

SUGÁRVÉDELEM

**Eötvös Loránd Fizikai Társulat
Sugárvédelmi Szakcsoportjának
On-line Folyóirata**
<http://www.sugarvedelem.hu/sugarvedelem/>

**IV. Évfolyam 1. szám
2011**

BUDAPEST

HU ISSN 2060-2391

Kiadó: az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Sugárvédelmi Szakcsoportja

Kiadásért felelős: Bujtás Tibor a Szakcsoport elnöke

Web megjelenés: Vincze Árpád

A szerkesztőbizottság elnöke:

Fehér István

A szerkesztőbizottság tagjai:

Bálintné Kristóf Krisztina,

C. Szabó István,

Csete István,

Csigé István,

Déri Zsolt,

Fehér Ákos,

Katona Tünde,

Turák Olivér,

Vincze Árpád,

Zagyvai Péter

A szerkesztőség elérhetősége:

Levelezési cím: 1027 Budapest II.Fő u. 68.

e-mail: szerkesztoseg@sugarvedelem.hu

HU ISSN 2060-2391

A környezeti kibocsátás meghatározásának új módszere az atomerőmű hermetikus téri túlnyomással járó üzemzavara esetén

Deme Sándor*¹, C. Szabó István², Láng Edit¹, Pázmándi Tamás¹

¹MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet, 1525 Budapest, Pf. 49

²Paksi Atomerőmű Zrt., 7031 Paks, Pf. 71

*deme@aeki.kfki.hu

Title – A new method for calculation of environmental release of NPP in case of containment overpressure type accident

Abstract – Our paper deals with a new method for determination of environmental release in a containment overpressure type accident at NPP. The paper describes activity transfer from fuel rods to primary coolant and into containment air and liquid phase of containment, and other processes including wash-out and deposition of activity from air phase.

Fraction of air activity in the containment appears in other rooms of plant as well due to leakage of containment and most part of this activity will be released into environment mostly via ventilation stack.

The new method for determination of the environmental release is based on measurement of the overpressure and dose rate in the containment and leakage rate of containment.

Keywords- Nuclear Power Plant, accident, environmental release, dispersion calculation

Kivonat – Ismertetjük a paksi atomerőmű hermetikus téri túlnyomással járó üzemzavarának következtében fellépő környezeti kibocsátás meghatározásának új módszerét. Bemutatjuk az aktivitásterjedés egyes lépéseit, a fűtőelemekből a primerköri közegbe kerülő aktivitást, annak a hermetikus tér légterébe és a zsompvízbe jutását, a hermetikus térben fellépő egyéb folyamatokat, így a kimosás és a kiülepedés hatását is. A hermetikus tér légterébe került aktivitás egy része a hermetikus tér szivárgása révén az erőmű helyiségein keresztül – elsősorban a szellőzőkéményen át – a környezetbe kerül.

Bemutatjuk a környezeti kibocsátás becslésének új módszerét, mely a hermetikus térben fellépő túlnyomás, a mért dózisteljesítmény, valamint a szivárgás ismerete alapján határozza meg a kikerülő aktivitást.

