

ПЭТ-КТ төхөөрөмжийн цацрагийн хамгаалалтын тооцоо

Ж.Мөнхсайхан^{1*}, Ц.Золбадрал^{1,3}, С.Одмаа^{1,2}

¹ Монгол Улсын Их Сургууль, Цөмийн физикийн судалгааны төв

² Монгол Улсын Их Сургууль, Инженер, технологийн сургууль

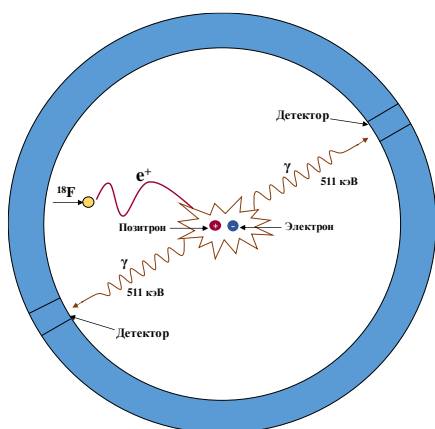
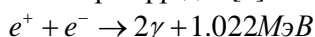
³ Шинэ Монгол Ахлах Сургууль

Энэ судалгааны ажлаар Позитрон Эмиссийн Томограф (ПЭТ) болон Компьютер Томограф (КТ) төхөөрөмжийн эффектив тунгийн чадлыг аналитик томьёо болон RHITS код ашиглан тодорхойлов. ¹⁸FDG эмийн цацраг идэвх 15мКи байхад тунгийн чадлыг хамгаалалтгүй болон хамгаалалттай үед онолоор тооцон симуляцийн үр дүнтэй харьцуулав. Мөн АНУ-ын эмнэлгийн физикчдийн нийгэмлэг (AAPM Task Group 108)-ээс эрхлэн гаргасан ПЭТ-КТ төхөөрөмжийн хамгаалалтын тооцооны тайланг үндэслэн нөлөөлөх факторыг авч үзэн эффектив тунгийн чадлыг үнэлж, үр дүнгээ ашиглан хамгаалалтын тооцоог гүйцэтгэв.

Түлхүүр үг: ПЭТ-КТ төхөөрөмж, гамма-цацраг, цацрагийн хамгаалалт, RHITS код

I. ОРШИЛ

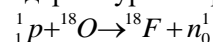
Цөмийн анагаах ухаанд Позитрон Эмиссийн Томограф болон Компьютер Томограф (ПЭТ-КТ)-ыг цацраг идэвхт эмийн тусламжтай аливаа өвчнийг оношлох, өвчтөнийг эмчлэх зорилгоор ашигладаг. Энэхүү хосолсон технологи нь нэг удаагийн өндөр нягтаршилтай зураг авалтаар тухайн өвчний үе шат, бүтцийг нарийн оношлох чадамжтай. ПЭТ оношилгоонд ¹¹C, ¹³N, ¹⁵O, ¹⁸F, ⁶⁴Cu, ⁶⁸Ga, ⁸²Rb, ¹²⁴I зэрэг богино наст, позитрон цацруулдаг изотопуудыг ашигладаг ба эдгээрээс ¹⁸F изотоп бүхий флюородеоксиглюкоз (¹⁸FDG) эмийг клиникт өргөн хэрэглэдэг. Өвчтөний биед тарьсан эмд агуулагдах цацраг идэвхт изотопын задралаар үүссэн позитрон нь хүний биеийн атомын электронтой харилцан үйлчилж аннигиляцид ордог ба энэ үзэгдлээс 511 кэВ энергитэй хоёр-гамма квант нэгэн зэрэг үүсдэг [1]:



Зураг 1. Аннигиляцийн гамма квантын үүсэл болон бүртгэх схем

Ийнхүү үүссэн аннигиляцийн гамма квантыг детекторт бүртгэх замаар боловсруулалт хийдэг ба Зураг 1-д аннигиляцийн гамма квантын үүсэл болон бүртгэх схемийг харуулав.

