

Бага чадлын реакторын эдийн засгийн хялбаршуулсан тооцоо

Ш.Молор^{a,*}, Ц.Золбадрал^b, Ү.Баянжаргал^c, С.Даваа^c

^a ШУА-ийн Физик, технологийн хүрээлэн, 13330

^b МУИС-ийн Цөмийн физикийн судалгааны төв, 13330

^c Цөмийн энергийн комиссын ажлын алба, 17042

Хураангуй

Монгол Улсад эрчим хүчний хэрэглээ тасралтгүй өсөж, дотоодын эх үүсвэрээс хэрэглээний 2/3-ийг хангаж байгаа нь импортын хамаарлаас шалтгаалсан эрсдэлийг нэмэгдүүлж байна. Ийм нөхцөлд бага чадлын цөмийн реактор (БЧР) ашиглах эдийн засгийн боломжийг BWRX, RITM-200N загварууд дээр тулгуурлан судаллаа. Судалгаанд тэгшитгэсэн өртөг (LCOE), цэвэр өнөөгийн үнэ цэнэ (NPV), дотоод өгөөжийн хувь (IRR), хөрөнгө оруулалтын нөхөлтийн хугацаа зэргийг авч үзсэн. Зээлийн хөнгөлөлтийн хувь 3-7% үед BWRX реакторуудын LCOE 46.5-73.6 ам.доллар/МВтцаг байгаа нь өнөөгийн борлуулалтын үнэтэй (80 ам.доллар/МВтцаг) харьцуулахад эдийн засгийн үр ашигтай байна. Харин RITM реакторууд илүү өндөр өртөгтэй тул зөвхөн 3%-ийн зээлийн хөнгөлөлтийн нөхцөлд ашигтай байна. Судалгааны үр дүн БЧР-ийг Монгол Улсын эрчим хүчний найдвартай байдалд хувь нэмэр оруулах боломжтой байна.

Түлхүүр үгс: Цахилгаан эрчим хүч, Бага чадлын реактор, Тэгшитгэсэн үнэ, Хөрөнгө оруулалт, Хаягдлын менежмент, Цэвэр өнөөгийн үнэ цэнэ

УДИРТГАЛ

Монгол Улсын эрчим хүчний салбар сүүлийн жилүүдэд эрчимтэй хөгжиж, эрчим хүчний хэрэглээ жилд дунджаар 7-8 %-иар өсөж байна. 2024 оны байдлаар улсын нийт эрчим хүчний хэрэглээ 11.6 тэрбум кВтцаг-д хүрч, өвлийн оргил ачаалал 1655 МВт-д хүрсэн нь өмнөх оноос 1.2%-иар нэмэгдсэн үзүүлэлт юм. Гэсэн хэдий ч, дотоодын үйлдвэрлэл нийт хэрэглээний 75.3 %-ийг хангаж, үлдсэн 24.7%-ийг импортоор бүрдүүлж байна [1]. Энэ нь эрчим хүчний хангамжийн найдвартай байдал, аюулгүй байдалд тодорхой эрсдэл үүсэж байна.

Монгол Улс нь эрчим хүчний хэрэгцээний тогтмол өсөлт, уур амьсгалын өөрчлөлттэй тэмцэх дэлхий нийтийн шаардлага, мөн сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийн хязгаарлагдмал байдал зэрэг олон хүчин зүйлтэй тулгарч байна. Эдгээр нөхцөл байдал нь улс орныг эрчим хүчний шинэ, найдвартай эх үүсвэрийг эрэлхийлэх зайлшгүй шаардлагад хүргэж байна. Энэхүү хэрэгцээ шаардлагын хүрээнд цөмийн эрчим хүчийг ашиглах боломжийг цогц байдлаар судлах нь нэн чухал юм. Монгол Улсын Засгийн газрын 2024–2028 оны үйл ажиллагааны хөтөлбөрт "Цөмийн эрчим хүч ашиглах бодлого хэрэгжүүлж, суурь судалгааг хийнэ" [2] гэж тусгасан.