Kulcsszavak – atomerőmű, üzemzavar, környezeti kibocsátás, terjedésszámítás

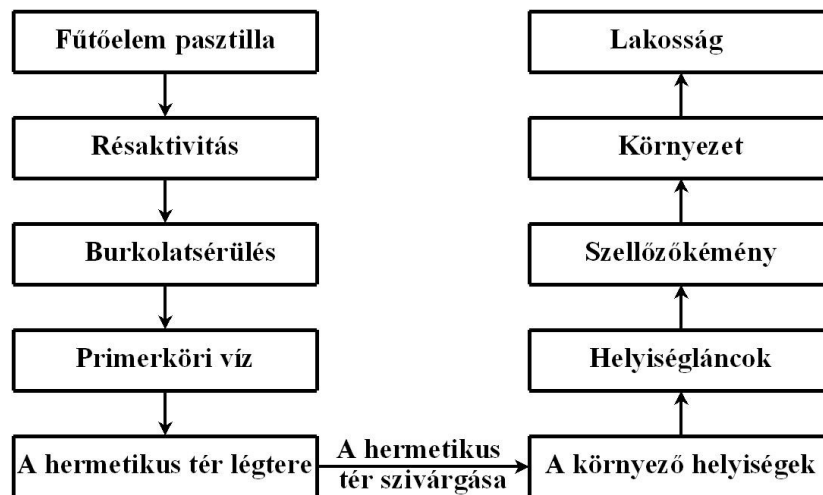
AZ ATOMERŐMŰ HERMETIKUS TÉRI TÚLNYOMÁSSAL JÁRÓ ÜZEMZAVARA

Egy atomerőműben a primerköri csővezeték törése esetén hűtőközegvesztéssel járó üzemzavarról, az angol terminológia szerint LOCA-ról (LOss of Coolant Accident) beszélünk. Ennek az eseménynek a lehetőségét az atomerőművek tervezésekor figyelembe veszik, és definiálják az ún. tervezési üzemzavart.

A Nukleáris Biztonsági Szabályzat [1] 3.023 pontja szerint tervezési üzemzavar az a ritkán bekövetkező esemény, amelyet rendszerek, rendszerelemek meghibásodása, kedvezőtlen külső hatások és/vagy helytelen/téves emberi beavatkozás idéz elő. Az esemény során a biztonsági funkcióknak a tervezettnek megfelelően kell működniük, és az esemény nem vezethet az üzemeltető személyzet és a lakosság hatóságilag előírt értéknél nagyobb sugárterheléséhez. A tervezési üzemzavarok gyakorisága általában kisebb, mint 10^{-2} /év.

A primerköri, 492 mm névleges átmérőjű (NÁ492) fővezeték törése az atomerómű tervezési üzemzavarainak egyik legsúlyosabb esete. Ilyenkor a törésnél kiáramló víz jelentős része azonnal elforr. A radioaktív gőz környezetbe történő kijutásának elkerülésére szolgál az ún. hermetikus tér. A hermetikus tér a reaktor hűtőköréit tartalmazó, 1,5 m vastag betonfallal körülvett épületrész, amely egyrészt a direkt sugárzás elleni védelemként szolgál, másrészt megakadályozza a benne felhalmozódó aktivitás döntő hányadának kijutását. A hermetikus tér része a lokalizációs rendszer (légsapda, buborékoltató kondenzátor), amely nagy nyomáscsúcs esetén a hermetikus térben fellépő nyomást csökkenti.

Az aktivitás környezeti kibocsátásának logikai vázlatát az 1. ábra mutatja.



1. ábra. A hermetikus téri túlnyomással járó üzemzavar esetén létrejövő környezeti kibocsátás logikai vázlata

A fűtőelem pasztillákban keletkező hasadási termékek egy része a fűtőelem gázterébe kerül, ez a részaktivitás burkolatsérülés esetén a fűtőelem környezetébe, a primerköri közegbe jut. A pasztillák töredezése, fragmentációja tovább növeli a kikerülő aktivitást.

A primerköri víz–gőz keverék a sérült csonkon át kiömlik a hermetikus tér légterébe, egy része gázfázisba, más része a hermetikus tér padlójára kerül.

A hermetikus tér légterébe került aktivitás egy része – a hermetikus térben bekövetkező túlnyomás hatására – a hermetikus tér tömítetlenségein át a hermetikus térrel szomszédos helyiségekbe szivároghat, majd a helyiségláncokon és a szellőzőrendszereken át a szellőzőkéménybe, onnan a környezetbe juthat, és lakossági sugárterhelést okozhat. A hermetikus tér szivárgásának megengedhető maximális értékét az üzemeltetési szabályzat adja meg, értéke 1,5 bar túlnyomásnál 24 óra alatt nem lehet több a hermetikus tér légtérfogatának 14,7%-ánál.

Az atomeróművi üzemzavaroknál a védőintézkedések megalapozása szempontjából nagy jelentősége van a környezetbe történő radionuklid kibocsátás meghatározásának.

