



Energiatudományi
Kutatóközpont



BELSŐ SUGÁRTERHELÉS MEGHATÁROZÁSÁRA ALKALMAS MÓDSZEREK FEJLESZTÉSE

Doktori (PhD) téziszfűzet

Pántya Annamária

Témavezető: Dr. Pázmándi Tamás

Konzulens: Dr. Zagyvai Péter

Energiatudományi Kutatóközpont

*Fizikai Tudományok Doktori Iskola,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem*

Budapest
2024

BEVEZETÉS ÉS A KUTATÁS ELŐZMÉNYE

A belső sugárterhelés meghatározása a radionuklidok szervezetbe kerülése következtében kapott sugárterhelés kiszámítására szolgáló ismereteket, eszközöket és módszereket foglalja magában. Az emberi szervezetbe belégzéssel, lenyeléssel vagy a bőrfelületen, esetleg sebhelyen keresztül juthat radioaktív anyag. Az ebből származó dózis meghatározására a sugárveszélyes munkakört betöltő munkavállalók és a lakosság radioaktív anyagot inkorporáló tagjai esetében is szükség van. Az ebből származó lekötött effektív dózist nem lehet közvetlenül megmérni, annak nagyságát a szervezetben lévő radioaktív izotópok mennyiségének mérésével történő meghatározását követően, matematikai modellek segítségével lehet megbecsülni. A sugárterhelés mértéke számos tényezőtől függ, többek között a szervezetbe került radioaktív anyag mennyiségétől, annak fizikai-kémiai formájától és a bevitel módjától. A belső sugárterhelés meghatározásához a rendelkezésre álló legjobb, naprakész, és lehetőség szerint pontos ismereteket kell felhasználni a felvétel körülményeire, a radionuklidok biokinetikájára, a szövetekben és szövetekben történő energiaátadásra és azoknak a sugárzás által okozott károsodására, valamint a sugárzás sztochasztikus vagy determinisztikus hatásának felmérésére vonatkozóan.

Az emberi testben lévő radioizotópok mennyiségének és minőségének közvetlen (*in vivo*) módszerekkel történő meghatározása alapjaiban nem különbözik az egyéb minták esetében is alkalmazott, főleg γ -spektrometriai mérésektől, azonban a minták egyedi, geometriailag nehezen egységesíthető mérete és alakja, a mérési szempontból általában kedvezőtlen és egyénileg változó mérési geometria, valamint a korlátozott mérési idő következtében a mérési eredmények bizonytalansága általában nagyobb, mint az élettelen minták esetében.

Az emberi testben lévő radioizotópok pontos meghatározásához azonban figyelembe kell venni az egyes személyek eltérő testméreteit és a belső szervek elhelyezkedését. A mérési berendezések és módszerek területén jelentős fejlesztések valósultak meg az elmúlt években. A nemek és a különböző korosztályok anatómiai különbségeit felhasználva olyan fizikai fantomokat fejlesztenek, amelyekkel modellezhető a különböző testgeometriák hatása a mérési eredményekre, ezzel pontosabb kalibrációt biztosítva a mérésekhez.

Általánosságban kijelenthető, hogy minél kisebb energiájú γ -sugárzás mérése a feladat, annál nagyobb jelentősége van az egyedi jellemzők figyelembevételének. A szervezetbe bekerülő urán és transzurán izotópok (pl. ^{239}Pu , ^{241}Am) monitorozása esetében mind a mérés technika kialakítása, mind pedig ezen izotópok mennyiségi meghatározása alapos felkészülést igényel, melynek elengedhetetlen eleme a mérőrendszer fizikai vagy numerikus fantomokkal végzett kalibrációja. A kis energiájú fotonokat a forrás és a detektor közötti anyagok, így a testszövetek is jelentősen gyengítik. Az emberi szövetek összetételét és sűrűségét utánzó, valóság-hű antropomorf fantomok vagy a numerikus modellek használata egyaránt lehetővé teszi a fotonok testen való áthaladásának pontosabb figyelembevételét.

Az emberi test egyes részeiben jelenlévő, ott hosszabb ideig tartózkodó radioizotópok meghatározására résztestméréseket (pl. tüdő-, koponya-, máj- vagy pajzsmirigymérés) alkalmazunk. Ekkor a mérés célja a célszervben lévő radioizotópok aktivitásának pontos meghatározása, amelynek során esetenként a test egyéb részeiben megtalálható aktivitásból származó jelzések járulékát is figyelembe vesszük. A kalibrációs fantomok jelentős része az átlagos testméretnek felel meg, és általában a radionuklidok egyenletes eloszlását modellezi az egyes szerveken belül, de valójában a radioaktív anyagok mennyisége és annak eloszlása az egyes szerveken belül nem egyenletes és olyan

összetett fiziológiai folyamatok befolyásolják, mint az anyagcsere, a szervek közötti kapcsolatok és a szövetekben való visszatartás.

