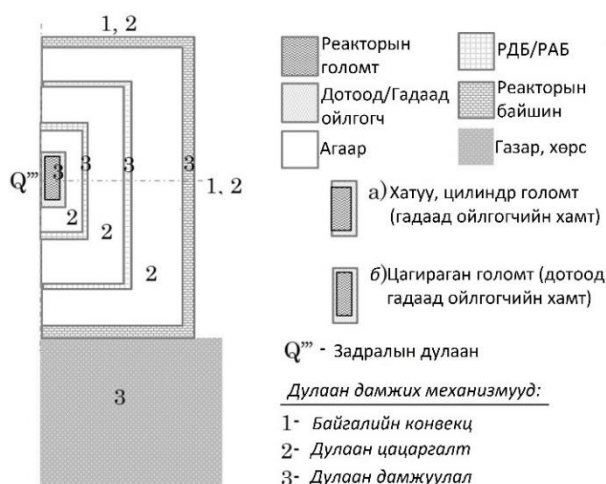
Призмэн блок төрлийн ӨТХР-ийн голомтоорх чадал түгэлт радиал чиглэлд Бессел функцээр, аксиал чиглэлд косинус функцээр түгсэн байдаг. Гэтэл голомтоорх чадлын түгэлтийг шатдаг хорлолт материал хэрэглэх юмуу удирдлагын саваа оруулах замаар жигдлэх шаардлагатай байдаг.

Энэ ажилд дулаан зайлуулах эхний хоёр төрлийн системүүд ямар нэгэн осол юмуу байгалийн гамшгийн улмаас ажиллагаагүй болсон тохиолдолд зөвхөн байгалийн хуулиар дулаанаа зайлуулах чадвар бүхий төвдөө ойлгогчтой, цагираган хийцтэй, призмэн блок төрлийн ӨТХР-ийн дизайны параметруудийн хамаарлыг реакторын голомтоорх чадлын түгэлтийн жигд ба жигд бус байх хоёр хувилбарт гарган авч үнэлэх үндсэн зорилго тавив. Мөн гарган авсан хамаарлыг төвдөө ойлгогчгүй, хатуу цилиндр голомттой, призмэн блок төрлийн ӨТХР-ийн дизайны параметруудийн хамааралтай харьцуулж, төвийн ойлгогчийн нөлөөг авч хэлэлцэв.

II. ДИЗАЙНЫ ТУХАЙД

ӨТХР-ийн идэвхтэй болон идэвхгүй хөргүүрийн систем ажиллахгүй ч тэрээр задралын дулаанаа зайлуулах чадвартай гэж үздэг. Японы Атомын Энергийн Агентлагт ажиллаж буй 30 кВт чадалтай, зургаан өнцөгт призмэн блок төрлийн өндөр температурын тест реактор (HTTR) нь аюулгүй ажиллагааны найдвар өндөртэй, дэвшилтэт технологи ашигладаг [9-12]. Иймд бидний өмнөх ажлуудын реакторын голомтын дизайнд ч, энэ ажлын дизайнд ч Японы HTTR реакторын голомтыг бүрдүүлэгч зургаан өнцөгт призмэн блокуудыг ашиглав.

* Electronic address: sodmaal@yahoo.com



Зураг 1. Реакторын үндсэн хэсгүүд болон дулаан дамжих механизмууд. а) хатуу цилиндр голомт, б) цагираган голомт.

Реакторын дизайны тооцооллын загварын ерөнхий зураглалыг зураг 1-д үзүүлэв. Зураг 1а нь төвдөө ойлгогчгүй, хатуу цилиндр голомт; зураг 1б нь төвдөө ойлгогчтой, цагираган голомтын бүтцийг харуулжээ. Уг хоёр төрлийн реакторын хийцийн бусад хэсгүүд нь адилхан болно. Голомт нь гадуураа гадаад ойлгогчоор

хүрээлэгдсэн байх ба энэ хоёр хийц реакторын даралтат байгууламж (РДБ)-д байрлана. РДБ нь реакторын агуулах байгууламж (РАБ) улмаар реакторын байшин (РБ)-д байрлана.

Тооцооллоор консерватив үр дүн гарган авахын тулд эдгээр байгууламж, барилга дэх том жижиг хоолой, бусад төрлийн хийцийг үл тооцов. Хэрэв эдгээрийг тооцсон бол дулаан дамжуулах чадвар нь агаарынхаас их тул дулааныг харьцангуйгаар хурдан хугацаанд зайлуулах болно.

Хүснэгт 1-д 30 МВт чадалтай Японы НТТР болон 200 МВт чадалтай, 0.82 Вт/см^3 дундаж чадлын нягттай призмэн блок төрлийн хатуу цилиндр ба цагираган голомттой ӨТХР-ийн хэмжээсүүдийг харьцуулан харуулав. Сүүлийн хоёр реакторын голомтын радиус ба өндрийн харьцааг 0.4 байхаар тооцов. Энэ 0.4 гэсэн харьцаа нь реакторын аюулгүй ажиллагааны шинж чанарт хамгийн оновчтой болохыг өмнөх ажилд үнэлж гаргасан [5].

Реакторын мужуудын материалын физик шинж чанарыг хүснэгт 2-д харуулав.

