

AZ EGÉSZTESTSZÁMLÁLÓ KALIBRÁCIÓJA ÉS KIÉRTÉKELÉSI ELJÁRÁSAINAK FEJLESZTÉSE

Kocsonya András*, Pántya Anna, Szabó Dezső, Harangozó Imréné,
Zagyvai Péter, Endrődi Zsuzsa

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, 1221 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

*kocsonya.andras@ek.hun-ren.hu

A kézirat beérkezett: 2024.03.26.

Közlésre elfogadva: 2024.05.29.

The whole-body-counter of the Centre for Energy Research is in operation since 60 years. The paper summarizes the main developments of the last decade. A new HPGe detector was installed, and efficiency calibration was performed by the new detector for a wide body-weight range. The detection limits are compared for the scintillation and semiconductor detector. New semi-automatic spectrum evaluation method was developed for the scintillation detector.

Keywords: internal dose, whole-body-counting, incorporation, spectra-evaluation, efficiency-calibration

Az Energiatudományi Kutatóközpont egésztestszámláló berendezése idén, 2024-ben 60 éves. A cikk összefoglalja az elmúlt évek főbb fejlesztéseit. Az egésztestszámlálóba új HPGe detektor lett beépítve, amivel széles testtömeg-intervallumra kiterjedő hatásfok-kalibráció történt. Összehasonlítottuk a szcintillációs és félvezető detektorokkal elérhető kimutatási határokat. A szcintillációs detektorral felvett spektrumokhoz új, jól automatizálható kiértékelési eljárást dolgoztunk ki.

Kulcsszavak: belső sugárterhelés, egésztestszámlálás, inkorporáció, spektrumértékelés, hatásfok-kalibráció

BEVEZETÉS

Az Energiatudományi Kutatóközpont belső sugárterhelés meghatározására szolgáló egésztestszámláló berendezését 60 évvel ezelőtt, 1964-ben helyezték üzembe és azóta is folyamatosan működik [1]. Az évforduló alkalmat ad arra, hogy összefoglaljuk az elmúlt időszak eredményeit, fejlesztéseit.

Az egésztestszámlálóval évente több mint 100 mérést végeznek. A KFKI telephely azon dolgozói, akiknek munkája során a belső sugárterhelés lehetősége felmerül, rendszeresen ellenőrző mérésen esnek át, rutinszerűen évente, illetve inkorporáció gyanúja esetén soron kívül is.

Az egésztestszámlálóban 3 detektor van: 2 db NaI(Tl) szcintillációs detektor, egy az ágy felett, egy pedig alatta. Kristályméretük 6"×4". Az ágy felett emellett egy félvezető detektor is van. A félvezető detektor együtt mozog a szcintillációs detektorral, azonban ahhoz képest oldalra van beépítve. Emiatt az ágy oldalirányú mozgatása szükséges ahhoz, hogy a megfelelő detektor kerüljön a mérési pozícióba [2].

ÚJ HPGE DETEKTOR BEÉPÍTÉSE ÉS ANNAK KALIBRÁCIÓJA

2012-ben az egésztestszámlálóba új nagytisztaságú germánium félvezető (HPGe) detektor került beépítésre a korábbi meghibásodott detektor helyére. Az új detektor típus: Canberra GX3018 típusú, relatív hatásfoka 30%.

Az új detektor hatásfokkalibrációját flaskafantommal végeztük. A 2012-ben elvégzett kalibráció során két flaskakészletet használtunk.

A KFKI AEKI ^{152}Eu flaskafantom-készlet az Am – 241 / Eu – 152 – OMH-11105 jelű standard hígításával készült 1994-ben. Össztömege 100 kg. A készlet referencia időpontja 1994.01.01. 1 flaska aktivitása az alábbi táblázatban látható.

1. táblázat. Az 1994-es KFKI AEKI flaskafantom aktivitása (1 flaska)

nuklid	felezési idő	aktivitás (kBq)
^{241}Am	432.2 év	0.084
^{152}Eu	13.537 év	3.540

Csekély aktivitása miatt az ^{241}Am – hosszú felezési ideje ellenére – nem használható.

Az OSSKI-tól kölcsönkapott flaskafantom-készlet egy Eckert & Ziegler gyártmányú radioaktív hiteles anyagminta hígításával készült. Bizonylata szerint az alábbi radionuklidokat tartalmazza.

2. táblázat. Az OSSKI flaskafantom-készlet aktivitása

nuklid	felezési idő	aktivitás (kBq)
^{51}Cr	27.7 nap	32.27
^{57}Co	271.79 nap	0.77
^{60}Co	5.27 év	3.68
^{85}Sr	64.84 nap	4.81
^{88}Y	106.65 nap	7.58
^{109}Cd	462.6 nap	20.17
^{137}Cs	30.07 év	3.24
^{139}Ce	139.64 nap	1.01
^{241}Am	432.2 év	3.64

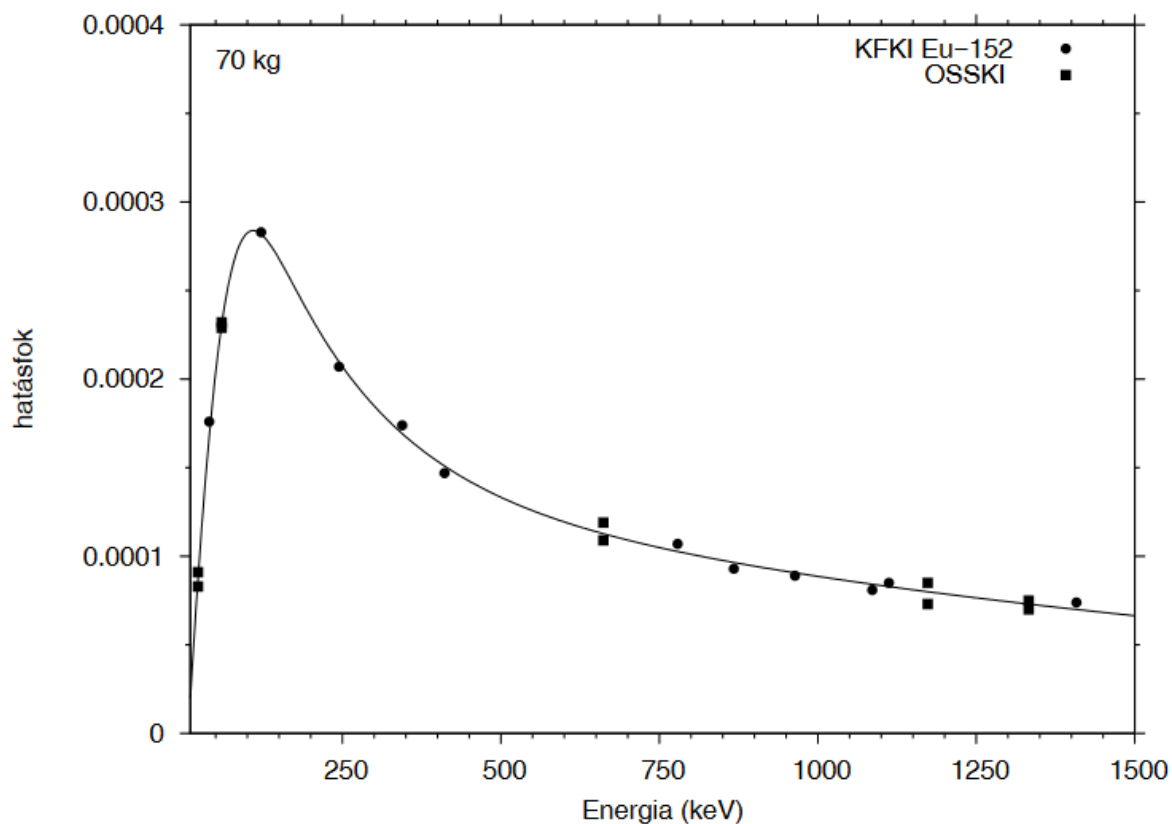
A megadott aktivitások a teljes – 90 kg-os – készletre vonatkoznak.