A vizsgálatok során figyelembe kell venni az életkorfüggő sajátosságokat, például az egyes szervek életkorra jellemző méretét, vagy a metabolikus folyamatok életkorfüggését is. Ezen a területen az elmúlt években különösen a ^{131}I izotóptól származó pajzsmirigy-dózisok megfigyelésére és értékelésére helyeztek nagy hangsúlyt. A pajzsmirigy mérete, elhelyezkedése az életkor függvényében változik. Annak érdekében, hogy a gyermekek sugárterhelése pontosabban meghatározható legyen, a mérési hatások meghatározása során használt kalibrációs fantomoknál ezeket is figyelembe kell venni. A doktori kutatásom során részletesen bemutattam, hogy a belső sugárterhelés meghatározása érdekében végzett *in vivo* mérések pontosságának növeléséhez olyan kalibrációs eljárásokat kell összeállítani, amelyek figyelembe veszik a mérni kívánt izotópot, a mérési geometriát, a mérési eszközt és a mérni kívánt szervet, valamint a mérendő személy életkorát.

Abban az esetben, ha a belső sugárterhelés meghatározásához közvetett mérési eljárásokat használunk, *in vitro* biológiai minták – exkrétumok (vizelet, széklet), vér vagy orrváladék – aktivitáskonzentrációjának értékéből következtetünk a testben jelenlévő radioaktív anyag mennyiségére. A mérési módszer megválasztásához ismerni kell a vizsgálandó radioizotópot hordozó vegyületek fizikai és kémiai tulajdonságait és a szervezeten belüli metabolikus viselkedését. Ezek a mérések vagy az egésztest- és résztestszámolás eredményeinek kiegészítésére szolgálnak, vagy azért szükségesek, mert a kis hatótávolságú sugárzást kibocsátó radionuklidok (tisztán α - vagy β -sugárzó, esetleg nagyon kisenergiájú röntgen- és α -sugárzó izotópok) esetében más módon nem lehetséges a szervezetben lévő radioizotópok mennyiségének meghatározása.

Az emberi szervezetből származó biológiai minták radioaktivitásának közvetett mérési módszerekkel történő meghatározása során a mintavételezés körülményei jelentősen befolyásolják az eredmények megbízhatóságát. Mindazonáltal a komplex biológiai minták esetében a mintákban található anyagok kémiai stabilitása változhat a tárolás, a szállítás és a mintaelőkészítés során, amelyek alapvetően befolyásolhatják a mérési eredményeket. A vizsgált személyek számos egyedi fiziológiai tényezővel rendelkeznek. A mérési eredmények értékelésénél komoly kihívást jelent ezek figyelembevétele, mert a szervezetben zajló metabolikus folyamatok miatt a mérések reprodukálhatósága rosszabb, mint más, élettelen minták esetében.

A trícium (^3H) izotóp vizeletből való kimutatására használt folyadékszintillációs mérések során az egyik fontos tényező, amely befolyásolhatja a mérési eredmények pontosságát, a quench (kioltó) hatás. Ez a szintillációs fény veszteségét, a mérési spektrum eltolódását okozza. A quench hatás kezelésére több módszer is rendelkezésre áll, melyek közül a mintaelőkészítés, a különböző kalibrációs módszerek (standard addíció, quench görbe illesztés) alkalmazása, vagy a szintillátor összetételének optimalizálása a legelterjedtebb. A megfelelő mérési eljárások kialakítása és a quench hatás minimalizálása kritikus fontosságú a pontos és megbízható folyadékszintillációs mérések érdekében.

Ahhoz, hogy a mérési adatokból a felvételt és a lekötött effektív dózist kiszámítsuk, további, a felvételi szituációt jellemző paraméter ismerete szükséges. Ezek közül a legfontosabbak a felvétel ideje óta eltelt idő, a felvétel módja, a felvett izotóp fizikai és kémiai formája, valamint az egyéni jellemzők, melyek szintén rendelkezhetnek bizonytalanságokkal.