Хүснэгт 1. Реакторын хэмжээсийн харьцуулалт

Реакторын муж	НТТР, 30 МВт [9-12]	Хатуу цилиндр ӨТХР, 200 МВт, 0.82 Вт/см^3 [5-7]	Цагираган ӨТХР, 200 МВт, 0.82 Вт/см^3
Дотоод ойлгогч (радиус × өндөр, м)	-	-	0.36×7.89
Голомт (радиус × өндөр, м)	1.15×2.9	3.14×7.84	3.16×7.89
Ойлгогч_гадаад (радиус × өндөр, м)	2.125×5.25	3.5×9.0	3.52×9.05
РДБ_дотоод (радиус × өндөр, м)	2.75×13.2	5.5×19.0	5.52×19.05
РДБ-ийн хананы зузаан	12.2 -16 см	26 см	26 см
РАБ_дотоод (радиус × өндөр, м)	9.25×30.3	14.76×39.52	14.78×39.57
РАБ-ийн хананы зузаан	3 см	6 см	6 см
РБ_дотоод	$48 \times 50 \times 55$ (өргөн×урт×өндөр,м)	39.82×89.64 (радиус×өндөр, м)	39.84×89.7 (радиус×өндөр,м)
РБ-ийн хананы зузаан	Өгөгдөл байхгүй	25 см	25 см

Хүснэгт 2. Материалуудын физик финж чанарууд

Реакторын муж	Голомт	Ойлгогч	РДБ/РАБ	РБ	Зай	Хүрээлэн буй орчин
Материал	Шарагдсан IG-110 бал чулуу		Хүчлэг ихтэй хайлш	Бетон	Агаар [13]	Хөрс
Дулаан дамжуулах чадвар, $\text{Вт м}^{-1}\text{К}^{-1}$	10 [14]	$k_{IG}(T)$ [16]	44.5 [13]	1.8 [13]	k(T)	1 [15]
Хувийн дулаан багтаамж, Дж $\text{кг}^{-1}\text{К}^{-1}$		$C_{pIG}(T)$ [16]	475 [13]	750 [13]	$C_p(T)$	1840 [15]
Нягт, кг м^{-3}	1800 [16]		7850 [13]	2300 [13]	$\rho(T)$	1500 [15]
Цацаргах чадвар	0.8 [17]		0.9 [17]	0.85 [17]	-	0.38 [17]

Ш. ЦАГИРАГАН ГОЛОМТТОЙ РЕАКТОРЫН ГОЛОМТ ДЭХ ЗАДРАЛЫН ДУЛААНЫГ ИДЭВХГҮЙГЭЭР ЗАЙЛУУЛАХ АНАЛИЗИЙН АРГА ЗҮЙ

Цагираган голомттой реакторын голомт дэх задралын дулааныг идэвхгүйгээр зайлуулах анализийн арга зүй нь бидний өмнөх ажлуудад COMSOL программыг [13] ашиглан хатуу цилиндр голомттой ӨТХР-т хэрэглэсэн аргатай үндсэндээ ижил. Энд реактор амжилттай унтарсны дараа түүний голомтод үүсэх задралын дулаан идэвхтэй болон идэвхгүй системээр бус зөвхөн дулаан дамжих байгалийн үндсэн гурван механизм болох дулаан дамжуулал, дулаан цацаргалт, байгалийн конвекцид үндэслэн голомтоос ойлгогч болон хийцийн бусад материал руу, эцэстээ агаар луу дамжих тооцооллыг гүйцэтгэсэн. ӨТХР-ийн голомт дэх дулаан дамжих механизмд гелийн хийн хөргүүрийн байгалийн конвекцтэй харьцуулбал голомтын дамжуулал хувь нэмэр ихтэй гэдгийг зарим судлаачдын ажилд [14] харуулсан байна.

Түүнчлэн ийм төрлийн реакторт даралт унасан, хөргүүр тасалдсан томоохон ослын үед (жнь, DLOCA, PLOCA) хийцийн ханануудын хооронд дулааны цацаргалтын замаар дулаан дамжих нь конвекцоор дамжихаас илүүтэй гэдгийг мөн харуулсан байна [18]. Иймд хийцийн ханануудын хоорондох агаар орчинд дулаан дамжих гол механизмыг дулаан цацаргалт гэж үзсэн. Зураг 1-д анализд авч үзсэн реакторын үндсэн хэсгүүдээрх дулаан дамжих механизмуудыг бас харуулав.

Реактор амжилттай унтарсны дараа голомтод үүсэх задралын дулаан голомт, ойлгогч, болон бусад үндсэн хэсгүүдээр дамжих ба энэ нь дулаан дамжууллын дараах үндсэн тэгшитгэлээр тодорхойлогдоно:

$$C_p^V \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k\nabla T) = Q''' \quad (1)$$

Энд, C_p^V нь реакторын мужийн эзэлхүүнээрх дулаан багтаамж [Дж/К], T нь реакторын мужийн температур [К], t нь реактор унтарснаас хойших хугацаа [сек], k нь реакторын мужийн дулаан дамжуулах чадвар [Вт/(м К)], Q''' нь голомтын эзэлхүүнээрх дулааны нягт [МВт/м³]. Задралын дулаан дамжих тооцооллыг дээрх дулаан дамжууллын үндсэн тэгшитгэлийг цацаргалтын хилийн нөхцлүүд (тэг. (2) ба (3)) болон байгалийн конвекцийн хилийн нөхцөл (тэг. (4))-ийн тусламжтайгаар физикийн олон тооцооллыг хамааралтайгаар гүйцэтгэх чадвартай COMSOL программын хатуу болон

шингэн орчинд дулаан дамжих моделиор гүйцэтгэв [13].

