

Pu-Be үүсгүүрийн дулааны нейтроны урсгалын түгэлтийг нейтрон идэвхжилийн шинжилгээний аргаар тодорхойлсон нь

Т.Мөнх-Эрдэнэ^{1*}, Н.Батцоож¹, Б.Өсөхбаяр¹, Д.Баатархүү¹, Г.Хүүхэнхүү¹, М.Одсүрэн²

¹ Монгол Улс, Улаанбаатар, Монгол Улсын Их Сургууль, Цөмийн шинжлэх ухаан, технологийн үндэсний хүрээлэн

² Монгол Улс, Улаанбаатар, Монгол Улсын Их Сургууль, Инженер технологийн сургууль

Энэхүү судалгааны ажилд графитан удаашруулагчтай Pu-Be нейтроны үүсгүүрийн дулааны нейтроны урсгалын түгэлтийг нейтрон идэвхжилийн шинжилгээний аргаар тодорхойлов. Үүний тулд алт (Au) болон индий (In) ялтсуудыг үүсгүүрээс 0–30 см-ийн зайд шарж идэвхжүүлэн, үүссэн гамма-цацрагийн спектрийг HPGe детектор бүхий гамма спектрометрээр хэмжив. Гарган авсан үр нь нейтрон физикийн болон дозиметрийн туршилт, судалгааны арга зүйг боловсруулахад чухал ач холбогдолтой.

Түлхүүр үгс: Нейтрон идэвхжилийн шинжилгээ, гамма-спектрометр, металл ялтас, дулааны нейтрон, алт ба индийн ялтас

1. ОРШИЛ

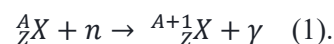
Цөмийн реактортай болох, цөмийн эрчим хүч ашиглах асуудал яригдаж буй манай орны хувьд нейтрон физикийн судалгааны өөрт тохирсон арга зүйг боловсруулж, хөгжүүлэх шаардлага тулгарч байна. Үүнийг шийдэхэд хувь нэмэр болох зорилгоор МУИС-ийн харьяа Цөмийн шинжлэх ухаан, технологийн үндэсний хүрээлэн (ЦШУТҮХ) Pu-Be үүсгүүрийг графитан кубад байршуулж, нейтроны урсгал тодорхойлох, энергийг нь хэмжих, дозиметрийн судалгаа зэрэг ажлуудыг хийж байна. Үүний нэг нь нейтроны урсгалыг тодорхойлж буй энэхүү ажил юм.

Энэхүү судалгаанд графитан удаашруулагчтай Pu-Be үүсгүүрийн дулааны нейтроны урсгалын түгэлтийг тодорхойлох зорилго тавив. Нейтроныг шууд хэмжих боломжгүй тул нейтрон идэвхжилийн шинжилгээ (НИШ)-ний аргыг сонгон авсан [1,2]. Уг арга нь өндөр мэдрэх чадвартай бөгөөд дээжийг нейтроноор шарж идэвхжүүлсний дараа үүсэх изотопуудын гамма-квантаар нейтроны урсгалыг шууд бус аргаар нарийн тодорхойлох боломжийг олгодог [3,4]. Туршилтанд дулааны нейтроны урвалын огтлол өндөртэй алт (Au) болон индий (In) металл ялтсуудыг идэвхжүүлэгч болгон ашиглаж, үүссэн гамма-квантыг цэвэр германий (HPGe) детектортой гамма-спектрометр [5] -ээр хэмжив.

2. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ, БАГАЖ ТӨХӨӨРӨМЖ

2.1 Физик үндэс

Дээжийг дулааны нейтроны урсгалаар шарахад дараах цөмийн урвал явагдана.



Энд: A_ZX -бай изотоп;

n-нейтрон;

${}^{A+1}_ZX$ -үүссэн изотоп;

γ -гамма квант.

Дээжийг t_1 хугацаанд шарсан гэж үзвэл үүсч буй цацраг идэвхт цөмийн тоо N

$$N(t_1) = \frac{\sigma N_0 \phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) \quad (2)$$

гэж олдоно.

Энд: ϕ - дулааны нейтроны урсгал (н/см² с);

σ - урвалын огтлол (см²);

λ - үүссэн цөмийн задралын тогтмол;

N_0 -бай цөмийн тоо.