A lekötött effektív dózis kiszámításához szükséges biokinetikai modellek paraméterértékeinek hiányosságai adódhatnak a modellek bizonytalanságaiból és az egyéni variabilitásból is. Eszerint a bizonytalanság egyik forrása az, hogy a modelleket és azok paramétereit egy úgynevezett *Referencia személyre* dolgozták ki, amelytől az mért személy tulajdonságai jelentősen különbözhetnek. Ugyanúgy

növeli a bizonytalanságot, hogy az adott személy biokinetikai jellemzői (például az ürített vizelet vagy széklet mennyisége), jelentősen változhatnak az időben. Az alkalmazott biokinetikai modellek megbízhatóságát befolyásolja a modellek alapját képező forrásadatokat terhelő bizonytalanság is. A biokinetikai modellek ideális esetben humán adatokon alapulnak, de azokban az esetekben, amikor az emberi szervezetre vonatkozó információ nem áll rendelkezésre, a kísérleti állatokra és a kémiai analógokra vonatkozó adatokkal helyettesítik – vagy egészítik ki – ezeket. Számos példa van arra, hogy az emlősfajok közötti biokinetikai adatok extrapolációjában bizonytalanságok jelennek meg, továbbá nincs minden izotóp esetén empirikus bizonyíték arra, hogy a kémiai analógok hasonló fiziológiai és biológiai tulajdonságokat mutattának. Ez utóbbi különösen a lantanidák és az aktinidák vizsgálatának bizonytalanságát növeli.

A mérési adatok dózisbecslésre való felhasználhatóságát az is befolyásolhatja, ha a felvételt követően a szervezetbe került radioaktív anyag gyorsabb kiválasztásának érdekében dekomporációs kezelésre kerül sor. A kezelések egyik fajtája a DTPA (diethylene triamine pentaacetic acid) beadása, melyet főként az aktinidák (pl. amerícium) által okozott belső szennyezés kezelésére használnak, mivel képes azokkal vízoldható komplexeket képezni, és így elősegíti azok gyorsabb kiválasztását a szervezetből. A kezelés megváltoztatja a radioaktív anyag retenciós függvényét a szervezetben a radioaktív anyagok gyorsabb kiválasztása miatt, ezért az alapértelmezett biokinetikai modellek nem alkalmazhatók közvetlenül. Így a lekötött effektív dózis számítása során figyelembe kell venni a DTPA kezelés hatására bekövetkező változásokat és egy, az adott felvételi esetre és személyre jellemző új retenciós függvény alapján kell meghatározni a belső sugárterhelést. A vizeletmérésekből kapott adatok értelmezésekor figyelembe kell venni a DTPA kezelés időzítését és gyakoriságát. A DTPA kezelést követően a vizeletben mért aktivitás értéke kezdetben jelentősen megemelkedhet. Ezek az értékek tükrözik a szervezetből eltávolított radioaktív anyag mennyiségét, és fontos információkat nyújtanak a kezelés hatékonyságáról. A kezelés után bizonyos idővel, amikor a vizeletben mért aktivitás szintje lecsökken a kezelés nélküli szint környékére, már lehet következtetni a szervezetben maradt radioaktív anyag mennyiségére és annak eloszlására.

A közelmúltban végzett összehasonlítási gyakorlatok (ICIDOSE, IAEA-IDEAS) arra is felhívták a figyelmet, hogy a belső sugárterhelés meghatározása során egyéb nehézségekkel is szembe kell nézni. A biokinetikai és a dozimetriai modellek alkalmazása olyan döntéseket és ítéleteket igényelhetnek, amelyek a becsült dózis különbözőségéhez vezethetnek. Ugyanazon adatsorból végzett dózisbecslések eredménye bizonyos esetekben jelentős szórást mutathat a különböző feltételezésektől, az értékelést végző tapasztalatától és készségétől, valamint az alkalmazott hardvertől és a szoftvereszközöktől függően.

A tématerülettel foglalkozó szakemberek folyamatos célja a dózisbecslés harmonizációja annak érdekében, hogy a belső sugárterhelés eredményei – a külső dózismérés eredményeihez hasonlóan – összehasonlíthatók legyenek a pontosság és a reprodukálhatóság tekintetében. Ha két személy ugyanannak a külső sugárzási térnek van kitéve, akkor a dózismérőjük által mért eredmények összhangban vannak, és a legjobb becslést adják. A belső sugárterhelés meghatározása során hasonló célt fogalmazunk meg: azonos mérési eredményekből kiindulva az elvégzett elemzéseknél elvárható, hogy a belső sugárterhelésre közel azonos eredményt kapjunk. A belső sugárterhelés meghatározásánál tehát az eredmények megbízhatóságának ugyanolyan prioritást kell élveznie, mint a külső dozimetriában.

CÉLKITŰZÉSEK

A belső sugárterhelés meghatározására alkalmas módszerek fejlesztése során kiemelt figyelmet kell fordítani két alapvető tényezőre: a mérési módszerek optimalizálására és a dózisbecslés során alkalmazott paraméterek bizonytalanságainak feltárására. Az optimalizálási eljárások és a bizonytalanságok kezelése nagyban függ az adott izotóptól, a használt mérési módszerektől és eszközöktől. Emiatt elengedhetetlen, hogy a mérési és modellalkotási módszereket alaposan, az adott körülményekhez, valamint az érintett izotópok specifikus tulajdonságaihoz igazítsuk.

