

Цөмийн түлшний нөхөн үйлдвэрлэл

Б.Мөнхбат*, Н.Норов

Монгол Улсын Их Сургууль, Цөмийн Судалгааны Төв

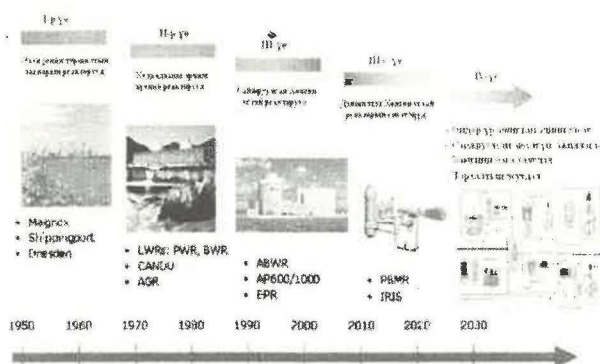
*Batsaikhan_Munkhbat@yahoo.com

Товч агуулга

Энэхүү өгүүлэлд цөмийн эрчим хүчний дөрөвдүгээр үеийн реакторууд болох хар тугалган хөргүүртэй, цөмийн түлшний нөхөн үйлдвэрлэл явуулах SSTAR (Small Sealed Transportable Autonomous Reactor) ба ELSY (European Lead-cooled System) хурдан нейтроноор ажилладаг реакторуудын тухай авч үзэв.

I. Оршил

Дэлхийн цөмийн эрчим хүчний реакторуудыг гурван үе болгон хуваадаг. Одоо дөрөвдүгээр үеийн реакторуудыг (зураг1) дэлхийн тэргүүлэх компаниуд зохион бүтээж байгаа бөгөөд эдгээр реакторуудын чадал нь Монголын эрчим хүчний хангамжинд ашиглахад тохирсон байна. Иймд эдгээр реакторуудаас өөрийн оронд илүү тохиромжтойг сонгон ашиглах нь манай улсын тогтвортой хурдтай хөгжил, олон улсын түвшинд цөмийн зэвсгийг үл дэлгэрүүлэх асуудал, эдийн засгийн эрчимтэй хөгжлийг хангах үндэс суурь болох юм. Хөгжүүлэхээр сонгогдсон дөрөвдүгээр үеийн реакторуудад Хий-хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор (GFR), Натри хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор (SFR), Хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор (LFR), Хайлмал давсан хөргүүртэй реактор (MSR), Хэт өндөр температурт хий-хөргүүртэй реактор (VHTR), мөн Супер-критик усан хөргүүртэй реакторууд (SCWR) багтаж байна [2].



Зураг1. Эрчим хүчний реакторуудын хөгжлийн үе шат

Эдгээр зургаан системээс натри, хар тугалга, хар тугалга-висмутын хайлш, хий хөргүүртэй гурван систем нь хурдан нейтроны спектртэй, цөмийн түлшний битүү циклийг бүрдүүлдэг реакторууд юм.

II. Цөмийн түлшний хуримтлал

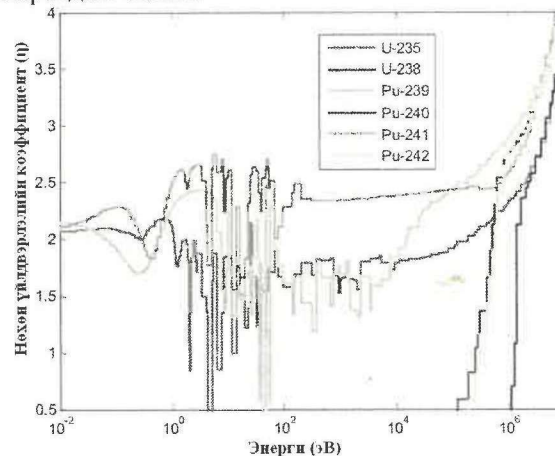
Хурдан нейтроны реакторууд цөмийн түлшний нөхөн үйлдвэрлэлийг явуулна. Иймээс хурдан нейтроны реакторт нөхөн үйлдвэрлэлийн коэффициент (η) өндөр байдаг. Цөмийн түлшний нөхөн үйлдвэрлэлийн коэффициентийг тооцвол цөмийн түлшний хуримтлал нь дараах байдлаар тодорхойлогддог [3].

$$M = M_0\eta + M_0|\eta|^2 + \dots \quad (1)$$

Энд: M_0 -түлшний анхны нөөц

η -нөхөн үйлдвэрлэлийн коэффициент

Хэрэв $\eta > 1$, байвал цөмийн түлшний хуримтлал нь харьцангуй хурдан байх нь (1) тэгшитгэлээс харагдаж байна.



