

PAJZSMIRIGY DÓZIS MEGHATÁROZÁSA BALESETI HELYZETBEN

Pántya Annamária*, Andrási Andor, Pázmándi Tamás, Zagyvai Péter
Magyar Tudományos Akadémia Energetikai Kutatóközpont
1121, Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29-33
*pantya.anna@energia.mta.hu

A kézirat beérkezett: 2017.05.22.

Közlésre elfogadva: 2017.08.18.

Thyroid dose estimation in reactor accident situation

Abstract - A severe reactor accident can cause major release of a complex mixture of radionuclides. Following a nuclear accident the evacuated or relocated population is expected to be individually monitored for determining their received dose. The CATHyMARA project focuses on post-accident ^{131}I measurement in the thyroid of affected population, particularly for children. Monitoring strategies are aimed to distinguish between cases of children and adults, required capabilities and existing gaps are revealed by reviewing the results of two European intercomparison runs. Further important part is the development of emergency oriented dose assessment methods. The main outcome of the project will be the release of guidelines based on practical experience and the comparison of existing and required means.

thyroid, iodine-131, reactor accident, iodine prophylaxis, dose estimation

Kivonat. *Súlyos reaktorbalesetek esetén radionuklidok komplex elegye nagy mennyiségben kerülhet a levegőbe. Jelentős környezeti kibocsátás esetén indokolt lehet a környezetben élő lakosság tagjainak monitorozása, dózisának becslése. A kezdeti időszakban a lakosság sugárterheléséért elsősorban az illékony jódizotópok a felelősek. Ezért a CATHyMARA projekt az emberi pajzsmirigyben dúsuló ^{131}I izotóp mérésére összpontosít, különös tekintettel a gyermekek sugárterhelésének meghatározására. A munka során a gyermekek és a felnőttek közötti különbségek felderítésére koncentráltunk, ennek érdekében különböző életkoroknak megfelelő fantomokat használtunk, az eredmények pontosságának és megbízhatóságának növelése érdekében a projekt keretében nemzetközi összeméréseket szerveztünk. A projekt fontos részét képezte a veszélyhelyzeti dózisbecslés módszerének fejlesztése. A program legfontosabb eredménye a gyakorlati tapasztalatokat összefoglaló útmutató lesz.*

pajzsmirigy, jód-131, reaktorbaleset, jód profilaxis, dózisbecslés

BEVEZETÉS

Súlyos reaktorbalesetek alkalmával radionuklidok komplex elegye nagy mennyiségben kerülhet a levegőbe. Ilyenkor szükséges lehet a kibocsátás környezetében élő lakosság tagjainak egyenkénti megfigyelése az őket ért sugárterhelés minél pontosabb becslése érdekében. Ezeknél a balesetknél a kezdeti időszakban a lakosság belső sugárterheléséért elsősorban az illékony jódizotópok a felelősek [1][2].

A csernobili atomerőmű balesete után számos lakos kapott akár az 1 Gy-t elérő dózist a radioaktív jód felvételtől, ennek következtében több mint 6000 pajzsmirigyrákos esetet regisztráltak azok körében, akik a baleset idején kisgyermekek voltak [3] [4]. A fukushimai atomerőmű balesete után a vészhelyzeti dolgozóknál a lekötött effektív dózis 98%-át a

radiojód inhalációja okozta. A baleset után 1080, 18 éven aluli gyermek pajzsmirigyét vizsgálták hordozható NaI(Tl) detektoros berendezéssel. A vizsgálatokhoz használt mérőeszközök között olyan, nem hitelesített eszközök is voltak, amelyeket csak a baleset után kalibráltak. A kisgyermek mérésére nem állt rendelkezésre hitelesített mérőberendezés, csak néhány hónappal később lett elérhető az úgynevezett Babyscan [5][6][7].

A csernobili baleset után pár évvel Fehéroroszországban a gyermekek monitorozására kifejlesztett egyedi hordozható mérőrendszer sajnálatos módon Európában nem tudott elterjedni [8]. Számos országban sem speciális méréstechnika, sem egyedi kalibrációs és kiértékelési módszer nem áll rendelkezésünkre máig sem a gyermekek monitorozására baleseti helyzet esetén.