A belső sugárterhelés meghatározásának teljes folyamatát, a különböző mérési technikákat és a dózisbecslés kritikus pontjait részletesen tanulmányozva, kutatásom célja, hogy a jelenleg alkalmazott mérési módszereket és modelleket tovább fejlesszem. Ezekkel a fejlesztésekkel arra törekszem, hogy növeljem a mérések érzékenységét, csökkentve a mérési bizonytalanságokat, valamint javítsam a dózisbecslések pontosságát, megbízhatóságát és reprodukálhatóságát.

A tudómérések különösen fontosak kis energián sugárzó izotópok (pl. ^{241}Am) esetében, mivel ebben az energiatartományban a szerv előtti szövetek sugárzásgyengítő tényezője jelentős. Munkám célja, hogy optimalizáljam a tudóméréseket ezeknél az izotópoknál, különös tekintettel a mérési pontosságra és megbízhatóságra, figyelembe véve a szövetek sugárzásgyengítő hatását és a mellkasban található egyéb szervekben jelenlévő radioaktivitás hatását. A mérések optimalizálása érdekében olyan mérési pozíciót kerestem, amelyben a mellkas mérés során a keresztthatások minimalizálhatók, abban az esetben, ha nem tudjuk, melyik szerveben van a radioaktív anyag, és csak egy mérésre van lehetőségünk.

Baleseti szituációban a légkörbe kerülő és onnan belélegzett radiojód izotópok a pajzsmirigyben halmozódnak fel, ahol jelentős sugárterhelést okozhatnak. A pajzsmirigy mérete, elhelyezkedése az életkor függvényében változik, ezért a gyermekek esetében ezeknek a tényezőknek a figyelembevétele különösen fontos annak érdekében, hogy a szervdózis meghatározása kellően pontos legyen. A kutatásom során a rendelkezésre álló pajzsmirigymérő berendezésre különböző mérési geometriákat és fantomokat alkalmazva végeztem érzékenységvizsgálatokat. Ezek segítségével meghatároztam, hogy az egyes paraméterek milyen szerepet játszanak a mérési bizonytalanságban, ezáltal lehetővé téve a mérési eljárások optimalizálását és a szervdózis pontosabb becslését.

A ^3H izotóp vizeletből történő vizsgálatához általában folyadékszintillációs mérőrendszert alkalmazunk, amelynek egyik kritikus tényezője a quench (kioltó) hatás figyelembevétele. Munkám során megvizsgáltam, hogy különböző kalibrációs módszerek mennyire hatékonyak a quench hatás kiküszöbölésében vagy figyelembevételeiben anélkül, hogy a vizeletminták időigényes mintaelőkészítésére szükség lenne. A célom az volt, hogy olyan eljárást fejlesszek ki, amely pontos marad komplex minták esetén a quench hatás jelenlétében is, ezzel javítva a mérési eredmények megbízhatóságát és hatékonyságát.

A mérési adatokból kiindulva, a lekötött effektív dózis meghatározásához biokinetikai modelleket kell alkalmazni, figyelembe véve az adott izotóp metabolizmusát, felszívódását, eloszlását és kiürülését. Szerves vegyületek estén az irodalomban nem minden esetben található megfelelő biokinetikai modell a felvett radioizotóp viselkedésére. Munkám során megvizsgáltam, hogy ilyen esetekben hogyan lehet meghatározni a belső sugárterhelésből származó lekötött effektív dózist, és feltártam, hogy a különböző tényezők – mint például a biokinetikai modellek pontatlansága, az ismeretlen felvételi idő, valamint a mérési bizonytalanságok – mekkora mértékben befolyásolják a kapott eredményt.

Egyes izotópok esetében a dekorporációs szerek, mint például a DTPA, alkalmazásával csökkenthető a belső sugárterhelés mértéke. Azonban ezek a kezelések megváltoztathatják az egymást követő mérési eredmények közötti összefüggéseket, ami befolyásolhatja a biokinetikai modellek adatokhoz való illesztését. Munkám során megvizsgáltam, hogy a DTPA kezelés hogyan befolyásolja a ^{241}Am inkorporációja utáni vizeletmérési adatok felhasználhatóságát. Emellett elemeztem, hogyan érhető el a legjobb dózisbecslés a különböző típusú mérési eredmények egyidejű felhasználásával, a felvételekre jellemző abszorpciós paraméterek változtatásával.