Манай улс 2021 онд ПЭТ-КТ төхөөрөмж болон тус технологид хэрэглэгдэх цацраг идэвхт изотопыг дотооддоо үйлдвэрлэх цэнэгтэй бөөмийн циклотрон хурдасгуурыг ашиглалтад оруулсан. Уг хурдасгуурт хурдассан протоноор ¹⁸O байг бөмбөгдөн 110 минутын хагас задралын үетэй ¹⁸F изотопыг дараах урвалаар гарган авдаг:



¹⁸F изотопыг цааш молекулын нийлэгжүүлэх тусгай төхөөрөмжид шилжүүлэн 15 мКи идэвхтэй ¹⁸FDG эмийг үйлдвэрлэдэг.

Өндөр энергитэй аннигиляцийн фотоны урсгалаас хамгаалах зорилгоор ПЭТ-КТ төхөөрөмж байрлах өрөө болон зураг авахын өмнөх амрах өрөө, эдгээрийн дээд ба доод давхарт цацрагийн тунгийн чадлыг үнэлж, цацрагтай ажиллагчид болон эмнэлэгийн бусад ажилчид, олон нийтийг болзошгүй цацрагийн шарлагад өртөхөөс хамгаалсан дизайныг боловсруулах нь чухал байдаг.

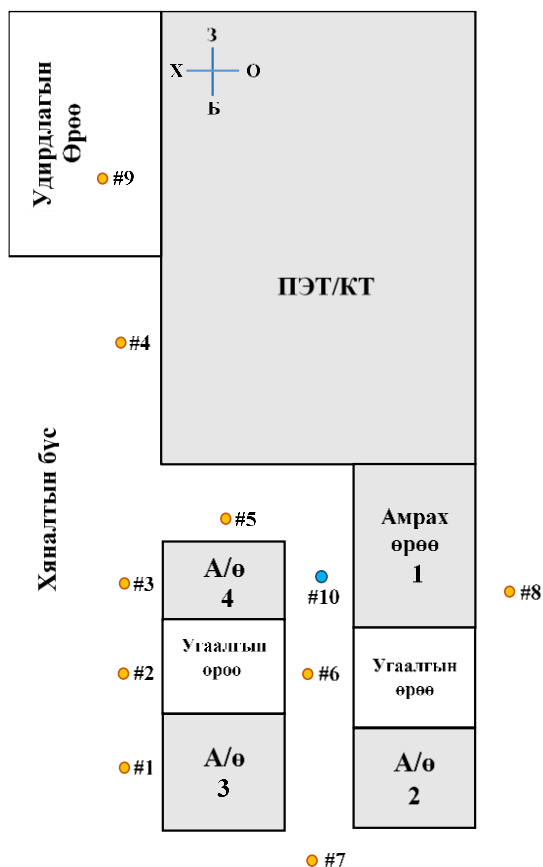
Тиймээс цацрагийн хамгаалалтын тооцоог онол болон компьютер симуляцийн аргаар нарийн тодорхойлох шаардлага байна. 2022 онд МУИС-ийн ЦФСТ-ийн Ru-Be үүсгүүрийн хамгаалалтын тооцоог аналитик томьёо болон симуляцийн үр дүнгүүдийг харьцуулан гүйцэтгэжээ [2].

Бид энэ ажлаар Бриллиант эмнэлэгийн ПЭТ-КТ төхөөрөмжийн хамгаалалтын тооцоог аналитик аргаар болон RHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) кодыг [3] ашиглан тодорхойлж, харьцуулах зорилго тавив.

* Электрон шуудан: j.munkhsaikhan@num.edu.mn

II. ТООЦООНЫ АРГАЗҮЙ

Цацрагийн тунгийн чадлыг ПЭТ-КТ төхөөрөмж байрлах болон амрах өрөөнүүдийн ойролцоох нийт 10 байрлалд тодорхойлов. ПЭТ-КТ төхөөрөмж байрлах өрөө, амрах өрөөнүүдийн байршил болон тооцооллын цэгүүдийг Зураг 2-т харуулав.



Зураг 2. ПЭТ-КТ төрөөхөмжийн өрөөний зохион байгуулалт

Тунгийн чадлыг тооцоолохдоо дараах төлөвлөлтийг хийв.

Үүнд:

- ¹⁸FDG эм (үүсгүүр)-ийн идэвх-15 мКи
- Өдөрт оношлуулах өвчтөний тоо-8
- Цацраг идэвхт эм тарьсны дараа хүлээх хугацаа-60 минут
- ПЭТ-КТ төхөөрөмжид зураг авах хугацаа-30 минут.

