

ЦӨМИЙН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ЧИГЛЭЛЭЭР ХИЙГДСЭН СУДАЛГАА

А.Цэндсүрэн¹, Н.Норов¹, С.Одмаа², Б.Мөнхбат^{1,2}, Т.Жамъянсүрэн¹, Х.Дашням¹,
Д.Баясгалан¹

1Монгол Улсын Их Сургууль, Цөмийн Физикийн Судалгааны төв

*2Монгол Улсын их Сургууль, Инженер Технологийн Сургууль, Ногоон эрчим хүч
инженерчлэлийн тэнхим*

Товч агуулга: Энэхүү өгүүлэлд МУИС-ийн ЦФСТ-д сүүлийн 30 жил хийгдсэн цөмийн эрчим хүчний чиглэлээр хийгдсэн ажлуудыг тоймлон орууллаа. Судалгааны эхэн үед Цөмийн эрчим хүч гэж юу болох, цөмийн хүчийг ашиглах үндэслэл, олон нийтийн санал асуулга, цөмийн энерги ашиглах хууль боловсруулахтай холбогдуулан 9 бүлэг, 40 зүйлтэй хуулийн төсөл боловсруулсан байна. Энэхүү суурь судалгааны ажлын үр дүнд МУИС-д Цөмийн эрчим хүчний бакалаврын хөтөлбөрийг 2012 онд нээн элсэлт авч эхэлсэн байна. Энэхүү хөтөлбөрөөр цөмийн физикийн суурь хичээл болон цөмийн реакторын физикийн суурь мэдлэг олгосон. Цөмийн реакторын голомтын дизайныг судалгааг 2010 оноос эхлэн Цөмийн Эрчим Хүч, Технологи (ЦЭХТ)-ийн салбарт хөгжүүлэн судалгааны үр дүнг олон улсын болон дотоодын мэргэжлийн сэтгүүл, хуралд амжилттай хэвлүүлэн, илтгэсээр байна.

Түлхүүр үгс: Цөмийн эрчим хүч, Цөмийн эрчим хүчний реактор, Судалгааны реактор, Голомтын дизайн, Монте-Карло арга

Оршил

Бал чулуун хавтан болон ураны түлшний эвлүүлгээс эхлээд асар том реактор болтлоо хувьсан өөрчлөгдсөн цөмийн эрчим хүчний реакторууд нь шинжлэх ухааны суурь судалгаанаас эдийн засгийн өндөр ач холбогдолтой шинэ технологи бий болгодог гэдгийг илтгэх томоохон нэг жишээ юм. Эрчим хүчний реакторуудын хөгжүүлэлтийн эхэн үед төрөл бүрийн дизайнуудын санааг дэвшүүлсэн байдаг. Гэвч техник, технологи, эдийн засаг, улс төрийн асуудлаас үүдэн эдгээр реакторын дизайны хөгжүүлэлтийн ихэнх нь амжилтгүй болсон байдаг. Түүнчлэн дизайны хөгжүүлэлтийн эхэн үе учир хүндрэлтэй, бэрхшээлтэй асуудлууд нь тодорхойгүй байв. Харин дизайны хөгжүүлэлт үргэлжилсэн реактор бол хөнгөн усан хөргүүртэй хоёр реакторын

дизайн байв. Энэхүү хоёр реакторын хөгжүүлэлтийн гол тулгуур нь тэнгисийн цэргийн зориулалтаар ашигладаг реакторын арвин туршлага байв.

Монгол Улсад цөмийн эрчим хүчийг ашиглах тухай судалгааг Н.Содном, Н.Норов, Л.Энхжин зэрэг эрдэмтэд 1990-ээд оноос эхлүүлсэн ба 1999 онд МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг 6(147)-д[1] цөмийн эрчим хүчийг ашиглах тухай өгүүлэл хэвлэгдсэн байдаг. Тус эрдэм шинжилгээний өгүүлэлээр цөмийн эрчим хүчийг манай оронд ашиглах асуудлыг хэрэгжүүлэх зорилгоор дараах чиглэлийн ажлыг гүйцэтгэх нь зүйтэйг тодорхойлсон. Үүнд:

- ✓ Эрчим хүчний нэгдсэн системээс алслагдсан зарим аймгийн төв, сум, суурин газрын цахилгаан, дулааны

хангамжид бага оврын цөмийн цахилгаан станцыг ашиглах судалгаа хийх, хэрэглэх хүрээг тогтоох;

- ✓ Манай орны тогтвортой хөгжлийг хангахад экологийн хувьд хамгийн цэвэр эрчим хүч бол цөмийн эрчим хүч бөгөөд манай эрчим хүчний ирээдүй гэж үзэх үндэслэлтэй;
- ✓ Эрчим хүчний мастер төлөвлөгөөнд цөмийн эрчим хүчийг ашиглах талаар заавал оруулах нь зүйтэй.

Мөн МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг 7(159)[2] Улаанбаатар хотод цөмийн дулааны станцыг ашиглах боломжийн судалгааны ажлыг хэвлүүлсэн ба Улаанбаатар хотын дулааны хэрэгцээг аюулгүй ажиллагаатай цөмийн дулааны станц ашиглан хангах нь нүүрс шатаадаг уламжлалт станцаас экологийн хувьд давуу болохыг тус ажлаар харуулсан.

Энэ чиглэлийн судалгааны ажлууд үргэлжилж Монгол Улсад цөмийн эрчим хүчийг ашиглах нь хүрээлэн буй орчны асуудал, шатах түлшний хэрэглээг бууруулах боломжтойн зэрэгцээ дотоодын эрчим хүчний эрэлт хэрэгцээг бүрэн хангахад боломжтойд оршино гэж тодорхойлсон.

Он цагийн дараалал

ЦФСТ-д 1990-ээд оноос эхлэн цөмийн эрчим хүчийг Монгол улсад ашиглах үндэслэл[3][1][4], 2010 оноос дэвшилтэд реакторуудын голомтын дизайны судалгааны ажлууд[5], [6], [7], [8] бөөмийн шилжилтийг тооцоолдог Монте-Карло аргад суурилсан компьютерын код ашиглан гүйцэтгэж эхэлсэн. Монте-Карло арга нь орон зай, цаг хугацаа, өнцөг, энергиас хамаарсан бөөмийн шилжилтийг судалж, бөөмсийн шинж чанарыг судалдаг арга юм. Энэ чиглэлийн судалгааны ажлын

дэлгэрэнгүйг дэвшилтэд реакторын голомтын дизайн судалгааны хэсэгт оруулав.