A kutatás célja, hogy javítsa a dózisbecslési modellek pontosságát és megbízhatóságát azáltal, hogy optimalizálja a mérési adatokat, így segítve elő a pontosabb belső sugárterhelés meghatározást.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- 1. tézispont:** A laboratóriumban rendelkezésre álló eszközök jellemzőihez illeszkedve mérési protokollt dolgoztam ki a szervezetbe került, inhomogén eloszlású ^{241}Am izotóp aktivitásának meghatározására. Megállapítottam, hogy kis energiájú γ -sugárzást kibocsátó izotópok (pl. ^{241}Am) felvételét követő, tüdőre vonatkozó résztestmérések esetén, HPGe detektorral, különböző kialakítású (eltérő izotópeloszlás, különböző vastagságú szövetekvivalens anyagok) fantomokkal végzett kalibrációkkal meghatározott számlálási határfokok között, az adott energiánál, akár 10%-ot elérő eltérés lehetséges. Igazoltam, hogy a mellkas rétegvastagsága kiemelt jelentőségű, és figyelembevétele 15-50%-ban csökkenti az ebből adódó mérési bizonytalanságot, javítva a dózisbecslés pontosságát. [P1] [p1] [p2] [p3]
- 2. tézispont:** Megállapítottam, hogy a mellkas egyes szerveiben található radioizotópoknak jelentős keresztthatása lehet más szervek felett végzett mérések esetén: a radioaktivitást tartalmazó tüdő a máj feletti mérésekre 20-40%-os relatív hatással van, míg a májban lévő aktivitás esetén a tüdő feletti mérésekre gyakorolt keresztthatás 10% alatti. Igazoltam, hogy a szegycsont feletti mérési pozíció kevésbé érzékeny a keresztthatásból származó bizonytalanságra. Az általam javasolt és az adott mérési geometriára kidolgozott módszer alkalmazásával jelentősen javítható a belső sugárterhelés egésztestszámlálóval végzett méréseinek pontossága, így növelve a mérések megbízhatóságát és a sugárterheléssel kapcsolatos döntések megalapozottságát. [P1] [p1] [p2] [p3]
- 3. tézispont:** Saját mérésekkel, valamint a laboratóriumban rendelkezésre álló detektorra és pajzsmirigyfantomokra kidolgozott numerikus modellek Monte Carlo szimulációjával igazoltam, hogy a pajzsmirigy mérése esetén a kalibráláshoz alkalmazott különböző fizikai kialakítású fantomok 3%-ot nem meghaladó eltérést okoznak a végeredményében. Bizonyítottam, hogy pajzsmirigy esetén a felnőtt méretre kalibrált mérési határfok mintegy 10%-os szisztematikus hibát okoz a mérési eredményben, ha azt 5 éves gyerekekre alkalmazzuk. A szerv előtti szövet rétegvastagságának milliméterenkénti növekedése felnőtt, tinédzser és gyermek pajzsmirigyfantom mérése esetén rendre 1,5-2,5%-os, 1,0-2,5%-os, és kevesebb mint 1,0%-os csökkentést okoz a mérési határfokban a detektor távolságának függvényében. [P2] [P3] [P4] [p4] [p5] [p6] [p7] [p8]
- 4. tézispont:** Biológiai minták ^3H aktivitáskoncentrációjának folyadékszintillációs méréssel történő meghatározása során a határfok számítására különböző módszerek szolgálnak, amelyek közül leggyakrabban a standard addíciót vagy a quench (kioltás) görbe illesztést alkalmazzák:

megmutattam, hogy ezek a módszerek akár 10%-os eltérést is okoznak a hatások eredményében. Megismerve a két módszer előnyeit és komplex mintákon tapasztalt hátrányait, új módszert dolgoztam ki a ^3H mérés hatásokának meghatározására. A kombinált módszer lényege, hogy a valós, hasonló tulajdonságúnak tekinthető mérési mintákat először a standard addíciós módszernek megfelelően ismert aktivitás hozzáadásával spike-oljuk, majd ezeket együttesen kezelve a kioltási tulajdonságra jellemző tSIE – számlálási hatások értékpárokat állítunk elő. Az így előálló értékpárokat egy szűk tartományban egyszerű függvényt (az általam vizsgált esetben regressziós egyenest) illesztünk, tehát kalibrációs függvényt kapunk, amelyből a vizsgált minta tSIE-értékéhez leolvasható a korrigált számlálási hatások. Igazoltam, hogy a kombinált módszer alkalmazása előnyös, mert a különböző bizonytalansági forrásokat kiegyenlíti, amivel a mérési pontosság összességében növekszik, különösen komplex minták esetében. A módszer alkalmazhatóságát és annak előnyeit nemzetközi összeméréseken, valódi vizelet mintákon mutattam meg. [P5] [p5] [p9] [p10] [p11]