Зураг2. Уран, плутонийн изотопуудын хувьд цөмийн түлшний нөхөн үйлдвэрлэлийн коэффициент, нейтроны энергийн хамаарал

Нөхөн үйлдвэрлэлийн коэффициентийг дараах тэгшитгэлээр тооцоолдог.

$$\eta = \frac{\mu\nu}{1+\alpha} - (1-q) \quad (2)$$

Энд: μ -хурдан нейтроноор ^{238}U -ийн цөм хуваагдахад үүсч байгаа нейтроны тоо ν -нэг хуваагдлаар үүсч байгаа хоёрдогч нейтроны тоо

Энэ тэгшитгэл нь нейтроны үүсч байгаа анхны нөхцөлийг тодорхойлдог ба нейтрон нь цөмийн хуваагдлын гинжин урвалын тэтгэж явуулах мөн бүтэцийн материалд q тооны нейтроны

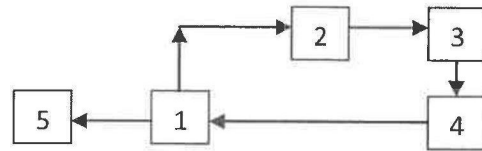
шингээгдсэний нөлөөнөөс болж нейтроны тоо буурч байгааг харуулдаг. Нейтрон үүсэх нь μ ба ν коэффициентийн үржвэрээр тодорхойлогдож байна. Урвалаас чөлөөлөгдөж байгаа нейтроны хэмжээ нь хуваагдаж байгаа изотоп болон хуваагдал явуулж байгаа нейтроны энергитэй холбоотой. α гишүүн нь цацраг идэвхт залгилтын хөндлөн огтлолыг хуваагдаж байгаа нуклидын хуваагдлын хөндлөн огтлолд харьцуулсан харьцаа юм.

$$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f} \quad (3)$$

Дулааны нейтроны реакторын μ коэффициент нь хурдан нейтроны реактороос бага байдаг. Дулааны нейтроны хуваагдлаас үүсч байгаа хоёрдогч нейтроны тоо нь ^{239}Pu -ийн хувьд $\nu_{\text{дулаан}}^{Pu} = 2.87$ ба $\nu_{\text{хурдан}}^{Pu} = 3$ байдаг ба α фактор нь харгалзан 0.39 ба 0.1-тэй тэнцүү байдаг. Нейтроны бууралт нь $1 < (1+q) < 2$ байдаг учраас дулааны ба хурдан нейтроны реакторт q нь ойролцоогоор ижилхэн байна. Иймээс дулааны нейтроны реакторт $\eta < 1$, хурдан нейтроны реакторт $\eta > 1$ байдаг.

^{235}U цөмийн хуваагдлаар ойролцоогоор 2 нейтрон үүсдэг ба ^{239}Pu цөмийн хуваагдлаар 3-аас илүү нейтрон үүсдэг. Ийм учраас хурдан нейтроны реакторт аль болох уран-плутонийн циклийг ашигладаг бөгөөд үндсэн түлшээр нь ^{239}Pu -г, нөхөн үйлдвэрлэлийн материалаар нь ^{238}U -г ашигладаг. Энэ тохиолдолд η нь ~ 1.5 хүрдэг.