Эрчим хүчний шинэ эх үүсвэрийг эрэлхийлэх энэхүү шаардлагын хүрээнд, цөмийн эрчим хүчний салбарын дэвшилтэт технологийн нэг

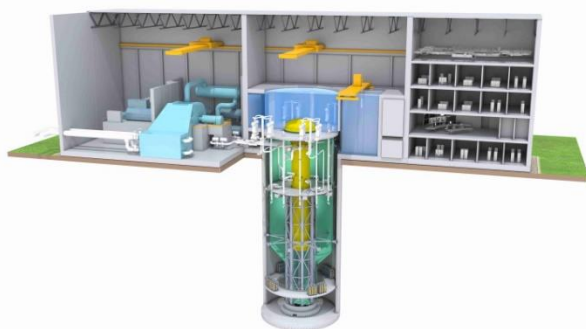
болох Бага чадлын реактор (БЧР) нь чухал ач холбогдолтой юм. БЧР нь өөрийн жижиг хэмжээ, уян хатан байдал, аюулгүй ажиллагааны өндөр түвшин, мөн эдийн засгийн үр ашиг зэрэг олон давуу талыг агуулдаг. Түүнчлэн, БЧР-ууд нь төвлөрсөн бус эрчим хүчний хангамжийн системийг бий болгох, улмаар алслагдсан бүс нутгуудыг тогтвортой эрчим хүчээр хангах чухал боломжийг олгодог. Энэ судалгааны зорилго бага чадлын реакторын эдийн засгийн хялбаршуулсан тооцоог хийхэд оршино. Судалгаагаар БЧР-ийн хөрөнгө оруулалтын зардал, ашиглалтын зардал, эрчим хүчний нэгжийн өртөг зэрэг үзүүлэлтүүдийг тооцсон.

ТООЦООНД АШИГЛАСАН БАГА ЧАДЛЫН ЦӨМИЙН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ РЕАКТОР

Монгол Улсын эрчим хүчний дутагдал, өсөн нэмэгдэж байгаа эрчим хүчний хэрэгцээ 2030 онд 3.3 ГВт [3] болох шаардлагад тулгуурлан эрчим хүчний олон эх үүсгүүрийн нэг нь Цөмийн эрчим хүчний станц (ЦЭХС) байх боломжтой. ЦЭХС-ын суурилагдсан чадлыг ОУАЭА-ийн зөвлөмжийн дагуу шинээр цөмийн эрчим хүч ашиглах улс нийт эрчим хүчин чадлын 10%-иас хэтрэхгүй байхаар [4] BWRX-300, RITM 200N реакторуудын суурилагдсан хүчин чадлыг 220-600МВт байхаар сонгон авч Монгол Улсын эрчим хүчний өнөөгийн тарифтай харьцуулан тооцсон.

BWRX-300 цөмийн эрчим хүчний реактор

BWRX-300 нь АНУ-ын General Electric Hitachi Nuclear Energy (GEH) компанийн хөгжүүлж буй буцалсан уст реакторын (BWR - Boiling Water Reactor) төрлийн шинэ үеийн БЧР юм. Энэхүү БЧР нь системийн хялбар шийдэл, аюулгүй ажиллагааны пассив (байгалийн хуулиар ажилладаг) элементүүд, барих хугацаа болон зардлыг бууруулах зорилготой инженерийн шийдлүүдийг агуулсан. Тус реактор нь 300 МВт-ийн чадалтай, нэг циклээр 12-18 жил ажиллах горимд тохируулсан дизайнтай [5]. Энэхүү БЧР нь дэлхийд арилжааны зорилгоор баригдаж байгаа анхны реакторуудын нэг юм.



Зураг 1. BWRX 300 цөмийн эрчим хүчний реактор.

Монгол Улсын эрчим хүчний нэгдсэн сүлжээнд 300МВт болон 600МВт-ийн суурилагдсан чадалтай BWRX 300 реактор холбоно гэж үзэв.