Реактор дотор хийцийн нэг хананаас нөгөө хана руу (тэг.(2)) болон реакторын байшингийн хананаас гадаад агаар орчин руу (тэг.(3)) дулаан цацаргалтаар дамжихыг цацаргалтын хилийн нөхцлөөр тооцсон:

$$k\nabla T = \varepsilon(G_m + F_{amb}\sigma T_{amb}^4 - \sigma T_s^4) \quad (2)$$

$$(k\nabla T)|_{os} = \varepsilon_{os}\sigma(T_{ext}^4 - T_{os}^4) \quad (3)$$

Энд, ε нь хананы гадаргуун цацаргах чадвар, G_m нь нэг хана руу бусад хананаас цацарч очихыг тооцох фактор, F_{amb} нь хана хоорондын геометрийн фактор, σ нь Стефан-Больцманы тогтмол [$5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$], T_{amb} нь орчны температур [К], T_s нь хананы гадаргуун температур [К], ε_{os} нь реакторын гадаад хана (РБ)-ны гадаргуун цацаргах чадвар, T_{ext} нь гадаад орчны агаарын температур [К], T_{os} нь реакторын гадаад хананы гадаргуун температур [К].

Анализийн тооцоололд цагираган голомтоорх чадлын түгэлтийг хоёр хувилбараар авч үзсэн. Эхнийх нь, голомтоорх чадлын түгэлт радиал чиглэлд Бессел функцээр, аксиал чиглэлд косинус функцээр илэрхийлэгдэнэ гэж таамагласан:

$$P(r, z) = P^{\max} \cdot J_0\left(2.4046 \frac{r - r_{inref}}{R_{core} - r_{inref}}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H_{core}}\right) \quad (5)$$

Энд, P^{\max} нь чадлын нягтын хамгийн их (ХИ) утга [Вт/см³], H_{core} нь голомтын өндөр [м], R_{core} нь голомтын радиус [м], r_{inref} нь дотоод ойлгогчийн радиус [м]. Энэ тэгшитгэлээс харвал голомтын төв хэсэгт ХИ чадал үүсч байна. Чадлын ийм жигд бус түгэлтийг жигдлэх уламжлалт арга нь шатдаг хорлол материал болон удирдлагын савааг голомтод оруулж өгдөг. Ингэж оновчтой байдлаар голомтын дизайныг хийсний дараа чадлын түгэлт жигд болсон гэвэл үүнийг дараах байдлаар илэрхийлнэ:

$$P = P^{ave} \cdot V_{core} = P^{ave} \cdot \pi(R_{core}^2 - r_{inref}^2) \cdot H_{core} \quad (6)$$

Энд, P^{ave} нь чадлын дундаж нягт [Вт/см³], V_{core} нь голомтын эзэлхүүн [см³].

Эдгээр чадлын нягтын түгэлтийг ашиглан голомтын эзэлхүүнээрх дулааны нягтыг олбол:

$$Q'''(r, z, t) = 5 \cdot 10^{-3} \cdot H_{tab}(t) \cdot P^{\max} \cdot J_0\left(2.4046 \frac{r - r_{inref}}{R_{core} - r_{inref}}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H_{core}}\right) \quad (7)$$

$$Q''(t) = 5 \cdot 10^{-3} \cdot H_{tab}(t) \cdot P^{ave} \cdot \pi(R_{core}^2 - r_{inref}^2) \cdot H_{core} \quad (8)$$

Энд, $H_{tab}(t)$ нь реактор унтарсны дараа голомтод үүсэх задралын дулааны хүснэгтэлсэн утга [МэВ/хуваагдал], $5 \cdot 10^{-3}$ нь МэВ/хуваагдал нэгжээс Вт нэгж рүү хувиргах хувиргалтын коэффициент.

^{235}U түлштэй дулааны нейтроны цөмийн реакторыг хязгааргүй (10^{13} сек) хугацаанд ажиллуулаад унтраасан тохиолдолд голомтод үүсэх задралын дулааны чадлыг Японы Атомын Энергийн Агентлаг тооцоолон гаргасаныг задралын дулааны хүснэгтэлсэн утгад ашиглав [19].

Бидний өмнөх ажлуудад хатуу цилиндр реакторын голомтоорх чадлын түгэлтийг жигдлээгүй тохиолдолд доорх илэрхийллийг ашигласан [5-7]:

$$P(r, z) = P^{max} \cdot J_0\left(2.4046 \frac{r}{R_{core}}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H_{core}}\right) \quad (9)$$

IV. РЕАКТОРЫГ УНТРААСНЫ ДАРАА ГОЛОМТЫН ХИ ТЕМПЕРАТУРТ ТӨВИЙН ОЙЛГОГЧИЙН НӨЛӨӨ

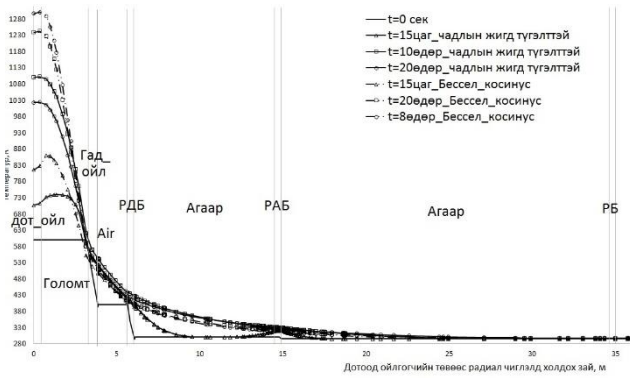
Хүснэгт 1-д харуулсан хэмжээс бүхий 200 МВт чадалтай, 0.82 Вт/см^3 чадлын дундаж нягттай цагираган реакторыг унтраасны дараа голомтын ХИ температурт төвийн ойлгогчийн нөлөөг үзэх урьдчилсан анализ хийв. Реактор унтрахаас өмнө голомт дэх чадлын түгэлтийг жигд бус ба жигд байсан хоёр хувилбарыг авч үзэн чадлын түгэлт уг температурт хэрхэн нөлөөлөхийг бас хэлэлцэв. Реактор унтрахад

түүний үндсэн хэсэг тус бүрийн температур жигд байсан гэж таамаглав. Голомтыг бүрдүүлэгч түлш, графитан матарц, гелий хийн хөргүүрийг бүгдийг нь ижил температуртай байсан гэж үзэн “реактор унтрах үеийн голомтын температур” гэдэг нэршлээр төлөөлүүлэв. Энэ таамаглалыг бидний өмнөх ажлуудад ч мөн таамагласан.