Хурдан нейтроны реакторын нэг чухал үзүүлэлт бол цөмийн түлшний анхны хэмжээг хоёр дахин нэмэгдүүлэхэд зарцуулагдах хугацаа (t_2) юм. Зураг3-т өргөжүүлсэн нөхөн үйлдвэрлэлтэй цөмийн түлшний циклийн диаграммыг үзүүлэв. Реакторт цөмийн түлшний хуримтлал болсноор түүнийг реактороос гарган авч тодорхой хугацааны туршид хадгалах газар байлгана. Үүний дараа цөмийн түлшний дахин үйлдвэрлэлийн үйлдвэрлүү зөөж түлшний элемент гарган авна. Эндээс харахад цөмийн түлшийг хоёр дахин нэмэгдүүлэх хугацаа нь түлш үйлдвэрлэлийн циклийн түвшин болгон, алхам бүрийн хугацаатай холбоотой нь харагдаж байна. Түлшний элементийн үйлдвэрлэл нь үйлдвэрлэлийн технологийн боловсронгуй байдал, стандарчлалын түвшин, үйлдвэрлэлийн хэмжээ зэргээр тодорхойлогдоно. Мөн реакторын түлшний ашиглагдах хугацаа нь хоёрдогч цөмийн түлшний хуримтлалын хэмжээгээр тодорхойлогдоно.



Зураг3. Өргөжүүлсэн нөхөн үйлдвэрлэлтэй цөмийн түлшний циклийн бүдүүвч

Өргөжүүлсэн нөхөн үйлдвэрлэлтэй цөмийн түлшний цикл дэх түлшний хуримтлалыг дараах тэгшитгэлээр тооцоолно.

$$\frac{M}{M_0} = \exp(wt) \quad (4)$$

w -хуримтлалын хэмжээ

t -хугацаа

M_0 -анхны түлшний ачаалал

M - t хугацаанд хуримтлагдсан түлшний тоо

Иймээс түлш хоёр дахин нэмэгдэх хугацаа дараах байдлаар тодорхойлогдоно:

$$t_2 = \frac{\ln 2}{w} \quad (5)$$

Өөрөөр хэлбэл, цахилгаан эрчим хүчний чадлын өсөлтөөс хамааран цөмийн түлшний хуримтлалын шаардлагатай хэмжээг тодорхойлж чадна гэсэн үг юм. Хэрэв цахилгаан эрчим хүчний өсөлт жилд дунджаар 5%-той тэнцүү гэвэл цөмийн түлш хоёр дахин нэмэгдэх хугацаа $t_2 \approx 14$ жил болно. Энэ бол өнөөгийн хурдан реактортай цөмийн станцын тооцоо юм. Реактор дахь хоёрдогч цөмийн түлшний хуримтлалын хэмжээг нэмэгдүүлэхийн тулд η -г нэмэгдүүлэх хэрэгтэй ба дахин цэнэглэх хугацааг бага байлгах хэрэгтэй[3].

Бидний авч үзэж байгаа хар тугалга хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторууд болох SSTAR реактор нь транс ураны гидрид түлшийг ашигладаг ба EASY реакторын хувьд MOX эсвэл ураны нитрид түлшийг аль алиныг нь ашиглах боломжтой юм.

Хар тугалга хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын (Lead cooled Fast Reactor) голомтын ашиглагдах хугацаа урт учраас биет хамгаалалт болон цөмийн зэвсэг үл дэлгэрүүлэх асуудалд дээд зэргийн эерэг талтай ба түлшний битүү цикл ашигладаг. учраас тогтвортой ажиллагаатай юм. Энэ нь эдийн засаг болон аюулгүй байдалд сайнаар нөлөөлөх нь харагдаж байна.

III. SSTAR реактор

АНУ дахь Аргонны Үндэсний лабораторын хийж байгаа STAR (the Secure Transportable Autonomous Reactor) төслийн зорилго бол урт хугацааны туршид өөрөө бие даан ажилладаг