2001 онд “Нейтрон”[9] төслийн хүрээнд Монголд ашиглаж болох цөмийн эрчим хүчний төхөөрөмжийн техник, эдийн засгийн судалгаа ба мастер төлөвлөгөөний бэлтгэл ажил гүйцэтгэсэн. Энэ чиглэлээр зохих судалгаа явуулж, “Монголд атомын цахилгаан станц байгуулах үндэслэл” сэдэвт онол практикийн бага хурлыг Монгол 3000 ХХК-тай хамтран зохион байгуулсан байна.

2002-2003 онд Цөмийн эрчим хүчний сэдвээр Цөмийн реакторт үүсэх цацраг идэвхт хаягдлыг их энергитэй протоны багцаар шарж трансмутаци болгох процессын судалгаа[10] Монгол улсад ашиглах цөмийн эрчим хүчний реакторын судалгаа, цөмийн эрчим хүч ашиглах эдийн засаг, экологийн судалгаа гүйцэтгэсэн.

2004 онд Цөмийн эрчим хүч сэдэвт ажлын хүрээнд ураны хуваагдлын бүтээгдэхүүний гаралтыг хэмжих туршилтын хүрээнд ЦФСТ-ийн микротрон МТ22 дээр гамма квант болон фото-нейтроноор ураны цөм хуваагдахад үүсэх бүтээгдэхүүнийг нимгэн хөнгөн цагаан ялтсанд шилтгэн авч, тэдгээрийн гамма цацрагийг гамма-спектрометр дээр хэмжиж, хуваагдлын бүтээгдэхүүний масс түгэлтийг тодорхойлох аргачлал боловсруулсан. Мөн цөмийн эрчим хүчний эх үүсгүүр ашиглах боломжтой зарим бүс нутгийн цацрагийн дэвсгэр түвшний судалгааны ажлын хүрээнд лабораторийн гамма-спектрометрээр Дорнод, Төв, Баруун бүс нутгийн хөрсөнд байгалийн цацраг идэвхт элемент уран, тори болон бусад үүсмэл цацраг идэвхт изотопын хувийн идэвхийг тодорхойлж цацрагийн тунгийн чадлыг тооцоолсон. Цөмийн эрчим хүчийг ашиглах хууль боловсруулахтай

холбогдуулан Олон Улсын Атомын Энергийн Агентлаг (ОУАЭА) болон бусад орнуудын хууль тогтоомжийг судалж, Монголд цөмийн эрчим хүч ашиглах 9 Бүлэг, 40 зүйлтэй хуулийн төсөл боловсруулсан байна.

2005-2007 онд “Цөмийн энерги”, 2008-2010 он “Цөмийн реактор”, 2011-2013 “Цөмийн эрчим хүч, ураны технологи”, 2014-2015 он “Цөмийн түлш, дэвшилтэд реактор”, 2017-2019 он “Цөмийн энерги ашиглан нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэх судалгаа” сэдэвт ажлуудыг доктор, профессор Н.Норов удирдан гүйцэтгэсэн байна. Эдгээр суурь судалгааны ажлын товч тайлан цөмийн физикийн судалгааны төвийн 50 жилийн ойн[11] номд орсон.

2018-2021 онд Монголд тохиромжтой дэвшилтэд реакторын харьцуулсан судалгаа сэдэвт доктор, дэд профессор С.Одмаагийн удирдсан суурь судалгааны ажил гүйцэтгэсэн.

2022 оноос судалгааны үндсэн чиглэлээр “Цөмийн эрчим хүчний реакторын судалгаа”, “Цөмийн эрчим хүчний ашиглалт”, “Ногоон эрчим хүч-устөрөгчийн эрчим хүч, Цацраг идэвхт ашигт малтмалын олборлолт” дэд сэдвүүдийг тодорхойлж Боловсрол, шинжлэх ухааны яам, Шинжлэх ухаан технологийн сан, Цөмийн Физикийн Судалгааны төвийн гурван талт гэрээ байгуулан ажиллаж байна. Эдгээр чиглэлийн хүрээнд судалгааны ажлууд 2023-2027 хүртэл онуудад хийгдэхээр байна.

Цөмийн эрчим хүчний талаарх ард иргэдийн санал бодлын судалгаа-2015” дэд төслийн гол үр дүн

Цөмийн эрчим хүчний талаарх олон нийтийн санаа бодлыг тандах, хандлагыг тогтоох зорилгоор 2011 онд явуулсан

судалгааны ажилд судлагдахуун, аргазүйг хэрэглэн Улаанбаатар хотоос 780, Дархан, Эрдэнэтээс тус бүр 150, Завхан, Ховд, Дорнод, Дорноговь аймгаас тус бүр 100, бүгд 1500 иргэнээс цаасан анкетаар, 110 иргэнээс цахим хэлбэрээр, нийт 1590 иргэнээс санамсаргүй байдлаар түүвэрлэж мэдээлэл цуглуулсан. Санал асуулгын дүнд тоон судалгааны арга хэрэглэн их олонлогийг төлөөлүүлэн түүвэрлэлт хийж, SPSS.17 программ ашиглан мэдээллийг боловсруулан давтамжийн хүснэгт болон харьцуулсан үзүүлэлтүүдийг гаргах замаар хамаарлын хүчин зүйлийн шинжилгээ хийв.

Судалгааны мэдээлэлд үндэслэн 17 дүгнэлт хийж, дүгнэлтээс урган гарах 7 зөвлөмж, дагалдан гарах 4 зөвлөмжийг захиалагчид санал болгосон. Дүгнэлтүүдийн агуулгыг товч илэрхийлбэл:

- Энэхүү санал асуулга нь цөмийн эрчим хүчний талаар манай орны нийгмийн бүх давхарга, ард нийтийн өргөн төлөөллийг хамарсан хоёр дахь томоохон судалгаа бөгөөд шинжлэх ухааны үндэслэлтэй үр дүнгүүдийг гарган авсан гэж үзэж байна;
- Эрчим хүчний ямар эх үүсвэрийг дэмжиж байгааг харвал: цөмийн эрчим хүчийг дэмжигч 36% байхад эсэргүүцэгч 27% буюу дэмжигчдээс цөөн, нүүрсээр эрчим хүч үйлдвэрлэхийг дэмжигчид 45% байхад эсэргүүцэгчид 26% буюу цөмийг эсэргүүцэгчидтэй адил хувьтай бөгөөд цөмийн энергийг дэмжих, дэмжихгүй, хэрхэхээ мэдэхгүй хүмүүсийн тоо хоорондоо ойролцоо байна;