A készlet referencia időpontja 2010.09.01., azaz a mérés idején 2 éves volt A készítés óta eltelt idő alatt a rövidebb felezési idejű nuklidok már elbomlottak. Emiatt a kalibrációhoz csak a ^{60}Co , ^{109}Cd , ^{137}Cs és ^{241}Am radionuklidok voltak felhasználhatók. Bár a ^{57}Co felezési ideje kb. 3/4 év, a kezdeti aktivitás nagyon kicsi volt, ezért a méréskor már nem volt kimutatható.

A kalibráló mérések fekvő „SCANNING END STOP” geometriában történtek. A mérési idő $T = 1293$ s volt. A jobb statisztikus pontosság miatt a OSSKI flaskafantommal a fenti, szokásos mérési idő kétszeresével $T = 2586$ s idővel is történtek mérések.

A hatásfok energiafüggése az alábbi ábrán látható. Az ábrákon eltérő módon vannak jelölve a két fantomból származó pontok. Bár a két fantom a felhasznált flasks különbözősége miatt kismértékben eltér egymástól, azt feltételezzük, hogy a belőlük kapott hatásfokok eltérése elhanyagolható lesz. Ezt a feltételezésünket alátámasztja, hogy a két fantomból kapott pontok azonos függvényre illeszkednek (1. ábra). A két különböző radioaktív hiteles anyagminta

hígításával készült kalibráló készlettel kapott hatásfokok egy görbére illeszkedése egyben a bizonylatban foglalt aktivitásokat is kölcsönösen ellenőrzi.



1. ábra. A Canberra GC3018 HPGe detektor hatásfoka 70 kg-os testtömeg esetén

Korábban a kalibráló mérések 50–100 kg testsúlyokra készültek, 10 kg lépésekben, de erre ekkor nem volt elegendő kapacitás. Azonban szükség lenne hatásfok-kalibráció 100 kg feletti testsúlyok esetére is, mivel a vizsgálatok során rendszeresen kell ilyen testsúlyú embereket is mérni.

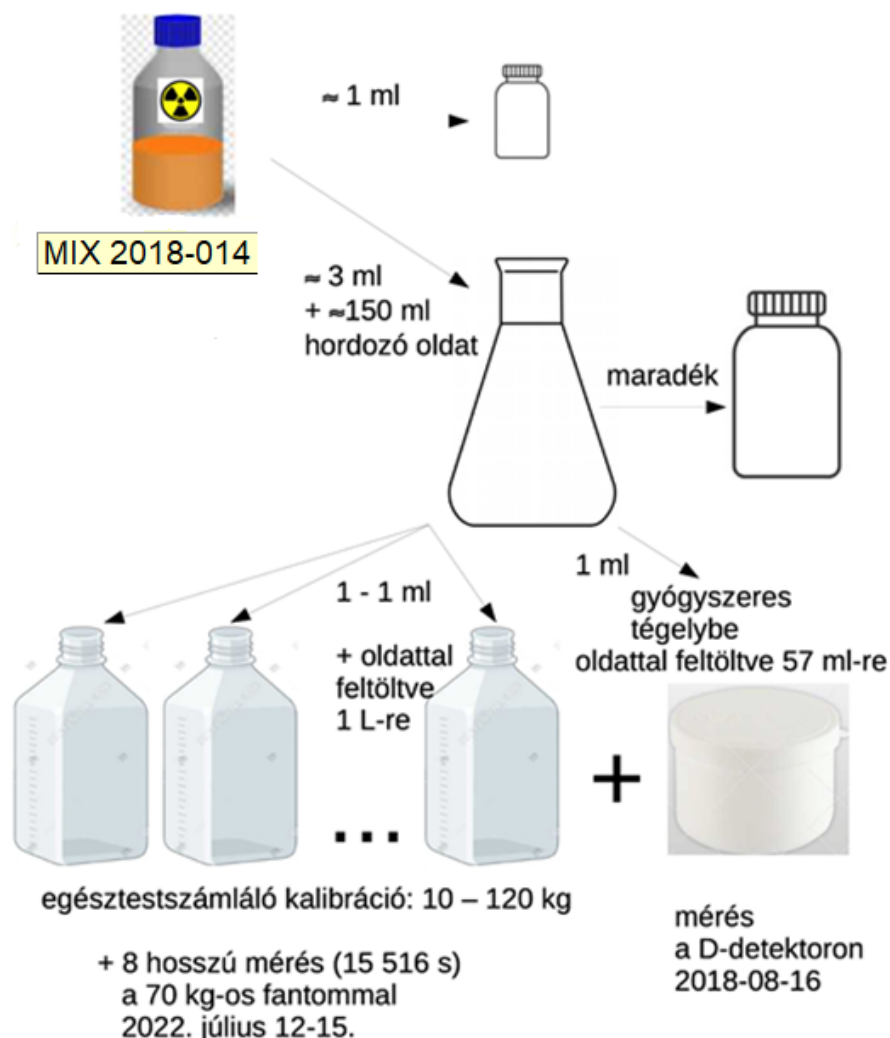
Kalibráció 2018-2022-ben

A detektor újabb kalibrációjához új flaskakészlet készült, a MIX 2018-014 jelű a Budapest Főváros Kormányhivatala Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztály által biztosított radioaktív hiteles anyagmintából. A hiteles anyagminta műbizonylatban szerinti aktivitása az alábbi táblázatban olvasható.