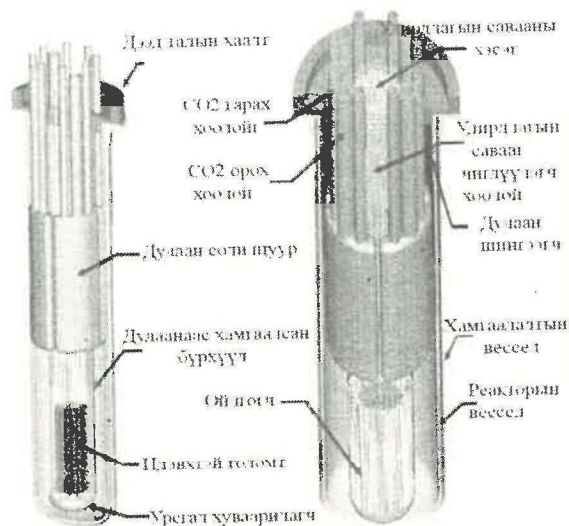
жижиг хэмжээтэй, олон төрлийн хэрэгцээнд ашиглагддаг системийг хөгжүүлэх явдал юм. STAR нь хэд хэдэн хувилбартай. Хамгийн жижиг нь SSTAR (the Small Sealed Transportable Autonomous Reactor) реактор (Зураг4) юм.

SSTAR бол 20МВт-ын цахилгаан үйлдвэрлэх (45МВт-ын дулааны) чадалтай, бассейн төрлийн, экспортлоход зориулсан жижиг хэмжээтэй, хурдан нейтроны спектртэй, байгалийн циркуляцаар хөргөдөг, цөмийн зэвсгийг үл дэлгэрүүлэх зорилготой, “идэвхгүй” хамгаалалттай хурдан нейтроны реактор юм[4]. SSTAR реакторын гол онцлог нь хар тугалган хөргүүр ашигладаг бөгөөд бага оврын голомт (зураг5) нь дахин цэнэглэхгүйгээр 15-30 жилийн турш ажиллах боломжтой. SSTAR реакторын үндсэн параметруудийг хүснэгт1-т үзүүлэв. Энэ реакторыг хөгжүүлж буй гол зорилго нь Аляск, Хавай, Номхон далайн эрэг орчмын улс орнууд болон хөгжиж буй улс орнуудад цахилгаан эрчим хүчинд холбогдоогүй алслагдсан хүн амыг шаардлагатай эрчим хүчээр хангах явдал юм. Энэ загвар нь үндсэн гурван онцлог шинжийг агуулсан:

- А. Хар тугалга хөргүүр ашигладаг
- В. Байгалийн циркуляцаар дулаан дамжуулдаг анхдагч хөргүүртэй
- С. Транс-ураны нитрид түлш ашигладаг

Реакторын чадлыг 181МВт цахилгаан (400МВт дулаан) чадалтай болтол сайжруулах боломжтой. Энэ реактор нь цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэхэд зориулагдсан бөгөөд SSTAR-ийн чадлыг нэмэгдүүлсэн хувилбар STAR-LM (Secure Transportable Autonomous Reactor with Liquid Metal) реактор юм. STAR-LM бол “идэвхгүй” хамгаалалттай, хар тугалга-висмут хөргүүртэй хурдан нейтроны модуляр реактор юм. Энэ реактор нь 2,5м-ийн диаметрийн бортоготой уран-трансураны нитрид түлшийг ашигладаг ба үүнийг 15 жил тутамд солидог. Энэ реакторт задралаас үүсэх дулаан нь агаарын циркуляцаар гадагшилна. Реакторын вессел нь 16,9м өндөр, 5,5м-ийн диаметртэй.

Чадлыг нэмэгдүүлсэн энэ хувилбар нь Са-Вг термо-химийн циклийг ашиглаж устөрөгч болон нүүрстөрөгчийг үйлдвэрлэх боломжтой юм. Гэхдээ кладд болон бүтээцийн материалууд нь ойролцоогоор 800°C температурт ажилладаг байх ёстой. Өндөр температурын энэ хувилбарыг STAR-H₂ гэж нэрлэж байна[5]. Одоогийн байдлаар ойлголтын түвшинд судлагдаж байна.