Az Európai Unió által finanszírozott CATHYARA (Child and Adult Thyroid Monitoring After Reactor Accident) nemzetközi kutatási projekt fő célja egy nagyobb radioaktív kibocsátással járó baleset által okozott belső sugárterhelés mérési módszereinek kidolgozása volt, különös tekintettel a jódizotópok (elsősorban a ^{131}I) által gyermekekben okozott pajzsmirigydózis pontos meghatározására [9].

A PROJEKT CÉLJA

Jelentős környezeti kibocsátással járó baleseti szituációban az egyes védelmi intézkedéseket az új nemzetközi ajánlás [10] szerint kétféle dózis alapján határozzák meg: az intézkedések nélkül a jövőben várható dózissból (projected dose), illetve a balesetben érintett lakosság tagjai által már elszennvedett dózissból (received dose). A teljes testre és az egyes szervekre vonatkozó belső sugárterhelés közvetlenül nem mérhető. A terjedésszámítás eredményeiből és a környezeti mérésekből lehetséges a dózissokra következtetni, azonban a környezeti modellek bizonytalansága és a rendelkezésre álló környezeti mérési adatok szűkössége, valamint az egyénenként eltérő életviteli és táplálkozási szokások miatt a megbízható dózisbecslés érdekében kulcsfontosságú a lakosság egyes tagjainak megfigyelése, indokolt esetben a hosszabb idejű nyomon követése.

A megelőző és követő óvintézkedések tervezése során számos tényező figyelembevétele szükséges, a radioaktív jód felvételének monitorozása során ezek közül a legfontosabbak:

- hány fő monitorozása valósítható meg 1 nap alatt,
- ki fogja elvégezni a méréseket,
- lehetséges-e az emberek helyszíni monitorozása,
- szükségesek-e speciális eszközök és/vagy kalibráció a gyerekek részére,
- hogyan vehető figyelembe a jód profilaxis hatása,
- hogyan értelmezhetők a mérési adatok a belső dózis számításához.

A fenti kérdésekre adott válaszok alapján határozhatóak meg a hiányosságok a mérési módszerekben és a dózisbecslésben. A projekt célkitűzéseit a következő pontokban határozták meg:

- fel kell mérni a pajzsmirigy monitorozásra alkalmas detektorokat,
- össze kell hangolni a mérések kivitelezését a különböző lakossági csoportok monitorozása esetén,
- összefoglaló értékelést kell készíteni a ^{131}I mérésekből végzett dózisszámításokhoz,
- fejleszteni kell a baleseti szituációban végezhető dózisbecslés módszereit,
- meg kell alkotni az optimális, egységesen alkalmazható mérési stratégiát a belső sugárterhelés monitorozására,
- ajánlásokat kell megfogalmazni a további technikai fejlesztésekre.

A másfél évig tartó munka 7 munkacsoportban folyt [11], ezeket az 1. táblázat foglalja össze, intézetünk a WP2, WP3, WP6, és WP7 munkacsoportokban vett részt. A projekt keretében

végzett munka során elért eredményekről a közeljövőben várható egy összefoglaló cikk megjelenése, jelen cikkünkben az összemérések és a dózisbecslés területén elért saját eredményeinket mutatjuk be.

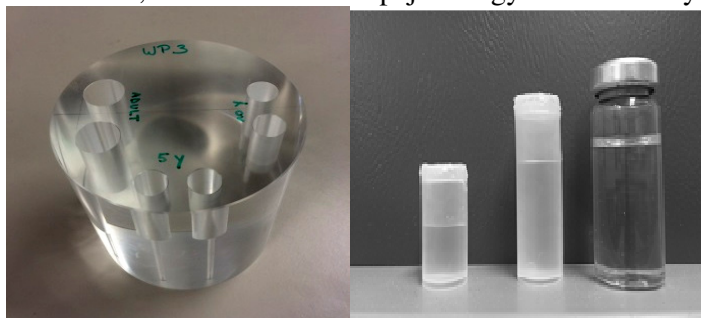
1. táblázat: A CATyMARA projekt munkacsoportjai

