

ЦАЙНЫ ДЭЭЖИД МАНГАН (Mn) –НЫ АГУУЛГЫГ НЕЙТРОН ИДЭВХЖИЛИЙН ШИНЖИЛГЭЭНИЙ АРГААР ТОДОРХОЙЛОХ

Л.Одонцацрал^{1,*}, Ж.Мөнхсайхан¹, Н.Отгонпүрэв¹, Б.Ариунгэрэл², Т.Мөнгөнтуяа², Г.Галт-Очир², Б.Мөнхбат¹

¹Монгол Улсын Их Сургууль, Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв

²Монгол Улсын Их Сургууль, Инженер Технологийн сургууль

*Э-шуудан: Odontsatsral.l@num.edu.mn

Энэхүү судалгааны ажлаар NaI(Tl) сцинтилляцийн детекторын энерги тохируулга болон бүртгэмжийг 0.5-1.0 МэВ энергийн мужид ²³⁹Pu-Be нейтроны үүсгүүр ашиглан ⁵⁵Mn(n,γ)⁵⁶Mn-ыг идэвхжүүлж тодорхойлсон. Үүнийг ашиглан Монгол улсад өргөн хэрэглэгддэг импортын зарим дүрдэг савалгаатай хар цайнд (black tea) агуулагдах Манган (Mn)-ны агуулгыг тодорхойлов. Судалгааны үр дүнгээс харахад Mn-ны агуулга цайны төрлөөс хамаарч 0.4-4.1 мг/г гарсан.

Түлхүүр үгс: Манган (Mn), нейтрон идэвхжилийн шинжилгээ, NaI(Tl) сцинтилляцийн детектор, энергийн ялгамж, бүртгэмж, энергийн тохируулга

I. ОРШИЛ

Манай улсын хувьд 2022 онд батлагдсан “Хүнсний хангамж, аюулгүй байдлыг хангах талаар авах зарим арга хэмжээний тухай” тогтоолын хүрээнд хүнсний аюулгүй байдлын статистик үзүүлэлтийг тооцох аргачлалыг шинэчлэн боловсруулж батлуулах, хүнсний бүтээгдэхүүнд дүн шинжилгээ, үнэлгээ хийх шаардлагатай гэж тусгажээ.

Олон Улсын Атомын Энергийн Агентлаг (ОУАЭА) болон Нэгдсэн үндэсний байгууллага (НҮБ) хамтран 2023 оны Дэлхийн хүнсний форумын үеэр Atoms4Food санаачилга гаргасан. Энэхүү хөтөлбөрийн зорилго нь цөмийн технологитой холбоотой аналитик аргуудыг ашиглан хүнсний гарал үүсэл, хүнсний аюулгүй байдал, шошгон дээрх найрлагад хяналт тавих юм. Бид энэхүү санаачилгад үндэслэн хүнсний бүтээгдэхүүний найрлагыг цөмийн технологийн арга ашиглан судлах боломжийг нэмэгдүүлэхийг зорьж байна.

Энэ зорилтонд үндэслэн NaI сцинтилляцийн детекторыг ЦФСТ-д суурилуулан, ашиглаж байна. NaI сцинтилляцийн детектор нь дээжинд агуулагдах бага хэмжээний элементийн агуулгыг тодорхойлоход хамгийн тохиромжтой багаж юм.

Элементийн агуулга тодорхойлох олон арга байдаг. Үүнээс нейтрон идэвхжилийн

шинжилгээ (НИШ) нь мэдрэх чадвар сайн, нарийвчлал өндөр, олон элементийг нэгэн зэрэг тодорхойлох, хатуу, шингэн, хийн төлөвт буй сорьцыг эвдэхгүйгээр судлах боломжтой зэрэг нь бусад аналитик аргуудаас ялгагдах онцлог давуу талуудтай.