Зураг4. 20МВт цахилгааны (45МВт дулааны) чадалтай SSTAR систем



Зураг5. SSTAR реакторын голомт ба ойлгогч
Хүснэгт5. SSTAR реакторын үндсэн үзүүлэлтүүд

Чадал, цахилгаан (дулаан), МВт	19.7 (45)
Хөргүүр	Хар тугалга
Түлш	Трансураны нитрид
Түлшний баяжилт, %	1.7/3.5/17.2/19.0/20.7 гэсэн 5 бүстэй
Голомтын ашиглагдах хугацаа, жил	30
Хөргүүрийн оролт/гаралтын температур, °C	420/564
Хөргүүрийн урсгалын хэмжээ, кг/с	2150
Чадлын нягт, Ватт/см ³	42
Түлшний максимум температур, °C	882
Кладдын материал	Цахиураар сайжруулсан зэвэрдэггүй ган
Зэвэрдэггүй ган материалаар хийсэн кладдын	650

максимум температур, °C	
Түлш/Хөргүүрийн эзэлхүүний харьцаа	0.45/0.35
Түлшний савааны диаметр, см	2.50
Голомтын өндөр ба диаметрийн хэмжээ, м	0.976/1.22
Голомтын гидравлик диаметр, см	1.371
Pb-CO ₂ дулаан солилцуур	Shell-and-Tube
Pb-CO ₂ дулаан солилцуурын тоо	4
Дулаан солилцуур хоолойн уртын хэмжээ, м	4.0
Дулаан солилцуурын хоолойн дотоод/гадаад диаметр, см	1.0/1.4
Реакторын vessелийн өндөр/диаметрийн хэмжээ, м	12.0/3.23
Реакторын vessелийн зузаан, м	5.08
Реакторын vessel ба хамгаалалтын vessелийн хоорондох зай, см	12.7
Хоосон зайг дүүргэгч материал	Агаар
Хамгаалалтын vessелийн зузаан, см	5.08
Агаарын сувгийн зузаан, см	15
Агаарын температур, °C	36
Ажиллах шингэн	Суперкритикал CO ₂
CO ₂ -ын турбинд орох температур, °C	550
Цикл дэх CO ₂ -ын хамгийн бага температур, °C	31.25
Цикл дэх CO ₂ -ын Max/Min даралт, МПа	20/7.4
CO ₂ -ын урсгалын хэмжээ, кг/с	245
Цахилгааны цэвэр гаралт, МВт (цахилгаан)	19.7
Цахилгааны цэвэр ашиг, %	43.8

IV. ELSY реактор

ELSY(European Lead-cooled SYstem) нь цэвэр хар-тугалга хөргүүртэй, 600МВт цахилгаан үйлдвэрлэх чадалтай бассейн төрлийн реактор (зураг6) юм. Энэ реактор нь “EU-FP6-ELSY” төслийн хүрээнд судлагдаж байна. ELSY төслийн зорилго нь минор актинидуудыг шатаах чадалтай, тогтвортой байдлыг бүрэн хангасан, энгийн инженерчлэлийн техникийн онцлогыг ашигласан аюулгүй ажиллагаатай дөрөвдүгээр үеийн хурдан нейтроны критик реакторын өрсөлдөхүйц загварыг зохион бүтээх явдал юм. Хүснэгт6-д ELSY реакторын үндсэн параметруудийг үзүүлэв. Хар тугалгыг анхдагч хөргүүрээр сонгон авч байгаагийн давуу тал нь маш өндөр температурт буцалдаг ба агаар болон устай харилцан үйлчлэх химийн идэвхи бага байдагтай холбоотой.

Хүснэгт6. ELSY реакторуудын үндсэн параметрууд

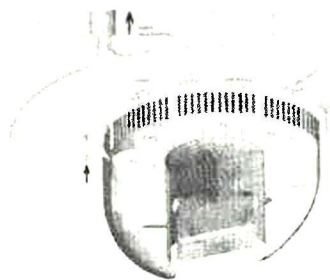
Үндсэн параметрууд	ELSY
Чадал, цахилгаан (дулаан), МВт	600 (1500)
Хувиргах харьцаа	~1
Дулааны үр ашиг (%)	42
Анхдагч хөргүүр	Хар тугалга
Анхдагч хөргүүрийн	Албадмал