Цөмийн энергийн комиссоос 2015 онд баталж гаргасан цацрагийн аюулгүйн нормын 5.1 хэсэгт “Цацрагтай ажиллагчдын 5 жилийн туршид авах цацрагийн тунгийн хязгаар 100 мЗв-ээс ихгүй байна гэхдээ дурын 1 жилд авч болох цацрагийн тунгийн хязгаар 50 мЗв-ээс хэтрэхгүй байх ёстой” [4] гэжээ. Эндээс цацрагтай ажилладаг хүний долоо хоногт авах тунгийн дээд хэмжээг 1 мЗв гэж үзэж болно. Мөн ААРМ Task Group 108 тайланд долоо хоногт хяналтын бүсэд

зөвшөөрөгдөх хэмжээг 100 мкЗв, хяналтын бүс бүсэд 20 мкЗв гэж заажээ. Бид энэхүү аюулгүй ажиллагааны нормыг хангах шаардлагатай хамгаалалтын зузааныг үнэлэв.

2.1. Тунгийн чадал

PHITS кодоор тунгийн чадлыг үнэлэхдээ тооцоог хялбар гүйцэтгэх зорилгоор ¹⁸FDG тариулсан тухайн өвчтөнийг цэгэн үүсгүүр гэж загварчлан физиологийн хүчин зүйлсийг тооцолгүйгээр аналитик тооцооны үр дүнтэй харьцуулав. Цэгэн үүсгүүрийн хувьд тунгийн чадлыг дараах тэгшитгэлээр тодорхойлдог [1,8]:

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

Энд:

Г-шарлагын чадал;

1 мКи идэвхтэй ¹⁸F үүсгүүрээс 1 м зайд хамгаалалтгүй үед шарлагын чадал 0.143 мкЗв м²/МБк ц байдаг.

А-үүсгүүрийн идэвх;

г –үүсгүүрээс тухайн цэг хүртлэх зай;

АНУ-ын эмнэлгийн физикчдийн нийгэмлэг (AAPM Task Group 108)-ээс гаргасан “ПЭТ-КТ төхөөрөмжид тавигдах хамгаалалтын шаардлагууд” тайланд тунгийн чадлыг тооцохдоо дараах факторуудыг тооцсон [5].

А. Бууралтын фактор

Богино наст цацраг идэвхт изотопуудыг ПЕТ-д ашигладаг тул цацрагийн тунгийн D_0 анхны утгаас t -хугацаанд хуримтлагдах ($D_0 \cdot t$) тунгийн чадал $\dot{D}(t)$ нь тооцоолсон утгаас бага байдаг. Үүнийг тооцдог хэмжигдэхүүнийг бууралтын фактор гэдэг:

$$R_t = \dot{D}(t)/(D_0 \cdot t) = 1.443(T_{1/2} \cdot t_s)(1 - e^{-0.693(t_s/T_{1/2})}) \quad (2)$$

Энд:

$T_{1/2}$ –тухайн изотопын хагас задралын үе;

t_s –хүлээх болон зураг авах нийт хугацаа;

В. Цацраг идэвхт задралын фактор

Өвчтөний биед тарьсан цацраг идэвхт эм биеэр жигд тарах хүртэл тодорхой хугацаанд хүлээсний дараа зураг авдаг. Цацраг идэвхт задралын фактор F_U нь зураг авах өрөөнөөс хуримтлагдах тунгийн чадлыг тооцоход ашиглагдах бөгөөд эм тариулсан өвчтөний хүлээх хугацаанд цацраг идэвхт задралыг тооцсон хэмжигдэхүүн юм.

С. T-фактор

Тухайн байгууламжийн бүсэд хүний байсан дундаж хугацааг тоног төхөөрөмжийн нийт ажилласан хугацаанд харьцуулсан харьцааг T-фактор гэдэг. Байгууламжийн бүсэд ихэнх цагаа өнгөрүүлсэнтэй холбоотойгоор цацрагийн шарлагад хамгийн их өртөх тохиолдлыг тооцдог. Өөрөөр хэлбэл эмнэлгийн ажилчид үйлчлүүлэгчтэй харьцуулахад ажлын байрандаа хамгийн их хугацааг өнгөрөөдөг тул цацрагийн шарлагад илүү өртөх боломжтой. Мөн байршлаас хамаараад T-фактор нь харилцан адилгүй байна. Тухайлбал, ажлын өрөө, удирдлагын өрөө зэрэгт $T=1$ бол коридор, ажилчдын амрах өрөөнд $T=1/5$, нийтийн угаалгын өрөө, агуулах, үүдний өрөө зэрэгт $T=1/20$ байдаг [6].

