

РЕТ/СТ оношилгооны үеийн цацрагийн хамгаалалт, тунгийн тооцоолол

Ц. Ганзул^{a,b,3}, Д. Болортуяа^a, М. Одсүрэн^b

^aМонгол Улсын Их Сургууль, Цөмийн Физикийн судалгааны төв

^bМонгол Улсын Их Сургууль, Инженер Технологийн сургууль, Ногоон эрчим хүч, инженерчлэлийн тэнхим

Энэхүү ажилд дүрс оношилгооны РЕТ/СТ төхөөрөмж шинээр суурилуулах байгууламжийн оношилгооны үеийн цацрагийн хамгаалалт, тунгийн тооцооллыг аналитик томъёо болон RHITS код ашиглан харьцуулан судлав. Судалгаагаар 444 МБк цацраг идэвхтэй фтордеоксиглюкоз (¹⁸FDG) цэгэн үүсгүүрийг 17 см зузаан бетон ханатай өрөөнд байрлуулан загварчилж тунгийн чадлыг тооцоолоход хяналттай бүсэд зөвшөөрөгдөх тунгийн хязгаараас хэтрээгүй, харин хяналтгүй бүсэд 2.7 дахин их байв. Хяналтгүй бүсийн орчны цацрагийн хамгаалалтыг сайжруулахын тулд хананд нэмэлтээр 7 мм хар тугалга

Түлхүүр үгс: Цацрагийн хамгаалалт, RHITS код, ¹⁸FDG

Мэргэжлийн индекс (PACS number): 28.41.Qb & 87.59.B

I. УДИРТГАЛ

Цацрагийн хамгаалалт нь 1900 оноос хойш орчин үеийн анагаах ухааны практикт зайлшгүй шаардлагатай чухал хэсэг болсон. 1980 онд жилд 1.7 тэрбум орчим эмнэлгийн процедурт цацраг ашигладаг байсан бол 2018 онд 4.2 тэрбум болж өсөөд байна [1]. Одоогийн байдлаар дэлхийн хүн амын цацрагийн хэрэглээний 99.9 гаруй хувийг хүний гараар бүтээгдсэн эмнэлэгт ашиглагддаг цацраг эзэлж байна [2]. 2008 онд оношилгооны цөмийн анагаах ухааны хэрэглээ нийт цацраг ашигладаг эмнэлгийн процедурын 1 хувийг эзэлдэг байсан бол 2018 онд 7 орчим хувийг эзэлдэг болж нэмэгдсэн. Монгол Улсад 2021 онд анх удаа РЕТ/СТ буюу позитрон эмиссийн томограф болон компьютер томограф хосолсон төхөөрөмж нэвтэрсэн бөгөөд түүнээс хойш хорт хавдар болон зарим өвчний оношилгоо, эрт илрүүлэгт уг төхөөрөмжийн хэрэгцээ улам бүр нэмэгдэж байна. РЕТ/СТ оношилгоонд 110 минутын хагас задралын хугацаатай ¹⁸F буюу ¹⁸FDG⁴ (фтордеоксиглюкоз) эмнэлгийн дүрс оношилгооны зориулалттай цацраг идэвхт тариаг ашиглах нь түгээмэл. ¹⁸FDG тариа хавдар болон бодисын солилцоонд идэвхтэй эд эрхтэнд хуримтлагддаг [3,4]. Дэлхий даяар ¹⁸FDG-ыг үйлчлүүлэгч тус бүрийн өндөр, жинд харгалзан 555 МБк хүртэл идэвхтэйгээр тарьж 60 минут тайван

байдалд хүлээгээд дараа нь 30 минутын турш РЕТ/СТ төхөөрөмжөөр бүтэн биеийн дүрс зураг авна [5]. Үйлчлүүлэгчид энэхүү цацраг идэвхт тариаг тарьснаас хойш хүний биед агуулагдах электрон болон тус тарианы задралаас үүсэх позитрон хооронд аннигилцийн 511 кэВ энерги бүхий хоёр гамма цацраг үүсдэг [6]. РЕТ/СТ төхөөрөмж нь уг гамма цацрагийг бүртгэж өндөр нарийвчлалтай бүтэн биеийн дүрс зураг авна. Ийнхүү оношилгооны үед үйлчлүүлэгч цацраг идэвхтэй болж байгаа учраас тус байгууламжид ажиллаж буй эмч, сувлагч, физикч болон асран хамгаалагчдын хувьд шаардлагагүй цацрагт өртүүлэхгүй байх ёстой. Мөн барилга байгууламжийн хувьд долоо хоногийн тунгийн хязгаар хүртэл бууруулах цацрагийн хамгаалалтад нийцэх нь хамгийн чухал [7].