3. táblázat. A MIX 2018-014 jelű radioaktív hiteles anyagminta aktivitása

MIX 2018-014	A (kBq)
²⁴¹ Am	396,1
¹⁵² Eu	502,4
¹³³ Ba	484,5
⁶⁰ Co	980,8
¹³⁷ Cs	696,0
ref. date:	2018-06-01

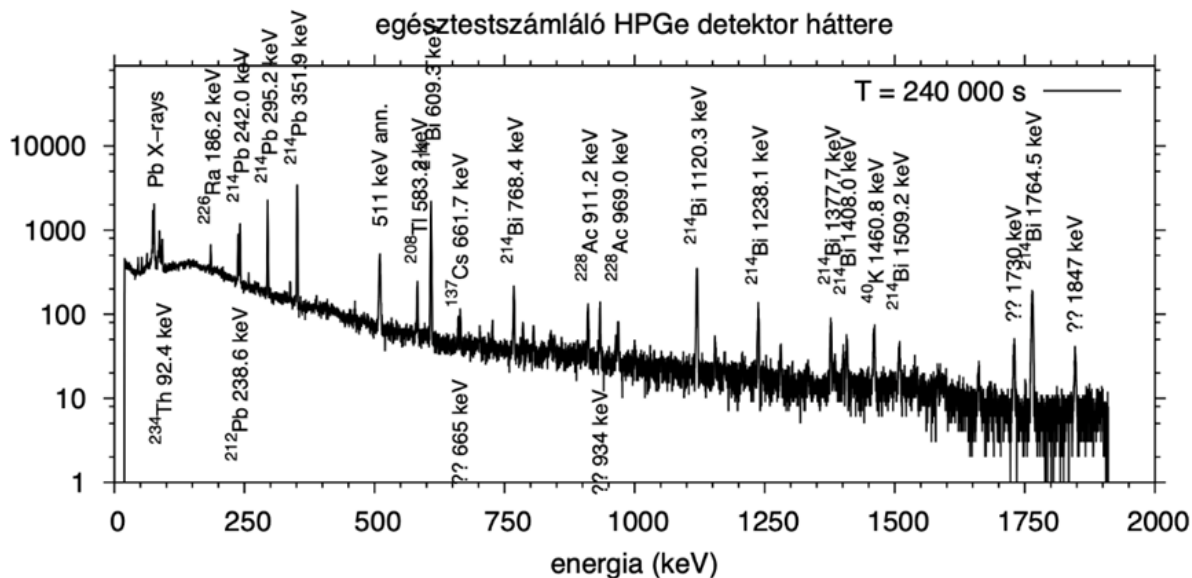
A minta hígításával 120 db 1 literes flaska lett megtöltve. A hígítási folyamatot az alábbi (2. számú) ábra szemlélteti.



2. ábra. A MIX 2018-014 radioaktív hiteles anyagminta hígítása

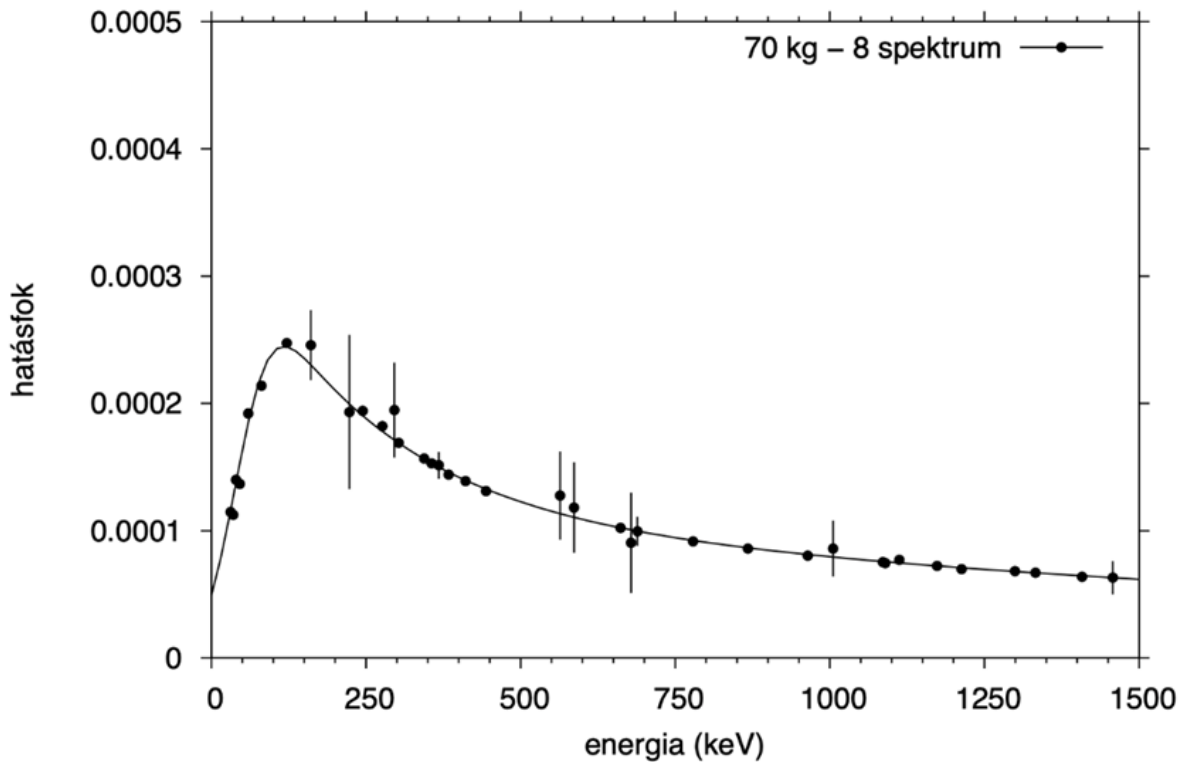
A méréseket változatlanul fekvő scanning-end-stop geometriában végeztük. A flaskákból 10 kg-tól 120 kg-ig állítottunk össze kalibráló fantomokat, 10 kg lépésben. A jobb mérési statisztika érdekében a 70 kg-os fantommal a szokásos scanning-end-stop mérést 1/12-ed részére lelassítva is végeztünk méréseket. Ezt 8-szor megismételtük, így az összeidő 124 128 s lett (1,44 nap).

A megfelelő háttérlevonás érdekében egy hétvégés, hosszú mérési idejű háttérspektrumot is felvettünk: $T = 240\,000$ s (2,78 nap). Ebben csak egyetlen mesterséges radionuklid látható: ^{137}Cs (3. ábra). A szokásos 1293 s-es mérés alatt ez a csúcs <2 beütés lenne.