Хүснэгт 1. BWRX 300 БЧР-ийн үзүүлэлт [6]

Үзүүлэлт	BWRX 300	BWRX 300x2
Суурилагдсан эрчим хүчний чадал	300 МВт	600 МВт
Станцын чадлын фактор	90%	90%
Станц ажиллах хугацаа	60 жил	60 жил
Үйлдвэрлэх эрчим хүч	2,365 сая кВтцаг/жил	4,731 сая кВтцаг/жил
	3500	3237.5
Хөрөнгө оруулалт	ам.доллар/кВт	ам.доллар/кВт
Түлшний баяжуулалт	4.95%	4.95%
	анхны	анхны
Түлшний хэрэглээ	суурилуулалт 45тн, 10 тн/жил	суурилуулалт 90тн, 20 тн/жил
	17	15.7
Үйл ажиллагаа/засвар үйлчилгээний зардал	ам.доллар/МВтцаг	ам.доллар/МВтцаг
Хаягдлын менежмент/станц буулгах зардал	ам.доллар/МВтцаг	ам.доллар/МВтцаг
Станц барих хугацаа	4 жил	4 жил

RITM 200N цөмийн эрчим хүчний реактор

RITM-200N реактор нь тусгайлан хойд бүсийн, алслагдсан, төвлөрсөн сүлжээнд холбогдоогүй бүс нутагт зориулагдсан байгаль, цаг уурын хүнд нөхцөлд ажиллах зориулалттай юм. RITM-200N нь хэвтээ байрлалтай, интеграл хийцтэй, даралтат усан реактор (PWR) бөгөөд түүнийг Арктикийн бүсийн усан онгоцнуудад (жишээлбэл, мөс зүсэгч хөлөгт) амжилттай туршин хэрэглэсэн туршлагад үндэслэн хуурай газарт тохируулсан хувилбар юм. Уг реакторын суурилагдсан чадал нь 55 МВт бөгөөд жилд дунджаар 400–500 сая кВтцаг эрчим хүч үйлдвэрлэх боломжтой [7].



Зураг 2. RITM 200N цөмийн эрчим хүчний реактор.

RITM 200N цөмийн эрчим хүчний реакторын хувьд эрчим хүчний нэгдсэн сүлжээнд 220МВт болон 330МВт-ийн суурилагдсан чадалтай реактор холбоно гэж тооцсон.

Хүснэгт 2. RITM 200N БЧР-ийн үзүүлэлт [8]

Үзүүлэлт	RITM 220	RITM 330
Суурилагдсан эрчим хүчний чадал	220 МВт	330 МВт
Станцын чадлын фактор	90%	90%
Станц ажиллах хугацаа	60 жил	60 жил
Үйлдвэрлэх эрчим хүч	1,735 сая кВтцаг/жил	2,600 сая кВтцаг/жил
	6800	6371
Хөрөнгө оруулалт	ам.доллар/кВт	ам.доллар/кВт
Түлшний баяжуулалт	20%	20%
	анхны	анхны
Түлшний хэрэглээ	суурилуулалт 13.2тн, 2.1 тн/жил	суурилуулалт 19.8тн, 3.2 тн/жил
	26.3	24.7
Үйл ажиллагаа/засвар үйлчилгээний зардал	ам.доллар/МВтцаг	ам.доллар/МВтцаг
Хаягдлын менежмент/станц буулгах зардал	ам.доллар/МВтцаг	ам.доллар/МВтцаг
Станц барих хугацаа	4 жил	4 жил

Монгол Улсын цахилгаан эрчим хүчний үнэ тариф

Эрчим хүчний зохицуулах хорооноос хэрэглэгчийн цахилгааны тарифыг 2024 оны 11 дүгээр сарын 15-ны өдрөөс Цахилгааны дундаж тариф 1 кВтцаг тутамд 216 төгрөг байгааг 280 төгрөг [9] болгосон нь өнөөдрийн төгрөг ам.долларын ханшаар 1МВтцаг эрчим хүчийг 80 ам.доллаароор зарж байна.

ЭДИЙН ЗАСГИЙН ХЯЛБАРШУУЛСАН ТООЦООНЫ АРГА ЗҮЙ

Тэгшитгэсэн үнэ тооцох арга зүй

Тэгшитгэсэн өртгийг тооцох [10] нь хамгийн эхэнд тэгшитгэсэн хөрөнгө оруулалтын өртөг (LIC)-ийг тооцохоос эхэлдэг бөгөөд энэ үед “өнөөгийн үнэ цэний хүчин зүйл” (pvf) болон “хөрөнгийн нөхөн төлбөрийн хүчин зүйл” (crf)-ийг дараах байдлаар авч үзнэ:

$$LIC = PI \left[\frac{1}{TEG} \right] \left[\frac{crf(i, n)}{(1+i)} \right] [pvf(i, w, N)] \quad (1)$$

$$pvf(i, w, N) = \sum_{k=1}^N w_k (1+i)^{N-(k-1)} \quad (2)$$

$$crf(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3)$$

Үүнд:

TEG – жилд үйлдвэрлэх дундаж цахилгаан эрчим хүч (МВтцаг);

PI – суурилуулсан хүчин чадал тутамд ногдох "overnight" хөрөнгө оруулалтын өртөг (ам.доллар/МВтцаг);

i – хөнгөлөлтийн хувь;

N – барих хугацаа (жилээр);

w_k – тухайн жилд хийгдэх хөрөнгө оруулалтын хувь хэмжээ;

n – станцын ажиллах хугацаа.

Хөнгөлөлтийн хувийг ОУАЭА-ийн зөвлөмжийн дагуу 3%, 5%, 7%, 10%-иар тооцсон.

Үйл ажиллагааны үнэ тооцох арга зүй

Түлш, ашиглалт, засвар үйлчилгээ болон цацраг идэвхт хаягдлын менежмент, станц буулгах зардлууд нь хөнгөлөлтийн хувьтай холбоогүй тул дараах томъёогоор өнөөгийн үнэ цэнээр тооцно [11]:

$$LCF = \frac{\text{түлшний зардал (жилд)}}{TEG} \quad (4)$$

$$LCO\&M = \frac{\text{засвар үйлчилгээний зардал (жилд)}}{TEG} \quad (5)$$

$$LCD = \frac{\text{хаягдлын менежмент, станц буулгах зардал (жилд)}}{TEG} \quad (6)$$

Цөмийн түлшийг BWRX 300 реакторын хувьд 4.95%-ийн баяжилттай 1 кг түлш 2100 ам.доллар, RITM 200N реакторын хувьд 20%-ийн баяжилттай 1кг түлш 6000 ам.доллар байна гэж тооцсон [12].

$$LCOE = LIC + LCF + LCO\&M + LCD \quad (7)$$

Цөмийн эрчим хүчний станцын хувьд цацраг идэвхт хаягдал, станцын ашиглалтын хугацаа дууссаны дараах буулгах зардал өндөр байдаг тул хөрөнгө босгох санхүүгийн олон аргууд дотроос олон улсад нийтлэг ашигладаг тарифт тооцож шингээх (Cost Internalization in Tariff) [13] аргыг энэхүү тооцоонд ашигласан. Цөмийн эрчим хүч ашиглаж байгаа улс орнууд тарифт тооцож шингээх аргаар 1 МВтцаг тутамд 1-2 ам.доллар нэмж тооцдог.

Эдийн засгийн үнэлгээний арга зүй

Судалгаанд дараах эдийн засгийн үзүүлэлтүүдийг авч үзсэн:

- Цэвэр өнөөгийн үнэ цэнэ (NPV)
- Дотоод өгөөжийн хувь (IRR)
- Үр ашиг өртгийн харьцаа Benefit/Cost ratio)
- Хөрөнгө оруулалтын нөхөх хугацаа (Payback period)

NPV – Орлогын болон зарлагын мөнгөн урсгалын зөрүүгээр тодорхойлогддог бөгөөд энэ нь эерэг байвал төслийг хэрэгжүүлэхэд тохиромжтой гэж үзнэ [14].

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+i)^t} - C_0 \quad (8)$$

Үүнд:

C_t – тухайн хугацаанд орж ирэх цэвэр мөнгөн урсгал;

C₀ – анхны нийт хөрөнгө оруулалтын зардал;

i – хөнгөлөлтийн хувь;

t – станцын ашиглалтын хугацаа (жил).

Цэвэр өнөөгийн үнэ цэнэ (NPV) нь хөнгөлөлтийн хувиас хамаарна. Төслийн үр ашгийн дотоод өгөөжийн хувь болон үр ашиг өртгийн харьцаагаар анхны хөрөнгө оруулалтын нөхөх хугацааг тооцно.

$$0 = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+IRR)^t} - C_0 \quad (9)$$

ТООЦООНЫ ҮР ДҮН

Монгол Улсын цахилгаан эрчим хүчний өнөөдрийн төгрөг ам.долларын ханшаар 1 МВтцаг эрчим хүчийг 80 ам.доллаароор тооцож

эрчим хүчний нэгдсэн системд холбогдон ажиллах БЧР-ийн эдийн засгийн үр ашиг, хөрөнгө оруулалт нөхөх хугацааг тооцсон.