Хүснэгт 3-д энэхүү урьдчилсан анализын цагираган реакторын тооцооллын дүнг хатуу цилиндр реакторынхтой харьцуулан харуулав. Үр дүнгээс харвал, голомтоорх чадлын нягтыг жигдэлж нэгэн төрөл болгоход реактор унтарсны дараах голомтын ХИ температур нилээд багасч байна. Өөрөөр хэлбэл, голомтоорх чадлын түгэлтийг нэгэн төрөл болгосноор уг реакторын аюулгүй байдал сайжирч байна. Шалтгаан нь чадлын түгэлт жигд бус байхад (тэг. (5) ба (9)) задралын дулаан төвдөө их үүсч байгаатай холбоотой ба хатуу цилиндр реакторын хувьд чадлын түгэлтийн энэ нөлөөг өмнөх ажилд судлан тайлбарласан [8]. Энэ шинж чанар хоёр төрлийн реакторт ижил байна. Түүнчлэн унтраасны дараа 0.36 м радиустай төвийн ойлгогчтой цагираган реакторын голомтын чадлын түгэлт нэгэн төрөл бус ба нэгэн төрөл байхад түүний ХИ температурыг хатуу цилиндр голомтынхтой харьцуулахад харгалзан 500 К ба 160 К-ээр бага байна. Төвийн ойлгогчийн материал нь графит бөгөөд дулаан багтаамж өндөртэй, тэнд дулааны үүсгүүр байхгүй тул голомтод үүсэх задралын дулааны зарим нь дотоод болон гадаад ойлгогчид дамжин, хуримтлагдах нь голомтын температурыг бууруулахад гол нөлөө үзүүлж байна. Иймд төвдөө ойлгогчтой реакторын аюулгүй байдал сайжирч байна.

Хүснэгт 3. Реактор унтарсны дараа голомтын ХИ температурт төвийн ойлгогч, чадлын нягтын түгэлтийн нөлөө

Реакторын голомтын төрөл	Хатуу цилиндр [8]		Цагираган	
	Жигд бус	Жигд	Жигд бус	Жигд
Чадлын нягтын түгэлт				
Төвийн ойлгогчийн радиус (R_{inref}), м		0	0.36	
Голомтын зузаан (t_{core}), м	3.137		2.797	
$R_{core}=R_{inref}+t_{core}$, м	3.137		3.157	
Голомтын өндөр, м	7.843		7.893	
Голомтын эзэлхүүн, м ³		243.9		
Чадлын дундаж нягт, Вт/см ³		0.82		
Реакторын чадал, МВт		200		
Реактор унтрах үед голомт/ойлгогчийн температур, К		600		
Реактор унтрах үед бусад мужийн температур, К				
Агаар1/ РДБ/ Агаар2/ РАБ/ Агаар3/ РБ/ Хөрс		400/ 400/ 300/ 300/ 295/ 295/ 280		
Реактор унтарсны дараа голомтын ХИ температур, К	1810	1168	1301	1102
Реактор унтарсны дараа голомтын температур ХИ уганд хүрэх хугацаа, өдөр	10.4	10.4	8.1	10.1

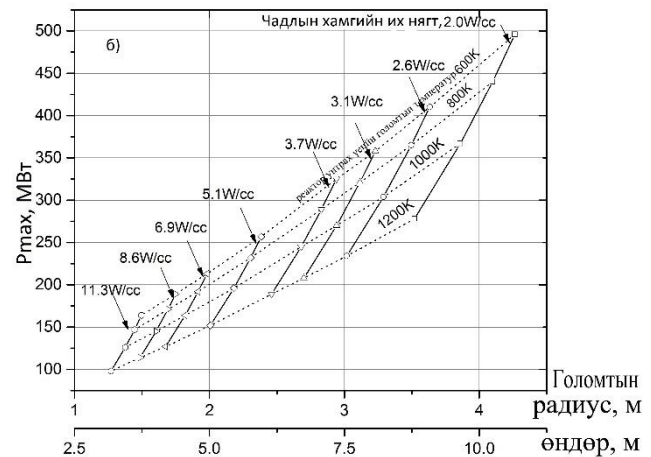
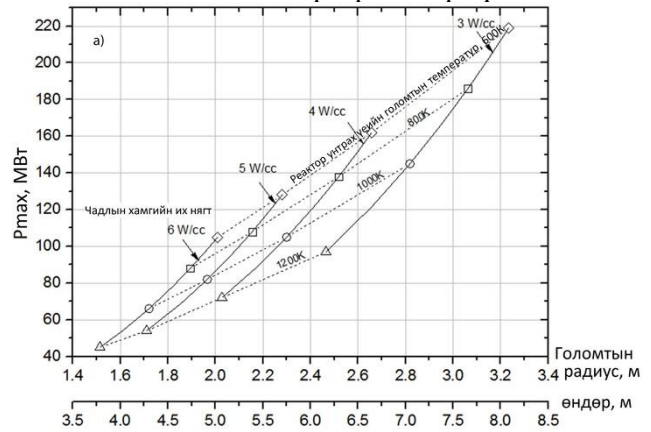


Зураг 2. Жигд ба жигд бус чадлын түгэлттэй ажиллаж байсан цагираган реакторыг унтраагаад янз бүрийн хугацааны дараа төвийн тэнхлэгийн дагуу радиал чиглэлээрх температурын түгэлтийн харьцуулалт.