Нейтронноор шараад цацраг идэвхтэй болсон дээжийг t_2 хугацааны турш хүлээж байж t_3 хугацааны турш хэмжсэн гэвэл энэ хэмжилтийн үед задарсан цөмийн тоо ΔN

$$\Delta N = \frac{\sigma N_0 \phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3}), \quad (3)$$

гэж олдоно. Энд дээж дэх бай цөмийн тоог

$$N_0 = \frac{m N_A}{A} \quad (4)$$

гэж олно. Энд: m – дээж дэх элементийн масс; A -тодорхойлох элементийн масс тоо; N_A - Авогадрын тоо.

Детектороор бүртгэгдсэн фото-пикийн талбай S нь детекторын бүртгэмж ε , гамма-квантын гаралт I , урвалд орж буй изотопын байгалийн тархалт θ болон зарсан цөмийн тоо ΔN -с

$$S = \varepsilon I \theta \Delta N \quad (5)$$

гэж хамаарна. (3), (4) ба (5) –аас дулааны нейтроны урсгал:

$$\phi = \frac{S \lambda A}{N_A \theta m I \varepsilon} \cdot \frac{1}{(1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})} \quad (6)$$

гэж олдоно. НИШ-гээр дулааны нейтроны урсгалыг тодорхойлохдоо S -ийг хэмжээд (6) томъёог ашиглан ϕ -ийг олно.

2.2 Нейтроны үүсгүүр, дээж

Ялтсан дээжүүдийг идэвхжүүлэхийн тулд ЦФСТ-д буй голдоо Pu-Be нейтроны үүсгүүртэй ($E_{\text{дун}}=4.5$ МэВ), 120см ирмэгийн урттай графитан удаашруулагчийн сувагт Зураг 1-т үзүүлсний дагуу 10 см-ийн алхамтайгаар байрлуулж шарав.



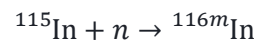
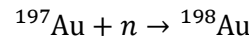
Зураг 1. Графитан удаашруулагчтай нейтроны Pu-Be үүсгүүр, дээж шаргах схем

Идэвхжих дээжээр урвалын огтлол өндөртэй алт (^{196}Au) болон индий (In^{115})-н ялтсан дээжүүдийг ашиглав (Зураг 2).



Зураг 2. Алт болон Индийн ялтсан дээжүүд

^{197}Au изотопын байгаль дээрх тархалт нь 100% бол ^{115}In -гийнх 95.7% байдаг бөгөөд нейтрон тусах үед явагдах



урвалыг ашигласан. Эдгээр урвалын үр дүнд үүсэх ^{198}Au , ^{116m}In изотопуудын өгөгдлүүдийг Хүснэгт 1-т харуулав. Уг урвалаас үүссэн гамма-квантыг ашиглан идэвхэжсэн дээжүүдийн гамма спектрийг HPGe детектор бүхий гамма-спектрометрээр хэмжив.

Хүснэгт 1. Алт болон индийн нейтроноор явагдах (n, γ) урвалын мэдээлэл

Изотоп	(n, γ) урвалын огтлол (барн)	Хагас задралын үе	Үүсэх гамма-квантын	
			энерги (кэВ),	гаралт (%)
^{198}Au	98.7	2.7 хоног	411.8	95.6
^{116m}In	205.0	54 мин	1293.6	84.8

2.3 Гамма-спектрометр

Бид хэмжилтэндээ МУИС, ЦФСТ-ийн лабораторид буй АНУ-ын ORTEC компанид үйлдвэрлэгдсэн Бериллий (Be) цонхтой цэвэр Германий (HPGe) детектортой гамма спектрометрийг ашигласан (Зураг 3). [5]-р ажилд уг спектрометрийн голлох үзүүлэлтүүдийг тодорхойлсон бөгөөд гамма-квантыг бүртгэх бүртгэмж нь 411.80 кэВ болон 1293.56 кэВ энергитэй гамма квантын хувьд $\varepsilon = 6.49 \cdot 10^{-2}$, $\varepsilon = 1.46 \cdot 10^{-2}$.