Хүснэгт 3. BWRX цөмийн эрчим хүчний реакторын эдийн засгийн тооцооны үр дүн

БЧР	Хөнгөл өлтийн хувь (DR - %)	ЦЭХ үйлдвэрлэх өртөг (ам.доллар /МВтцаг)	Өртөг- үр ашиг н харьца а	Цэвэр өнөөгийн үнэ цэнэ (сая ам.доллар)	Хөрөнгө оруулалты н нөхөх хугацаа (жил)
BW RX 300 MB T	3	46.5	1.7	1806.9	16
	5	56.6	1.4	815.0	19
	7	68.5	1.2	279.5	26
	10	89.3	0.9	-148.1	Нөхөхгүй
BW RX 600 MB T	3	53.2	1.5	2894.7	18
	5	62.5	1.3	1218.4	22
	7	73.6	1.1	314.3	31
	10	92.8	0.9	-406.5	Нөхөхгүй

Хүснэгт 4. RITM цөмийн эрчим хүчний реакторын эдийн засгийн тооцооны үр дүн

БЧР	Хөнгөл өлтийн хувь (DR - %)	ЦЭХүйлдвэрлэх өртөг (ам.доллар /МВтцаг)	Өртөг- үр ашиг н харьцаа	Цэвэр өнөөгийн үнэ цэнэ (сая ам.доллар)	Хөрөнгө оруулалты н нөхөх хугацаа (жил)
RI TM 220 M Bt	3	71.8	1.1	325.0	43
	5	91.4	0.9	-291.2	Нөхөхгүй
	7	114.6	0.7	-619.6	Нөхөхгүй
	10	154.9	0.5	-876.1	Нөхөхгүй
RI TM 330 M Bt	3	72.0	1.1	472.0	42
	5	90.4	0.9	-399.3	Нөхөхгүй
	7	112.2	0.7	-863.9	Нөхөхгүй
	10	150.0	0.5	-1226.7	Нөхөхгүй

ДҮГНЭЛТ

- Зээлийн хүүгийн түвшин нь төслийн ашигтай байдлыг шийдвэрлэх гол хүчин зүйл болно. Судалгаанд хамрагдсан бүх төрлийн реакторын хувьд зээлийн хөнгөлөлтийн хувь нь цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх нэгж өртөг болон улмаар төслийн хөрөнгө оруулалтыг нөхөх боломжид шууд нөлөөлж байна. Ялангуяа 10%-ийн хүүтэй зээлийн хувьд бүх загваруудын цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх нэгж өртөг одоогийн борлуулалтын үнэ буюу 80 ам.доллар/МВтцаг-аас өндөр гарч, хөрөнгө оруулалтыг нөхөх боломжгүй болох нь тогтоогдлоо.