	Megnevezés	Feladatkörök
WP1	Irányítás, menedzsment	Mérföldkövek és költségek követése.
WP2	A jelenleg alkalmazott koncepciók és mérési ajánlások áttekintése	Nemzetközi ajánlások feldolgozása. Az egyes országok gyakorlatának felmérése kérdőívekkel.
WP3	Összemérés szervezése mobil mérőrendszerrel	A szükséges pajzsmirigy fantom elkészítése, köröztetése a résztvevők között. Mérőrendszerek és mérési adatok összegzése.
WP4	Összemérés szervezése gyors, spektrometriai mérésekre nem alkalmas eszközökkel	A csoportban ugyanazok a feladatok voltak, mint a WP3-ban.
WP5	Monte Carlo modellszámítások	Reális pajzsmirigy modell készítése, amely figyelembe veszi az életkort is.
WP6	Dózisbecslés	Módszer továbbfejlesztése és együtthatók meghatározása az elnyelt pajzsmirigy dózis és az effektív dózis számítására.
WP7	Irányelvek kidolgozása és a tapasztalatok megosztása	Összefoglaló tanulmány készítése a munkafázisok eredményeinek felhasználásával.

ÖSSZEMÉRÉS

A projekt keretében szervezett összemérésben az MTA EK is részt vett. A méréseket a többi résztvevőhöz hasonlóan egy hordozható, baleseti helyzetben is használható pajzsmirigy mérővel végeztük el.

A mérésekhez alkalmazott nyak fantom egy plexiüveg henger volt 13 cm átmérővel és 12 cm magassággal, továbbá három, különböző méretű pajzsmirigy szimuláló lyukpárral.



1. ábra: Az összemérés során használt pajzsmirigy fantom és a hozzá való kivetták

A lyukpárok mérete eltérő, hogy az 5 és 10 éves gyermekek, valamint a felnőttek pajzsmirigy méretét imitálja. A mérendő aktivitások két-két fiolába voltak töltve. Az egyes fiolák folyadék formátumú ^{133}Ba izotópot tartalmaztak. A különböző méreteket és töltöttségüket a 2. táblázatban ismertetjük.

2. táblázat: A pajzsmirigy fantomba tehető fiolák geometriai paramétereit és töltöttség

Fiolák	Magasság (mm)	Átmérő (mm)	Töltöttség (ml)
5 éves gyermek	3,2	1,35	3,2
10 éves gyermek	5	1,4	7,5
Felnőtt	5,8	2	19

A ^{133}Ba izotóp gamma-vonalai hasonló energiájúak, mint a ^{131}I izotóp vonalai (3. táblázat), azonban felezési ideje jóval hosszabb, így egy több hónapig tartó összemérés során használata célszerűbb. A ^{133}Ba 276,4 keV-es gamma-vonalának hozama közel azonos, mint a ^{131}I 284,3 keV-es vonalé, a ^{131}I 364,5 keV-es főcsúcsának energiája pedig a ^{133}Ba 356,0 keV-es főcsúcsának energiájával azonosítható, bár utóbbi gamma-gyakorisága valamivel kisebb. Szcintillációs detektorokkal felvett spektrumokban a ^{133}Ba csúcsai nem válnak mind szét, általában csak a három legintenzívebb csúcs (81 keV, 303 keV, 356 keV) különíthető el vizuálisan.

3. táblázat: A ^{133}Ba és ^{131}I energiái és gamma-gyakoriságuk, a felezési idő 10,51 év és 8,02 nap

Energia (keV)	Gamma-gyakoriság (%)
^{133}Ba	
80,99	34,06
276,40	7,16
302,85	18,33
356,01	62,05
383,85	8,94
^{131}I	
284,31	6,14
364,49	81,70
636,99	7,17