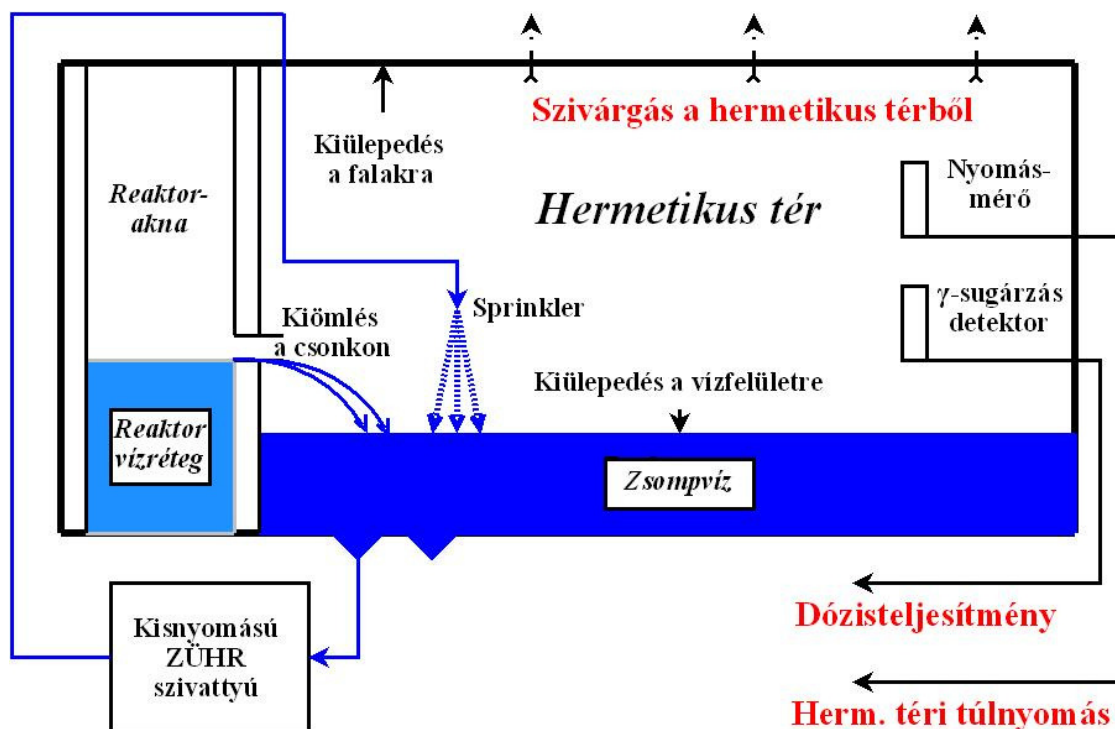
Az erőmű légköri kibocsátásának folyamatos mérésére szolgálnak a szellőzőkéményben elhelyezett kibocsátásmérő műszerek. A szellőzőkéménybe az aeroszolok, az elemi és szerves jód, valamint a nemesgázok aktivitáskoncentrációjának meghatározására a PING (Particle, Iodine, Noble Gas) nevű műszeregyüttes van beépítve. Üzemzavari és baleseti kibocsátás esetén – elsősorban a jódmérő – telítésbe mehet. A méréstartományuk aeroszolok esetén $1 \cdot 10^6$ Bq/m³, ¹³¹I esetén $3,7 \cdot 10^6$ Bq/m³, nemesgázoknál pedig $1 \cdot 10^9$ Bq/m³-ig terjed. Ez a méréshatár ¹³¹I vonatkozásában üzemzavari kibocsátásnál lényegesen csökken, mert más jódizotópok (¹³²I, ¹³³I, ¹³⁴I és ¹³⁵I) és radioaktív nemesgáz is van a mérendő levegőben, amelyek zavarják a ¹³¹I mérését a mérődetektor terhelése révén. Meg kell jegyezni, hogy ezek

a mérőrendszerek csak a kéménykibocsátás meghatározására alkalmasak, velük az épület tömörtelenségein történő esetleges szivárgás révén bekövetkező kibocsátás nem mérhető.