- 5. tézispont:** Egy ismeretlen felvételi körülmények között történt ^{14}C -inkorporáció esetét vizsgálva megmutattam, hogy a szakirodalomban ajánlott modellek nem minden esetben alkalmasak pontos dózisbecslésre, de megfelelő jelzést adnak a kivizsgálás szükségességére. Retenciós függvényeken alapuló modelleket dolgoztam ki, amelyek nagy mennyiségű vizeletmérési adat rendelkezésre állása esetén lehetőséget adnak esetspecifikus dózisszámítások elvégzésére. Megmutattam, hogy az aktuális szakirodalmi módszerek alkalmazásával kapott dózis a vizsgált esetre majdnem 50-szerese volt az esetspecifikus dózisbecslés értékének. Rámutattam, hogy az esetspecifikus megközelítés továbbra is érzékeny marad a vizsgálat során nem mérhető paraméterek helyes kiválasztására, így pl. a vizelettel történő kiválasztási hányadnak 0,9-re történő megválasztása körülbelül 40%-os csökkenést okoz a becsült effektív dózis értékében, míg a vizelettel ürülő hányad 0,1-ra történő csökkentése esetén a becsült effektív dózis több mint ötszörösére nő a szakirodalomból átvett 0,59-es tényezővel kapott lekötött effektív dózishoz képest. [P6] [p12]
- 6. tézispont:** Meghatároztam az ^{241}Am baleseti inkorporációját követően végzett orvosi javaslatra alkalmazott DTPA deinkorporációs kezelés hatását vizeletmérési eredményekre és modellt dolgoztam ki az adatok megfelelő kiválasztására. Megállapítottam, hogy a DTPA kezelés után 50 napon belül gyűjtött vizeletminták mérési eredményeinek felhasználása igen pontosan dózisbecsléshez vezet. Igazoltam, hogy az esetspecifikus dózisbecslések pontosításához a tüdő- és vizeletmérési adatok kombinálása és a megfelelő abszorpciós paraméterek alkalmazása szükséges, és így a dózisbecslés bizonytalansága már nem haladja meg a 10%-ot. [p13][p14]

AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSA

Az elmúlt években végzett kutatásaim feltárták a belső sugárterhelés meghatározásának kritikus pontjait és rámutattak többek között arra, hogy a mérési pontosság növelése önmagában nem mindig eredményez érdemi javulást a dózisbecslés eredményében. Megmutattam, hogy optimalizált izotóp- és eszközspecifikus fejlesztési stratégiákat kell kidolgozni, amelyek célzottan csökkentik a legnagyobb bizonytalanságot okozó tényezőket, biztosítva a gyakorlatban is alkalmazható megoldásokat. A kutatás során szerzett ismeretek alapján olyan dózisbecslési eljárások dolgozhatók ki, amelyek a lehető legjobban figyelembe veszik az egyéni emberi tényezőket és az esetre jellemző paramétereket. A

pontos mérés és számítás érdekében alapos ismeretekre és megfelelő módszerek alkalmazására van szükség.

A munka egyik fontos eredménye, hogy elkészült az Országos Atomenergia Hivatal által kiadandó módszertani útmutató tervezete a belső sugárterhelés monitorozásához. Az útmutató segítséget nyújt a munkáltatónak a munkavállalók foglalkozás körében inkorporált radioaktív anyag ellenőrzésében és a lekötött effektív dózis meghatározásában. Az eljárásrend használata hozzájárul a hazai belső sugárterhelés monitorozás harmonizálásához, mivel általa egyértelművé válnak a hatósági elvárások. Ezzel elősegíti az érvényes előírásokban meghatározott sugárvédelmi követelmények teljesülését. Az útmutató elsősorban az engedélyesek sugárvédelemmel foglalkozó szakemberei részére készült, de hasznos lehet a belső sugárterhelés meghatározásához szükséges méréseket végző laboratóriumok, valamint a mérési eredményekből a dózisoskat meghatározó szakértők számára is. Az útmutató kialakítása és megfogalmazása mellett esettanulmányok bemutatásával segíti a gyakorlati alkalmazhatóságot. [op1][op2][op3]