Az összemérés során az abban résztvevők a rutin mérési eljárásokat használták, és csupán egyszer mérték meg a mintákat, ahogy azt valós baleseti helyzetben is tennék, a megfelelően csekély statisztikus hibához szükséges minimális mérési időt használva. A méréseket a Gamma Műszaki Zrt. által készített NDI65 típusú NaI(Tl) detektorral végeztük. A detektor nem sokkal az összemérés előtt került beszerzésre, így a mérések megkezdése előtt energia és határfok kalibrációt is kellett végeznünk, melyhez a MultiAct szoftvert használtuk [12]. Az energia kalibrációhoz ^{152}Eu , ^{133}Ba , ^{137}Cs pontforrásokat használtunk, a teljesenergia-csúcsok azonosításával a pontos energiák ismeretében meghatározzuk a gamma-energia-csatorna függvényét. A határfok kalibrációhoz a laboratórium rendelkezésére álló saját pajzsmirigy fantomunkat használtuk [12], ez is plexiből készült fantom, azonban csak egy, felnőttek pajzsmirigyét modellező (kb. 20 ml-es) üreggel van ellátva. Három küvetába különböző aktivitású ^{131}I izotópot töltöttünk, ezek megméréseivel a teljesenergia-csúcs intenzitásából az ismert képlet (1) alapján számítottuk ki a ^{131}I 364,49 keV energiájára és az adott mérési geometriára vonatkozó határfokot.

$$A = \frac{N}{t \cdot \eta \cdot f_g}$$

ahol

A: a minta aktivitás

N: a mért nettó csúcsterület

t: a mérési idő

η : a mérési geometriához tartozó hatásfok

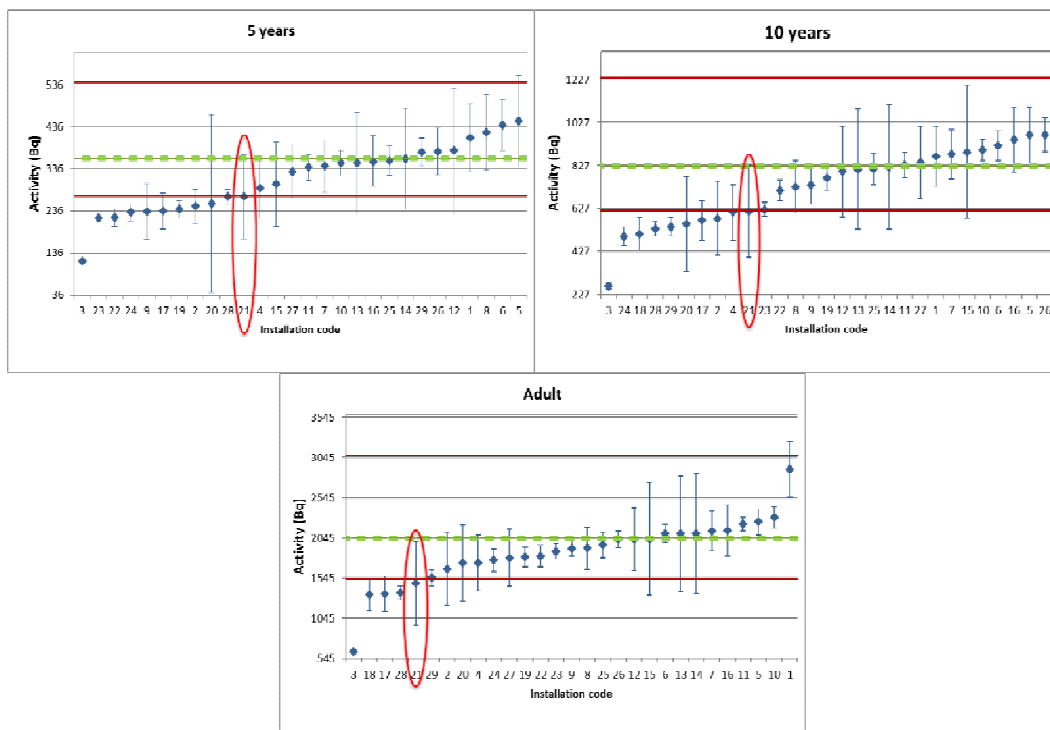
Az összemérés során 2000 s-os mérési időt alkalmaztunk, ami a kis aktivitások miatt indokolt volt, ugyanakkor egy gyermek mérése esetén, illetve valós baleseti helyzetben rövidebb mérési idő válhat szükségessé. Ennek meghatározása a pillanatnyi mérési körülmények mérlegelése alapján lehetséges, figyelembe véve például a háttér értékét és a mérésre várók számát is. Az összemérés során mért aktivitásokat a ^{133}Ba felezési idejével a referencia dátumra (2016.01.01) vissza kellett számolni. A hatásfok kalibráció csak a felnőtt pajzsmirigy esetén ad valóban pontos hatásfokot, de más adat híján a kisebb pajzsmirigy méretek esetén is ezt a hatásfokot használtuk.