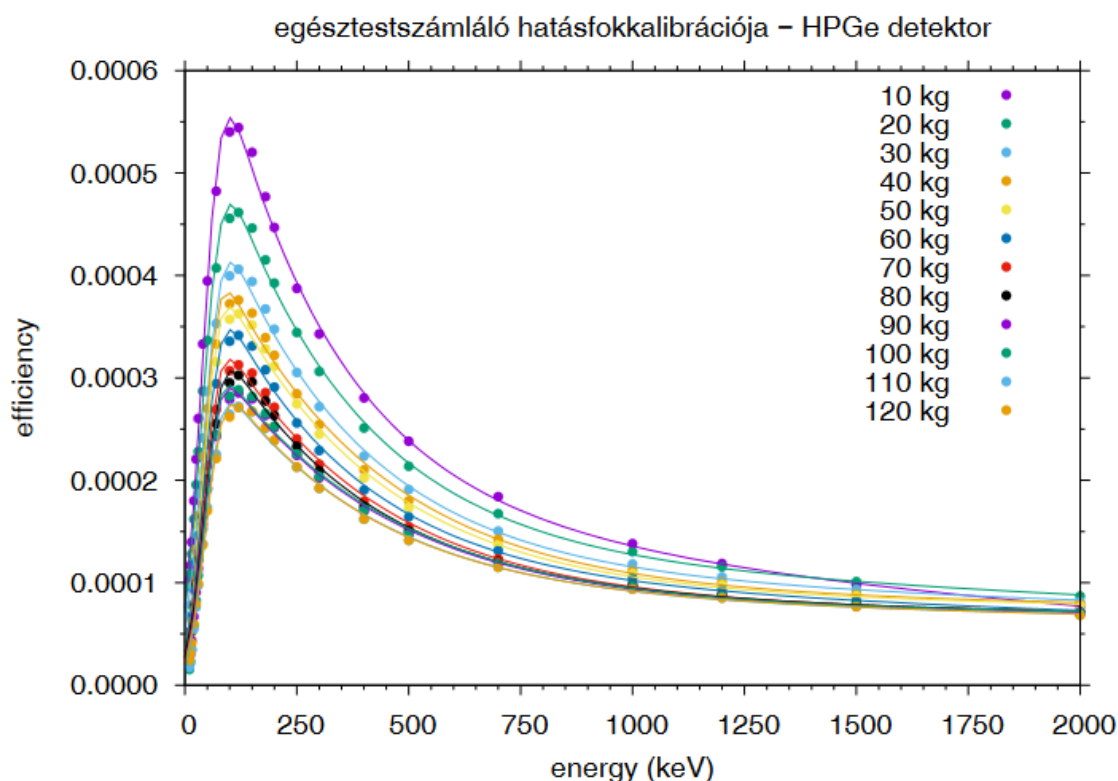
3. ábra. Az egésztestszámláló HPGe detektorának háttérspektruma

A 70 kg-os fantommal elvégzett hosszú idejű méréssel a kalibráló minta 5 nuklidjából 38 gamma-vonalat lehetett felhasználni a kalibrációhoz a 31 keV – 1457 keV energia-intervallumban (4. ábra).



4. ábra. A hosszú idejű kalibráló spektrumok alapján szerkesztett hatásfokgörbe

A 10 kg – 120 kg testtömegekre felvett hatásfokgörbék az alábbi (5. számú) ábrán láthatók.



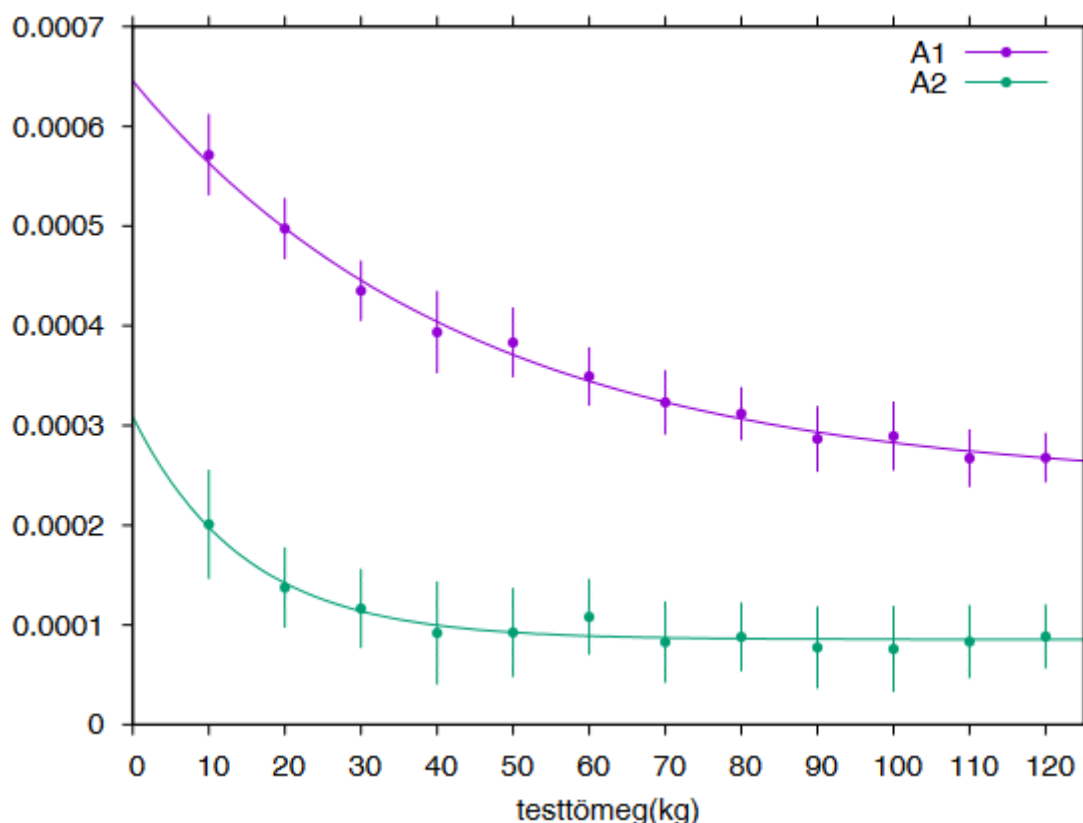
5. ábra. Az egésztestszámláló HPGe detektorának hatásfoka 10 kg – 120 kg testtömegekre

A detektor hatásfokának energiafüggését az alábbi függvénnyel írjuk le:

$$\varepsilon(E) = \operatorname{erfc}\left(-\frac{E - E_0}{E_\Lambda}\right) \times \left(A_1 \cdot \exp\left(-\frac{E}{E_1}\right) + A_2 \cdot \exp\left(-\frac{E}{E_2}\right)\right)$$

A hatásfokot leíró függvény paramétereinek testtömegtől való függését empirikus úton közelítjük. Ezáltal bármilyen testtömeg és fotonenergia esetén meg lehet határozni a hozzá tartozó hatásfokot.

A félvezető detektor esetén rutin mérések kiértékelése általában a Genie-2000 programmal történik [5]. Sajnos a Genie-2000 nem teszi lehetővé, hogy a hatásfokfüggvény paramétereit közvetlenül bevigyük a programba. Emiatt erre egy „kerülő” eljárást dolgoztuk ki, amivel a Genie-200 programot rá lehet venni arra, hogy az általunk meghatározott hatásfokokkal számoljon. Ennek részletei a „Környezeti minták gamma-spektrometriás vizsgálata” című ismeretfelújító előadásban és cikkben vannak leírva.