Эдгээр факторыг тооцон үүсгүүрээс r -зайд долоо хоногт хуримтлагдах цацрагийн тунгийн чадлыг дараах тэгшитгэлээр үнэлнэ:

$$D(t_s) = \frac{\Gamma A t_s R_t N_w F_U T}{r^2} \quad (3)$$

Энд:

Г-шарлагын чадал;

А-үүсгүүрийн идэвх;

t_s -хүлээх болон зураг авах хугацаа;

N_w -долоо хоногт оношлуулах өвчтөний тоо;

R_t - бууралтын фактор;

F_U - цацраг идэвхт задралын фактор;

T-фактор;

r-үүсгүүрээс тухайн цэг хүртлэх зай.

2.2. Фотоны шилжилт ба хамгаалалтын зузааныг тооцоолох

Моно-энергитэй γ -цацрагийн багц x -зузаантай материал дундуур нэвтрэхэд эрчмийн сулралыг дараах тэгшитгэлээр тодорхойлно [1,7]:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (4)$$

Энд:

I_0 - туссан цацрагийн эрчим;

I -суларсан цацрагийн эрчим;

μ - шугаман сулралын коэффициент;

Тунгийн чадал нь цацрагийн эрчимтэй шууд хамааралтай тул тунгийн чадлыг сулралыг дээрхтэй адилаар (5) тэгшитгэлээр илэрхийлж болно.

$$D(t) = D_0(t) e^{-\mu x} \quad (5)$$

Энд:

$D_0(t)$ –хамгаалалтгүй үеийн тунгийн чадал;

$D(t)$ – x зузаантай хамгаалалтаар суларсан тунгийн чадал;

Бидний зорилго нь аюулгүй ажиллагааны нормыг хангах шаардлагатай хамгаалалтын зузааныг тодорхойлох учраас зөвшөөрөгдөх тунгийн утгыг суларсан тунгийн чадал $D(t)$ -ийн оронд авч үздэг. Хамгаалалтгүй үеийн тунгийн чадалд зөвшөөрөгдөх тунгийн утгыг харьцуулсан харьцааг шилжилтийн фактор (T_f) гэдэг.

$$T_f = \frac{P}{D_0(t)}; \quad (6)$$

Энд:

P -зөвшөөрөгдөх тунгийн хязгаар;

Тэгшитгэл (5) болон (6)-аас шилжилтийн фактор нь дараах хэлбэртэй болно:

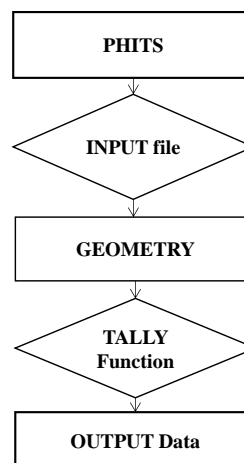
$$T_f = \frac{P}{D(t) \cdot e^{\mu x}} \quad (7)$$

Эндээс шаардлагатай хамгаалалтын зузаан (x)-ыг шилжилтийн фактор ашиглан дараах байдлаар хялбархан олох боломжтой:

$$x = -\frac{1}{\mu} \cdot \ln T_f \quad (8)$$

2.3. Компьютер симуляц

Энэхүү ажилд Японы Атомын Энергийн Агентлагаас хөгжүүлсэн PHITS кодыг ашиглав. Тус код нь Монте-Карло аргад үндэслэн санамсаргүй түүврийн аргаар бөөмийн харилцан үйлчлэлийн магадлалаар тооцоолдог. Өөрөөр хэлбэл давталтын тоо 100, нэг давталтанд 1000 бөөм гэж үзвэл нийт 100000 бөөмийн харилцан үйлчлэлийн магадлалыг тооцож, тэдгээрийн дундаж үр дүнг гаргадаг. Зураг 3-аар PHITS кодын тооцоолол гүйцэтгэх алгоритмыг харуулав.