Зураг 3. HPGe гамма спектрометр

3.ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Нейтрон идэвхжилийн шинжилгээнд аливаа дээжийг ханатал шарахын тулд шарах хугацаа нь дээжинд үүсэх изотопын хагас задралын үеийг багадаа 5 дахин нэмэгдүүлсэнтэй тэнцүү байдаг. Энэхүү ажилд (n, γ) урвалаар үүсэх 54 минутын хагас задралын үетэй ^{116m}₄₉In изотопын хувьд шарах хугацааг ойролцоогоор 5 цаг, 2.7 хоногийн хагас задралын үетэй ¹⁹⁸₇₉Au изотопын хувьд шарах хугацааг ойролцоогоор 14 хоног байхаар тооцов. Бид алтны 3, индийн 4 дээжийг нейтроны сувагт 10 см-ын алхамтайгаар шараад (Хүснэгт 2), ¹⁹⁸₇₉Au ялтсан дээжийг нэг хоног хүлээх хугацаатайгаар, ^{116m}₄₉In ялтсан дээжийг 30 минутын хүлээх хугацаатай тус бүр 30 минутын турш гамма-спектрометр ашиглан хэмжив (Хүснэгт 3).

Хүснэгт 2. Шарлагын суваг дахь дээжийн байрлал, масс

Үүсгүүр ялтас хоорондын зай (см)	Ялтсан дээжийн нэр	Масс (гр)
0	Au-1	0.0373
	In-1	0.2579
10	Au-2	0.0473
	In-2	0.2597
20	Au-3	0.0292
	In-3	0.2558
30	In-4	0.2480

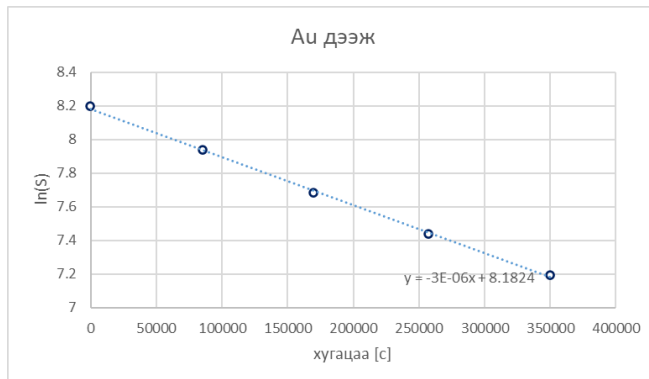
3.1 Хагас задралын үе

Хэмжилтээр бүртгэгдсэн гамма-квантыг зөвхөн тухайн урвалаар үүссэн изотопынх гэдгийг мэдэхийн тулд хагас задралын үеийг тооцоолъё.

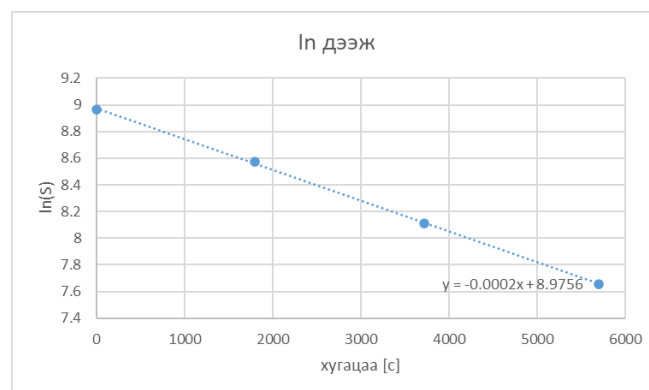
Үүний тулд бүртгэгдсэн гамма-квантын тоо буюу фото-пикийн талбай S болон ялтсан дээжийг шарж эхэлсэн үеэс хэмжилт эхлэх хүртэлх хугацааны t хамаарлыг хагас логарфимын хуваарь дээр байгуулан (Зураг 4-5), шулууны коэффициент буюу задралын тогтмол λ-аас тухайн изотопын хагас задралын үеийг

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (7)$$

гэж олов.