6. ábra: A hatásfokot leíró függvény paramétereinek függése a testtömegtől

A SZCINTILLÁCIÓS ÉS A FÉLVEZETŐ DETEKTOR KIMUTATÁSI HATÁRÁNAK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA

A félvezető detektorra elvégzett kalibráció és a szcintillációs detektor korábbi kalibrációját ellenőrző mérés, illetve a háttérpektrumok alapján meghatároztuk a két detektor kimutatási határait néhány gyakorlatban lényeges radionuklidra.

A gyakorlati szempontból lényeges radionuklidok többségére a félvezető detektorral valamivel jobb kimutatási határ érhető el, mint a szcintillációssal, mivel a félvezető detektor jobb energiafelbontása és alacsonyabb háttére kompenzálja a lényegesen kisebb térfogatot.

A ^{40}K esetén valamivel rosszabbnak bizonyult a félvezető detektor kimutatási határa a szcintillációshoz képest. Ez elsősorban a háttérlevonás miatt van: mivel ^{40}K a környezetben és így a detektor háttérében is megtalálható, a kisebb térfogatú detektor esetén a kisebb beütésszámok különbsége miatt lehet a különbség bizonytalansága jelentősebb, ami korlátozza a kis aktivitások megbízható detektálását. Az emberi szervezetben szokásán előforduló – jellemzően 3–5 kBq – ^{40}K esetén ez azonban nem okoz problémát, az megbízhatóan kiértékelhető a félvezető detektorral is.

Bár a kimutatási határok összehasonlítása alapján látható, hogy az új félvezető detektor használata esetén – a ^{40}K előbb tárgyalt esetét kivéve – nem nagyon van olyan gyakorlati szempontból lényeges radionuklid, aminél a szcintillációs detektor jobb eredményt adna, mint

a félvezető. Azonban a szcintillációs detektor előnye, hogy nem igényel hűtést, így abban az esetben is üzemképes marad, ha cseppfolyós nitrogén valamiért nem állna rendelkezésre.

4. táblázat: A szcintillációs és a félvezető detektor kimutatási határai

Nuklid	Energia (keV)	Kimutatási határ (Bq)		HPGe / NaI arány
		NaI	HPGe	
^{22}Na	1274,5	94	83	89%
^{57}Co	122,1		93	
^{60}Co	1173,2	99	66	66%
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	140,5		79	
^{125}I	27,4			
^{131}I	364,5	145	98	68%
^{137}Cs	661,7	120	92	77%
^7Be	477,6	1101	805	73%
^{40}K	1460,8	874	2321	265%
^{192}Ir	316,5	153	76	50%
^{54}Mn	834,9	104	63	60%
^{65}Zn	1115,5	187	153	82%

SPEKTRUMÉRTÉKELŐ ELJÁRÁS AZ EGÉSZTESTSZÁMLÁLÓ SZCINTILLÁCIÓS DETEKTORÁHOZ

A szcintillációs detektor által adott spektrum jellemzője, hogy a mérsékelt energiafelbontás miatt a csúcsok átlapolnak egymással. Ez megnehezíti a csúcsok egyenkénti kezelését és csúcs alatti folytonos háttér egyszerű levonását, ezzel a nettó csúcsterület meghatározását.

Az új félvezető detektor használata mellett is a szcintillációs detektor továbbra is használatban maradt, így ennek spektrumainak kiértékelésére is kell egy megbízható kiértékelési eljárás, ami lehetőleg kevés emberi erőforrás mellett biztosítja a spektrumok értékelését és azoknak az eseteknek a kiszűrését, amikor inkorporáció gyanúja merül fel és amivel részletesebben foglalkozni kell.

A most ismertetett eljárásban egy gyakorlatban könnyen alkalmazható matematikai modellel írja le a NaI detektorral felvett spektrumokat, amelyből a további feldolgozáshoz, értékeléshez szükséges paraméterek könnyen kinyerhetők.

A folytonos háttér leíró függvény:

$$BG(i) = \operatorname{erf}\left(\frac{i - i_0}{A_0}\right) \times \left(A_1 \times \exp\left(-\frac{i}{b_1}\right) + A_2 \times \exp\left(-\frac{i}{b_2}\right)\right)$$

Az exponenciálisan lecsengő folytonos háttér egy kb. 100 keV energiáig terjedő gyorsabb lecsengésű szakaszból és egy e feletti lassabban lecsengő szakaszból áll. Ez indokolja a második tényezőben a két exponenciális tag alkalmazását.

A csúcsokat leíró függvény:

$$p_j(i) = a_j \times \exp\left(-\frac{(i - c_j)^2}{2 \cdot \sigma_j^2}\right)$$

A teljes spektrum a folytonos háttérből és az ezekre rátevődő csúcsokból áll:

$$f(i) = BG(i) + \sum_{j=1}^k p_k(i)$$

A leírt függvénnyel való illesztés után a spektrumok további feldolgozásához szükséges adatok az illesztett paraméterekből számíthatók ki. A csúcsterület: $AREA = 2,5066 \times a_j \times \sigma_j$,

A detektor háttér spektrumában a természetes radionuklidok, a ^{40}K , ^{228}Ac , ^{214}Pb és ^{214}Bi – utóbbi kettő radon-bomlástermékek – gamma-vonalai, valamint az 511 keV-es annihilációs csúcs láthatók. Az alkalmazott modellbe az alábbi gamma-vonalakat vettük fel.

^{40}K	^{214}Pb	^{214}Bi	^{228}Ac	annihilációs csúcs
1460.8 keV	351.9 keV	609.3 keV	911.2 keV	511.0 keV
	295.2 keV	1764.5 keV	969.0 keV	
	242.0 keV	1120.3 keV	338.3 keV	
		1238.1 keV	964.8 keV	

Az azonos radionuklidhoz tartozó gamma-vonalakat egy vonalcsoportha fogtam össze, melynek tagjai között az intenzitásarányt rögzítjük. Az intenzitásarányokat a ^{214}Bi és a ^{214}Pb esetén egy hosszú idejű háttér méréséből vettük. A ^{228}Ac esetén csak a 911,2 keV-es csúcs volt megbízhatóan megilleszthető. Emiatt többi csúcsának intenzitását a táblázatokból vett vonalgyakorisággal vettük, korrigálva a detektor hatásfokával a kérdéses energián.

A spektrumot leíró függvénynek így – alaphelyzetben – 14 szabad paramétere van:

- a folytonos háttér 6 paramétere: A_0 , i_0 , A_1 , A_2 , b_1 , b_2 ;
- az energiakalibráció paraméterei: Zero, Gain;
- az energiafelbontás paraméterei: s_0 , s_1 ;
- a vonalcsoporthoz jellemző a_i paraméterek (4 vonalcsoporthoz → 4 db).