Az általunk kidolgozott, mérésen alapuló számítási módszer a hermetikus térből az azt körülvevő helyiségekbe, majd a környezetbe kilépő aktivitás meghatározására szolgál a hermetikus téri túlnyomással járó üzemzavar bekövetkeztekor. A módszer a hermetikus tér légterébe kerülő aktivitás dózisteljesítmény-mérésen alapuló meghatározásán és a túlnyomás hatására a hermetikus térből való kikerülés számításán alapul. A meghatározás első lépéseként vizsgálni kell, hogy a primerköri közeg révén a hermetikus térbe került aktivitás mekkora hányada marad a légtérben, mert a kibocsátást csak a légtérben maradó hányad határozza meg.

A HERMETIKUS TÉRI SZIVÁRGÁST BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

Tekintsük át azokat a folyamatokat, amelyek befolyásolják azt, hogy a hermetikus térből – szivárgás révén – mekkora aktivitás kerül ki a hermetikus teret körülvevő helyiségekbe. A főbb elemeket a 2. ábra mutatja be.



2. ábra. Az aktivitás útja a hűtőközegtől a hermetikus tér falán át történő szivárgásig és a hermetikus térben végbemenő, a légköri aktivitást befolyásoló folyamatok és a módszer által használt mérőeszközök

A fűtőelemek üzeme során hasadási termékek keletkeznek, a hasadási termékek egy része a fűtőelem réseiben gyűlik össze. A reaktor zónakészletének ismeretében meghatározható a burkolatsérüléskor várhatóan a primerköri közegbe kerülő aktivitás. Ha az összes fűtőelem burkolatának sérülését tételezzük fel, akkor az 1. táblázatban megadott aktivitások kerülnek a vízbe a legjobb közelítésnek megfelelő feltételezésekkel [2]. Ez az adat tartalmazza a burkolatsérüléssel egyidejűleg fellépő fűtőelem tablettá töredezéséből, a fragmentációból származó aktivitást is

1. táblázat. A környezeti sugárterhelés szempontjából legfontosabb hasadási termékek részaktivitásának és a fragmentálódásából származó aktivitásának összege (A), valamint felezési idejük ($T_{1/2}$) gadolíniumos fűtőelemek esetén

Nuklid	$T_{1/2}$ [óra]	A [Bq]	Nuklid	$T_{1/2}$ [óra]	A [Bq]	Nuklid	$T_{1/2}$ [óra]	A [Bq]
^{85m} Kr	4,48	4,71E+15	¹³⁵ I	6,61	8,87E+15	¹⁰³ Ru	942,7	2,78E+16
⁸⁵ Kr	94000	2,12E+15	⁸⁴ Br	0,53	4,47E+14	¹⁰⁶ Ru	8847,6	1,55E+16
⁸⁷ Kr	1,272	4,71E+15	⁸⁷ Br	0,0155	5,88E+14	¹³² Te	78,2	1,19E+16
⁸⁸ Kr	2,84	8,19E+15	⁸⁸ Rb	0,297	1,75E+15	¹³⁴ Cs	18100	5,77E+15
⁸⁹ Kr	0,053	3,16E+15	⁸⁹ Rb	0,253	2,25E+15	¹³⁷ Cs	263000	4,54E+15
⁹⁰ Kr	0,009	2,07E+15	⁹⁰ Rb	0,0425	1,53E+15	¹³⁸ Cs	0,537	5,28E+15
^{131m} Xe	285,6	4,92E+14	⁸⁹ Sr	1212	2,05E+16	¹³⁹ Ba	1,378	6,38E+15
¹³³ Xe	125,88	7,47E+16	⁹⁰ Sr	255000	3,36E+15	¹⁴⁰ Ba	305,8	2,26E+16
^{135m} Xe	0,255	2,34E+15	⁹¹ Sr	9,52	6,35E+15	¹⁴⁰ La	40,27	1,30E+16
¹³⁵ Xe	9,09	1,08E+16	⁹² Sr	2,71	5,05E+15	¹⁴¹ Ce	780	2,95E+16
¹³⁸ Xe	0,236	9,76E+15	⁹⁵ Zr	1535,5	3,88E+16	¹⁴³ Ce	33	1,07E+16
¹³¹ I	192,96	1,06E+16	⁹⁷ Zr	16,9	9,82E+15	¹⁴⁴ Ce	6823,2	4,00E+16
¹³² I	2,3	5,22E+15	⁹⁵ Nb	843,6	3,22E+16	¹⁴⁴ Pr	0,288	3,25E+15
¹³³ I	20,8	1,23E+16	⁹⁷ Nb	1,2	5,51E+15			
¹³⁴ I	0,8767	6,77E+15	⁹⁹ Mo	66	1,52E+16			