Зураг 2-т жигд ба жигд бус чадлын түгэлттэй ажиллаж байсан цагираган реакторыг унтраасны дараа хугацааны өөр өөр моментод төвийн тэнхлэгийн дагуу радиал чиглэлээрх температурын түгэлтийг харьцуулан харуулав. Энд, үргэлжилсэн шугамаар чадлын жигд түгэлттэй реакторыг унтрааснаас хойш янз бүрийн хугацаан дэх температурын радиал түгэлтийг, тасархай шугамаар жигд бус түгэлт (Бессел ба косинус функц)-тэй реакторынхыг тус тус харуулав. Реактор унтарсны дараа тодорхой хугацаанд задралын дулааны үүсэх хурд нь дамжих хурдаас их байгаа нь ажиглагдаж байна. Улмаар хугацаа өнгөрөх тусам голомтын температур өссөөр ХИ утганд хүрэх хүртэл энэ байдал хэвээр байх бөгөөд энэ мөчөөс хойш задралын дулаан үүсэх хурд нь дамжих хурдаас басасч байна. Энэ байдал голомтын чадлын түгэлтийн хэлбэрээс үл хамааран төстэй байна. Цагираган реакторт дулаан багтаамж өндөртэй, дулааны үүсгүүргүй төвийн ойлгогч байгаа тул голомтод үүсэх задралын дулааны зарим хэсэг нь түүнд дамжин хуримтлагдах тул голомтын температур ихээр багасч байна. Голомтоорх чадлын нягт жигд бус үед түүний төв хэсэгт их дулаан үүсч хуримтлагдах тул голомтын ХИ температур огцом ихэсч байна. Хугацаа өнгөрөх тусам голомтын төвөөс зах руугаа дулаан дамжууллаар дамжих боловч төвийн хэсэгт харьцангуй их хэмжээгээр дулаан үүссээр байх тул голомтын ХИ температур нь чадлын жигд түгэлттэй реакторынхаас их хэвээр байсаар байна.

V. ЗАДРАЛЫН ДУЛААНАА ИДЭВХГҮЙГЭЭР ЗАЙЛУУЛАХ ЧАДВАРТАЙ ЦАГИРАГАН РЕАКТОРЫН ДИЗАЙНЫ ПАРАМЕТРУУДИЙН ХАМААРАЛ

Задралын дулаанаа идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай цагираган реакторын дизайны параметруудийн хамаарлыг голомтоорх чадлын түгэлтийн хоёр хувилбарын үед гарган авахын тулд бидний өмнөх ажилд хатуу цилиндр реакторт гүйцэтгэж байсантай ижил процедураар задралын дулаан дамжих тооцооллыг COMSOL программаар гүйцэтгэнэ.



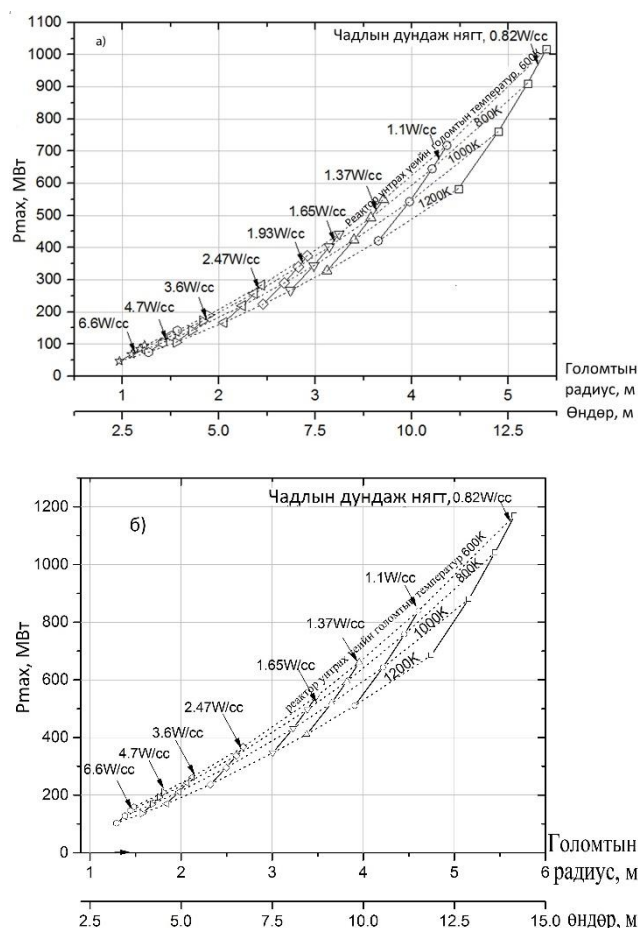
Зураг 3. Чадлын жигд бус түгэлттэй үед дизайны параметруудийн хамаарал, а) хатуу цилиндр ΘXTP [5-7], б) цагираган ΘXTP , $R_{\text{оол.ойл}}=0.36$ м.