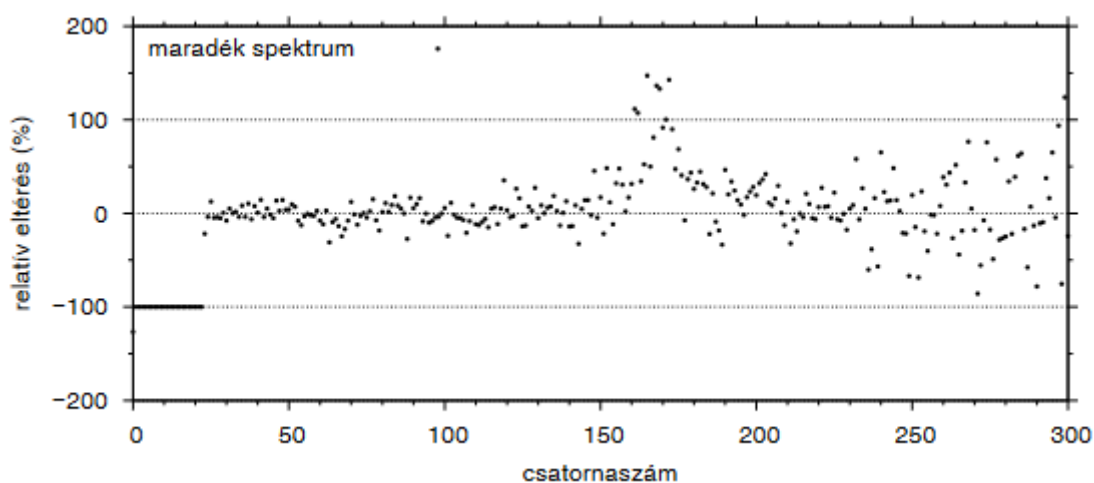
A fenti függvényben A_1 , A_2 és a_i paraméterek lineárisak, míg a többi nem. A spektrumillesztések a Levenberg-Marquardt algoritmus alapján a gnuplot [4] programmal történtek.

A háttérképzéssel szemben személyek méréseknél a háttérspektrumhoz adódnak hozzá az inkorporált radionuklidok gamma-vonalai. Normál esetben csak ^{40}K szokott előfordulni, így a hozzá tartozó 1460.8 keV-es csúcs növekedik meg a háttérhez képest. A spektrum illesztésénél új gamma-vonalaz az illesztési modellbe nem kell felvenni. Amennyiben a vizsgált személyben más, inkorporált gamma-sugárzó radionuklid van mérhető mennyiségben, akkor annak gamma-vonalai megjelennek a spektrumban. Erre a következő részben látunk példát.

Az illesztés elvégzése után a program előállítja a mért spektrum és az illesztés különbségét, azaz a maradék-spektrumot. Ha az csak a Poisson-szórásból származó véletlen ingadozást mutatja, akkor az illesztés elfogadható és a spektrumban valószínűleg nincs olyan radionuklid, ami nincs benne az illesztési modellben. Ha azonban modellben nem szereplő gamma-sugárzó van jelen, akkor a maradék-spektrumban határozott eltérés keletkezik, amit elég könnyű akár szemre, akár az illesztés jósága alapján matematikai úton kiszűrni.

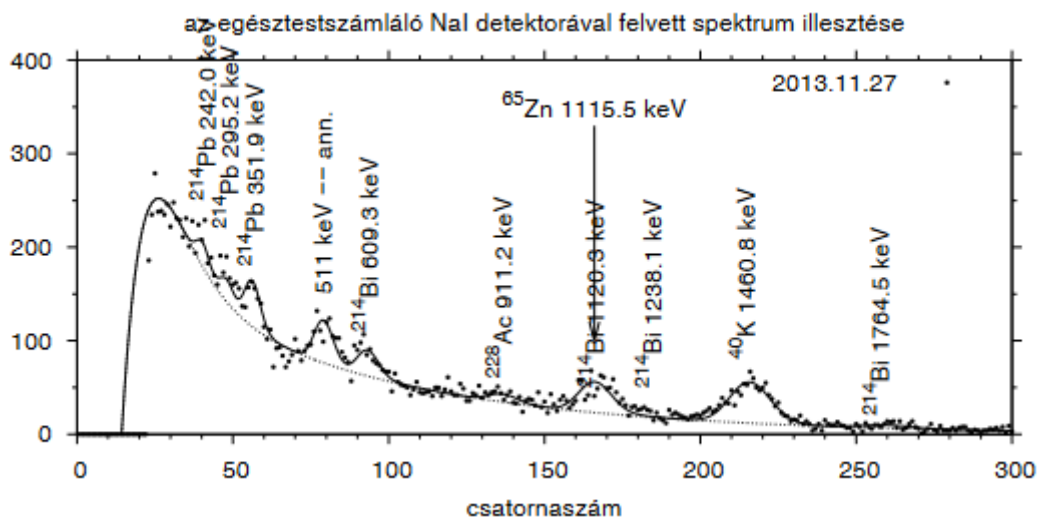
Egy ^{65}Zn inkorporáció esete

A munkakörüknél fogva belső sugárterhelés kockázatának kitett dolgozók éves szűrővizsgálata keretében mért egyik személy spektrumának értékelésekor feltűnt, hogy a ^{214}Bi 1120,3 keV-es csúcsa a szokások vonalarányokkal nem illeszthető meg és a maradék-spektrumban egy csúcs keletkezik.



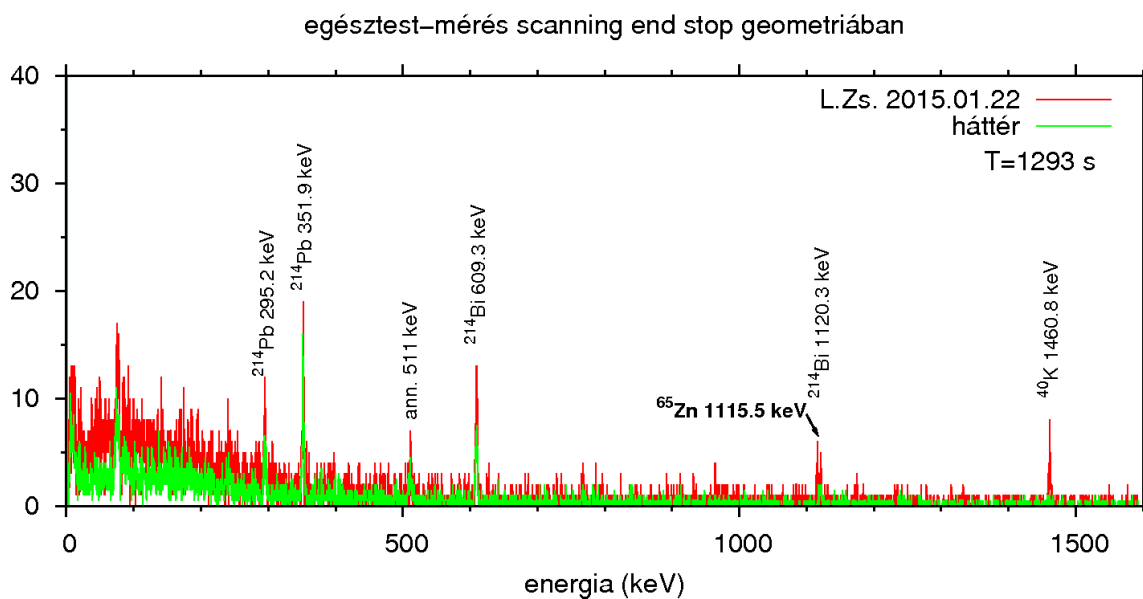
7. ábra: Maradék-spektrum az illesztési modellben nem szereplő radionuklid esetén