Энэ ажлаар РЕТ/СТ төхөөрөмж шинээр суурилуулах эмнэлгийн хувьд цацраг идэвхт тариа ашиглаж буй уг оношилгооны үеийн цацрагийн хамгаалалт, тунгийн тооцооллыг аналитик томъёо болон RHITS код ашиглан харьцуулан тооцоолох зорилготой. Уг хүрээнд байгууламжийн үндсэн бүтээцийг харгалзан тооцож тунгийн чадлыг үнэлж, шаардлагатай цацрагийн хамгаалалтын болон тунгийн тооцооллыг гүйцэтгэх зорилт тавив.

³ Э-шуудан: ganzul@num.edu.mn

⁴ ¹⁸FDG: ¹⁸F изотопыг глюкозтой нийлэгжүүлэн үйлдвэрлэдэг цацраг идэвхт тариа.

* 2024 оны 11 сарын 27-ны өдөр үр дүнг шинэчлэв.

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

$$x = -\frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{D_x}{D_0 B} \right). \quad (5)$$

Цацрагийн хамгаалалт, тунгийн тооцоолол

PET/CT оношилгооны үеийн цацрагийн хамгаалалтын тооцооллыг хийхдээ ^{18}FDG цацраг идэвхт тариа тариулсан үйлчлүүлэгчийг цэгэн үүсгүүр гэж үзэв. Цэгэн үүсгүүрийн хувьд r зай дахь тунгийн чадлыг дараах 1-р тэгшитгэлээр тодорхойлдог [8]:

$$D = \frac{\Gamma A}{r^2}. \quad (1)$$

Энд Γ - шарлагын чадал ($0.143 \text{ мкЗв м}^2/\text{МБк цаг}$), A - үүсгүүрийн идэвх, r - хэмжилтийн цэгээс үүсгүүр хүртэлх зай.

Моноэнергитэй цацрагийн нарийн багц x зузаантай хамгаалалтын материалаар нэвтрэхэд цацрагийн эрчим [9]:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (2)$$

болно. Энд I_0 - тусч буй цацрагийн анхны эрчим, μ - шугаман сулралын коэффициент, x - зузаан, I - x зузаантай материалд суларсан цацрагийн эрчим. Ихэнх цацрагийн хамгаалалтын тооцооллын хувьд цацраг изотроп тархалттай байдаг бөгөөд сарнисан цацраг мөн бүртгэгддэг. Энэ тохиолдолд μx буюу сулрах уртад харгалзах B (Build up) факторыг ашиглан сарнисан цацрагийн тооцдог. B факторыг тооцсоноор 2-р тэгшитгэл дараах хэлбэртэй болно:

$$I = I_0 B e^{-\mu x}. \quad (3)$$

3-р тэгшитгэлийг ашиглан x зузаантай материалаар нэвтэрсэн цацрагийн тунг 4-р тэгшитгэлээр тодорхойлж болно.

$$D_x = D_0 B e^{-\mu x}, \quad (4)$$

Энд D_0 - анхны тунгийн чадал, D - x зузаантай материалд суларсан тунгийн чадал, μ - 511 кэВ энергитэй гамма цацрагийн хувьд хар тугалган материалын шугаман сулралын коэффициент 1.83 см^{-1} байна [10].

ALARA зарчмын дагуу долоо хоногийн тунгийн хязгаарыг хяналттай бүсэд 100 мкЗв , хяналтгүй бүсэд 20 мкЗв хэмээн тогтоосон байдаг [4]. Тэгвэл 4-р тэгшитгэлийн дагуу шаардлагатай хамгаалалтын материалын зузааныг дараах томъёо ашиглан тодорхойлно.

Монте Карло симуляц

Судалгаанд Монте Карло аргад үндэслэсэн бөөм болон хүнд ионы шилжилтийн систем болох PHITS кодыг ашигласан. Монте Карло симуляц нь санамсаргүй тоо ашиглан бөөмийн шилжилт бүрийг тооцож, симуляцийг давтах замаар эдгээр давталтаас үүсэх утгуудыг нэгтгэн дундаж утгыг тооцдог [11]. PHITS кодоор нейтрон, протон, электрон, фотон болон бусад бөөмийн 1 ГэВ хүртэл өргөн энергийн мужид харилцан үйлчлэлийг тооцох боломжтой бөгөөд 1-р зурагт ажиллах зарчмыг үзүүлэв [12].



