

Эмнэлэгийн зориулалт бүхий ^{118}Te -ийг $^{\text{nat}}\text{Sn}$ бай дээр α бөөмөөр явагдах урвалаар үйлдвэрлэх арга замын оновчлол

Ц.Золбадрал^{1,2*}, Т.Мөнх-Эрдэнэ¹, Б.Өсөхбаяр¹, Н.Батцоож¹

¹ Монгол Улсын Их Сургууль, Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв, Улаанбаатар 13330
² Нишина хурдасгуурт суурилсан шинжлэх ухааны төв, РИКЕН, Япон улс, Вако 351-0198

Хураангуй

Энэ судалгааны ажлаар эмнэлэгийн зориулалт бүхий ^{118}Te -ийг байгалийн агуулгатай изотопын баяжуулалттай цагаан тугалга бай дээр α бөөмөөр шарахад явагдах цөмийн урвалуудын огтлолыг Talys кодоор тооцов. Мөн $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ болон $^{116}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ урвалуудын физик гаралтыг тооцоолж, ^{118}Te -ийг үйлдвэрлэх арга замыг оновчилсон.

Түлхүүр үгс: Цагаан тугалга, теллур-118, сурьма-118, альфа бөөм, өдөөлтийн функц, урвалын огтлол.

1. УДИРТГАЛ

Позитрон цацаргалтын томографи (ПЦТ)-д ашиглах боломжтой изотопуудын дунд ^{118}Sb нь хагас задралын хугацаа богино ($T_{1/2} = 3.6$ мин), гаралт өндөр (75%), мөн дагалдан цацрах өндөр энергийн γ цацрагийн эрчим бага ($E_{\gamma} = 1229.33$ кэВ, $E_{\gamma} = 2.5\%$) [1] зэрэг давуу талуудтай. Түүнчлэн, уг изотопыг 6 хоногийн хагас задралын хугацаатай ^{118}Te -ийн задралаас буюу зөөврийн $^{118}\text{Te}/^{118}\text{Sb}$ генератороос гаргаж авах боломжтой нь алслагдсан суурин ихтэй манай орны эмнэлгүүдэд тээвэрлэн хэрэглэхэд нэн тохиромжтой юм.

$^{118}\text{Te}/^{118}\text{Sb}$ генераторын эх изотоп болох ^{118}Te -ийг хөнгөн цэнэгт бөөмийн хурдасгуур ашиглан, байгалийн болон изотопын өндөр баяжилттай цагаан-тугалга (Sn), сурьма (Sb) зэрэг элементүүдийн изотопууд дээр протон, дейтрон, альфа зэрэг цэнэгт бөөмсөөр шарахад явагдах цөмийн урвалуудаар гарган авах боломжтой. Эдгээр цөмийн урвалыг харьцуулан судалж, $^{118}\text{Te}/^{118}\text{Sb}$ генераторыг үйлдвэрлэх аргыг хөгжүүлэн, оновчтой болгоход цөмийн урвалын огтлолын нарийвчлал бүхий туршилтын өгөгдөл зайлшгүй шаардлагатай байдаг. Өмнөх судалгааны ажлаар [2] бид $^{\text{nat}}\text{Sn}(\alpha, x)^{118}\text{Te}$ цөмийн урвалын огтлолыг туршилтаар хэмжиж тодорхойлсон бөгөөд $^{\text{nat}}\text{Sn}(\alpha, x)^{118}\text{Te}$ цөмийн урвалаар ^{118}Te -ийг гаргаж авахад ^{119}Te -ийн үндсэн болон өдөөгдсөн төлвүүд хамт үүсч гол бохирдол болохыг тодорхойлсон.

Иймээс бид энэ ажлаар изотопын баяжуулалттай бай дээр α бөөмөөр явагдах $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ болон $^{116}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ урвалуудын огтлолыг Talys[3] кодоор тооцоолж физик

гаралтыг үнэлж, ^{118}Te -ийг үйлдвэрлэх арга замыг оновчлохыг зорилоо.