Зураг 4. Au ялтсийн бүртгэгдсэн гамма-квант ln(S) болон хугацаа t-ийн хамаарал



Зураг 5. In ялтсийн бүртгэгдсэн гамма-квант ln(S) болон хугацаа t-ийн хамаарал

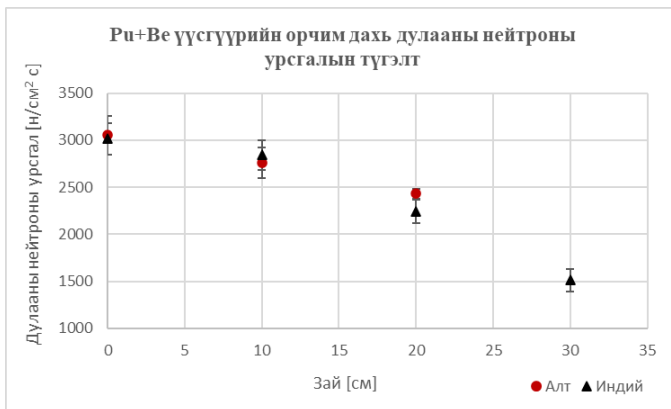
Эндээс идэвхэжсэн дээжийн хагас задралын үеийг (7) томъёог ашиглан тооцоолоход $T_{1/2}(Au) = 2.7 \pm 0.2$ хоног, $T_{1/2}(In) = 57 \pm 4$ мин гэж олдов. Энэ нь лавлах утгатай алдааны мужид таарч байна.

3.2 Нейтроны урсгал

Гамма-спектрометрээр хэмжилт хийсний дараа (6) томъёог ашиглан нейтроны урсгалыг зайнаас хамааруулан тооцоолоход дараах үр дүн гарав (Хүснэгт 3, Зураг 6).

Хүснэгт 3. НИШ аргаар тооцоолсон нейтроны урсгал

Үүсгүүр детектор хооронды зай [см]	$^{197}\text{Au} (n, \gamma) ^{198}\text{Au}$ урвалаар тооцоолсон нейтроны урсгал [н/см ² с]	$^{115}\text{In} (n, \gamma) ^{116m}\text{In}$ урвалаар тооцоолсон нейтроны урсгал [н/см ² с]
0	3054±204	3016±168
10	2760±166	2843±156
20	2431±55	2242±177
30	-	1515±120



Зураг 6. НИШ аргаар тооцоолсон дулааны нейтроны урсгалын түгэлт

Зураг 6-аас харахад алт болон индийгийн ялтас ашиглан нейтрон идэвхжилийн шинжилгээний аргаар тодорхойлсон нейтроны урсгалын утгууд алдааны мужид хоорондоо таарч байна.

Практикт дулааны нейтроны урсгалыг НИШ-ний аргаар тодорхойлоходоо резонансын нейтроны хувь нэмрийг тооцохын тулд кадмийн харьцааны арга ашигладаг. Учир нь алт болон индий нь харилцан адилгүй резонансын энергитэй нейтроныг шингээх огтлол өндөр байдаг (алт 4.9 эВ энергитэй нейтроныг шингээх огтлол $\sigma_{res} \approx 3 \cdot 10^4$ барн, индий 1.46 эВ энергитэй нейтроныг шингээх огтлол $\sigma_{res} \approx 3.8 \cdot 10^4$ барн) тул хэмжилтийн үр дүнд нөлөөлдөг.

Энэхүү ажлын хүрээнд кадмийн шүүлтүүр ашиглаагүй нөхцөлд алт болон индийгийн идэвхжилээс тодорхойлсон нейтроны урсгалууд хоорондоо алдааны мужид таарч байгаа нь $\phi_{рез} \ll \phi_{дул}$ буюу резонансын нейтроны хувь нэмэр бага байгааг илтгэж байна.

Түүнчлэн Pu-Be үүсгүүрийн гаралт, удаашруулагчийн геометр болон материалын шинж чанар харилцан адилгүйгээс бусад ижил төрлийн ажлуудтай шууд тоон харьцуулалт хийх боломж хязгаарлагдмал юм. Гэхдээ нейтроны урсгал зайнаас хамаарч буурах ерөнхий хандлагад бидний гарган авсан үр дүн нийцэж байгааг дурдах нь зүйтэй [6].

Цаашид кадмийн харьцааны аргыг ашиглан резонансын нейтроны нөлөөг салгаж, цэвэр дулааны нейтроны урсгалыг тодорхойлох нь хэмжилтийн үнэн зөв байдлыг сайжруулах ач холбогдолтой гэж үзэж байна.