Зураг 1. PHITS кодын ажиллах физик зарчим

PET/CT оношилгооны үеийн цацрагийн хамгаалалтын тооцооллыг хийхдээ дараах нөхцөлүүдийг ашигласан. Үүнд:

- Өрөөнүүдийн зохион байгуулалтын бодит геометр хэмжээ
- Барилгын үндсэн 17 см бетонон ханыг тооцож
- Оношилгооны үед 3 үйлчлүүлэгч зэрэг байх тохиолдол буюу 3 цэгэн үүсгүүр
- Газраас 1 м өндөрт хэмжилтийн 8 цэг
- Үүсгүүрийн (^{18}FDG) идэвх- 301 МБк , 444 МБк
- Долоо хоногт дүрс зураг авах өдөр - 3
- Долоо хоногийн ажлын цаг – $24 (3 \times 8 \text{ цаг})$

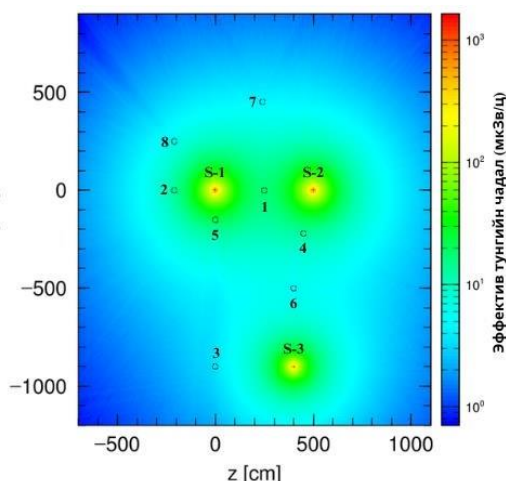


Зураг 2. Тооцоонд ашигласан PET/CT байгууламжийн төлөвлөлтийн зураг

(2)-р зургаас харахад 2,8-р хэмжилтийн цэгүүд хяналтгүй бүс юм. Хүлээн авах хэсгийн хувьд хэмжилтийн цэг байршуулсан хэсэгт утгах ажилтан байрлахаар төлөвлөгдсөн. Цацраг идэвхт тариа тариулсан өвчтөн буюу цэгэн үүсгүүрийг Тарианы өрөө-1 (S-1, 444 МБк), Амрах өрөө-1 (S-2, 444 МБк), PET/CT зураг авах өрөө (S-3, 301 МБк) нийт 3 цэгт байршуулсан. Монгол улсын хувьд ихэвчлэн 444 МБк хүртэл идэвхтэй ^{18}F FDG тариа ашигладаг. Дүрс зураг авахад буюу 60 минутын дараа уг тарианы идэвх 301 МБк болно хэмээн тооцож судалгаанд ашиглав.

III. ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Байгууламжийн өрөө хоорондын үндсэн ханагүй тохиолдолд үүсгүүр, хэмжилтийн цэгүүдийн байршил болон PHITS кодоор тодорхойлсон цацрагийн тархалтыг 3-р зурагт үзүүлэв.



Зураг 3. Тусгаарлах ханагүй тохиолдолд хэмжилтийн цэг, үүсгүүрүүдийн байршил болон цацрагийн тархалт

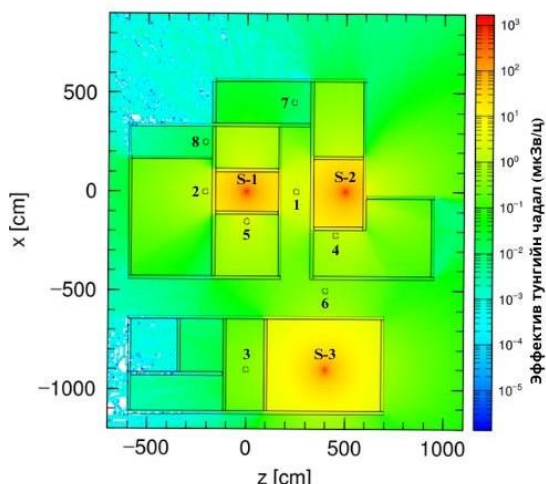
(3)-р зургийн дагуу тунгийн чадлыг 1-р тэгшитгэл болон PHITS кодоор тооцоолсон утгуудыг 1-р хүснэгтэд харьцуулан үзүүлэв.