2. ТООЦООНЫ АРГА ЗҮЙ

Энэ судалгаанд бид орчин үеийн цөмийн урвалын онолын тооцоо хийхэд зориулагдсан симуляцийн програм болох TALYS [3] кодоор $^{\text{nat}}\text{Sn}(\alpha, x)^{118}\text{Te}$, $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ болон $^{116}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ урвалуудын өдөөлтийн функцийг тооцоолсон. TALYS код нь нейтрон, протон, дейтрон, тритон, гелий-3, альфа бөөм болон фотоноор үүсгэгдсэн цөмийн урвалыг 1 кэВ-ээс 200 МэВ хүртэлх сум бөөмийн энерги, мөн Литий-3-аас масс 124 хүртэлх бай цөмийн массын өргөн мужид тооцоолох боломжтой. TALYS нь цөмийн саринал, компаунд цөмийн урвал, тэнцвэрийн өмнөх болон шууд урвал зэрэг цөмийн урвалын бүх үндсэн механизмуудыг бүрэн хамардаг, тасралтгүй хөгжүүлэлт хийгддэг бөгөөд мөн параметруудийг өөрчилж тооцоо хийх боломжтойгоороо давуу талтай. Онолын тооцооны Talys кодын үр дүнгээр цөмийн урвалын огтлолын TENDL [4] өгөгдлийн санг бүрдүүлж, мөн тасралтгүй хөгжүүлж байдаг.

Манай өмнөх судалгааны ажилд [2] хэмжсэн $^{\text{nat}}\text{Sn}(\alpha, x)^{118}\text{Te}$ цөмийн урвалын огтлолын туршилтын үр дүнг онолын тооцооны TENDL [4] өгөгдлийн сангийн утга сайн төлөөлж чадахгүй байгаа нь ажиглагдсан. Иймээс бид тооцоог дараах 2 үе шаттайгаар гүйцэтгэсэн:

- 1) Байгалийн агуулга бүхий цагаан тугалга бай дээр 50 МэВ энергитэй α бөөмөөр явагдах $^{\text{nat}}\text{Sn}(\alpha, x)^{118}\text{Te}$ цөмийн урвалын өдөөлтийн

* e-шуудан: ts_zolbadral@num.edu.mn

функцыг Talys-2.0 кодын “adjust” буюу параметруудийг өөрчлөх горимоор тооцоолж, туршилтын утгыг сайн төлөөлөх тооцооны горимыг сонгоно.

- Эхний шатанд сонгосон тооцооны горимоор изотопын баяжуулалттай цагаан тугалгын байнууд дээр α бөөмөөр явагдах $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ болон $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ урвалуудын өдөөлтийн функцүүдыг тооцоолж, ^{118}Te -ийн физик гаралт, изотопын цэвэршилт болон сум бөөмийн энергийн цонхыг тодорхойлно.

Байгалийн цагаан тугалга нь 10 тогтвортой изотоптой бөгөөд тэдний агуулга нь: ^{112}Sn : 0.97%, ^{114}Sn : 0.66%, ^{115}Sn : 0.34%, ^{116}Sn : 14.54%, ^{117}Sn : 7.68%, ^{118}Sn : 24.22%, ^{119}Sn : 8.59%, ^{120}Sn : 32.58%, ^{122}Sn : 4.63%, ^{124}Sn : 5.79% [5]. 50 МэВ энергитэй α бөөмөөр байгалийн цагаан тугалга байг шарахад ^{118}Te изотоп үүсэх урвалуудыг хүснэгт-1-д өгөв.

Хүснэгт-1: Хэмжилтээр тодорхойлсон изотопуудын цөмийн урвалын болон цацраг идэвхт задралын өгөгдлүүд [5–7].

Изотоп	E_γ [кэВ]	I_γ [%]	Урвал	Босго энерги [МэВ]
^{118}Te	1229.33 ^{118}Sb -аас	2.5 [0.3]	$^{114}\text{Sn}(\alpha, \gamma)$	0.46
			$^{115}\text{Sn}(\alpha, n)$	8.21
			$^{116}\text{Sn}(\alpha, 2n)$	18.03
			$^{117}\text{Sn}(\alpha, 3n)$	25.15
			$^{118}\text{Sn}(\alpha, 4n)$	34.71
			$^{119}\text{Sn}(\alpha, 5n)$	41.36

Изотопын цэвэршилт (IP) нь тодорхой изотоп тухайн дээжид тухайн элементийн бусад изотопуудтай харьцуулахад хэр хэмжээтэй байгааг илэрхийлнэ.