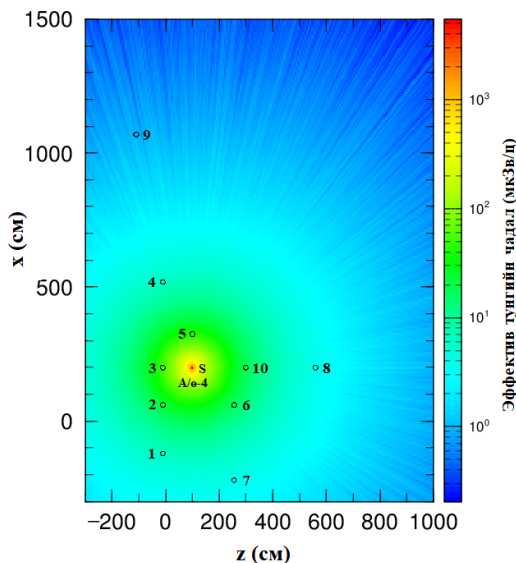
Зураг 3. PHITS кодын тооцоолол гүйцэтгэх алгоритм

PHITS кодыг цацрагийн хамгаалалт, цөмийн анагаах ухаан, онолын суурь судалгаа, сансар судлал, хүрээлэн буй орчны цацрагийн судалгаа

зэрэг олон салбарт өргөн хүрээнд ашиглаж байна. Бид RHITS 3.28 хувилбарыг судалгаандаа ашиглав.

3. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

RHITS 3.28 кодоор тооцооллыг гүйцэтгэхдээ 15 мКи идэвхтэй үүсгүүрийг амралтын өрөө-4 (A/ө-4)-ний төвд байрлуулан, тооцооллын цэгүүдийн координатыг Зураг 4-т харуулав. Үүсгүүрээс тодорхойлох цэг хүртэлх зайг Хүснэгт 1-д өгөв.



Зураг 4. Үүсгүүр ба тооцооллын цэгүүдийн байрлалын RHITS үр дүн

Эдгээр байрлалд тодорхойлсон эффектив тунгийн чадлын симуляцийн үр дүнг тэгшитгэл (1)-ийн утгатай харьцуулан Хүснэгт 1-д өгөв.

Хүснэгт 1. Эффектив тунгийн чадал

Тооцооллын цэгийн байрлал	r (м)	1-р тэгшитгэл	RHITS код	Харьцаа
		D (мкЗв/ц)		
1	3.4	6.54	6.73	0.97
2	1.8	24.04	24.36	0.99
3	1.1	65.57	64.07	1.02
4	3.4	6.43	6.71	0.96
5	1.3	47.60	49.56	0.96
6	2.1	16.87	17.58	0.96
7	4.5	3.63	3.79	0.96
8	4.6	3.45	3.61	0.96
9	9.0	0.93	0.93	1.00
10	2.0	19.8	19.3	1.03

Хүснэгт 1-ээс харахад цэгэн үүсгүүрийн хувьд симуляц болон аналитик тооцооны үр дүнгүүд хоорондоо тохирч байна.

Оператор зураг авах явц болон өвчтөнийг удирдлагын өрөөнөөс хянах бөгөөд операторын авах тунг аль болох бага байлгах ALARA зарчмыг баримтлан үүсгүүрээс багадаа 2 м-ийн зайд удирдлагын өрөө байрлахыг зөвлөдөг [5]. Тиймээс өрөөний төвд байрлуулсан үүсгүүрээс 2 м зайд #10 дугаартай байрлалд хартугалга болон бетонон хамгаалалттай үед тунгийн чадлыг үнэлэв.

Тэгшитгэл (4)-өөр x-зузаантай материалаар сулрах цацрагийн эрчмийг үнэлэхдээ хуримтлалын фактор B-г нэмж тооцдог [7,8].

$$I = I_0 B e^{-\mu x} \quad (9)$$

Энэ фактор нь сарнисан цацрагийг тооцдог хэмжигдэхүүн бөгөөд цацрагийн энерги болон тухайн материалын төрлөөс хамаардаг. Хамгаалалтгүй үед #10 байрлалд эффектив тунгийн чадал 19.84 мкЗв/ц байсан бол материалын төрөл болон зузаанаас хамаарч дараах байдлаар буурч байна.