A méréseket 2016. augusztus 25-én végeztük a mérések kiértékeléséhez a spektrumban ROI-k (region of interest) segítségével kijelöljük a csúcst és meghatározzuk a nettó csúcsterületet. A mérési időt, a gamma-gyakoriságot és a geometriára meghatározott hatásfokot felhasználva számítjuk ki ((1) képlet) az ismeretlen aktivitást, a mérési eredményeket és a referencia értékeket a 4. táblázatban foglaltuk össze.

4. táblázat: Az összemérésre beküldött adataink, eredményeink összehasonlítva referencia értékekkel

	5 éves	10 éves	felnőtt
Mérési dátum	2016.08.25.	2016.08.25.	2016.08.25.
Mérési idő	2000 s	2000 s	2000 s
Detektor távolság	4,5 cm	4,5 cm	4,5 cm
Aktivitás \pm bizonytalanság (Bq)	270 \pm 100	615 \pm 215	1480 \pm 520
Referencia értékek \pm hiba (Bq)	361,8 \pm 0,7	823,6 \pm 1,6	2046,5 \pm 4,1
Eltérés (%)	-25	-25	-28

Ezzel az eredménnyel a kb. 30 laboratórium részvételével zajlott összemérésben a középmezőnybe tartozunk. Az összemérésben részt vett laboratóriumok eredményeinek összesítése látható a következő ábrán, kiemeltük az MTA EK adatait. Az eredményt egy új detektor és mérőrendszer első alkalmazása során értük el. Az összemérés jósági kritériuma az volt, hogy a jelentett aktivitás mennyire egyezett meg a minta tényleges aktivitásával. Ennek alapján a mi eredményünk még éppen elfogadható, azonban ez az eltérés valójában számunkra kedvező, mivel a kiértékeléshez nem a ténylegesen jelenlévő ^{133}Ba , hanem a helyettesített ^{131}I adatait (hatásfok és -gyakoriság) használtuk. Megjegyezzük, hogy pusztán a tapasztalt eltérés mértéke szerint nem célszerű rangsorolni a közreműködőket, hiszen a vizsgált és valóban vizsgálandó radionuklidok mérés technikai sajátosságai nem azonosak.



2. ábra: Az összemérésben résztvevő laborok eredményeinek ábrázolása, kiemelve az MTA EK eredményeit

DÓZISBECSLÉS

A kapott mérési eredmények értékeléséhez tartozik, hogy a mért és a referencia aktivitásokkal dózisbecslést végezzünk. Az elemzésekhez a MONDAL-3 programot használtuk [14], ami az ICRP ajánlásaiban [15] foglaltak szerint számol. A lehetséges izotópok közül a ^{131}I -t, a felvételi módok közül az inhalációt választottuk, annak megfelelően, hogy a kiindulási szcenárió egy súlyos reaktorbaleset korai időszakát jelölte meg. A vizsgált személyek a lakosság csoportjába soroltak. A ^{131}I jód esetén a programban az aeroszolatot jellemző AMAD (Activity Median Aerodynamic Diameter) helyett a felvevő személy életkorát lehet beállítani, mivel a pajzsmirigy mérete és működése hatással van a radiojódtól származó dózisa. A számításokat a felvétel utáni első napra végeztük, hiszen arra vagyunk kíváncsiak, hogy baleset esetén, a felvétel után rövid idővel ezeket az értékeket mérve, milyen belső sugárterhelést kapna a népesség tagja.