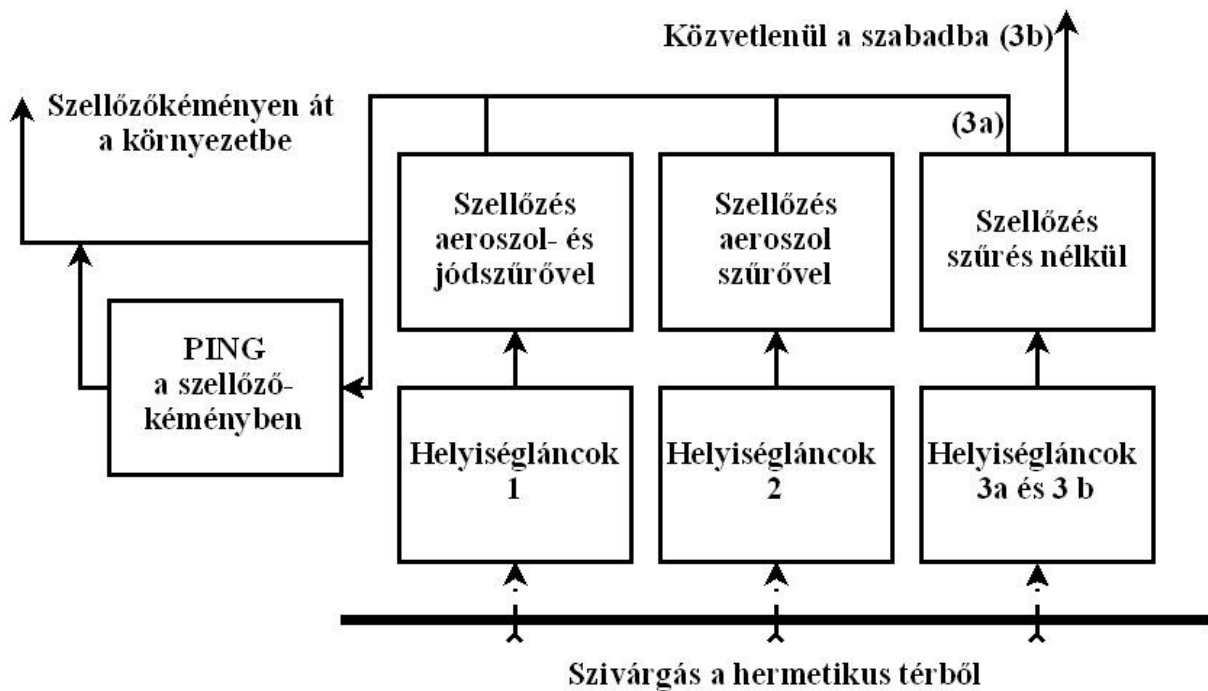
Feltételezzük, hogy a részaktivitás és a fragmentálásából származó aktivitás már a csőtörés pillanatában a víz–gőz keverékből álló primerköri közegbe kerül. Ezt a feltételezést csak az aktivitások egymáshoz viszonyított arányának meghatározásához használjuk fel.

A törött cső csonkján át a víz–gőz keverék nagy nyomással a hermetikus tér légterébe ömlik ki. A további számításoknál feltételezzük, hogy a primerköri közegbe került összes radioaktív nemesgáz a hermetikus tér légterébe kerül, az elemi és a szerves jód 57%-a és az aeroszolok (beleértve a jód aeroszolatokat is) 10%-a jut a légtérbe [2], a maradék rész pedig a vízfázisban, a hermetikus tér padlóján összegyűlő, ún. zsompvizben marad.