II. МАТЕРИАЛ БА СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

A. Нейтрон идэвхжилийн шинжилгээ

²³⁹Pu-Be үүсгүүрийн дулааны нейтроны урсгалаар (10^3 н/см²с) шарахад цацраг идэвхт цөм үүсэх ба задрах хоёр процесс нэгэн зэрэг явагддаг. Нэгж хугацаан дахь цацраг идэвхт цөмийн тоо дараах тэгшитгэлээр илэрхийлэгдэнэ [1].

$$\frac{dN}{dt} = N_0 * \phi * \sigma - \lambda * N \quad (1)$$

Энд: N –үүсч буй цацраг идэвхт цөмийн тоо

ϕ –шарж буй дулааны нейтроны урсгал (н/см²с)

σ –дулааны нейтроны урвалын огтлол (см²)

λ –үүссэн цөмийн задралын тогтмол

N_0 –бай цөмийн тоо

Сорьцыг нейтроноор шарж байх үед үүсэх цацраг идэвхт цөмийн тоо (2) томъёогоор илэрхийлэгдэнэ.

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

Энд: t_1 – сорьцыг нейтроноор шарах хугацаа

Нейтроноор шараад цацраг идэвхтэй болсон сорьцыг t_2 хугацааны турш хүлээж байж хэмжсэн гэвэл цацраг идэвхт задралын хууль ёсоор хэмжилт эхлэх үеийн цацраг идэвхт цөмийн тоог

$$N(t_2) = N(t_1)e^{-\lambda t_2} \quad (3)$$

гэж олно. Хэрэв сорьцоос гарах гамма цацрагийг t_3 хугацааны турш хэмжсэн гэвэл энэ хооронд задарсан цөмийн тоо

$$\Delta N = N(t_2) - N(t_3) = N(t_2)(1 - e^{-\lambda t_3}) \quad (4)$$

болно. Энд: $N(t_3)$ – хэмжилт дуусах агшин дахь цацраг идэвхт цөмийн тоо. (2), (3) ба (4)-өөс

$$\Delta N = \frac{\sigma N_0 \phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3}) \quad (5)$$

гэж хэмжилтийн үед задарсан цөмийн тоог олж болно. Энд сорьц дахь тухайн элементийн бай цөмийн тоог

$$N_0 = \frac{m N_A}{A} \quad (6)$$

гэж олно. Энд: m – сорьц дахь тухайн элементийн масс, A – тодорхойлох элементийн масс тоо, $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – Авогадрын тоо

Туршилтаар ΔN –ийг хэмжихгүй, харин ΔN –тооны цөм задрахад үүссэн гамма цацрагийг NaI сцинтилляцийн детектоор бүртгэх учир t_3 хугацаанд бүртгэгдсэн гамма цацрагийн тоо буюу фото-пикийн талбайг ашиглана.

$$S = \varepsilon I \theta \Delta N \quad (7)$$

Энд: ε – детекторын бүртгэмж, I – гамма цацрагийн гаралт, θ – урвалд орж буй изотопын байгалийн тархалт.

(5), (6), ба (7) томъёогоос фото пикийн талбай

$$S = \frac{N_A \theta m I \varepsilon \sigma \phi}{\lambda A} (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3}) \quad (8)$$

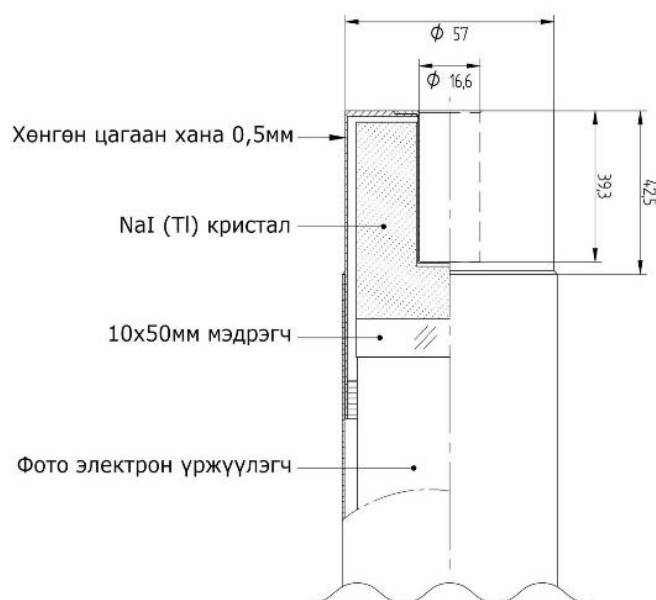
гэж олдоно. НИШ-нд сорьц дахь тухайн химийн элементийг орц буюу агуулгыг S -ийг хэмжээд (8) томъёоноос m –ийг олно.