- Цөмийн эрчим хүчний давуу болон дутагдалтай талын тухайд ард иргэдийн санал бодол 2011 оныхтой ижил байна. Тухайлбал: цөмийн эрчим хүчийг ашиглахад ач холбогдолтой, ач холбогдлоосоо илүү эрсдэлтэй, “мэдэхгүй” гэсэн хүмүүс хоорондоо ойролцоо 1/3 орчим байв;
- Монгол улс ирээдүйд эрчим хүчний хэрэгцээгээ хангахад цөмийн эрчим хүч ашиглахыг дэмжигчдийн эзлэх хувь 54% байгаа бол цөмийн эрчим хүч чухал биш гэж үзэгсэд 27% байгаа нь манай ард иргэд цөмийн техник технологи, аюулгүй ажиллагааны ирээдүйн хөгжил дэвшил итгэл найдвар тавьж, өөдрөг үзэлтэй байгааг илтгэх бөгөөд энэ байдал 2011 оныхоос өөрчлөгдөөгүй байсан;
- Цөмийн эрчим хүчний давуу тал, аюулгүй байдлын талаарх асуултад судалгаанд хамрагдагсдын тэн хагас нь цөмийн цахилгаан станцыг аюулгүй ажиллуулах боломжтой гэж үзсэн байхад эсрэг саналтай болон мэдэхгүй гэж үзсэн хувь нь цөмийн аюулгүй байдалтай холбоотой бусад асуултынхаас хоёр дахин бага байгаа нь ард иргэд цөмийн аюулгүй ажиллагааны ирээдүйн хөгжилд итгэлтэй байгааг давхар баталж байсан;
- Иргэдийн цөмийн эрчим хүчний талаарх мэдээлэл авах гол эх үүсвэрт телевиз, интернэт; цөмийн аюулгүй байдлын талаар хамгийн итгэлтэй мэдээллийг өгөх байгууллагад нэгд цөмийн энергийн комисс, хоёрт эрдэмтэд, гуравт сэтгүүлчдийг

нэрлэсэн нь 2011 оны байдлаас өөрчлөгдөөгүй хэвээр байна. Иймд цөмийн энергийн комиссын ажлын алба, цөмийн салбарын эрдэмтэн судлаачид, сэтгүүлчидтэй хамтран ажиллаж, олон нийтийн телевиз, мэдээллийн гол гол интернэт сайтуудаар үнэн зөв мэдээлэл түгээвэл ард иргэдэд хүрэх нь, хүлээж авах нь илүү үр дүнтэй болсон байна;

- Ерөнхий боловсролын сургуулийн сургалтын хөтөлбөрт эрчим хүчний, ялангуяа цөмийн эрчим хүчний давуу тал, эрсдэлийн тухай үндсэн мэдлэг, мэдээлэл бараг өгдөггүй, түүнчлэн хэвлэл мэдээллийн хэрэгслээрх цөмийн эрчим хүчний талаарх мэдлэг мэдээллийг иргэд хангалттай гэж үзэхгүй байгаа нь судалгааны үр дүнгээс харагдсан;
- Цаашид ард олон нийтийн иймэрхүү судалгааг цөмийн эрчим хүчийг ашиглах талаар үе үе явуулж байх, өөрийн орны онцлог байдал, ард түмний боловсрол мэдлэгт тохирсон, сайтар бодож боловсруулсан, цөөн тооны асуултыг бэлтгэх нь зүйтэй.

Цөмийн эрчим хүчний болон судалгааны реакторыг ашиглах үндэслэл

2014-2016 онуудад цөмийн судалгааны реакторын урьдчилсан техник, эдийн засгийн

судалгаа, судалгааны реакторыг дэмжих үндэсний дэд бүтцийн судалгаа зэрэг дэд төслүүд хэрэгжиж дараах мэдээллийг боловсруулан[12]. Үүнд:

- ✓ Цөмийн энергийн газраас хэрэгжүүлсэн эрдэм шинжилгээний төслүүдийн хүрээнд судалгааны реакторын асуудлыг ЦФСТ

хариуцаж ирсэн бөгөөд хэрэгцээг тодорхойлж, судалгааны реакторыг ажиллуулах хүний нөөцийг зураглал гаргасан, судалгааны реакторуудын хийц, олон улс дахь хэрэглээний талаар мэдээлэл цуглуулсан.

- ✓ Судалгааны реакторын сонголт хийхэд сургалтад ашиглахаас гадна судалгаа- боловсруулалт, үйлдвэрлэлийн зориулалтаар ашиглах хэрэгцээг хангах шалгуур үзүүлэлтүүдийг гаргаж, эдгээрийг үндэс болгон 1 МВт-аас доош чадалтай АНУ-ын Трига марк II (бага), эсвэл ОХУ-ын 5-10 МВт (дунд зэргийн) чадалтай реакторыг сонгох хоёр хувилбар гаргасан[13].
- ✓ Судалгааны реакторын аюулгүй ажиллагааны дүрэм, Судалгааны реакторын аюулгүй ажиллагааны үндэсний стандарт зэрэг зарим бичиг баримтын эхний хувилбарыг боловсруулсан.

Монгол улсад бага, дунд чадалтай цөмийн станц ашиглах үндэслэл

Дэлхийн дундаж жишгийг авч үзэхэд нийт эрчим хүчний хэрэгцээнийхээ 10-15% орчмыг цөмийн станцаас хангадаг. Энэ жишийг манай улсын хувьд авч үзвэл Монгол Улсын суурилагдсан хүчин чадал 1800МВт орчим гэвэл 180-270 МВт эрчим хүчний чадлыг цөмийн эрчим хүчээр хангах юм. Ийм чадал бүхий цөмийн цахилгаан станцууд бол бага, дунд чадалтай реактор (БДЧР)-ууд юм. ОУАЭА-ийн тодорхойлж байгаагаар 300 МВт хүртэл цахилгааны чадал үйлдвэрлэх боломжтой реакторыг бага чадлын, 300-700 МВт хүртэлх цахилгааны чадал үйлдвэрлэх чадалтай реакторыг дунд чадалтай реактор гэж ангилдаг. Бага, дунд чадалтай реакторын хяналт, реакторыг унтраах, дулааныг

зайлуулах, голомтыг хөргөх зэрэгт байгалийн хуульд үндэслэн “идэвхгүй” гэж нэрлэгдэг системийг нэвтрүүлж, өндөр температурт тэсвэртэй дэвшилтэт түлшний болон бүтээцийн материалыг хэрэглэснээр цөмийн түлш гэмтэх, осол гарах магадлалыг бууруулсан олон шинэлэг дизайн зохион бүтээгдэж байна.