Энэ процедурт эхлээд реакторын чадал (50 МВт-аас 1200 МВт), чадлын дундаж эсвэл ХИ нягт, (0.82 Вт/см³-аас 6.6 Вт/см³ эсвэл 3 Вт/см³-аас 12 Вт/см³), реактор унтрах үеийн голомтын температурын хэд хэдэн утгын (600 К-ээс 1200 К) янз бүрийн хослолд реактор унтарсны дараа задралын дулаан голомтоос дамжих тооцооллыг гүйцэтгэн дээрх параметруудийн хослол бүрд голомтын температурын ХИ утгыг олно. Реакторын чадал болон чадлын дундаж эсвэл ХИ нягтын утга бүрд голомтын радиус ба өндрийн харьцаа 0.4 гэдгийг ашиглан голомтын хэмжээг олно. Бүх тооцоололд дотоод ойлгогчийн радиусыг 0.36 м гэж авав. Реактор унтрах үед голомт ба ойлгогчоос бусад мужийн температурын утгууд хүснэгт 3-д үзүүлсэнтэй ижил болно. Голомтоорх чадлын нягт жигд түгсэн үед тэг. (8)-аар задралын дулааныг

тооцоолох ба энд чадлын дундаж нягтыг 0.82 Вт/см^3 -аас 6.6 Вт/см^3 гэж авсан. Харин чадлын жигд бус түгэлтийн үед тэг. (7)-аар задралын дулааныг тооцоолох ба энд ХИ чадлын нягтыг 3 Вт/см^3 -аас 12 Вт/см^3 гэж авсан. Чадлын дундаж нягт нь 0.82 Вт/см^3 (эсвэл 6.6 Вт/см^3) байх жигд чадлын түгэлттэй реакторын чадал ба голомтын хэмжээ нь харгалзан 3 Вт/см^3 (эсвэл 12 Вт/см^3) чадлын ХИ нягттай, жигд бус чадлын түгэлттэй (Бессел ба косинус функц) реакторын чадал болон голомтын хэмжээтэй адил болно.

Дулаан дамжууллын тооцооллоор олсон голомтын ХИ температурыг түлшний температурын зөвшөөрөгдөх дээд хязгаар болох 1873 К [3]-аар хязгаарлан реакторын зөвшөөрөгдөх ХИ чадлын утгыг бусад параметрийн (чадлын дундаж/ХИ нягт, голомтын температур) хослол бүрд олно. Бусад хийцийн ХИ температур дизайныхаа зөвшөөрөгдөх хязгаараас бага байсан. Дараа нь зөвшөөрөгдөх чадлын утга, чадлын дундаж/ХИ нягт болон $R_{\text{core}}/H_{\text{core}}=0.4$ харьцааг ашиглан уг реакторын голомтын хэмжээг олно.

Голомтоорх чадлын түгэлт жигд бус байх үед тооцооллоор олсон дизайны параметруудийг хамаарал байдлаар зураг 3-т харуулав. Зураг 3а-т бидний өмнөх ажилд [5-7] гарган авсан хатуу цилиндр голомттой, чадлын жигд бус түгэлттэй, задралын дулаанаа идэвхгүйгээр зайлуулах чадвартай ӨХТР-ийн дизайны параметруудийн хамаарлыг, зураг 3б-т цагираган голомттой харгалзах реакторынхыг харьцуулан харуулав. Зураг 3а, 3б-д хэвтээ тэнхлэгт голомтын радиус ба өндөр, босоо тэнхлэгт реакторын зөвшөөрөгдөх ХИ чадлыг харуулсан. Зөвшөөрөгдөх чадал болон голомтын хэмжээ нь реактор унтрах үеийн голомтын температурын янз бүрийн утгаас хэрхэн хамаарахыг тасархай шугамаар, чадлын нягтын ХИ утгаас хэрхэн хамаарахыг тасралтгүй шугамаар харуулав. Энэ хамаарал төвөгтэй мэт харагдавч дизайны үндсэн параметруудийн холбоог нэг дор харуулсан чухал үр дүн болно. Эдгээр хамаарлыг хэрхэн ашиглахыг жишээ дээр тайлбарлая. Жишээлбэл, реакторын дизайнар 150 МВт чадалтай 1200 К голомтын температуртай цагираган хийцтэй, чадлын жигд бус түгэлттэй ӨТХР зохион бүтээе гэвэл бусад параметрийн утгуудаа голомтын радиус 2 м , өндөр 5 м , чадлын ХИ нягт 5.1 Вт/см^3 болохыг зураг 3б-ээс хялбархан олох боломжтой. Ийм параметртэй реактор унтарсны дараа задралын дулаанаа идэвхгүйгээр, амжилттай зайлуулж, аюулгүй болж чадна гэсэн үг юм.



Зураг 4. Чадлын жигд түгэлттэй үед дизайны параметруудийн хамаарал, а) хатуу цилиндр ӨТХР [8], б) цагираган ӨТХР, $R_{\text{дом.ойл}}=0.36 \text{ м}$.