Хүснэгт 2. Хартугалган хамгаалалттай үед эффектив тунгийн чадал

x (см)	μx	B	D (мкЗв/ц)	
			9-р тэгшитгэл	RHITS код
1	1.83	1.4	4.46	4.75±0.07
2	3.65	1.6	0.83	0.94±0.08
3	5.48	1.8	0.15	0.16±0.19
4	7.31	2.0	0.03	0.02±0.18

Хүснэгт 3. Бетонон хамгаалалттай үед эффектив тунгийн чадал

x (см)	μx	B	D (мкЗв/ц)	
			9-р тэгшитгэл	RHITS код
5	1.05	2.4	16.71	16.65±0.05
10	2.09	4.2	10.25	8.71±0.07
15	3.14	6.5	5.57	3.80±0.04
20	4.19	9.5	2.85	2.16±0.18
25	5.24	13	1.37	0.87±0.13

Хүснэгт 2 болон 3-т симуляц болон аналитик тэгшитгэлээр тооцсон үр дүнгүүдээ харьцуулан харуулав. Эндээс харахад аналитик тэгшитгэл болон RHITS тооцооны үр дүнгүүд ойролцоо гарч байна. Гэвч энэ тохиолдол нь цацраг идэвхт эм тарьсан тухайн өвчтөнийг цэгэн үүсгүүр гэж үзэн агаарт тархах бөөмсийн харилцан үйлчлэлд үндэслэн тооцоог гүйцэтгэсэн.

Харин AAPM Task Group 108-аас гаргасан тайланд цацраг идэвхт задрал болон бууралтын фактор, долоо хоногт оношлогдох нийт

өвчтөний тоо, хүлээх болон зураг авах хугацаа зэргийг нарийн тооцожээ.

Тиймээс тус тайланд тусгагдсан факторуудыг тооцон хяналтын бүсэд тунгийн чадлыг (3) тэгшитгэлийг ашиглан тодорхойлов. Өрөө тус бүрд байрлуулсан үүсгүүрээс тооцооллын цэг хүртэлх зай болон тунгийн чадлын үр дүнг Хүснэгт 4 болон 5-д өгөв.

Эффектив тунгийн чадал D -ын хамгийн их байх тохиолдол буюу зураг авахын өмнөх амрах дөрвөн өрөө, ПЭТ-КТ өрөө тус бүрд үүсгүүрийг байрлуулж, тэдгээрээс #1-9 байрлалд өгөх долоо хоногийн нийлбэр тун ΣD -г хамгаалалтгүй үед олов.

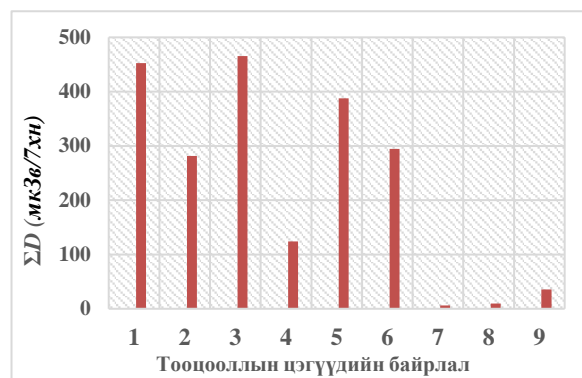
Хүснэгт 4. Эффектив тунгийн чадал

Тооцооллын цэгүүдийн байрлал	ΣD (мкЗв/7хн)	Зураг авах өрөө		Амрах өрөө			
		r (м)	D (мкЗв/7хн)	1		2	
				r (м)	D (мкЗв/7хн)	r (м)	D (мкЗв/7хн)
1	452.4	8.3	9.3	6.0	11.7	4.7	19.3
2	281.7	6.8	13.8	5.1	16.4	5.0	16.9
3	465.5	5.5	20.8	4.7	19.5	5.7	13.0
4	123.9	3.4	54.5	5.4	14.8	7.7	7.2
5	387.8	3.6	49.1	3.6	32.1	5.7	13.1
6	294.5	6.5	15.0	2.9	50.8	2.7	57.4
7	6.1	9.4	0.2	5.3	0.4	2.3	2.0
8	9.3	5.7	0.5	1.2	7.1	3.4	0.9
9	35.5	5.6	20.6	10.0	4.3	13.2	2.4