Физик гаралт нь сум бөөмийн 1мкА гүйдлээр байг 1 цагийн турш шарахад дээжийн авах идэвхийг тодорхойлно. Зузаан байн хувьд физик гаралт (PHY)-ийг тэгшитгэл 2-оор тооцсон:

$$PHY = H \cdot \frac{N_A}{A_t \cdot Z_p \cdot e} \cdot \int_{E_2}^{E_1} \frac{\sigma(E)}{dE/d\rho x} dE \cdot \lambda \quad (1)$$

Үүнд:

E_1 - ялтас дээр тусаж буй сум бөөмийн энерги [МэВ]

E_2 - ялтсыг нэвтэрсэний дараах сум бөөмийн энерги [МэВ]

$dE/d\rho x$ - зогсоох хүч [МэВ см²/мг]

H -бай цөмийн изотопын баяжуулалт

N_A - Авогадрын тоо [# /моль]

A_t - бай элементийн моль масс

[гр/моль]

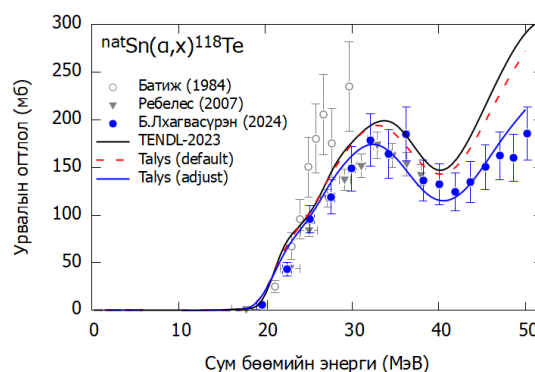
Z_p - сум бөөмийн атомын дугаар

e - эгэл цэнэг

3. ҮР ДҮН

Өдөөлтийн функц:

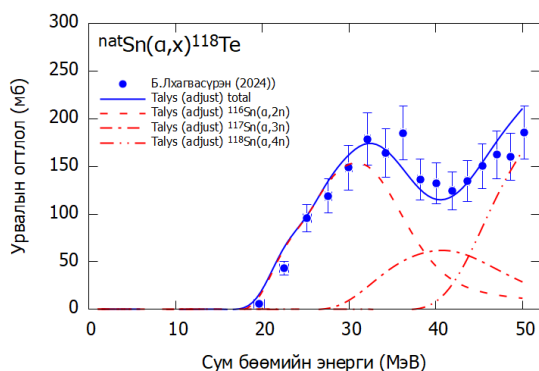
Туршилтаар тодорхойлсон $^{nat}\text{Sn}(\alpha, x)^{118}\text{Te}$ урвалын өдөөлтийн функцийг хэмжилтийн хэмжилтийн утгууд болох Лхагвасүрэн [2] Ребелес [8] болон Батиж нарын [9] үр дүн, мөн онолын тооцооны TENDL-2023 өгөгдлийн сангийн утга, Talys-2.0 кодын параметрийн өөрчлөлтгүй “default” горим болон параметр өөрчилсөн “adjust” горимуудаар хийсэн тооцооны үр дүнгүүдтэй харьцуулж зураг 1-д харуулав.



Зураг-1: Туршилтаар тодорхойлсон $^{nat}\text{Sn}(\alpha, x)^{118}\text{Te}$ урвалын өдөөлтийн функц ба бусад судлаачдын хэмжилтийн үр дүн болон онолын тооцооны үр дүнгүүдийн харьцуулалт.

Зураг-1-ээс харахад өндөр энергийн мужид TENDL-2023 өгөгдлийн сангийн утга болон Talys (default) горимын тооцооны утгууд нь туршлагын утгуудтай харьцуулахад их байна. Иймээс бид Talys (adjust) горимоор буюу Ферми хийн түвшний нягтыг тохируулах “Pshiftadjust” параметрийг ^{116}Sn -ийн хувьд -2, ^{117}Sn -ийн хувьд -4.5 болгож өөрчилсөнөөр $^{nat}\text{Sn}(\alpha, x)^{118}\text{Te}$ урвалын өдөөлтийн функцийг туршилтын утгатай тохирох үр дүнд хүрсэн. Pshiftadjust параметрийн default утга нь “0” байдаг.