БДЧР дэлхийн олон оронд, ялангуяа цахилгаан сүлжээний багтаамж багатай эсвэл цахилгаан эрчим хүчний хэрэгцээ багатай хөгжиж буй орнууд ашиглаж эхэлж байна. Мөн БДЧР-ыг далайн ус цэнгэгжүүлэх, байр орон сууцны халаалт, устөрөгч үйлдвэрлэл зэрэг эрчим хүчний бус дулааны эх үүсвэрт хэрэглэхэд тохиромжтой.

БДЧР-ын хийц дараах шаардлагуудыг хангах учир түүний эдийн засгийн үзүүлэлт сайжирна. Үүнд:

- Станцын хийц хялбар болж сайжирснаар ослын шалтгаан, түүний үр дагавар буурсан;
- Реактор барих хугацаа богино, хөрөнгө оруулалтыг нөхөх хугацаа бага, реакторын хэмжээ тээвэрлэж болохуйц авсаархан болсон;
- Стандарт станц буюу тоног төхөөрөмжийн бүрдлийг модуль байдлаар үйлдвэрлэх нь түүний үнийг бууруулсан;
- БДЧР нь жижиг модуль хэмжээтэй дэс дараалан угсарч станцын чадлыг нэмэгдүүлэх боломжтой нь тул хөрөнгө оруулалтын эрсдэлийг багасгах зэрэг ач холбогдолтой.

Монгол улсад БДЧР-ыг ашиглах боломжууд:

1. Манай улсын цахилгаан, дулаан хангамжийн шугам сүлжээнд БДЧР-ыг ашиглах боломжтой

– Шугам сүлжээ нь тохиромжтой бөгөөд боломжтой

– Ашигласан түлшийг хадгалах шаардлагагүй, реакторын голомтыг бүхэлд нь солих учир ашигласан цөмийн түлш боловсруулах дэд бүтэц хөгжөөгүй манай улсын хувьд тохиромжтой

2. Манай орны төвийн эрчим хүчний системийн бүтцийг сайжруулах, алслагдмал орон нутагт хэрэглэх боломжтой

– Үйлдвэрийн болон тусгаарлагдсан бүс нутгийг эрчим хүчээр хангахын зэрэгцээ реакторын дулааныг ашиглан эрчим хүчинд нүүрсийг, тээвэрт бензинийг орлох устөрөгч үйлдвэрлэх, ус цэнгэгжүүлэх боломжтой.

3. Хөрөнгө оруулалтыг нэг удаа биш урт хугацаанд үе шаттай нэмэгдүүлэх

– Тухайн үед шаардагдах чадалтай реакторыг ашиглалтад оруулж, улмаар чадлыг дэс дараалан өсгөх нь хөрөнгө оруулалтын эрсдэл багатай гэх мэт болно. СВБР-75/100 (ОХУ) зэрэг БДЧР-уудын хийц батлагдаад байна.

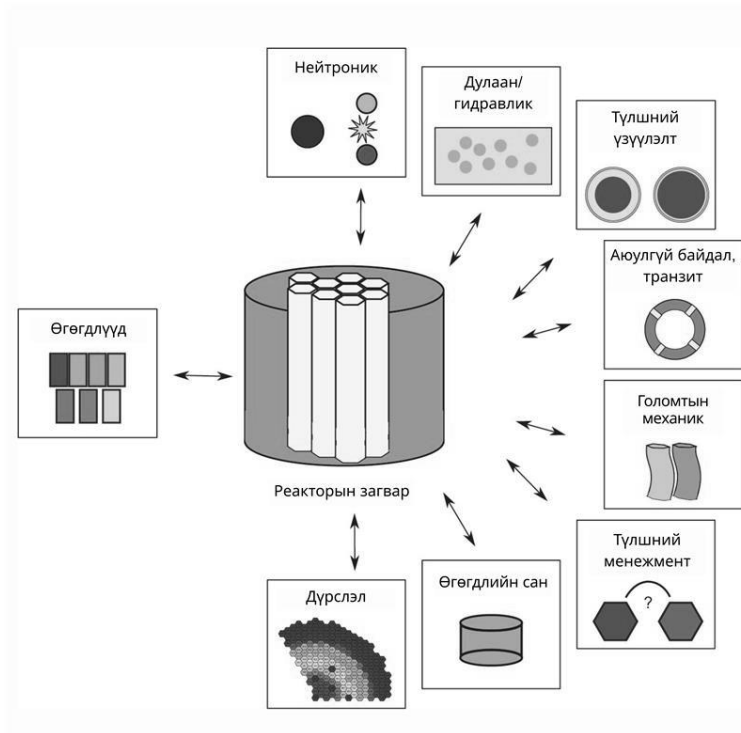
Дэвшилтэд цөмийн реактор болон судалгааны реакторын голомтын дизайны судалгаа

Голомтын дизайны судалгааны ажлууд бөөмийн шилжилтийг тооцоолдог Монте-Карло аргад суурилсан компьютерын код ашиглан хийгдэж байна. Монте-Карло арга нь орон зай, цаг хугацаа, өнцөг, энергиэс хамаарсан шилжилтийн тэгшитгэлийг

бодож бөөмсийн шинж чанарыг судалдаг арга юм.

Голомтын дизайны судалгааг гүйцэтгэхдээ тухайн судлах гэж буй голомтын үндсэн асуудлыг тодорхойлж, судалгааны ажлын зорилтыг тодорхойлно. Үүний дараа судалгааны арга зүйг тодорхойлж судалгааны үндсэн хязгааруудыг тогтоож өгнө. Үүний дараа судалгаанд ашиглах реакторын физикийн кодоод тухайн голомтын дизайны анализад тохирсон горим, нөхцөлүүдийг тогтооно. Эцэст нь судалгааны үр дүнг боловсруулан хэлэлцүүлдэг. Зураг 1-д дизайны судалгааны үндсэн бүтцийг харуулав.