Хүснэгт 5. Эффектив тунгийн чадал

Тооцооллын цэгүүдийн байрлал	Амрах өрөө			
	3		4	
	r (м)	D (мкЗв/7хн)	r (м)	D (мкЗв/7хн)
1	1.1	374.9	3.4	37.4
2	2.1	97.2	1.8	137.4
3	3.4	37.4	1.1	374.9
4	6.3	10.6	3.4	36.7
5	4.5	21.5	1.3	272.1
6	2.4	74.7	2.1	96.4
7	1.9	2.9	4.5	0.5
8	5.6	0.3	4.6	0.5
9	12.1	2.9	9.0	5.3

Долоо хоногт хуримтлагдах эффектив тунгийн чадлын нийлбэр утга ΣD -ыг тооцооллын цэгүүдийн байрлалаас хамааруулан Зураг 4-т харуулав.



Зураг 4. Эффектив тунгийн чадал

Зураг 4-өөс харахад #1-6 гэж дугаарласан байрлалд эффектив тунгийн чадал ойролцоогоор 124 ~ 466 мкЗв/7хн хооронд байна.

Байгууламжийн гаднах #7 болон #8 дугаартай байрлалд цацрагийн тунгийн чадал харьцангуй бага гарсан нь T -факторыг тооцсонтой холбоотой.

Долоо хоногийн нийлбэр тун ΣD -ийн утгуудыг зөвшөөрөгдөх тунгийн хязгаар 20 болон 100 мкЗв-т тус тус харьцуулан шилжилтийн фактор T_f -ыг тэгшитгэл (6)-аар тооцон Хүснэгт 6-д өгөв. Эдгээр тунгийн зөвшөөрөгдөх утгууд нь харгалзан хяналтын болон хяналтын бус бүсэд хамаарна.

Хүснэгт 6. Шилжилтийн фактор

Өрөөний байршил	Тооцооллын цэгийн байрлал	Эффектив тунгийн чадал (мкЗв/7хн)	Зөвшөөрөгдөх тунгийн хязгаар (мкЗв/7хн)	Шилжилтийн фактор
Хяналтын бүс	1	452.43	100	0.22
	2	281.72		0.36
	3	465.52		0.22
	4	123.92		0.81
	5	387.85		0.26
	6	294.45		0.34
Байрны гадна	7	6.09	20	3.29
	8	9.33		2.15
Удирдлагын өрөө	9	35.48	100	2.82

Тооцооны үр дүнгээс харахад #7-9 дугаартай байрлалд шилжилтийн факторын утга 1-ээс их байгаа нь хамгаалалт шаардлагагүйг харуулж байна. Харин #1-6 байрлалд 1-ээс бага гарсан нь

хамгаалалт хэрэгтэйг илтгэж байна. Тодорхойлсон шилжилтийн факторын утгуудаа ашиглан тэгшитгэл (8)-аар хартугалга, бетон, тоосгон материалуудын хувьд шаардлагатай хамгийн бага хамгаалалтын зузааныг хяналтын болон хяналтын бус бүсэд тооцон үр дүнгээ Хүснэгт 7-д харуулав.

Хүснэгт 7. Хамгаалалтын материалын шаардлагатай зузаан

Өрөөний байршил	Тооцооллын цэгийн байрлал	Зөвшөөрөгдөх тунгийн хязгаар (мкЗв/7хн)	Хамгаалалтын зузаан, (см)		
			Хартугалга	Бетон	Тоосго
Хяналтын бус	1	100	0.9	7.4	9.1
	2		0.6	5.1	6.3
	3		0.9	7.6	9.3
	4		0.1	1.1	1.3
	5		0.8	6.7	8.2
	6		0.6	5.3	6.5
Байрны гадна	7	20	-	-	-
	8		-	-	-
Удирдлагын өрөө	9	100	-	-	-

Хүснэгт 7-д хяналтын бүсийн тунгийн зөвшөөрөгдөх хязгаар 100 мкЗв/7хн үед бидний сонгосон байрлалаас хамаарч хамгаалалтын зузаан өөр өөр байна. Тухайлбал, #3-байрлалд бетонон хамгаалалтын зузаан ойролцоогоор 7.6 см, тоосго 9.3 см зузаантай байна. Эндээс хамгаалалтын зузаан хяналтын болон хяналтын бус бүс, тухайн материалын шинж чанараас хамаарч харилцан адилгүй байна.