5. táblázat: A mért és a referencia aktivitásokkal számolt effektív dózis

Életkor (év)	Mért aktivitás (Bq)	Effektív dózis (mSv)	Pajzsmirigy dózis (mSv)	Referencia aktivitás (Bq)	Effektív dózis (mSv)	Pajzsmirigy dózis (mSv)
5	270±100	0,11±0,042	2,75±1,05	363	0,15	3,75
10	615±215	0,13±0,045	3,25±1,125	824	0,17	4,25
felnőtt	1480±520	0,13±0,045	3,25±1,125	2046	0,18	4,50

Látható, hogy az így kapott effektív dózis értékek nem érik el a 0,2 mSv-et. A pajzsmirigy esetében a szerv egyenérték dózis 25-ször akkora, mint a lekötött effektív dózis. A radiojód esetén ajánlott kiszámolni a pajzsmirigyre vonatkozó egyenérték dózist is, mivel arra 50 mSv az ajánlott alapkritérium [16]. Mivel a radiojód nagyrészt a pajzsmirigyben koncentrálódik, a

jódizotópok rövid felezési ideje miatt a kezdeti időszakban okoz jelentős dózist. Ilyen esetben a fő figyelmet a gyerekekre és az újszülöttekre kell fordítani, mert az ő pajzsmirigyük sokkal érzékenyebb a sugárzás rákkeltő hatására. Továbbá fontos a magas hormonszintű lakossági csoport megfigyelése is, mint például a tinédzserek, a terhes nők, a szoptató anyák és a változókorú nők, mert a megnövekedett hormontermelés miatt a sejtosztódás gyorsabb a szervezetükben, így a jód beépülése is gyorsabb.

JÓDPROFILAXIS

A jód, mint esszenciális nyomelem legfontosabb szerepét a pajzsmirigyben szintetizálódó két hormon (tiroxin és trijód-tironin) építőköveként tölti be. Normális körülmények között a gége alatt elhelyezkedő pajzsmirigy csak akkor észlelhető, ha jódhiány következtében a pajzsmirigysejtek száma megnő, mert csak nagyobb tömegű pajzsmirigy képes több hormont termelni, és a szervezet jódhiányát kompenzálni. A WHO által meghatározott napi jód szükséglet 100-200 µg, ezt főként ivóvízzel és jódzott só fogyasztásával visszük be a szervezetünkbe. A WHO ajánlása szerint a jódbevitel szempontjából a kívánatos jódzott konyhasó bevitel 10 g/nap, mellyel ugyan a napi jódpótlás biztosítható, de egyéb okok miatt sószegény táplálkozás lenne kívánatos, ami maximum 5 g/nap jódbevitt engedélyez, így a jódzott só fogyasztásával önmagában nem biztosítható a jód bevitel. Magyarország valamennyi megyéjére kiterjedő reprezentatív vizsgálatok [17] igazolják, hogy hazánkban a lakosság 80%-ának jódellátottsága elégtelen, országunk területének négyötödén az ivóvizek jódtartalma 50 µg/l alatti, így a táplálékláncon át víz, tej, tojás, és hús stb. fogyasztással kevés jód jut a szervezetbe. A Magyarországon termesztett mezőgazdasági termékek fogyasztása sem nyújt kielégítő megoldást, mivel a termőtalaj csekély jódtartalma miatt ezeknek a jódtartalma alacsony. A lakosság körében szorgalmazni kellene az optimális tej és tejtermékek fogyasztását, továbbá a magasabb jódtartalmú tejek forgalmazása is elősegítené a jód prevenciót.

A megfelelő mértékű természetes jódbevitel járulékos hatása, hogy mérsékli egy környezeti kibocsátással járó atomerőműi baleset során kialakuló dózisokat és az egészségi következményeit. Ha ugyanis a pajzsmirigy már elegendő jódot tartalmaz, akkor a felvétel sokkal kevésbé intenzív. Így az erőmű térségében (30-50 km) élő lakosság folyamatos jódellátottságának biztosítása mindenkor prioritást kell, hogy élvezzen. Ha megfelelő időben (azaz még a radiojód felvétele előtt) inaktív jódot viszünk a szervezetbe, a pajzsmirigy inaktív jóddal fog telítődni, csökken a radioaktív jód beépülése.