Реакторын дизайнд тухайн судлах гэж буй реакторын үндсэн үзүүлэлт болох өгөгдлийг цуглуулах нь хамгийн чухал хэсэг байдаг. Өгөгдлийг цуглуулсны дараа тооцооллын програмд реакторын голомтыг хэсэг бүрээр нь нарийвчлан оруулна. Хэрэв оруулсан өгөгдлийг зөв бичсэн бол код амжилттай ажиллаж таны оруулсан өгөгдлийн геометр дүрслэлийг гаргадаг. Өгөгдөл болон бичвэрийн хэсэг амжилттай болсны дараа нейтроник тооцооллоос эхлэн дулааны гидравлик, түлшний шаталт, аюулгүй байдал, голомтын механик, түлшний менежмент зэрэг реакторын физик үзүүлэлтийг гаргаж авдаг.



Зураг 1. Цөмийн реакторын голомтын дизайны тооцооллын бүтэц

ЦЭХТ-ийн салбарт Өндөр Температурын Хийн Реактор (ӨТХР), Натри Хөргүүртэй Хурдан Нейтроны реактор (НХХР), Хар Тулганган Хөргүүртэй Хурдан Нейтроны Реактор (ХТХХР), Түлшээ үржүүлэн шатаадаг, сэлгэх системтэй реактор болон IRT-4M, VVR-KN, VVR-M2 түлштэй судалгааны реакторуудын голомтын дизайнууд хамгийн их судлагдсан. Эдгээр ажлуудын МУИС-ийн Цөмийн Физикийн Судалгааны Төвд байрлах МИНАТО-СЕРВЕР дээр хийж гүйцэтгэсэн.

Мөн Өндөр температурын хийн реактор, Хар тугалган хөргүүртэй реактор, Судалгааны реакторын судалгааны ажлууд нь 2018-2021 онд хэрэгжсэн “Монголд тохиромжтой дэвшилтэт цөмийн реакторын харьцуулсан судалгаа” сэдэвт доктор, дэд профессор С. Одмаагийн удирдсан төслийн баг гүйцэтгэсэн. Эдгээр ажлын товч агуулга:

Өндөр температурын хийн реактор буюу өндөр температурд ажилладаг хийн хөргүүртэй 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 ихсэхгүй тул осолд хүргэх магадлал багатай байдгаараа IV-р үеийн реакторын нэг төрөл болон судлагдаж байна.

100 МВт дулааны чадалтай ӨТХР голомтод ажиллаж эхлэх үед үүссэн их хэмжээний илүүдэл нейтроныг (реактивити) багасгахын тулд бөөрөнхий хэлбэртэй “шатан шингээгч материал” (ШШМ)-ыг ашигласан. Энд хоёр өөр материалын бөөмсийг зэрэг ашиглах нь илүү үр дүнтэй учраас B_4C болон Gd_2O_3 бүхий ШШМ бөөмсийг түлшний үүрийн графит матрицад нэгэн жигд агуулгатайгаар нэмж өгөх

замаар хугацааны эхэн үеийн реактивитийг дарж, реакторын ажиллах хугацааны турш реактивити болон чадлын түгэлтийг амжилттайгаар жигдрүүлсэн[14], [15]. Үүний дараа бөөрөнхий болон цилиндр хэлбэртэй нэг төрлийн, шатан шингээгч материал (B_4C) агуулсан 100 МВт дулааны чадалтай, төвдөө ойлгогчтой, ӨТХР-ын голомтын критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэсэн. Цилиндр хэлбэртэй, ШШМ-тай бөөмсүүд нь бөмбөрцөг хэлбэртэй ШШМ-ын бөөмсүүдтэй харьцуулахад реакторын ажиллах хугацааны эхэн үед үүссэн илүүдэл реактивитиг сайн дарж, реакторын нийт ажиллах хугацаа болон түлшний шаталт ихэсч байна. Бөөрөнхий хэлбэртэй харьцуулахад адил гадаргуун талбайтай, ялгаатай эзлэхүүнтэй цилиндр хэлбэрийн ШШМ хэрэглэхэд голомтын нейтроник үзүүлэлтүүд сайжирч байгаа нь ШШМ-ын бөөмсийн тоо болон нийт гадаргуун талбайн хэмжээ, эзлэхүүн ихэссэнтэй холбоотой байна [16]. Мөн Маш өндөр температурын хийн хөргүүртэй реакторын (МӨТХР) голомтын дизайны судалгааг[17] критик байдлын болон түлшний шаталтын тооцооллыг гүйцэтгэсэн байна. Түлшний дизайнаас хамааруулан төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын нейтроник анализын үр дүнг хооронд нь харьцуулахад нэмэлт ZrC давхаргатай дэвшилтэт TRIZO түлш бүхий МӨТХР-ын голомт нейтроник шинж чанараараа хамгийн сайн үзүүлэлттэй байхыг олж тайлбарлав. Харин нэмэлт SiC агуулсан TRISO түлш бүхий төвдөө ойлгогчтой МӨТХР-ын голомтын хувьд реакторын ажиллах хугацаа богино, түлшний шаталт багатай тул тийм ч сайн сонголт биш болохыг олж тогтоов.

Хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реактор

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. 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 бага бөгөөд жигд тархалттай байх, реактор ажиллаж эхлэх үеийн (РАЭҮ) илүүдэл реактивити бага байх, реактивитийн өөрчлөлт жигд байх зэрэг шаардлагуудыг тавьдаг.

100 МВт чадалтай, хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын чадлын түгэлтийг жигдлэх болон илүүдэл реактивитиг дарах замаар дизайны аюулгүй байдлын сайжруулах судалгааны ажил гүйцэтгэсэн[18]. 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. Голомтын төвийн эвлүүлэгт B_4C , Gd_2O_3 , Er_2O_3 , гэсэн уламжлалт шатан шингээх материал ШШМ-уудыг гурван өөр хэлбэрээр ачаалж анализ хийхэд B_4C нейтроныг их шингээж анхны илүүдэл реактивитиг хамгийн сайн дарсан. Голомтод уламжлалт ШШМ

нэмэхэд анхны илүүдэл реактивитиг бууруулж байгаа боловч PPF-г муугаар нөлөөлж байгааг олж тайлбарлав. Шингээх хөндлөн огтлол ихтэй шатан шингээгч материал NpN -ийг голомтын зөвхөн төвийн эвлүүлэгт нэмэхэд нейтроник үзүүлэлтэд сайнаар нөлөөлж байгаа боловч PPF-ийн утгыг 5 хүртэл нэмэгдүүлсэн. 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.