Хүснэгт 1. Аналитик томъёо болон PHITS кодоор тооцоолсон тунгийн чадал

Хэмжилтийн цэг	Аналитик томъёо (1-р тэгшитгэл)	PHITS код
	(мкЗв/цаг)	
1	20.14	20.79±0.01
2	17.56	16.08±0.01
3	3.95	3.70±0.01
4	12.91	10.97±0.01
5	22.90	22.36±0.01
6	4.52	3.85±0.01
7	3.99	3.38±0.01
8	5.16	4.85±0.01

1-р хүснэгтийн аналитик томъёо болон PHITS кодоор тунгийн чадлыг тодорхойлсон утгууд өөр хоорондоо 2-16% зөрүүтэй байна.

Байгууламжийн үндсэн бүтээц болох 17 см бетонон ханатай өрөөнүүдийн хувьд PHITS кодоор цацрагийн тархалтыг тодорхойлж 4-р зурагт, тунгийн чадлыг тооцоолж 2-р хүснэгтэд үзүүлэв.



Зураг 4. 17 см бетон ханатай уг байгууламжийн хувьд цацрагийн тархалт

Хүснэгт 2. 17 см бетонон ханатай уг байгууламжийн хувьд хэмжилтийн цэгүүд дээрх тунгийн чадал*

Хэмжилтийн цэг	PHITS код		Зөвшөөрөгдөх тунгийн хязгаар (мкЗв/7 хоног)
	(мкЗв/цаг)	(мкЗв/7 хоног)	
1	3.76±0.01	90.32±0.01	100
2	2.25±0.01	54.34±0.01	20
3	0.40±0.01	10.10±0.01	100
4	1.27±0.01	30.70±0.01	
5	2.92±0.01	70.14±0.01	
6	0.30±0.01	7.21±0.01	
7	0.28±0.01	0.29±0.01	
8	0.01±0.01	0.24±0.01	20

(2)-р хүснэгтээс үзэхэд хүлээн авах хэсэг буюу 2-р цэгт бүртгэгдсэн тунгийн чадал 54.34 мкЗв/7хоног байгаа нь хяналтгүй бүсийн зөвшөөрөгдөх тунгийн хязгаар 20 мкЗв/7хоног-оос хэтэрч байна. Иймд 2-р цэг дээр 17 см бетонон хана хангалтгүй байгаа учраас хананы цацрагийн хамгаалалтыг сайжруулах шаардлагатай. Нэмэлт цацрагийн хамгаалалт шаардлагатай ханыг 5-р зурагт цэнхэр өнгөөр тэмдэглэв. (5)-р тэгшитгэлийг ашиглан шаардлагатай хар тугалган материалын зузааныг тодорхойлсон үр дүн болон уг зузааныг ашиглан PHITS кодоор тунгийн чадлыг тодорхойлсон утгыг 3-р хүснэгтэд үзүүлэв.

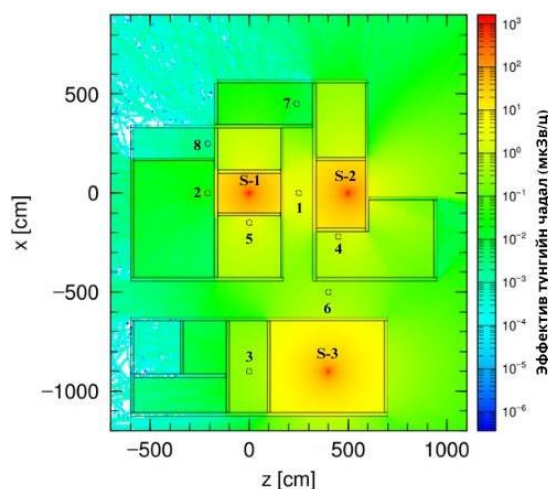


Зураг 5. Цацрагийн хамгаалалтыг сайжруулах шаардлагатай хана

Хүснэгт 3. Хүлээн авах хэсэг буюу 2-р цэгийн хананд байршуулах хар тугалган хамгаалалтын зузаан болон тухайн цэг дээрх тунгийн чадал*

Рb (мм)	Сулрах урт	В фактор	Аналитик томьёо (5-р тэгшитгэл)	PHITS код
			(мкЗв/7 хоног)	
6	1.09	1.25	22.37	20.22±0.01
7	1.28	1.27	18.62	17.08±0.01
8	1.46	1.29	16.13	14.24±0.01

Эндээс үзэхэд 7 мм зузаантай хар тугалган хамгаалалт байршуулснаар аналитик томьёо болон PHITS кодоор тодорхойлсон тунгийн чадал хоорондоо тохирч байна. 5-р зурагт үзүүлсэн хананы дагуу цацрагийн хамгаалалтыг байрлуулж цацрагийн тархалтыг 6-р зурагт харуулав.