KÖRNYEZETI KIBOCSÁTÁS

A hermetikus térben létrejövő túlnyomás hatására a hermetikus tér tömítetlenségein át szivárgás lép fel a hermetikus teret körülvevő helyiségekbe. A hermetikus térből a szivárgás révén a környező helyiségekbe kerülő aktivitás a helyiségláncok késleltető (puffer) hatása miatt csak fokozatosan jut a szellőzőrendszerek elszívási ágába, majd onnan az aktivitás a szellőzőkéményen át a környezetbe bocsátódik ki (3. ábra). A szellőzőrendszerek egy részében nincs szűrő, más részében az aeroszolok jó hatásfokkal kiszűrődnek, míg egyes helyiségláncok irányában aeroszol és jódszűrővel is ellátott szellőzőrendszer van. Amennyiben a biztonsági rendszerek és rendszerelemek szellőző rendszereinek és a turbina épület szellőző rendszereinek irányába is van szivárgás, akkor az oda kerülő aktivitás az épületekből közvetlenül (azaz nem a szellőzőkéményen át) kerül a környezetbe.

A nagy átmérőjű csövek törése esetén a hermetikus téri túlnyomás nagy értéket ér el, de csak rövid ideig tart, mert a hermetikus téri passzív nyomáscsökkentő berendezések (légcsapda, passzív sprinkler) működésbe lépnek.



3. ábra. A környezeti kibocsátás útvonalai a hermetikus tér falától a környezetig

A 492 mm névleges átmérőjű fővezeték hidegági törése esetén a hermetikus tér túlnyomása kevesebb, mint egy percig áll fenn. Kisebb átmérőjű csövek törése esetén a passzív nyomáscsökkentő rendszerek nem lépnek működésbe és ennek következtében a túlnyomás több óra hosszát, akár egy napig is fennállhat. Ha az üzemzavar következtében létrejövő hermetikus téri túlnyomás huzamosabb ideig fennáll, akkor figyelembe kell venni azokat a hermetikus térben lejátszódó folyamatokat is, amelyek az aktivitás mennyiségét a hermetikus tér légtérében és a zsonpvízben befolyásolják. Ezeket a folyamatokat a 2. ábrán mutattuk be.

A hermetikus térbe jutó aktivitás – egyes nuklidoknál leányelem-képződés mellett – a radioaktív bomlás miatt csökken. A légtérben lévő aktivitás egy része kiülepszik a légtérrel határos felületekre, a sprinkler az aeroszolak és az elemi jód kimosása révén szintén csökkenti a légtérben lévő aktivitáskoncentrációt. Feltételezzük, hogy a falakra kiülepedett aktivitás a légtér nagy vízcsepp tartalma miatt lemosódik a falakról és a zsonpvízbe kerül. A sprinkler folyamatos vízellátását a sérült zónát is hűtő, kisnyomású Zóna Üzemzavari Hűtő Rendszer (ZÜHR) szivattyúja biztosítja, cirkuláltatva a törésen át a zsonpba kifolyó vizet. A zsonpvíz aktivitáskoncentrációját a 4. víztisztító fokozatosan csökkenti, de e berendezést várhatóan csak a hermetikus téri túlnyomás megszűnése után helyezik üzembe.

MÓDSZER A KÖRNYEZETI KIBOCSÁTÁS MEGHATÁROZÁSÁRA

A hermetikus térből kilépő aktivitás mérés alapján történő meghatározására új módszert dolgoztunk ki. Ez a módszer azon alapul, hogy a hermetikus térből az időegység alatt kiáramló levegőmennyiség arányos a hermetikus téri túlnyomás és az egyes irányokban mért hermetikus téri szivárgási érték szorzatával, az időegység alatt kilépő aktivitás pedig a kiáramló levegő aktivitáskoncentrációjának és a kilépő levegő mennyiségének szorzatával. A hermetikus téri túlnyomást több műszer is méri, az egyes helyiségek irányában fellépő szivárgási értékeket pedig az adott bloknál minden éves karbantartási leállás után meghatározzák. A kilépő levegő aktivitáskoncentrációja arányos a hermetikus térben elhelyezett, ún. baleseti γ -sugármérő jelzésével. Megállapítható, hogy a javasolt módszer a

már meglévő műszerek jelzését használja fel, megvalósításához csak számítástechnikai fejlesztésre van szükség.