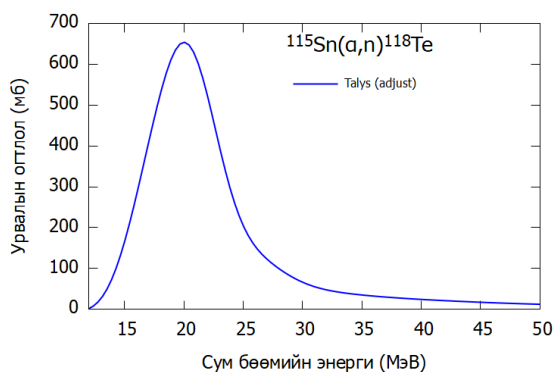
Зураг-2-г манай туршилтын утга болон $^{nat}\text{Sn}(\alpha, x)^{118}\text{Te}$ урвалын өдөөлтийн функцэд гол хувь нэмэр оруулж буй урвалуудын оглолыг дээр тодорхойлсон Talys (adjust) горимоор тооцоолсон үр дүнг харуулав.



Зураг-2: $^{nat}\text{Sn}(\alpha, x)^{118}\text{Te}$ урвалын өдөөлтийн функц туршилтын утга болон бусад хувь нэмэр оруулж буй урвалуудын огтлолыг *Talys (adjust)* горимоор тооцоолсон үр дүн.

$^{nat}\text{Sn}(\alpha, x)^{118}\text{Te}$ урвалын өдөөлтийн функцэд байгалийн агууллагаасаа хамаарч α бөөмийн энергийн 30 МэВ хүртэлх мужид $^{116}\text{Sn}(\alpha, 2n)^{118}\text{Te}$ урвал зонхилж, 40 МэВ орчимд $^{117}\text{Sn}(\alpha, 3n)^{118}\text{Te}$ урвал, 40 МэВ-ээс дээш мужид $^{118}\text{Sn}(\alpha, 4n)^{118}\text{Te}$ урвал гол хувь нэмэрийг оруулах нь зураг-2-оос харагдаж байна. Эдгээр урвалтай зэрэгцэн $^{nat}\text{Sn}(\alpha, x)^{119}\text{Te}$ урвалаар ^{119}Te -ийн үндсэн болон өдөөгдсөн төлвүүд бохирдол болж үүснэ.

Зураг-3-д *Talys (adjust)* горимоор тооцоолсон $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ урвалын өдөөлтийн функцийг харуулав.

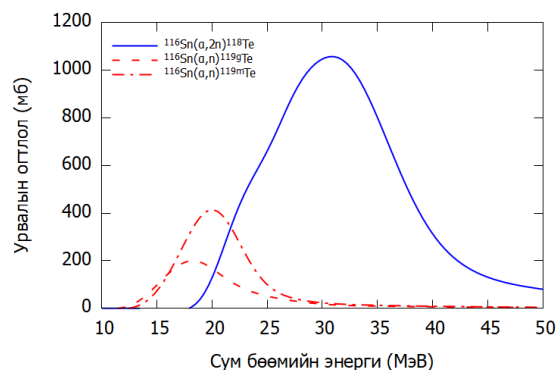


Зураг-3: *Talys (adjust)* горимоор тооцсон $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ урвалын өдөөлтийн функц.

Хэрэв 100 % изотопын баяжуулалттай ^{115}Sn байг α бөөмөөр шарвал хамт үүсэх цацраг идэвхт ^{119}Te -ийн үндсэн болон өдөөгдсөн төлвүүд нь $^{115}\text{Sn}(\alpha, \gamma)^{119g.m}\text{Te}$ урвалаар, харин $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ цөмийн урвалаар үүснэ. Цөмийн (α, γ) урвалын огтлол бусад урвалтай харьцуулахад хэдэн эрэмбээр бага байх учраас $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ цөмийн урвалаар ^{118}Te изотопыг α бөөмийн 8-30 МэВ энергийн мужид $^{119g.m}\text{Te}$ изотопуудын бохирдолгүйгээр үйлдвэрлэх боломжтой байна. Зураг-3-аас харахад $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ урвалын

огтлол 20 МэВ энергитэй α бөөмийн хувьд 680 мбарн хүрч байна.