Бид тунгийн чадлыг ПЕТ-КТ төхөөрөмж байрлах болон амрах өрөөнүүдийн зэргэлдээх байрлалд тодорхойлсон бол эдгээр өрөөнүүдийн дээд болон доод давхарт мөн тооцох шаардлагатай. Тус эмнэлэгийн ПЕТ-КТ төхөөрөмж нь В1 давхарт байрлах тул зөвхөн дээд давхарт тунгийн чадлыг үнэлэв.

Үүсгүүрийн байрлалыг ихэвчлэн шалнаас дээш 1м-т гэж үзэн эффеkтив тунгийн чадлыг дээд давхарын шалнаас дээш 0.5 м зайд үнэлдэг [5]. Зураг 5-д үзүүлсэн 3 м өндөртэй ПЭТ-КТ байрлах өрөөний дээд давхарт тунгийн чадлыг тооцъё. Үүсгүүрээс $r=2.5$ м зайд хамгаалалтгүй үед хуримтлагдах тунгийн чадлыг тэгшитгэл (3)-аар тооцоход ойролцоогоор $D=102$ мкЗв/7хн байна.



Зураг 5. Тооцоонд ашиглагдах давхар хоорондын зай

Хяналтын бус бүсийн зөвшөөрөгдөх тунгийн хязгаар 20 мкЗв гэдгээс бид шилжилтийн факторыг олж, тэгшитгэл (9)-ээр шаардлагатай хамгаалалтын зузааныг тооцов. Эндээс бетонон хамгаалалтын зузаан хамгийн багадаа 8 см, тоосгон материалын хувьд 10 см гэж гарав.

4. ДҮГНЭЛТ

1. Эффеkтив тунгийн чадлыг RHITS код болон аналитик томъёогоор хамгаалалтгүй болон хамгаалалттай үед тооцоолоход үр дүнгүүд хоорондоо ойролцоо гарч байна.
2. АНУ-ын “AAPM Task Group 108”-ын хамгаалалтын тооцооны аргазүйг ашиглан үүсгүүрийн идэвх 15 мКи байхад долоо хоногт хуримтлагдах тунгийн чадлыг үнэлэхэд хяналтын бүсэд 124~466 мкЗв/7хн хооронд гарсан бол ПЭТ-КТ өрөөний дээд давхарт ойролцоогоор 102 мкЗв/7хн байна.
3. Зөвшөөрөгдөх нормыг биелүүлж байх шаардлагатай хамгаалалтын зузааныг шилжилтийн факторт үндэслэн олж, эдгээр утгууд нь хяналтын болон хяналтын бус бүсэд материалын шинж чанараас хамаарч харилцан адилгүй болохыг тодорхойлов.
4. Цаашид RHITS кодыг ашиглан нөлөөлөх факторуудыг тооцсон нарийвчилсан судалгааг хийх болно.

НОМ ЗҮЙ

- [1] Paul E. Christian, Kristen M. Waterstram-Rich, Nuclear Medicine and PET/CT: Technology and Techniques, Seventh Edition, Elsevier-Health Sciences Division, 2011.
- [2] Т.Мөнх-Эрдэнэ, Нейтроны удаашрал ба хамгаалалтын тооцооны зарим үр дүн, ШУА-ийн ФТХ-ийн бүтээл №49, ISSN 2707-3157 (online), 2022 он, х.144-151.
- [3] T. Furuta, T.Sato, Medical Application of Particle and Heavy Ion Transport Code

- System PHITS. Radiol. Phys. Technol. vol.14, 2021.
- [4] Radiation Safety Regulation of Mongolia, Nuclear Energy Commission, 2015.
- [5] M. T. Madsen et al., AAPM Task Group 108: PET and PET/CT Shielding Requirements, Medical physics, vol 33, 2006.
- [6] NCRP Report No.151-Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities, 2015.
- [7] J.R.Lamarsh, A.J.Baratta, Introduction to Nuclear Engineering, Third Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 2001.
- [8] J.E.Martin, Physics for Radiation Protection, A Handbook of Second Edition, Completely Revised and Enlarged, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006, ISBN: 3-527-40611-5.