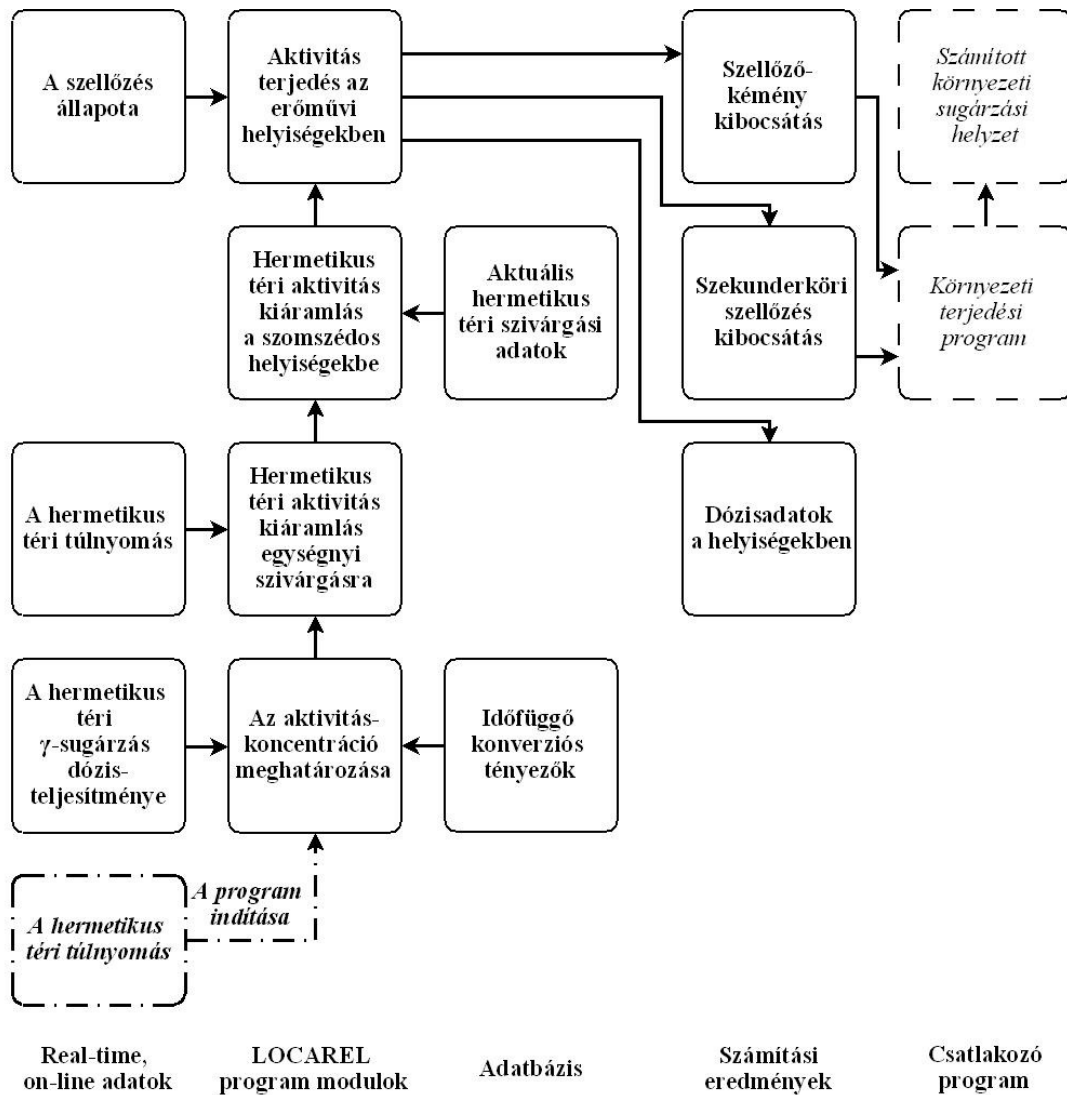
A 4. ábra mutatja a hermetikus térből kilépő és a helyiségláncon át kibocsátott aktivitás meghatározásának logikai vázlatát. A számításokat on-line számítógépen futó program közel valós időben tudja végezni, a programot a bármely blokkon csőtörés hatására létrejövő túlnyomásjel indítja. A hermetikus téri túlnyomás és a γ -sugárzás dózisteljesítménye alapján a program kiszámítja az egységnyi szivárgásra történő aktivitáskiáramlást, majd a korábban megadott szivárgási hányadok alapján megkapjuk az egyes helyiséglánckokba belépő aktivitást. A helyiséglánckok légforgalmának és a levegőszűrőknek megfelelően a program kiszámítja a környezetbe kilépő nuklidok aktivitását. A kimeneti adatok további felhasználását a jelen programtól független, akár on-line csatlakozó környezeti terjedésszámító program biztosítja, amely a meteorológiai adatok felhasználásával a környezeti sugárzási jellemzőket a számított kibocsátási adatok alapján határozza meg.