- BWRX загварууд эдийн засгийн хувьд илүү таатай үзүүлэлттэй байна. BWRX 300MBt болон 600MBt-ын реакторуудын хувьд зээлийн хөнгөлөлтийн хувь 3%-7% байх үед цахилгаан эрчим хүчний нэгж өртөг нь одоогийн борлуулалтын үнээс доогуур 46.5-73.6 ам.доллар/МВтцаг байж, нийт ашиглалтын хугацаанд ихээхэн ашиг (279.5-2,894.7 сая ам.доллар) олон, анхны хөрөнгө оруулалтаа харьцангуй богино хугацаанд (16-31 жил) нөхөх боломжтойг харуулж байна.
- RITM 220MBt болон 330MBt-ын реакторуудын хувьд зөвхөн зээлийн хөнгөлөлтийн хувь 3% байх үед л нэгж өртөг нь одоогийн үнээс доогуур (71.8-72 ам.доллар/МВтцаг) байж, ашигтай ажиллах боломжтой. Нийт 325-472 сая ам.долларын ашигтай байж болно. Гэвч энэ үед ч хөрөнгө нөхөх хугацаа нь BWRX загваруудаас хамаагүй урт буюу 42-43 жил байна.
- Зээлийн хөнгөлөлтийн хувь 5% болон түүнээс дээш байх үед RITM загваруудын нэгж өртөг огцом өсөж, төсөл ашиггүй байна. Энэ нь RITM загваруудын хөрөнгө оруулалтын нэгж кВт-ын өртөг (6371-6800 ам.доллар/кВт) өндөр байгаатай шууд холбоотой байна.
- Эцэст нь: Монгол Улс SMR төсөл хэрэгжүүлэхээр төлөвлөж буй тохиолдолд, BWRX загварууд нь эдийн засгийн хувьд илүү үр ашигтай, хөрөнгө нөхөх хугацаа богино, мөн зээлийн хүүгийн өөрчлөлтөд харьцангуй тэсвэртэй байгаа тул илүү тохиромжтой сонголт болох хандлагатай байна. Төслийн амжилтад хамгийн чухал хүчин зүйл нь зээлийн хамгийн таатай, урт хугацааны хөнгөлөлттэй нөхцөлийг ялангуяа 7%-иас доош хүүтэй бүрдүүлэх явдал юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1]. Эрчим хүчний салбарын үйл ажиллагааны дүн 2024, Эрчим хүчний зохицуулах хороо, <https://erc.gov.mn/mn/>
- [2]. Монгол Улсын Засгийн газрын 2024–2028 оны үйл ажиллагааны хөтөлбөр, <https://legalinfo.mn/mn/detail?lawId=17141368388631&showType=1>
- [3]. Монгол Улсын эрчим хүчний яам, <https://www.energy.gov.mn/>
- [4]. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.2, *Milestones in the Development of a National*

- Infrastructure for Nuclear Power* (Rev. 1), 2015, <https://www.iaea.org/publications/8872>
- [5]. GE Hitachi Nuclear Energy. (2023). *BWRX-300 Small Modular Reactor*. Retrieved from <https://nuclear.gepower.com>
- [6]. GE Hitachi Nuclear energy, BWRX-300 General Description, 005N9751, Revision F, December 2023.
- [7]. Rosatom. (2023). *RITM-200 and RITM-200N Reactors*. Retrieved from <https://www.rosatom.ru>
- [8]. ОКБМ Африкантов. (2021). *RITM-200: Technical Specifications*. Retrieved from <https://www.okbm.nnov.ru>
- [9]. Эрчим хүчний зохицуулах хороо, <https://erc.gov.mn/mn/>
- [10]. IAEA. Expansion Planning for Electrical Generating Systems. A Guidebook. 1984. Available online: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS1/TRS241_Web.pdf (accessed on 15 June 2024).
- [11]. Alonso, G. Economic, Competitiveness of Small Modular Reactors in a Net Zero Policy. *Energies* 2025, 18, 922. <https://doi.org/10.3390/en18040922>
- [12]. World nuclear association, Economics of Nuclear Power, <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power>
- [13]. IAEA – International Atomic Energy Agency, “Managing the Financial Risk Associated with the Financing of Nuclear Power Projects”, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.6, 2017. <https://www.iaea.org/publications/11097>
- [14]. IEA. Electricity 2024—Analysis and Forecast to 2026. January 2024. Available online: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6b2fd954-2017-408e-bf08-952fdd62118a/Electricity2024-Analysisandforecastto2026.pdf> (accessed on 17 July 2024).

Abstract

Mongolia's electricity demand is continuously increasing, with 2/3 of consumption met by domestic generation sources. This growing reliance on energy imports poses significant supply security risks. In this paper, the economic feasibility of deploying Small Modular Reactors (SMRs) is evaluated using the BWRX-300 and RITM-200N reactor designs as case studies. The analysis considers key financial indicators, including Levelized Cost of Electricity (LCOE), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Payback Period. The results show that for financing scenarios with concessional loan interest rates between 3% and 7%, the LCOE of BWRX reactors ranges from 46.5-73.6 USD/MWh, which is below the current average electricity sales price of 80 USD/MWh—indicating strong economic viability. In contrast, RITM-200N reactors exhibit higher overnight costs and are only economically feasible under a 3% concessional loan scenario. The findings suggest that SMRs could contribute meaningfully to enhancing the reliability and diversification of Mongolia's energy supply.