Үүнтэй адилаар хэрэв бид 100 % изотопын баяжуулалттай ^{116}Sn байг α бөөмөөр шарвал ^{119}Te -ийн үндсэн болон өдөөгдсөн төлвүүд $^{116}\text{Sn}(\alpha, n)^{119g.m}\text{Te}$ урвалуудаар, ^{118}Te изотоп $^{116}\text{Sn}(\alpha, 2n)^{118}\text{Te}$ урвалаар тус тус үүсэхийг зураг-4-д харуулав.

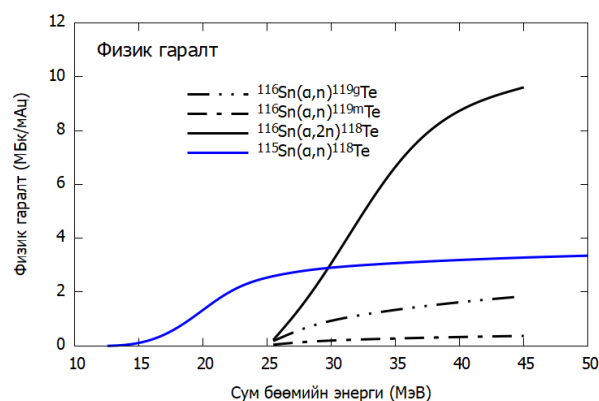


Зураг-4: *Talys (adjust)* горимоор тооцсон $^{116}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ болон $^{116}\text{Sn}(\alpha, n)^{119g.m}\text{Te}$ урвалуудын өдөөлтийн функцүүд.

$^{116}\text{Sn}(\alpha, 2n)^{118}\text{Te}$ урвалын огтлолын утга нь бохирдол болох $^{116}\text{Sn}(\alpha, n)^{119g.m}\text{Te}$ урвалуудын огтлолын утгаас α бөөмийн 25 МэВ -ээс дээш энергийн мужид харьцангуй их байна (зураг-4). Иймээс $^{116}\text{Sn}(\alpha, 2n)^{118}\text{Te}$ урвалаар ^{118}Te изотопыг 25-45 МэВ энергийн мужид $^{119g.m}\text{Te}$ -ийн бохирдол багатайгаар үйлдвэрлэх боломжтой байна. Мөн $^{116}\text{Sn}(\alpha, 2n)^{118}\text{Te}$ урвалын огтлолын хамгийн их утга 31 МэВ-д 1 барн хүрч байна.

Физик гаралт:

SRIM кодоор тооцсон зогсоох чадвар болон *Talys (adjust)* горимоор тооцсон урвалын огтлолын утгуудаас ^{118}Te изотопыг $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ урвалаар үйлдвэрлэх физик гаралтыг α бөөмийн энергийн 8-50 МэВ мужид, $^{116}\text{Sn}(\alpha, n)^{119g.m}\text{Te}$, $^{116}\text{Sn}(\alpha, 2n)^{118}\text{Te}$ урвалуудын физик гаралтыг гаралтыг 26-45 МэВ энергийн мужид тооцоолж, харьцуулан зураг 5-д харуулав.



Зураг-5: Тооцоолсон ^{118}Te ба $^{119\text{g.m}}\text{Te}$ изотопуудын физик гаралтын харьцуулалт.

Зураг-5-аас харахад $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ урвал нь теллурийн бусад изотопын бохирдолгүйгээр үйлдвэрлэх давуу талтай бөгөөд α бөөмийн энергийн 25 МэВ утгад физик гаралт нь 2.6 МБк/μАц хүрч байна. Харин $^{116}\text{Sn}(\alpha, 2n)^{118}\text{Te}$ урвалын физик гаралт нь α бөөмийн энерги 45 МэВ хүрэхэд физик гаралт харьцангуй өндөр буюу 9.6 МБк/μАц хүрч байгаа боловч, $^{119\text{g.m}}\text{Te}$ изотопуудын бохирдол байсаар байна.