Түлшээ үржүүлэн шатаадаг, сэлгэх системтэй реактор

Дэлхийн энергийн хэрэгцээ өсөхийн хэрээр түүнийг хангах тогтвортой, найдвартай, цэвэр эх үүсвэрийн нэг нь цөмийн эрчим хүч болно. Байгалийн ураныг үр дүнтэй ашиглах, цөмийн ашигласан түлшний хэмжээг багасгах, хуримтлалыг бууруулах, дахин боловсруулах үнэтэй үйлдвэрийн дутагдлыг нөхөх нэг арга нь түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторыг ашиглах юм. Ийм реакторт байгалийн эсвэл ядуурсан уран түлш ашиглах тул голомтыг критик төлөвт ажиллуулахын тулд нейтроны урсгал өндөртэй байрлалд хуваагдах изотопын агууламж өндөртэй түлшийг сэлгэн байрлуулах арга хэрэглэдэг. Энэ санааг Японы Токиогийн Шинжлэх Ухааны Институт (хуучин нэрээр Токиогийн Технологийн Институт)-ийн профессор Тору Обарагийн судалгааны баг дэвшүүлж[19], янз бүрийн түлш хөргүүрийн материал голомтод хэд хэдэн сэлгээний схемтэйгээр түлшээ үржүүлэн шатаах ажиллагааны горимыг ханган ажиллахыг судласан байна[20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27]

50 МВт-дулааны чадлын, U_3Si_2 түлштэй, шингэн натри хөргөлттэй, сэлгэн байрлуулах гацуур мод схемтэй, түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторын эхлэл голомтын дизайн хийв(С.Одмаа 2024). Байгалийн уран бүхий цахиурт уран түлштэй, 180 см өндөртэй, 200 см эквивалент радиустай, голомтын түлшний эвлүүлгийг 700 өдрийн интервалтайгаар гацуур мод сэлгээний схемээр сэлгэхэд бүтэн 2 цикл буюу нийтдээ 108 сэлгээний дараа тэнцвэрт төлөвт хүрч буйг харуулав. Тэнцвэрт төлөвийн түлшний эвлүүлгүүдийн хязгааргүй нейтрон үржүүлэх факторт үндэслэн эхлэл голомтын дизайныг бага зэргийн баяжуулсан уран түлш ашиглан хийсэн.

IRM-4M Түлштэй судалгааны реактор

ОХУ-аас нийлүүлэгддэг, хөнгөн цагаан бүрээс, ^{235}U баяжилт 19,7%, нэг түлшний эвлүүлэг нь үелсэн 7 дөрвөлжин, 1 дугуй давхаргаас бүрдсэн ба 9.6кг $U-235$ агуулсан, давхарга бүрийн хооронд ус байрлана. IRT-4M цөмийн түлшний 32ш эвлүүлгээс бүрдсэн усан сан төрлийн 10МВт чадалтай реакторын голомтын дизайн судалгааг хийв[8]. Энэхүү ажлаар Монте-Карло аргад үндэслэсэн Японы Атомын Энергийн Агентлагт хөгжүүлсэн MVP/GMVP-II кодыг нейтроноор явагдах урвалын өгөгдлийн сан JENDL-3.3-ийн хамтаар ашиглан IRT-4M түлшний багцаас бүрдсэн голомтын нейтроникийн тооцооллыг хийсэн. Энэ голомтын дизайны онцлог нь голдоо 4 түлшний эвлүүлгийн хэмжээтэй шаралтын суваг агуулдаг. Энэ суваг нь түлшний эвлүүлгүүдээр хүрээлэгдсэн байх ба ус, графит, берилий зэрэг нейтрон удаашруулагч материалуудаар дүүргэгдэнэ. Ийм хэлбэржилт нь зүг бүрээс ирэх дулааны болон хурдан нейтроны өндөр урсгалыг шаралтын сувагт бий болгодгоороо давуу

талтай. Үр дүнгээс харахад голомтын төв дээрх цацрагийн шарлагын суваг дээрх дулааны нейтроны урсгал хамгийн ихдээ $8.30 \cdot 10^{13}$ н/см²*с. Харин зах дээрх цацрагийн шарлагын суваг дээрх хамгийн их урсгал $6.03 \cdot 10^{13}$ н/см²*с. Эдгээр урсгал сувгийн 28-32 см уртад харгалзаж байна.

VVR-KN түлштэй судалгааны реактор

ОХУ-аас нийлүүлэгддэг, хөнгөн цагаан бүрээс, ²³⁵U баяжилт 19,7%, түлшний эвлүүлэг нь хоёр янз байна. Үүнд 7 зургаан талт, 1 цагираган давхаргаас бүрдсэн багц, 5 зургаан талт үелсэн давхрагаас бүрдсэн багц. Энэхүү голомт нь 5МВт чадалтай, нийт 26 түлшний багц, 52 берилли ойлгогч багц болон 7 цацрагийн шарлагын сувгуудаас бүрдэнэ[8]. Үр дүнгээс харахад голомтын төв дээрх цацрагийн шарлагын суваг дээрх дулааны нейтроны урсгал хамгийн ихдээ $2.35 \cdot 10^{14}$ н/см²*с. Харин зах дээрх цацрагийн шарлагын суваг дээрх хамгийн их урсгал $1.10 \cdot 10^{14}$ н/см²*с. Эдгээр урсгал сувгийн 28-32 см уртад харгалзаж байна.

VVR-M2 түлштэй судалгааны реактор

Бид Вьетнам улсын судалгааны реактор болох Далат (Dalat) реактор дизайны тооцооллыг гүйцэтгэв[8]Энэхүү реакторын чадал 250кВт байсан бөгөөд 1982 оны 3-сард реакторыг шинэчлэж чадлыг 500кВт болгосон. Үр дүнгээс харахад голомтын төв дээрх цацрагийн шарлагын суваг дээрх дулааны нейтроны урсгал хамгийн ихдээ $1.63 \cdot 10^{13}$ н/см²*с. Харин зах дээрх цацрагийн шарлагын суваг дээрх хамгийн их урсгал $8.22 \cdot 10^{12}$ н/см²*с. Эдгээр урсгал сувгийн 28-32 см уртад харгалзаж байна

Дүгнэлт

- Цөмийн эрчим хүчийг ашиглах үндэслэлийг боловсруулах ажил

эрчим хүчний судалгааны эхлэл болсон. Энэ чиглэлийн судалгаа анх 1998 онд Монгол улсад цөмийн эрчим хүчийг ашиглахад шаардлагатай гурван ажлыг тодорхойлон эхэлсэн.