A szcintillációs detektor korlátozott energiefelbontás miatt az csupán az energiából a nuklid nem azonosítható egyértelműen. A vizsgált személy által végzett munkák jellege alapján a szóba jöhető radionuklidok közül a ^{65}Zn a legvalószínűbb. Ennek 1155,55 keV-es csúcsát betéve a modellbe a maradék spektrumban levő csúcs eltűnik és az illesztés mindenütt megfelelő lesz.



8. ábra: A szcintilláció detektorral felvett spektrum illesztése ^{65}Zn inkorporáció esetén

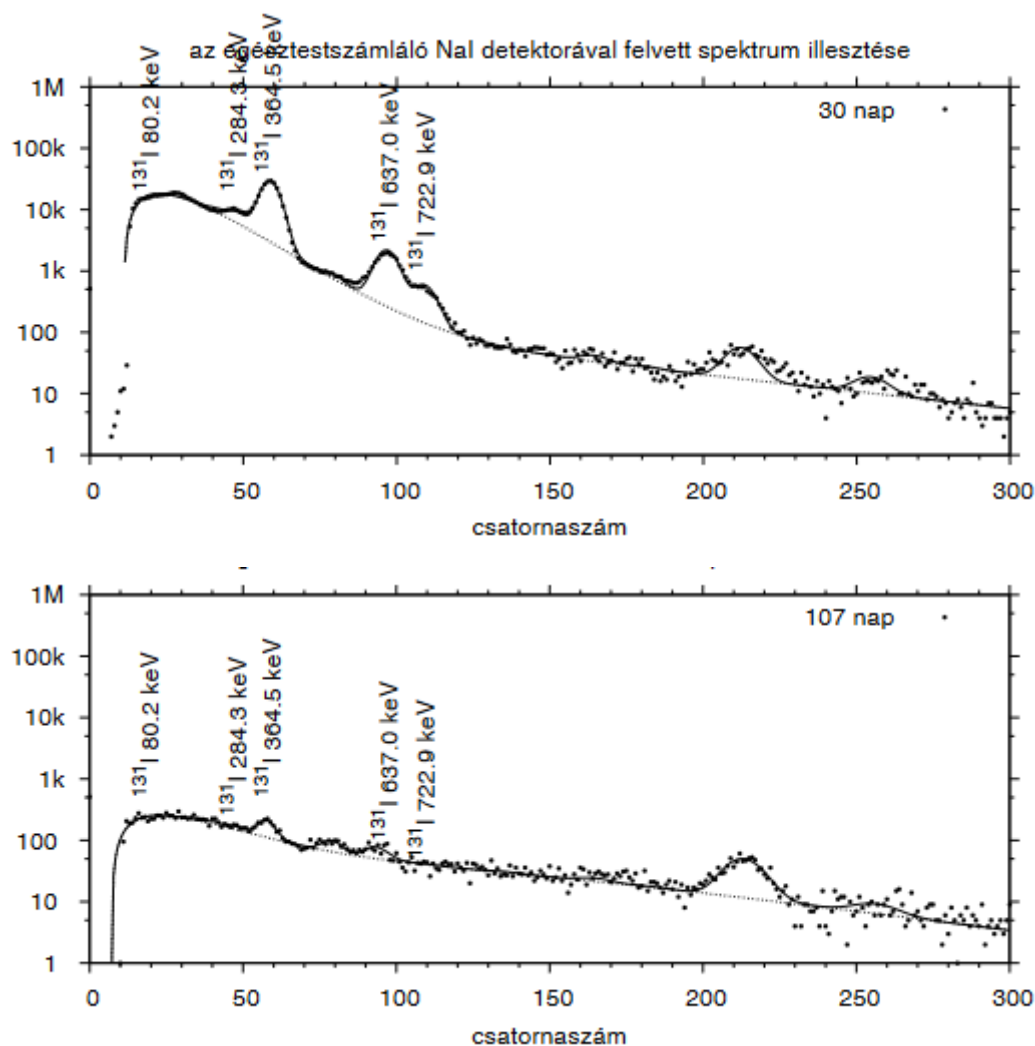
A vizsgált személynél a megismételtük a mérést félvezető detektor alkalmazásával, amely igazolta mind az azonosított nuklidot, mind a meghatározott aktivitást.



9. ábra: ^{65}Zn inkorporáció félvezető detektorral mérve

Mérés radioizotópos terápia után

2013-ban lehetőségünk nyílt egy radiojódos pajzsmirigy-kezelésen átesett személy többszöri egésztestmérésére, aki önként jelentkezett a méréssorozat alanyának. A kezelés során egyszeri alkalommal 2,4 GBq ^{131}I izotópot kapott tabletta formájában. A kezelése utáni 30., 36., 50., 57., 69., 107. napon végeztünk méréseket, egészen a ^{131}I kimutatási határ alá csökkenéséig.



10. ábra: ^{131}I terápián átesett személy spektrumai a beadás után 30 és 107 nappal

Itt a korábbi esetektől lényegesen nagyobb aktivitás került a szervezetbe, ennek megfelelően a mesterséges radionuklidtól jövő intenzitás lényegesen nagyobb, mint a természetes radionuklidoktól eredő.

A detektor pályája mentén változó holtidő hatása

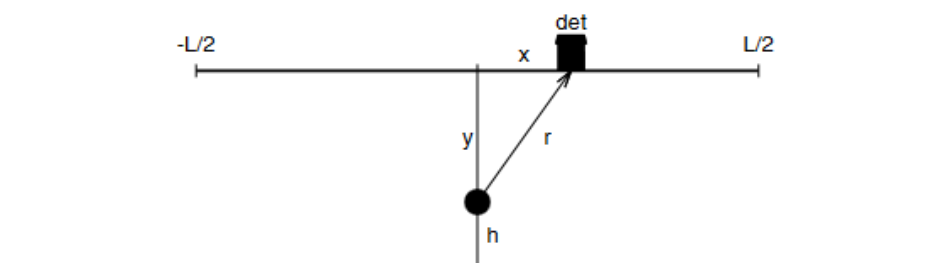
A környezetellenőrző mérések esetén és általában a legtöbb gamma-spektroszkópiával végzett mérésünk során a detektor élőideje (LT) szokott állandó értékre beállítva lenni. Így a valós idő (RT) valamivel hosszabb ennél, a holtidőtől függően. Az egészszteszámológánál más a helyzet: itt a detektor mozgása valós időben meghatározott program szerint történik, így a valós idő van ezzel megegyezőre állítva. Az élőidő a holtidő miatt ennél valamivel rövidebb lesz. Mivel az egészszteszámológóval végzett mérések során a holtidő jellemzően igen kicsi, így az eltérés nem jelentős.