A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

A tézispontokhoz kapcsolódó folyóiratközlemények

- [P1] T. Pázmándi, A. András, I. Fehér, A. Kocsonya, A. Pántya, P. Zagyvai, "Calibration of a whole body counter for ^{241}Am with the LLNL chest phantom", *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 170, no. 1-4, pp. 225-230, Sept. 2016, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv400>.
- [P2] A. Pántya, A. András, T. Pázmándi, P. Zagyvai, "Pajzsmirigy dózis meghatározása baleseti helyzetben", *Sugárvédelem*, vol. 10, no. 1, pp. 67-74, Aug. 2017, http://www.sugarvedelem.hu/sugarvedelem/docs/V10i1/Pan_V10i1.pdf.
- [P3] D. Broggio, S. Baudé, A. Belchior, V. Berkovskyy, Y. Bonchuck, J. Dewoghélaëre, G. Etherington, P. Fojtík, D. Franck, J.M. Gomez-Ros, D. Gregoratto, J. Helebrant, G. Hériard Dubreuil, J. Hülka, M. Isaksson, A. Kocsonya, A. L. Lebacq, I. Likhtarev, P. Lombardo, M. A. Lopez, I. Malátová, J. W. Marsh, I. Mitu, O. Monteiro Gil, M. Moraleda, J. F. Navarro, J. Oško, A. Pántya, T. Pázmándi, B. Perez, V. Pospisil, G. Ratia, M. A. Saizu, P. Szántó, P. Teles, K. Tymińska, F. Vanhavere, P. Vaz, T. Vrba, I. Vu, M. Youngman, P. Zagyvai, "Child and adult thyroid monitoring after a reactor accident (CATHYMAR): Technical recommendations and remaining gaps", *Radiations Measurements*, vol. 128, Article 106069, Sept. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2019.02.008>.
- [P4] A. L. Lebacq, M. A. Saizu, M. Takahashi, M. Isaksson, B. Bravo, J. Brose, L. Csizmadia, P. Fojtík, J. Kövendingé-Kónyi, G. Lünendonk, O. Meisenberg, N. Mosimann, J. Osko, A. Pántya, D. Saurat, G. Taba, T. Torvela, Z. Vagfoldi, I. Vilardi, I. Vu, M. Youngman, P. Zoriy, T. Beaumont, D. Franck, D. Broggio, "European intercomparison on the measurement of I-131 in thyroid of adults and children", *Radiations Measurements*, vol. 129, Article 106178, Oct. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2019.106178>.
- [P5] A. Pántya, Á. Dálnoki, A. R. Imre, P. Zagyvai, T. Pázmándi, "Tritium internal dose estimation from measurement with liquid scintillators", *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 137, pp. 18-22, July 2018, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.02.031>.

[P6] A. Pántya, P. Zagyvai, A. Remeli, L. Tyukodi, T. Pázmándi, "Dose assessment with different methods after exposure to ^{14}C -labelled compounds", *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 197, no. 2, pp. 78-88, Dec. 2021. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab162>.

A tézispontokhoz kapcsolódó konferenciaközlemények

- [p1] A. Pántya, A. András, I. Harangozó, A. Kocsonya, T. Pázmándi, Á. Szegvári, P. Zagyvai, (21-23-April 2015) "Egésztestszámláló kalibrálása ^{241}Am izotópot tartalmazó LLNL fantommal", Bemutatva: *XL. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam*, Hajdúszoboszló, Hungary. Elérhető: <https://elftsv.hu/svonline/docs/kulonsz/2015sv/eloadasok/39.pdf>
- [p2] T. Pázmándi, A. András, I. Fehér, A. Kocsonya, A. Pántya, P. Szántó, P. Zagyvai, (20-24 April 2015) "Calibration of a whole body counter for ^{241}Am with the LLNL chest phantom", Bemutatva: *Individual Monitoring of Ionising Radiation (IM 2015)*, Brugge, Belgium.
- [p3] A. Pántya, A. András, T. Pázmándi, P. Zagyvai, (9-13 May 2016), "Improvement of the dose estimation in case of an occupational ^{241}Am incorporation Event", Bemutatva: *Proceedings of the 14th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA 14)*, Cape Town, South Africa, 2016 p. 1004. Elérhető: <https://www.irpa.net/docs/IRPA14%20Proceedings%20Volume%202.pdf>
- [p4] P. Zagyvai, A. Pántya, T. Pázmándi, (10-12 October 2016) "A gyors radiojód-analízis szerepe a nukleáris balesetelhárításban – Új nemzetközi projektek", Bemutatva: *21. Őszi Radiokémiai Napok*, Balatonszárszó, Hungary, p. 94. Elérhető: https://public.ek-cer.hu/~lazar/Kem-Tud-Oszt_Rad-Kem-Biz/5_ORN/ORN_2016_prog+abst.pdf
- [p5] A. Pántya, A. András, T. Pázmándi, P. Zagyvai, (25-27 April 2017) "Pajzsmirigy dózis meghatározása baleseti helyzetben gyermekek és felnőttek esetén", Bemutatva: *XLII. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam*, Hajdúszoboszló, Hungary. Elérhető https://elftsv.hu/svonline/docs/kulonsz/2017sv/szerda/Hszob_Cathy_final.pdf
- [p6] A. Pántya, (June 6 2018) "Uncertainty of measurements for internal dose estimation", Bemutatva: *Proceedings of the PhD workshop of the Physics Doctoral School at the Faculty of Science Budapest University of Technology and Economics (szerk. Simon, Ferenc)*, pp. 48-58, Budapest, Hungary, 2018.
- [p7] A. Pántya, A. András, D. Jakab, T. Pázmándi, P. Zagyvai, (4-8 June 2018) "Uncertainty estimation of thyroid activity measurement and its consequences in dose assessment," Bemutatva: *Proceedings of 5th European IRPA Congress*, The Hague, Netherlands, 2018, pp. 305-309. Elérhető: <https://irpa2018europe.com/wp-content/uploads/2019/08/IRPA2018-Proceedings-v2sec.pdf>
- [p8] A. Pántya, T. Pázmándi, L. Horváth, P. Zagyvai, (14-18 June 2021) "Monte Carlo simulation for optimization of thyroid measurements", Bemutatva: *9th International Conference on Radiation in Various Fields of Research (RAD 2021)*, Herceg Novi, Montenegro. Elérhető: https://rad2021.rad-conference.org/vs/RAD_2021-Anna_P%C3%A1ntya.pdf.
- [p9] T. Pázmándi, D. Jakab, A. Pántya, (20-22 June 2018) "Uncertainties in analysis of urine samples", Bemutatva: *PROCORAD Annual Meeting*, Ispra, Italy.