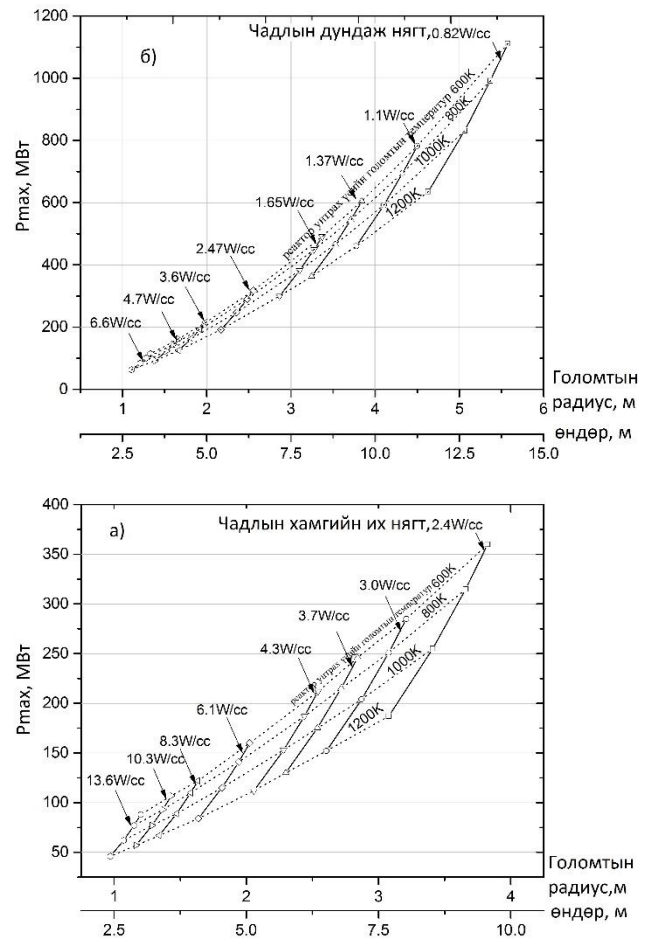
Хэрэв ийм чадал, голомтын температуртай хатуу цилиндр, чадлын жигд бус түгэлттэй ӨТХР зохион бүтээе гэвэл голомтын хэмжээг ихэсгэх эсвэл голомтын температурыг бууруулах шаардлагатай байгаа нь Зураг 3а-аас харагдана. Энэ нь дотоод ойлгогчтой реакторын аюулгүй ажиллагаа ижил хэмжээ, параметртэй хатуу цилиндр голомтынхоос сайжирч байгааг харуулна. Хэрэв ижил хэмжээтэй голомт (радиус 2 м , өндөр 5 м), ижил температурт ажиллуулна (1200 К) гэвэл хатуу цилиндр голомттой реакторын зөвшөөрөгдөх чадлын хэмжээ 70 МВт (чадлын нягтын ХИ утга 4 Вт/см^3) байх болно. Энэ нь эдийн засгийн хувьд ашиггүй хувилбар юм. Тэгэхээр нэг бол аюулгүй ажиллагааны ижил түвшинтэй, голомтын ижил хэмжээтэй, арай өндөр чадлын цагираган реакторыг сонгох эсвэл аюулгүй ажиллагааны түвшин илүү өндөртэй, голомтын хэмжээ болон чадлын түвшин ижил байх цагираган реакторыг сонгох боломжтой болж байна.

Голомтоорх чадлын түгэлт жигд байх үед тооцооллоор олсон дизайны параметруудийг хамаарал байдлаар зураг 4-д харуулав. Зураг 4-д бидний өмнөх ажлаар [8] гарган авсан хатуу

цилиндр голомттой, чадлын жигд түгэлттэй реакторынх, зураг 4б-д энэ ажлаар гарган авсан цагираган реакторын параметруудийн хамаарлыг харуулав. Зураг 4-ийн тэнхлэг, шугамуудын утга нь зураг 3-ийнхтэй ижил. Өмнөх зураг 3-т үндэслэн дүгнэсэнтэй адилаар цагираган реакторын аюулгүй ажиллагааны шинж чанар нь хатуу цилиндр реактортай харьцуулахад сайжирсан байна. Хэрэв зураг 3 ба 4-ийг харьцуулбал ижил хэмжээтэй голомттой реакторын зөвшөөрөгдөх ХИ чадлын хэмжээ нь жигд түгэлттэй реакторын хувьд ихээр нэмэгдсэн байна.

Зураг 3 ба 4-өөс дүгнэвэл, дотоод ойлгогч хэрэглэн реакторын аюулгүй ажиллагааг муутгахгүйгээр, арай өндөр чадлын реакторын дизайн хийх бололцоотой ба энэ нь голомтоорх чадлын нягтын хэлбэрээс үл хамаарч байна. Түүнчлэн чадлын нягтыг жигдрүүлж чадвал уг реакторын аюулгүй ажиллагаа улам сайжирч байна. Дотоод ойлгогчтой цагираган реакторын голомтоорх чадлын түгэлт жигд бол аюулгүй ажиллагааны шинж чанар нь хатуу цилиндр реактортай харьцуулбал маш ихээр сайжирч байна.

Дээрхтэй ижил тооцооллыг арай бага радиустай (0.18 м) дотоод ойлгогчтой, цагираган реакторт гүйцэтгэсэн. Учир нь дизайны үндэс болох Японы НТТР реакторын зургаан өнцөгт призмэн блокын паралел хоёр талын хоорондох хэмжээ 0.36 м хэмжээтэй байдаг [9-12]. Зураг 5а-д 0.18 м радиустай дотоод ойлгогчтой цагираган реакторын голомтоорх чадлын нягт жигд бус үед гаргасан дизайны параметруудийн хамаарлыг, зураг 5б-д жигд чадлын үеийнхийг харгалзан харуулав. Зураг 5а ба 5б-ийг харьцуулбал зураг 3-ийг зураг 4-тэй харьцуулсантай ижил дүгнэлт буюу чадлын түгэлтийг жигдлэн, аюулгүй ажиллах шинж чанарыг муутгахгүйгээр арай өндөр чадлын реакторын дизайн хийх боломжтой байна. Харин зураг 5а, 5б-ийг харгалзан зураг 3б, 4б-тэй харьцуулбал дотоод ойлгогчийн хэмжээ багасахад зөвшөөрөгдөх чадлын хэмжээ буурч байна, эсвэл ижил хэмжээтэй, ижил чадлын реакторыг арай бага температурт ажиллуулах шаардлагатай болж байна. Дотоод ойлгогчийн радиус хоёр дахин багасахад голомтоос түүн рүү дамжин ирж, хуримтлагдах дулааны хэмжээ бараг зургаа дахин багасч байгаа тул энэ нь арай бага дотоод ойлгогчтой голомтын температурыг ихэсэхэд хүргэж байна.