4. ДҮГНЭЛТ

Pu-Be үүсгүүрийн дулааны нейтроны урсгалын түгэлтийг тодорхойлох зорилгоор алт (Au) болон индий (In) элементийн ялтсуудыг идэвхжүүлэн, үүссэн гамма-квантыг HPGe гамма спектрометрээр хэмжив.

Хэмжилтийн үнэн зөв байдлыг үнэлэхийн тулд ^{198}Au , ^{116m}In изотопын хагас задралын үеийг туршилтийн үр дүнгээс тооцоолоход лавлах утгатай алдааны мужид таарч байв.

Хэмжилтээр тодорхойлсон нейтроны урсгал зайнаас хамааран 1515-3054 н/см²·с байв.

Кадмийн харьцааны арга ашиглаагүй үед алт болон индийн ялтсаар тодорхойлсон нейтроны урсгалын утгууд хоорондоо алдааны мужид тохирч байв. Энэ нь хэмжилтээр тодорхойлсон урсгалд резонансын нейтроны хувь нэмэр бага байгааг илтгэж байна.

Цаашид кадмийн харьцааны аргаар хэмжилтийн үр дүнг сайжруулах шаардлагатай.

Энэхүү судалгааны үр дүнг Pu-Be нейтроны үүсгүүр орчим дахь нейтрон физик болон дозиметрийн туршилт, хэмжилтийн арга зүйг цаашид хөгжүүлэхэд ашиглах боломжтой.

НОМ ЗҮЙ

- [1] E. Witkowska, K. Szczepaniak, M. Biziuk, "Some applications of neutron activation analysis," J Radioanal Nucl Chem 265, 141–150 (2005).

[DOI:10.1007.s10967-005-0799-1]

- [2] Ч.Сайханбаяр, Б.Мөнхбат, Д.Баатархүү, Г.Дамдинсүрэн, Г.Хүүхэнхүү, М.Одсүрэн, “Бага чадлын судалгааны реактор дээр нейтрон идэвхжилийн шинжилгээ хийх боломж,” Sci. tran. NUM, Phys.33, 562, 40-47, (2022).
[DOI:<https://doi.org/10.22353/physics.v33i562.929>.]
- [3] G.I. Khalil, “Detection limits of Au using fast and thermal neutron activation analyses”, J.Radioanal.Nucl.Chem.,Letters 96 (5), 547-556 (1985).
[DOI:10.1007/bf02336369]
- [4] Harvey, Zachary R., "Neutron flux and energy characterization of a plutonium-beryllium isotopic neutron source by Monte Carlo simulation with verification by neutron activation analysis," UNLV Theses, Dissertations, Professional Papers, and Capstones. 900. (2010).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.34917/2242920>]
- [5] Т.Мөнх-Эрдэнэ, Н.Батцоож, Ч.Сайханбаяр, Ж.Батмягмар, Б.Өсөхбаяр, Д.Баатархүү, М.Одсүрэн, Г.Хүүхэнхүү, “Цэвэр Ge-Детектор Бүхий Гамма-Спектрометрийн Гол Үзүүлэлтүүдийн Судалгаа,” Sci. tran. NUM, Phys.37, 608, 1–9, (2025).
[DOI:<https://doi.org/10.22353/physics.v37i608.8386>]
- [6] J. R. Lamarsh and A. J. Baratta, Introduction to Nuclear Engineering, 3rd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 156–162, (2001).

Determination of Thermal Neutron Flux Distribution from Pu–Be Source Using Neutron Activation Analysis

T. Munkh-Erdene^{1*}, N. Battsoj¹, B. Usukhbayar¹, D. Baatarkhuu¹, G. Khuukhenkhuu¹, M. Odsuren²

¹ National Institute of Nuclear Science and Technology, National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

² School of Engineering and Technology, National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

In this study, the distribution of thermal neutron flux from graphite-moderated Pu–Be neutron source was determined using the neutron activation analysis method. Gold (Au) and indium (In) foils were irradiated at distances of 0–30 cm from the source, and the resulting gamma-ray spectra were measured using a gamma spectrometer equipped with a high-purity germanium (HPGe) detector. The obtained results are useful for planning and conducting future neutron physics and neutron dosimetry experiments using a Pu–Be neutron source at our laboratory.

Keywords: Neutron activation analysis, gamma spectrometry, metal foils, thermal neutrons, gold and indium foils