- Цөмийн эрчим хүчний талаарх ард иргэдийн санал асуулгын үр дүнд цөмийн эрчим хүчийг дэмжигч 36% байхад эсэргүүцэгч 27% буюу дэмжигчдээс цөөн, нүүрсээр эрчим хүч үйлдвэрлэхийг дэмжигчид 45% байхад эсэргүүцэгчид 26% буюу цөмийг эсэргүүцэгчидтэй адил хувьтай бөгөөд цөмийн энергийг дэмжих, дэмжихгүй, хэрхэхээ мэдэхгүй хүмүүсийн тоо хоорондоо ойролцоо байгааг харуулсан.
- Судалгааны реакторыг ашиглах ажил 2011 оноос эхлэн хийгдэж 500кВт чадалтай Трига төрлийн реактор тохиромжтой гэж үзэж байв. Гэвч дараа дараагийн судалгааны ажлуудаар дээрх чадалтай реактор нь монгол улсын хэрэгцээг хангахад хүрэлцэхгүй харуулж байв.
- Эрчим реакторын хувьд мөн адил судалгааны эхэн үед CANDU төрлийн реактор тохиромжтой гэсэн үндэслэл гаргаж байсан боловч дараа дараагийн судалгааны ажлуудаар дээрх сонголт БДЧР реактор гэж өөрлөгдөж байна.
- Дэвшилтэд цөмийн эрчим хүчний реакторын голомтын дизайны судалгааны ажил сүүлийн арван жил хурдацтай хийгдсээр байна. Цөмийн эрчим хүч, технологийн салбарт Өндөр Температурын хийн реактор, Натри хөргүүртэй хурдан реактор, Хар тугалган хөргүүртэй хурдан реактор, Түлшээ үржүүлэн шатаадаг сэлгэх системтэй реактор, мөн ОХУ-

ын судалгааны реакторын түлшний (IRT-4M, VVR-KN, VVR-M2) дизайнтай судалгааны реакторуудын голомтын дизайны судалгааг Монте Карло аргад үндэслэсэн MVP, MVP-BRUN, SERPENT зэрэг реакторын голомтыг орон зай, цаг хугацаа, өнцөг, энергиэс хамаарсан шилжилтийн тэгшитгэлийг шийдэж бөөмсийн шинж чанар судлагдаж, судалгааны үр дүнгээ олон улсын мэргэжлийн сэтгүүлд хэвлүүлж, хурал зөвлөгөөнд илтгэсэн.

Ирээдүйд хийх ажлууд:

- Төрөл бүрийн реакторын дизайны аюулгүй байдлын анализ
- Төрөл бүрийн реакторын дизайны судалгааг илүү нарийвчлалтай гүйцэтгэх
- Хүний нөөцийг сайжруулах төсөл хөтөлбөр хэрэгжүүлэх
- БДЧР-ын төсөл хэрэгжүүлэх
- Эрчим хүчний тооцоолол

Талархал

Цөмийн эрчим хүчний асуудал, судалгааны ажлуудыг 1990-ээд оноос эхлэн МУИС-ийн ЦФСТ-д доктор, профессор Н.Содном, Н.Норов нар эхлүүлэв. Доктор, профессор Н.Норов 2005-2015 он хүртэл цөмийн эрчим хүчний суурь судалгааны төслүүдийг амжилттай хэрэгжүүлж Монгол улсад цөмийн эрчим хүчийг ашиглах үндэслэлийг гаргасан байна. Цөмийн реакторын голомлын дизайны ажлууд 2016 оноос эхлэн хийгдсээр байна. Цөмийн эрчим хүчний чиглэлийн судалгаанд хувь нэмэр оруулсан үе үеийн ахмадууд, төгсөгчид болон оюутнууд тус салбарт ажиллаж байсан багш ажилтнууд, хамтран

ажилладаг байгууллага, хүмүүст талархал илэрхийлж байна.

Ашигласан ном зүй

- [1] Н. Содном, Б. Эрдэв, Л. Энхжин, Н. Норов, and П. Зузаан, «Цөмийн эрчим хүч ашиглах тухай», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 6, no 147, pp 11–20, 3-p cap 1999, doi: 10.22353/PHYSICS.V6I147.819.
- [2] Н. Норов, and Д. Сангаа, «Улаанбаатар хотод цөмийн дулааны станцыг ашиглах боломж», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 7, no 159, pp 161–167, 3-p cap 2000, doi: 10.22353/PHYSICS.V7I159.492.
- [3] Н. Норов, and Д. Сангаа «Улаанбаатар хотод цөмийн дулааны станцыг ашиглах боломж», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 7, no 159, pp 161–167, 3-p cap 2000, doi: 10.22353/PHYSICS.V7I159.492.
- [4] Н. Содном, Б. Эрдэв, Л. Энхжин, Н. Норов, and П. Зузаан, «Цэвэр эрчим хүч», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 4, no 137, pp 94–103, 2-p cap 1998, doi: 10.22353/PHYSICS.V4I137.96.
- [5] Т. Жамъянсүрэн, С. Одмаа, Б. Мөнхбат, and Н. Норов, «Өндөр температурын хийн реакторын голомтын нейтроник анализд “SERPENT” кодыг ашиглах нь», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 30, no 527, pp 1–6, 3-p cap 2020, doi: 10.22353/PHYSICS.V30I527.618.
- [6] B. Munkhbat and T. Obara, «Conceptual design of a small nuclear reactor for large-diameter NTD-Si using short PWR fuel assemblies», *J Nucl Sci Technol*, vol 50, no 1, pp 46–58, 1-p cap 2013, doi: 10.1080/00223131.2013.750057.
- [7] С. Одмаа, Т. Жамъянсүрэн, and Н. Норов, «Задралын дулаанаа идэвхгүйгээр