- [p10] A. Pántya, T. Pázmándi, P. Zagyvai, (17-19 April 2018) ”Tríciumtól származó belső sugárterhelés becslése és annak bizonytalansága folyadék szcintillációs mérések alapján”, Bemutatva: *XLIII. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam*, Hajdúszoboszló, Hungary. Elérhető: https://elftsv.hu/svonline/docs/kulonsz/2018sv/Sz/6.%20ppt_pantya_tricium.pdf
- [p11] A. Pántya, T. Pázmándi, P. Zagyvai, (25-28 March 2019) „Uncertainty of internal dose estimation from tritium exposure”, Bemutatva: *First Tritium School*, Ljubljana, Slovenia, p. 36 Elérhető: https://transat-h2020.eu/wp-content/uploads/2019/03/Tritium-school_BookOfAbstracts_webpage-corr.pdf
- [p12] A. Andrási, A. Pántya, T. Pázmándi, P. Zagyvai, (18-20 October 2021) ”¹⁴C inkorporáció dózisbecslésének függése az inkorporált vegyület típusától”, Bemutatva: *26. Őszi Radiokémiai Napok*, Balatonszárszó, Hungary, p. 115. Elérhető: https://public.ek-cer.hu/~lazar/Kem-Tud-Oszt_Rad-Kem-Biz/5_ORN/ORN_2021_konferenciakiadvany.pdf
- [p13] T. Pázmándi, A. Andrási, A. Pántya, (16-18 April 2019) ”Belső sugárterhelés meghatározása területén szerzett ICIDOSE nemzetközi gyakorlat tapasztalatai”, Bemutatva: *XLIV. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam*, Hajdúszoboszló, Hungary. Elérhető: https://elftsv.hu/svonline/docs/kulonsz/2019sv/2_3_2_PaT.pdf
- [p14] A. Andrási, T. Pázmándi, A. Pántya, C.M. Castellani, A. Giussani, R. Grareth, (16-18 April 2019) „A hazai ²⁴¹Am inkorporációs sugárbaleset dozimetriája az ICIDOSE eredmények tükrében”, Bemutatva: *XLIV. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam*, Hajdúszoboszló, Hungary. Elérhető: https://elftsv.hu/svonline/docs/kulonsz/2019sv/2_3_1_AnA.pdf

További tudományos közlemények

- [op1] A. Pántya, T. Pázmándi, P. Zagyvai, ”Útmutató kidolgozása a belső sugárterhelés monitorozásához –1. rész”, készült az Országos Atomenergia Hivatal megrendelésére (OAH-ABA-46/17-M), EK-SVL-2018-263-01-01-01, 2018.
- [op2] A. Pántya, T. Pázmándi, P. Zagyvai, ”Útmutató kidolgozása belső sugárterhelés monitorozásához –2. rész”, készült az Országos Atomenergia Hivatal megrendelésére (OAH-ABA-44/18-M), EK-SVL-2018-263-02-01-01, 2018.
- [op3] A. Pántya, T. Pázmándi, P. Zagyvai, ”Útmutató kidolgozása a belső sugárterhelés monitorozásához –3. rész”, készült az Országos Atomenergia Hivatal megrendelésére (OAH-ABA-22/19-M), EK-SVL-2020-263-01-01-01, 2019.
- [op4] E. Davesne, R. Bull, J. Anderson, D. Bingham, A. Birchall, C.M. Castellani, C. Challeton-de Vathaire, M. L. Fernandez, M. Froning, A. Giomi, A. L. Lebacqz, J. Oško, I. Gomez Parada, A. Pántya, A. G. Rojas, A. Rojo, M. Takahashi, K. Tani, E. Blanchardon, ”Uncertainties in internal dose assessment: Lifetime dose assessment for three example workers occupationally exposed to uranium - Analysing the intercomparison results,” EURADOS Report 2017-03, ISBN 978 3 943701-16-6, Neuherberg, 2017.