ÖSSZEFOGLALÁS

A másfél éves CATHYMARA projekt végéhez közeledve egyértelműen kijelenthető: egy hiányterületen tudunk olyan irányelveket megfogalmazni, melyek baleseti szituációban könnyen használhatók és egyszerűen értelmezhetők. A projekt továbbá hasznos volt azért is, mert az összemérések segítségével mindenki fel tudta mérni a rendelkezésre álló eszközöket, és láthatóvá vált, hol vannak az erősségek és a hiányosságok. Az elvégzett munka rávilágított a nemzetközi összemérésekben való részvétel fontosságára, valamint a különböző fantomok és sugárforrások alkalmazásának szerepére. A pajzsmirigy metabolizmusának tanulmányozásával egyértelművé vált a folyamatos, megfelelő mennyiségű jód fogyasztás szükségessége a lakosság biztonsága érdekében.

IRODALOM

- [1] Council Directive 2013/59/Euratom, Basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom
- [2] IAEA Safety Standards Series No. Ns-g-1.13, Radiation protection aspects of design for nuclear power plants, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2005.
- [3] M. Balonovi, G. Kaidanovsky, I. Zvonava, A. Kuvtun, A. Bouville, N. Luckyanov, P. Voillequé, Contributions of Short-lived Radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early in vivo activity measurements, Rad. Pro. Dos. Vol. 105, No. 1-4, pp. 593-599 (2003)
- [4] V. Stepanenko, V. Skvortsov, A. Tsyb, et al. Thyroid and whole-body dose reconstruction in Russia following the Chernobyl accident: review of progress and results, Rad. Pro. Dos. Vol. 77, No. 1/2, pp. 101-106 (1998)
- [5] E. Güngör, N. Güngör, A. Yüksel, G. Bag, N. Orhan, Fukushima Radionuclides at air Filter and Rain water samples collected from Istanbul and their atmospheric removal time, Rad. Pro. Dos. Vol. 158. No 2, pp. 195-200 (2014).
- [6] S. Yamashita, N. Takamura, A. Ohtsuru, S. Suzuki, Radiation exposure and thyroid cancer risk after the Fukushima nuclear power plant accident in comparison with the Chernobyl accident, Rad. Pro. Dos. Vol. 171, No. 1, pp. 41-46 (2016)
- [7] E Kim, O Kurihara, T Suzuki et al, Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident, In: Proceedings of the 1st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident, 2012
- [8] R Hille, German measurements of the population doses around Chernobyl. In: One decade after Chernobyl. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, pp 149–157, 1996.
- [9] <http://www.eu-neris.net/index.php/projects/operra/operra-cathymara.html>
- [10] International Atomic Energy Agency: General Safety Requirements Part 3 (2014)
- [11] Open Project for the European Radiation Research Area (OPERRA 2014) Child and Adult Thyroid Monitoring After Reactor Accident, final proposal
- [12] Gamma Műszaki Zártkörű Részvénytársaság, MultiAct programcsomag NDI detektorhoz, programkezelési utasítás.
- [13] Phantoms and Computational Models in Therapy, Diagnosis and Protection, ICRU Report 48, Appendix B, 98. oldal, Bethesda, Maryland, 1992.
- [14] N. Ishigure, M. Matsumoto, T. Nakano, H. Enomoto „Development of Software for Supporting Internal Dose Estimation” <http://irpa11.irpa.net/pdfs/3a16.pdf> Proc. Symp. IRPA-11, Madrid, 2004. - <http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/RPD/mondal3.php>
- [15] Respiratory tract model: ICRP Publication 66, Biokinetic models: ICRP Publications 30, 56, 67, 69, 71, GI tract model: ICRP Publication 30; if f1 value is 1, 0.99 was taken for calculation, which is in line with the ICRP publications, Dose coefficient: values given in ICRP CD-ROM.
- [16] International Atomic Energy Agency: General Safety Requirements Part 7 (2014)
- [17] Farkas I., Sajgó M. (2001) A lakosság 80%-ának jódeállottsága elégtelen. Van lehetőség a jódepótlásra. Táplálkozás-Allergia-Diéta, 6(3-4):34-42.p.

A pályamű a SOMOS Alapítvány támogatásával készült.