В. NaI(Tl) сцинтилляцийн детектор

Судалгаанд ашигласан 51 ВР 51/2 М загварын NaI (Tl) сцинтилляцийн детекторыг АНУ-ын ORTEC компанид үйлдвэрлэсэн. NaI(Tl) детектор нь гамма цацрагийг 4π өнцгөөр хэмждэг тул мэдрэх чадвар өндөртэй. Детекторын гүн 39.3 мм, өргөн 16.6 мм, 0.5 мм хөнгөн цагаан бүрхүүл, 0.25 мм хөнгөн цагаан доторлогоо, 51 мм кристалл диаметртэй сцинтилляторын детектор юм (Зураг 1-т харуулав). ¹³⁷Cs үүсгүүрийн 662кэВ энергийн мужид ялгах чадвар 6.5%.

Хүснэгт-1. NaI(Tl) детекторын үзүүлэлт, хэмжилтийн горим

NaI сцинтилляцийн детектор	
Кристалл диаметр	51 мм
Ялгах чадвар	6.5%, ¹³⁷ Cs, 662 кэВ
Цонх	0.5 мм, Al
Хүчдэл	570-630 В
Хэмжилтийн хугацаа	300-3600 с
Ажиллах орчин	Агаар



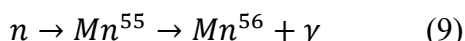
Зураг 1. NaI(Tl) сцинтилляцийн детектор

III. ТУРШИЛТИЙН НӨХЦӨЛ

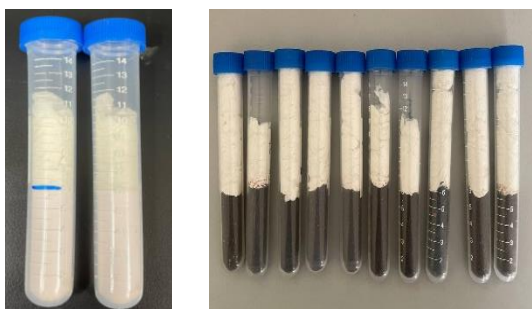
Байгаль дээр Mn-ны ганц тогтвортой изотоп нь ⁵⁵Mn бөгөөд түүн дээр дулааны нейтроноор шарахад явагдах урвалыг Хүснэгт2-т харуулав.

Хүснэгт-2. ^{55}Mn тогтвортой изотопи

Бай изотоп	^{55}Mn	
Байгалийн тархалт (%)	100	
(n, γ) урвалын огтлол (барн) /дулааны нейтрон/	13.36 ± 0.05 [3]	
Үүсэх изотоп	^{56}Mn	
Хагас задралын үе ($T_{1/2}$)	2.58ц	
Аналитик гамма шугамын	Энерги (кэВ)	846.8
	Гаралт (%)	98.85



Хятад улсад үйлдвэрлэсэн ISO9001-ISO14001-OHSAS18001 дугаартай 169.03 г/моль молекул масстай $\text{MnSO}_4\text{H}_2\text{O}$ манганы сульфат дээжийг 7.1858 г, 7.1869 граммаар, савлан тасалгааны температурт, хуруу шилэнд детекторын гүнтэй ижил түвшинд савлан, нягтруулав (Зураг 2-т).



Зураг 2. Дээж бэлтгэл

Дулааны нейтроны урсгалаар ^{55}Mn дээжийг 20 цагийн турш шарж идэвхжүүлэв. Хэмжилт хийхийн өмнө ^{56}Mn -ын хагас задралын үе болох 0, $1T_{1/2}$, $2T_{1/2}$, $3T_{1/2}$, $4T_{1/2}$ хугацаанд хүлээж, $1T_{1/2}$ хугацаанд хэмжилтийг гүйцэтгэсэн. ^{56}Mn -аас цацрах 847(98.8%) кэВ энергитэй гамма шугамыг бүртгэснээр түүний агуулгыг тодорхойлно.