4. ДҮГНЭЛТ

Судалгаагаар ^{118}Te изотопыг үйлдвэрлэхэд $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ болон $^{116}\text{Sn}(\alpha, 2n)^{118}\text{Te}$ гэсэн хоёр цөмийн урвалыг харьцуулан шинжилсэн.

$^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ урвалын хувьд 8-30 МэВ-ийн энергийн мужид, ялангуяа 25 МэВ-ийн энергид 2.6 МБк/мкАц физик гаралттай бөгөөд $^{119\text{g.m}}\text{Te}$ изотопын бохирдол маш бага үүсгэгдгээрээ онцлог юм. Энэ нь өндөр цэвэршилттэй ^{118}Te гарган авахад хамгийн оновчтой арга болохыг харуулж байна.

Нөгөө талаас, $^{116}\text{Sn}(\alpha, 2n)^{118}\text{Te}$ урвал нь 45 МэВ энергид 9.6 МБк/мкАц гэсэн хамаагүй өндөр гаралттай боловч, үүнийг дагалдан $^{119\text{g.m}}\text{Te}$ изотопын бохирдол мэдэгдэхүйц хэмжээнд үүсч байна.

Иймд, үйлдвэрлэлийн зорилгоос хамааран дараах стратегийг баримтлах нь зүйтэй. Өндөр цэвэршилттэй бүтээгдэхүүн шаардлагатай бол ^{115}Sn -ээр баяжуулсан байг сонгох, харин их хэмжээний гаралт чухал бол ^{116}Sn -ийг ашиглахдаа энергийн мужийг зөв тохируулж, бохирдлыг хянах шаардлагатай юм.

Ашигласан ном

- [1] National Nuclear Data Center, *Nuclear Structure and Decay Data On-Line Library, Nudat 2.7*, (unpublished).
- [2] Б.Лхагвасүрэн, Ц.Золбадрал, М.Айкава, С.Одмаа, and Г.Дамдинсүрэн,

Эмнэлэгийн $^{118}\text{Te}/^{118}\text{Sb}$ генераторыг үйлдвэрлэх цөмийн $^{nat}\text{Sn}(\alpha, x)^{118}\text{Te}$ урвалын огтлолын хэмжилтийн дүнгээс, Физик Сэтгүүл **36**, (2024).

- [3] A. J. Koning and D. Rochman, Modern Nuclear Data Evaluation with the TALYS Code System, *Nuclear Data Sheets* **113**, 2841 (2012).
- [4] A. J. Koning, D. Rochman, J. C. Sublet, N. Dzysiuk, M. Fleming, and S. van der Marck, TENDL: Complete Nuclear Data Library for Innovative Nuclear Science and Technology, *Nuclear Data Sheets* **155**, 1 (2019).
- [5] National Nuclear Data Center, *Nuclear Structure and Decay Data On-Line Library, Nudat* 2.8, <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>.
- [6] International Atomic Energy Agency, *LiveChart of Nuclides.*, <https://www-nds.iaea.org/livechart/>.
- [7] B. Pritychenko and A. Sonzogni, *Q-Value Calculator (QCalc).*, <https://www.nndc.bnl.gov/qcalc/>.
- [8] R. Adam Rebeles, A. Hermanne, S. Takács, F. Tárkányi, S. F. Kovalev, and A. Ignatyuk, Alpha induced reactions on natSn: An experimental study of excitation functions and possible production pathways, *Nucl Instrum Methods Phys Res B* **260**, 672 (2007).
- [9] Batij. V.G, Baskova. K.A, Kuz'menko.V.A, Makuni.B.M, Rastrepin.O.A, E.A.Skakun, Chugaj. T.V, and Shavtvalov. L.JA, *Excitation Functions of Sn-116,117(Alpha,Xn) Reactions in the Energy Range under 30 MeV*, in *Conference on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure, Alma-Ata* (1984), p. 355.

Abstract

In this study, the cross-sections of nuclear reactions induced by alpha particle irradiation on natural abundance and isotopically enriched tin targets were calculated using the TALYS code, aiming for the production of medical-use ^{118}Te . Additionally, the physical yields of the $^{115}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ and $^{116}\text{Sn}(\alpha, n)^{118}\text{Te}$ reactions were estimated to optimize the production method of ^{118}Te .