Tegyük fel, hogy a mért személy tartalmaz egy adott szervet érintő (helyi) inkorporációt, pl. belégzés útján a tüdőben rakódott le valami. Amikor a detektor az inkorporációt tartalmazó testrész felett jár, megnövekszik a holtideje. Így itt az élőidő csökken, a detektált beütésszám

emiatt kisebb lesz. A teljes mérés holtidején ez nem feltétlenül tükröződik, mert az inkorporációtól távolabbi testrészeknél a holtidő a szokásos érték közelébe csökken és a végén a teljes mérési időre vetített átlagos holtidőt látjuk. Érdeemes meggyőződni róla, hogy az egésztestszámlálás során előfordulhatnak-e elő olyan aktivitások, amikor ez a jelenség számottevő lehet.

Az egésztestszámlálásnál szokásosan alkalmazott fekvő scanning-end-stop geometriát vizsgáljuk. A vizsgált személy vagy fantom az ágyon fekszik. A detektor az ágy felett helyezkedik el H magasságban. A detektor a mérés során L hosszúságú pályán mozog v sebességgel.

A fantom belsejében helyezkedik el – az egyszerűsítés érdekében – egy pontszerűnek tekintett sugár- forrás, az ágy síkja felett h magasságban. Számoljunk a következőkben azzal, hogy a sugárforrás a detektor pályájának felénél van ($x = 0$).



11. ábra: mérési geometria mozgó detektor esetén

A sugárforrás által kibocsátott sugárzás intenzitása a detektor helyén (részecskefluxus) a sugárforrástól való távolság négyzetével fordítottan arányos: $I \propto 1/r^2$. Az r távolságot a Pitagorasz-tétellel kifejezve az x helyzetben levő detektor által észlelt intenzitás:

$$I(x) = I_{\max} \times \frac{1}{1 + \frac{x^2}{(H-h)^2}}$$

A detektor által észlelt beütésszám a detektor L hosszúságú úton történő mozgása alatt:

$$Y = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} I(x)(1 - DT(x))dt = \frac{1}{v} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} I(x)(1 - DT(x))dx$$

A detektor teljes előideje az L hosszúságú úton történő mozgása alatt:

$$LT = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} (1 - DT(x)) \frac{dx}{v} = \underbrace{\frac{L}{v}}_{RT} - \underbrace{\frac{1}{v} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} DT(x)dx}_{\langle DT \rangle}$$

Az első tag a mérés valós ideje (amennyi idő alatt a detektor megteszi az L hosszúságú pályát), míg a második tag a detektor pályájára átlagolt holtidő. Ezt a holtidőt fogja mutatni az analízátor összspektrum gyűjtése esetén.

Összehasonlítjuk a idealizált holtidő nélküli detektor és a (2) és (3) képletek alapján véges holtidővel rendelkező detektor által adott időegységre jutó beütésszámokat. Az egyszerűség kedvéért számoljunk azzal, hogy a holtidő egyenesen arányos az intenzitással és a detektor alatti pozícióban ($x = 0$ cm) a sugárforrás 30% holtidőt okoz.

Ekkor a teljes mérési időre átlagolt holtidő 12% lesz (a pálya közepén 30%, a két végén 3%). A (2) és (3) képletek alapján az integrálokat numerikusan kiszámolva a (4) képletből a valódihoz képest 7%-kal kisebb aktivitást kapunk. Ez a csökkenés még belefér az egésztestszámlálótól elvárható mérési pontosságba, mivel más bizonytalansági tényezők is okoznak hibákat.

Ez a számítás a KFKI egésztestszámlálójában használt nem kollimált detektor esetére vonatkozik, ahol a detektor, így a számunkra lényeges szögtartományban az irányfüggése nem számottevő. Más a helyzet, ha a detektor kollimált, azaz a ferde szögben beeső fotonokra árnyékolva van. Tegyük fel, hogy az - egyébként azonos tulajdonságokkal bíró detektor – csak egy 30° félnyílásszögű kúpban lát előre, azaz lefelé. Ekkor a teljes mérési időre átlagolt holtidő 5%-ra csökken, mivel a pálya két végén szinte 0 lesz ekkor a holtidő, míg a pálya közepén ekkor is 30%. Az aktivitás 23%-kal lesz kisebb a valósnál. Ez már jelentősebb csökkenés, mint az előbbi nem kollimált eset.

ÖSSZEGZÉS

Bár az elmúlt időszakban a sugárvédelem és dozimetria területén a mérési módszerek fejlesztésére rendelkezésre álló, elsősorban emberi erőforrás megcsappant, az éppen rendelkezésre álló létszámmal igyekeztünk egyrészt a fennálló mérési igényeknek eleget tenni, másrészt a gyakorlatban felmerült problémákra és kihívásokra válaszolva a mérési és kiértékelési módszereken szerény mértékben fejleszteni. Az új fejlesztések azonban hamar átkerültek a gyakorlatba, hiszen a saját munkánkat könnyítjük meg ezzel. Ugyanakkor a megrendelők igényeire is megbízhatóbb, pontosabb válaszokat tudunk adni, különösebb ha az alkalmazott módszerek saját fejlesztéseink, aminek részleteit ismerjük, és nem fekete-dobozként használjuk.

IRODALOM

- [1] Andrási Andor: Belső sugárterhelés meghatározása egésztest-számlálással. Fizikai Szemle, 2006/9.
- [2] Andrási Andor, Belezna Ferencné, Urbán János: A belső sugárterhelés egésztestszámlálós meghatározási módszerének továbbfejlesztése a KFKI-ban
- [3] Radioaktív izotópok emberi szervezetben történő meghatározására létesített egésztestszámlálós mérőrendszer továbbfejlesztése, Egységes mérő és kiértékelő

szoftver kifejlesztése és az új mérőrendszer kalibrálása, Beszámoló jelentés KFKI Atomenergia Kutatóintézet, Budapest, 1994. november

[4] G N U P L O T Version 4.6 Thomas Williams, Colin Kelley et. al. – <http://www.gnuplot.info>

[5] Genie 2000 Gamma Acquisition & analysis V3.2.1, Aug 26, 2009, Canberra Industries

Készült a SOMOS Alapítvány támogatásával.