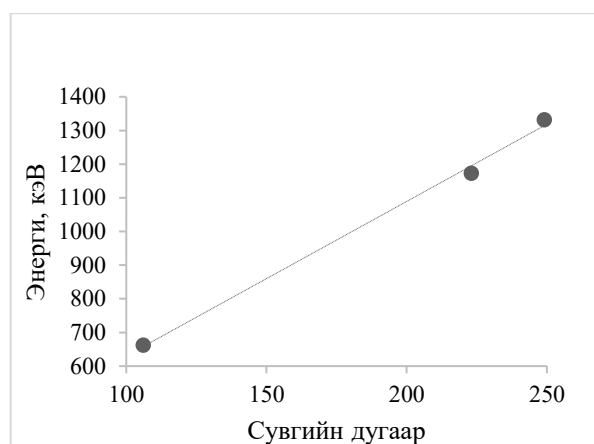
Хүснэгт-3. Туршилтын хугацаа

Шарах (ц) $T_{1/2}=2.58\text{ц}$	Хүлээх (ц) $T_{1/2}=2.58\text{ц}$	Хэмжих (ц) $T_{1/2}=2.58\text{ц}$
	0	
	$1T_{1/2}$	
5 $T_{1/2}$	$2T_{1/2}$	1 $T_{1/2}$
	$3T_{1/2}$	
	$4T_{1/2}$	

3.1. Энергийн тохируулга

NaI(Tl) сцинтилляцийн детекторын энергийн тохируулгыг ОУАЭА-аас авсан стандарт ^{137}Cs , ^{60}Co изотопон гамма үүсгүүрүүд ашиглан гүйцэтгэв. Үүсгүүрийг детектороос 3 см зайд давхарлан байрлуулж 3600 секундын хугацаанд хэмжилтийг хийсэн. Зураг 3-т үүсгүүрүүдийн энерги болон сувгийн дугаарын хамааралыг харуулав.

^{137}Cs , ^{60}Co , үүсгүүр ашиглан энергийн тохируулгыг хийв.



Зураг 3. NaI(Tl) сцинтилляцийн детекторын энерги тохируулга

3.2. Энергийн ялгамж

Детекторын энерги ялгамж гэдэг нь гамма цацрагийн энергийг хэр нарийвчлалтай бүртгэж байгааг илтгэдэг хэмжигдэхүүн юм. Энэ нь гамма цацрагийн энергийн пикийн талбайн хагас өндөрт харгалзах өргөнөөр тодорхойлогдоно.

$$R = \left(\frac{FWHM}{E_\gamma} \right) * 100\% \quad (10)$$

^{137}Cs болон ^{56}Mn элементүүдийн гамма шугамыг сонгон авч энерги ялгамжийг олсон.

Хүснэгт-4. NaI(Tl) детекторын энергийн ялгамж

Е, кэВ	Хагас өргөн дээрх өндөр FWHM	R, (%)
661.6	43.93	6.65
846.8	51.10	6.03

Бидний олсон ^{137}Cs изотопын хувьд ялгамж нь багажны үйлдвэрийн дагалдах сертификаттай таарч байна.

3.3. Бүртгэмж

Детекторын бүртгэмж нь ε тодорхой хугацаанд бүртгэгдсэн бөөмийн тоог (N_s) задарсан цөмийн тоонд (N_i) харьцуулсан харьцаагаар тодорхойлогддог хэмжигдэхүүн бөгөөд задарсан цөмийн хэдэн хувь нь бүртгэгдэж буйг харуулсан хэмжигдэхүүн юм [4].

$$\varepsilon = \frac{N_s}{N_i} \quad (11)$$

^{56}Mn -ийн задарсан цөмийн тоог тэгшитгэл (5) –р тооцоолж, детекторт бүртгэгдсэн цөмийн тоог Хүснэгт-5 өгөв.

Эндээс харахад NaI(Tl) детекторын хувьд бүртгэмж нь Mn-ны 847кэВ гамма энергийн шугам дээр $\varepsilon = 0.0016 \pm 0.0002$ байна.

Хүснэгт-5. NaI сцинтилляцийн детекторын бүртгэмж (ε)

Хүлээсэн хугацаа (ц) $T_{1/2}=2.58\text{ц}$	Бүртгэгдсэн цөмийн тоо (N_s) (10^6)	^{56}Mn задарсан цөмийн тоо (5) томъёогоор бодсон (N_i) (10^9)	Детекторын бүртгэмж ε (10^{-3})	Алдаа 2σ (10^{-3})
0	3.82	2.27	1.7	0.32
$1T_{1/2}$	1.8	1.13	1.6	0.13
$2T_{1/2}$	0.95	0.57	1.7	0.08
$3T_{1/2}$	0.45	0.28	1.6	0.03
$4T_{1/2}$	0.23	0.14	1.6	0.002