- зайлуулах чадвартай, төвдөө ойлгогчтой, өндөр температурын хийн хөргөлттэй реакторын голомтын дизайны судалгаа», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 25, no 478, pp 34–40, 2-р сар 2017, doi: 10.22353/PHYSICS.V25I478.175.
- [8] А. Цэндсүрэн, Г. Дамдинсүрэн, С. Даваа, and Б.Мөнхбат, «Монгол улсад тохиромжтой цөмийн сургалт, судалгааны реакторын голомтын дизайны судалгаа», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 30, no 527, pp 24–30, 3-р сар 2020, doi: 10.22353/PHYSICS.V30I527.647.
- [9] С. Одмаа, Н. Норов, and Д. Баатархүү, «Микротрроны бал чулуун удаашруулагч дахь нейтроны түгэлт», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 8, no 159, pp 109–120, 3-р сар 2001, doi: 10.22353/PHYSICS.V8I159.432.
- [10] С. Одмаа and Н. Норов, «Ураны хуваагдлын бүтээгдэхүүний салаалсан хэлхээн дэх гамма цацраг идэвхгүй цөмийн гаралтыг үнэлэх нь», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 10, no 179, pp 165–172, 3-р сар 2003, doi: 10.22353/PHYSICS.V10I179.541.
- [11] П. Зузаан, Н. Норов, Г. Хүүхэнхүү and С.Даваа, *Цөмийн Физикийн Судалгааны төв 50 жилд*, 1-р ed. Мөнхийн үсэг ХХК, 2015.
- [12] Г. Цэмбэлмаа, Бя. Мөнхбат and Н. Норов, «Судалгааны реакторыг дэмжих үндэсний дэд бүтцэд хийсэн урьчилсан үнэлгээ», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 24, no 468, pp 17–23, 3-р сар 2017, doi: 10.22353/PHYSICS.V24I468.633.
- [13] С. Одмаа, Н. Норов, Г. Хүүхэнхүү, and С. Даваа, «Монгол Улсад Тохиромжтой Судалгааны Реактор Сонгох Асуудалд», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 16, no 355, pp 100–108, 3-р сар 2011, doi: 10.22353/PHYSICS.V16I355.303.
- [14] С. Одмаа, Г. Энхбаатар, and Н. Норов, «Задралын Дулаанаа Идэвхгүйгээр Зайлуулах Чадвартай, Төвдөө Ойлгогчтой ба Ойлгогчгүй Өндөр Температурын Хийн Хөргөлттэй Реакторын Дизайны Параметруудийн Харьцуулсан Судалгаа», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 23, no 455, pp 77–84, 3-р сар 2016, doi: 10.22353/PHYSICS.V23I455.786.
- [15] Т. Жамъянсүрэн, and С. Одмаа, «Жигд бус голомттой, цагираган өндөр температурын хийн хөргөлттэй реакторын нейтроник анализ», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 27, no 495, pp 44–50, 3-р сар 2018, doi: 10.22353/PHYSICS.V27I495.604.
- [16] Т. Жамъянсүрэн, and С. Одмаа., «Өндөр температурын хийн реакторын голомт дахь шатан шингээгч материалын хэлбэрийн нөлөө», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 31, no 536, pp 77–83, 3-р сар 2020, doi: 10.22353/PHYSICS.V31I536.352.
- [17] Б. Хөхсүвд and С. Одмаа, «Маш өндөр температурын хийн хөргүүртэй реакторын голомтын дизайны судалгаа: өөр өөр бөөм түлштэй голомтуудын харьцуулалт», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 31, no 536, pp 46–53, 3-р сар 2020, doi: 10.22353/PHYSICS.V31I536.335.
- [18] Г. Нарантунгалаг and С. Одмаа, «Бага чадлын, хар тугалган хөргүүртэй хурдан нейтроны реакторын голомтын дизайныг сайжруулах судалгаа», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 31, no 536, pp 15–23, 3-р сар 2020, doi: 10.22353/PHYSICS.V31I536.329.
- [19] T. Obara, K. Kuwagaki, and J. Nishiyama, «Feasibility of Burning Wave Fast Reactor

- Concept with Rotational Fuel Shuffling», in *IAEA-CN245-051*, 2017.
- [20] K. Kuwagaki, J. Nishiyama, and T. Obara, «Concept of Stationary Wave Reactor with Rotational Fuel Shuffling Concept of Stationary Wave Reactor with Rotational Fuel Shuffling», *Nuclear Science and Engineering*, vol 191, no 2, pp 178–186, 2018, doi: 10.1080/00295639.2018.1463744.
- [21] V. K. Hoang, O. Sambuu, J. Nishiyama, and T. Obara, «Feasibility of Sodium-Cooled Breed-and-Burn Reactor with Rotational Fuel Shuffling», *Nuclear Science and Engineering*, vol 196, no 1, pp 109–120, 2022, doi: 10.1080/00295639.2021.1951063/FORMA T/EPUB.
- [22] O. Sambuu, V. K. Hoang, J. Nishiyama, and T. Obara, «Neutron Balance Features in Breed-and-Burn Fast Reactors», *Nuclear Science and Engineering*, vol 196, no 3, pp 322–341, 2022, doi: 10.1080/00295639.2021.1980361.
- [23] K. Kuwagaki, J. Nishiyama, and T. Obara, «Concept of breed and burn reactor with spiral fuel shuffling», *Ann Nucl Energy*, vol 127, pp 130–138, 5-p cap 2019, doi: 10.1016/j.anucene.2018.12.006.
- [24] T. Amarjargal, J. Nishiyama, and T. Obara, «Core Concept of Small Rotational Fuel-Shuffling Breed-and-Burn Fast Reactor with Nitride Fuel and Sodium Coolant», *Nuclear Science and Engineering*, vol 197, no 4, 2023, doi: 10.1080/00295639.2022.2129952.
- [25] H. H. Nguyen, J. Nishiyama, and T. Obara, «Optimization of reactor size in the small sodium-cooled CANDLE burning reactor», *Ann Nucl Energy*, vol 153, p 108040, 4-p cap 2021, doi: 10.1016/J.ANUCENE.2020.108040.
- [26] T. Amarjargal, J. Nishiyama, and T. Obara, «Small rotational fuel-shuffling breed-and-burn sodium-cooled and nitride-fueled fast reactor with LBE reflectors», *Ann Nucl Energy*, vol 201, p 110445, 6-p cap 2024, doi: 10.1016/J.ANUCENE.2024.110445.
- [27] O. Sambuu, V. K. Hoang, T. Amarjargal, and T. Obara, «Fuel cycle features of RFBB fast reactor with advanced fuel», 2025, doi: 10.1080/00223131.2025.2455051.
- [28] С. Одмаа, «Түлшээ үржүүлэн шатаах хурдан реакторын эхлэл голомтын дизайны судалгаа», *Scientific transaction of the National University of Mongolia. Physics*, vol 36, no 605, pp 28–34, 11-p cap 2024, doi: 10.22353/PHYSICS.V36I605.9341.