циркуляци	
Задралаас үүсэх дулааныг шилжүүлэх анхдагч хөргүүрийн циркуляци	Байгалийн
Хөргүүрийн голомтонд орох температур, (°C)	400
Хөргүүрийн голомтноос гарах температур, (°C)	480
Түлш	МОХ (эсвэл Нитрид)
Түлшний кладдын материал	T91 (aluminized)
Клады хамгийн их температур, (°C)	550
Түлшний элементийн диаметр, (мм)	10,5
Идэвхтэй голомтын өндөр/эквивалент диаметр (м)	0,9/4,32
Эрчим хүч хувиргах системд ажиллах шингэн	18МПа, 450°C-д усны хэт ханасан уур
Андагч насос	Уурын генераторт 8 ширхэг механик насос



Зураг6. ELSY реакторын бүтэц. 1-Реакторын голомт, 2-Идэвхтэй бүс, 3-Эхний насос, 4-Цилиндр дотор талын вессел, 5-Реакторын вессел, 6-Реакторын доод талын хонхор хэсэг, 7-Реакторын дээд тал, 8-Реакторын весселний тулгуур, 9-Голомтын дээд хэсэг, 10-Уурын генераторын хэсэг, 11-түлштэй харьцах төхөөрөмж

Реакторын голомтонд байрлах 162 түлшний цуглуулга нь гурван хэсэгт хуваагдана. Хамгийн дотор талын бүсэд 14%-ийн полутоний баяжилттай 56 түлшний цуглуулга, дунд талын бүсэд 17% баяжилттай 50 түлшний цуглуулга, гадна талын бүсэд 19,9%-ийн баяжилттай 56 түлшний цуглуулга байрлана[5]. Реакторын голомтын үндсэн онцлогуудыг хүснэгт3-т нэгтгэн харуулав. Түлшний дахин цэнэглэх хугацаа 5 жил бөгөөд 1,25 жил бүр голомтын 1/4 –ийг дахин цэнэглэнэ.



Зураг7. ELSY реакторын голомт

Хүснэгт7. ELSY реакторын голомтын үндсэн үзүүлэлтүүд

Түлшний ассемблейн тоо	56+50+56
Түлшний баяжилт	14%, 17%, 19%
Голомтын диаметр	561.7см (20 °C)
Кладдын материалын максимум температур	550°C
Дундаж шугаман чадлын хэмжээ	235Вт/см
Дундаж чадлын нягт	117Вт/см ³
Циклийн эхэн дэх түлшний цуглуулганы дундаж чадал	9.15 МВт дулаан
Түлшний цикл	5жил
Үржүүлэх харьцаа	0.94
Реактивностейн өөрчлөлт	900 pcm (per 1.25 years sub-cycle)
Түлшний дундаж шаталт	78.1MWd/kg (HM)

V. Дүгнэлт

1. Цөмийн эрчим хүчний дөрөвдүгээр үеийн реакторууд болох хар тугалган хөргүүртэй, цөмийн түлшний нөхөн үйлдвэрлэл явуулах, хурдан нейтроноор ажилладаг SSTAR болон ELSY реакторын бүтэц, техникийн үзүүлэлтүүдийг авч үзэв. 20МВт чадалтай SSTAR реактор нь аймгийн төвүүд, харин 600МВт чадатай ELSY реакторыг манай улсын эрчим хүчний нэгдсэн системд ажиллуулахад тохиромжтой юм.

2. Эдгээр реакторууд нь цөмийн түлшний нөхөн үйлдвэрлэл явуулах бөгөөд эрчим хүчний өсөлт жилд 5 % байхад цөмийн түлш хоёр дахин нэмэгдэх хугацаа 14 жил байна.

VI. Ашигласан материалууд

- [1] Craig Smith, "Lead-Cooled Fast Reactor (LFR) Design: Safety, Neutronics, Thermal Hydraulics, Structural Mechanics, Fuel, Core, and Plant Design" February 22, 2010
- [2] Tim Abram, Sue Ion "Generation-IV nuclear power: A review of the state of the science", Energy police 36 (2008) 4323-4330
- [3] Б.А.Дементьев, "Ядерные энергетические реакторы", Москва энергоатомиздат 1990
- [4] "Generation IV International Forum" Annual Report 2011
- [5] European Commission 7th Euroatom Framework Programme 2007-2013 "State of Development of LFR and ADS Technologies and R&D Needs"