3.4. Хар цайны дээж дэх Mn-ны агуулга тодорхойлох

Импортоор орж ирсэн хар цайны 10 дээжийг сонгон хэмжилт хийсэн. Хэмжилтийн үр дүнг Хүснэгт-6-г харуулав. Дээжинд Mn-ны агуулгыг гадаад стандартын арга ашиглан

бодож олов. Үр дүнгээ олон улсын W.Podwika, et.all, (2017) [4] нарын судлаачдын үр дүнтэй харьцуулав. Үр дүнгээс харахад цайнд агуулагдах Mn-ны агуулга #6, #7 дээжинд дундажаас бага, #2, #8, #9, #10 дээжинд ойролцоо, #4, #5 дээжинд өндөр гарсан.

Хүснэгт-6. Цайны дээж дэх Mn-ын агуулгыг тодорхойлсон дүн

Дээжний дугаарлалт (#)	Дээжийн жин (г)	Цайнд агуулагдах Mn дундаж хэмжээ [5] (мг/г)	Цайнд агуулагдах Mn хэмжилтийн дүн (мг/г)
1	2.5211	~1.1	2.3
2	2.4097		1.1
3	2.2612		2
4	2.2870		3.5
5	2.2870		4.1
6	2.4899		0.4
7	2.3561		0.6
8	2.4571		1.1
9	2.2236		1.1
10	2.5478		1.2

ДҮГНЭЛТ

^{56}Mn -ны 846.7 кэВ гамма энергийн шугамаар NaI(Tl) сцинтилляцийн детекторын бүртгэмжийг тодорхойлов.

Энэхүү судалгааны ажлаар ЦФСТ-ийн дулааны нейтроны ^{239}Pu -Be үүсгүүр, NaI(Tl) сцинтилляцийн детекторыг ашиглан нейтрон идэвхжилийн аргаар хүнсний бүтээгдэхүүн дэх Mn-ны агуулгыг тодорхойлох боломжтойг харуулав.

ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааны ажлыг Олон Улсын Атомын Энергийн Агентлаг (ОУАЭА)-ын техникийн хамтын ажиллагааны MON0011, MON0012 төслийн хүрээнд ЦФСТ-д суурилуулсан багаж, тоног төхөөрөмж дээр хийж гүйцэтгэв.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] Г.Дамдинсүрэн, П.Зузаан, Н.Отгонпүрэв Сорил Хэмжилтийн Дээжид Нейтрон Идэвхжилийн Аргаар Хийсэн Элементийн Шинжилгээний Дүн, Scientific Transaction of the National University of Mongolia PHYSICS 23 (455), 2016
- [2] Ч.Сайханбаяр, Б.Мөнхбат, Д.Баатархүү, Бага чадлын судалгааны реактор дээр нейтрон идэвхжилийн шинжилгээ хийх боломж МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг, ФИЗИК сэтгүүл 33 (562), 2022
- [3] https://www.ndc.jaea.go.jp/cgi-bin/Tab80WWW.cgi?iso=Mn055&lib=J40&utm_source
- [4] Т.Мөнх-Эрдэнэ, Н.Батцоож, Ч.Сайханбаяр, Цэвэр германий (HPGe) детектор бүхий гамма-спектрометрийн гол үзүүлэлтүүдийн судалгаа
- [5] W.Podwika, K. Kleszcz, M. Krośniak Copper, Manganese, Zinc, Cadmium in Tea Leaves of Different Types and Origin, Biol Trace element. 2017 Sep 2; 183 (2):389–395.

DETERMINATION OF THE MANGANESE (MN) CONTENT IN BLACK TEA USING NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS

L.Odonsatsral^{1,*}, J.Munkhsaikhan¹, N.Otgonpurev¹, A.Ariungerel², T.Munguntuya², G.Galtochir², B.Munkhbat¹

¹Nuclear Research Center, National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

²National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

In this study, the energy calibration and efficiency of a NaI(Tl) scintillation detector were carried out by activating ^{55}Mn using a ^{239}Pu -Be neutron source within the energy range of 0.5–1.0 MeV. This method was then applied to determine the manganese (Mn) content in several imported black tea samples commonly consumed in Mongolia. The results revealed that the Mn concentration varied depending on the type of tea, ranging from 0.4 to 4.1 mg/g.