Зураг 6. Хар тугалган хамгаалалт байршуулахад цацрагийн тархалт

6-р зургаас үзэхэд хүлээн авах хэсэг буюу 2-р цэг орчмын цацрагийн тархалт 4-р зурагтай харьцуулахад багассан байна.

IV. ДҮГНЭЛТ

Өрөө тус бүр 17 см бетонон ханаар тусгаарлагдсан PET/CT байгууламжид 307 МБк, 444 МБк цацраг идэвхтэй ^{18}F FDG цэгэн үүсгүүр байрлуулж уг оношилгооны үеийн цацрагийн хамгаалалт, тунгийн тооцооллыг аналитик томъёо болон RHITS код ашиглан харьцуулан судлав.

Судалгааны дүнд ALARA зарчмын дагуу хяналтгүй бүсийн долоо хоногийн тунгийн хязгаар 20 мкЗв байх ёстой ч 54 мкЗв буюу зөвшөөрөгдөх хэмжээнээс 2.7 дахин их байгааг тогтоов. Тухайн орчны цацрагийн хамгаалалтыг сайжруулахын тулд хяналтгүй бүсийн хананд нэмэлтээр 7 мм хар тугалган хамгаалалт шаардлагатай болохыг аналитик томъёогоор болон RHITS код ашиглан тодорхойлов. Хоёр аргын үр дүн хоорондоо сайн тохирохоос гадна RHITS код нь цацрагийн тархалтыг илүү дэлгэрэнгүй симуляц хийх давуу талтай болох нь харагдав.

Ионжуулагч цацраг ашиглах зориулалттай эмнэлэг (болон бусад төрлийн байгууллага)барилга төлөвлөлтийн эхний үе шатанд RHITS кодоор симуляц хийж өрөө тасалгааны тохиромжтой зохион байгуулалт, хананы зузааныг тооцоолох боломжтой бөгөөд энэ нь цаг хугацаа, зардал хэмнэх давуу талтай болох нь харагдаж байна.

V. ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааны ажлыг гүйцэтгэхэд туслалцаа үзүүлж хамтран ажилсан “RCM Mongolia LLC”, үнэтэй зөвлөгөө өгч тусалж дэмжсэн Цөмийн Физикийн Судалгааны Төв болон RHITS кодыг ашиглах албан ёсны эрх олгосон Японы Атомын Энергийн Агентлагийн хамт олонд талархсанаа илэрхийлж байна.

VI. АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

[1] J. Chen, *A Summary of UNSCEAR Evaluation on Medical Exposure to Ionizing Radiation and Call for More Representative*

Data, Radiation Medicine and Protection, 2024.

- [2] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), *2008 Report to the General Assembly: Annex on Medical Exposures*, 2010.
- [3] G. B. Saha, *Fundamentals of Nuclear Pharmacy*, Springer, 2018, ISBN: 978-3-319-57579-7.
- [4] M. T. Madsen, J. A. Anderson, J. R. Halama, J. Kleck, D. J. Simpkin, J. R. Votaw, R. E. Wendt, L. E. Williams, and M. V. Yester, *AAPM Task Group 108: PET and PET/CT Shielding Requirements*, Medical Physics, 2006.
- [5] D. J. Peet, R. Morton, M. Hussein, K. Alsafi, and N. Spyrou, *Radiation protection in fixed PET/CT facilities - Design and operation*, British Journal of Radiology, 2012.
- [6] M. Elschot, T. C. De Wit, and H. W. A. M. De Jong, *The influence of self-absorption on PET and PET/CT shielding requirements*, Medical Physics, 2010.
- [7] S. Vargas Castrillán and F. Cutanda henríguez, *A study on occupational exposure in a PET/CT facility*, Radiation Protection Dosimetry, 2011.
- [8] J. E. Turner, *Atoms, Radiation, and Radiation Protection: Third Edition*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007, ISBN: 978-3-527-40606-7.
- [9] J. E. Martin, *Physics for Radiation Protection: Second Edition*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006, ISBN: 3-527-40611-5.
- [10] H. Cember and T. Johnson, *Introduction to Health Physics: Fourth Edition*, The McGraw-Hill Companies, 2009, ISBN: 978-0-07-164323-8.
- [11] A. Stevens, *Monte-Carlo Simulation: An Introduction for Engineers and Scientists*, CRC Press, 2023, ISBN: 978-1-032-28077-6.
- [12] H. Iwase, K. Niita, and T. Nakamura, *Development of general-purpose particle and heavy ion transport monte carlo code*, Journal of Nuclear Science and Technology, 2002