Зураг 5. $R_{\text{дот.ойл}}=0.18$ м үед цагираган ӨТХР дизайны параметруудийн хамаарал, а) Чадлын жигд бус түгэлттэй, б) Чадлын жигд түгэлттэй.

ДҮГНЭЛТ

1. Энэ ажилд дотоод ойлгогчтой, цагираган ӨТХР-ийг унтраасны дараа голомтын ХИ температур дотоод ойлгогчгүй реакторынхтой харьцуулбал багасч байгааг харуулав.
2. Дотоод ойлгогчтой, цагираган реакторын аюулгүй ажиллагааны шинж чанарт голомтоорх чадлын нягтын нөлөө нь хатуу цилиндр реакторынхтой адил байна.
3. Дотоод ойлгогчтой, цагираган ӨТХР-ийн голомтоорх чадлын түгэлт жигд үед аюулгүй ажиллагааны шинж чанар нь маш ихээр сайжирч болохыг харуулав.
4. Голомтоорх чадлын түгэлт нь жигд, дотоод ойлгогчийн хэмжээ их байх тусам аюулгүй ажиллагааны шинж чанар нь ижил түвшний, арай өндөр чадлын ӨТХР зохион бүтээх боломжтой байна.

АШИГЛАСАН ХЭВЛЭЛ

- [1] The Generation IV International Forum. Very-High Temperature Reactor (VHTR), [Cited

- 2016 October] Available from: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42153/very-high-temperature-reactor-vhtr; 2000.
- [2] Hicks T.E et al. Modular HTGR safety basis and approach. INL/EXT-11-22708. USA: Idaho National Laboratory; 2011.
- [3] Kroeger P.G. Safety evaluations of accident scenarios in HTGRs. Nucl. Eng. and Design 1990; 122: 443-452.
- [4] Hayashi K et al. Assessment of fuel integrity of HTTR and its permissible design limit. JAERI-M-89-162. Japan: JAERI; 1989.
- [5] Odmaa S, Obara T. Possible design in long-life small prismatic HTGR for passive decay heat removal. J. of Nucl. Sci. Eng 2014; 177: 97-109.
- [6] Odmaa S, Obara T. Above-ground HTGR design for passive decay heat removal. J. Nucl. Sci. Technol 2015; (52) 6: 857-871.
- [7] Odmaa S, Obara T. Comparative study on HTGR design for passive decay heat removal. Progress in Nucl. Energy 2015; 82: 37-45.
- [8] Odmaa S, Obara T. Impact of power density profile on passive heat removal in prismatic HTGR. Annals of Nucl. Energy 2016; 87: 23-29.
- [9] Saito S et al. Design and safety consideration in the HTTR. Energy 1991; 16(1/2): 449-458.
- [10] Saito S et al. Design of HTTR. JAERI-1332. Japan: Japan Atomic Energy Research Institute; 1994.
- [11] Shiozowa S et al. Overview of HTTR design features. Nucl. Eng. and Design 2004; 233: 11-21.
- [12] Evaluation of HTGR Performance: Benchmark Analysis Related to Initial Testing of the HTTR and HTR-10, IAEA-TECDOC 1382. IAEA: Vienna; 2003.
- [13] COMSOL AB, COMSOL-5.0. Multiphysics modeling, finite element analysis, and engineering simulation software, [Cited 2015 November] Available from: <http://www.comsol.com/>; 2013.
- [14] Kunitomi K et al. Passive heat removal by vessel cooling system of HTTR during no forced cooling accidents. Nucl. Eng. and Design 1996; 166: 179-190.
- [15] Lienhard JH IV, Lienhard JH V. A heat transfer textbook. 4th ed. Cambridge (MA): Phlogiston Press; 2011.
- [16] Maruyama T, Kaito T, Onose S, Shibahara I. Change in physical properties of high density isotropic graphites irradiated in the "JOYO" fast reactor. J Nucl Mater. 1995;225:267-272.
- [17] Engineering Toolbox. Emissivity coefficients of some common materials. Resources, tools and basic information for engineering and design of technical applications [Internet]; 2012 [cited 2014 May]. Available from: <http://www.engineeringtoolbox.com/>.
- [18] Heat transport and afterheat removal for gas cooled reactors under accident conditions. IAEA-TECDOC-1163. IAEA: Vienna; 2000.
- [19] Decay heat tables. Nuclear Data Center, JAEA: http://www.ndc.jaea.go.jp/DHTable/Table_11.html [Cited 2014 May]

ТАЛАРХАЛ

Энэ ажил нь Солонгосын Ахисан түвшний судалгааны Солонгос сан болон МУИС-ийн Азийн судалгааны төвийн санхүүжилтээр хэрэгжиж буй “Бага чадлын эрчим хүч, дулааны дэвшилтэт цөмийн реакторын судалгаа” төслийн хүрээнд хийгдсэн болно.

Comparative Study on Design Parameters in Both an Annular and Solid Cylinder, Prismatic HTGR for Passive Decay Heat Removal

S.Odmaa, G.Enkhbaatar, N.Norov

In this study we obtained the design parameters relationship of an annular, prismatic HTGR with passive decay heat removal and compared them with those for solid cylinder one.