A 2. ábrán szereplő γ -sugárzásmérő műszer felső méréshatára 10^5 Gy/h, a csőtöréses üzemzavarnál fellépő magas hőmérsékletnek és nagy nyomásnak ellenálló kivitelű [3]. A hermetikus térben, a légcspadák előtti aknában elhelyezett γ -sugárzás detektor mind a hermetikus tér légtérben, mind a detektor alatti zsonpvízben lévő radionuklidok által létrehozott sugárzási teret együttesen méri. Ahhoz, hogy e jelzésből le lehessen vonni a zsonpvíz okozta járulékot, szükség volt arra, hogy kiszámítsuk az egyes komponensek időfüggő relatív hozzájárulását a dózistérhez. A dózisteljesítmény számításokhoz a nukleáris és a geometriai adatokat felhasználva a Microshield programot [4] alkalmaztuk. A 2. táblázat adja meg a két különböző várható vízszintre vonatkozó dózisteljesítményeket. A 40 cm-es vízszint annak az esetnek felel meg, ha a passzív sprinkler nem lép működésbe, a 153 cm-es pedig annak, ha a passzív sprinkler működésbe lépett és a felhasznált vízmennyiség a padlóra kerül.

A dózistér számításánál feltételezzük, hogy mind a légtérben, mind a zsonpvízben ismerjük a nuklidok aktivitásának egymáshoz viszonyított arányát, valamint ismertnek fogadjuk el a légtér és a zsonpvíz közötti kezdeti aktivitásmegoszlást is. Ezenkívül szükség van annak ismeretére is, hogy a detektor jelzésének mekkora hányada származik a kibocsátás szempontjából kizárólag meghatározó légtér aktivitásból. Az 5. ábrán bemutatjuk azt az esetet, amelyet a $\varnothing 492$ mm-es hidegági főkeringtető vezeték 200%-os törése jelent, megadva a légtér, illetve a zsonpvíz aktivitásából származó dózisteljesítmény-járulék időfüggését. Az adott esetben a zsonpvíz várható szintje 153 cm lesz. A számításoknál a radioaktív bomlás mellett figyelembe vettük a sprinkler és a kiülepedés hatását is, amelynek révén a légtérben lévő elemi jód és az aeroszolkok egyre nagyobb hányada kerül át a zsonpvízbe. Ennél az esetenél kezdetben a légtér dóziskomponense a nagyobb, azonban már mintegy 15 perc után a két komponens egyenlő lesz, két óra elteltével pedig a zsonpból származó komponens már kétszerese a légtér járuléknak.

A bemutatott dózisteljesítmény arányok minden olyan esetre érvényesek, amelyeknél a zsonpvíz szintje eléri a 153 cm-t, de a dózisteljesítmény számszerű értékei az ábrán szereplő értékektől eltérhetnek.

Meg kell jegyezni, hogy a hermetikus térben lévő γ -sugárzásmérő műszer az ismertetett üzemzavarnál fellépő mintegy 20 Gy/h sugárzási tér 5000-szereséig, azaz $1 \cdot 10^5$ Gy/h-ig lineárisan mér. Az ismertetett üzemzavarnál a zónakészlet 1–2%-a jut ki a hermetikus térbe, tehát a műszer még akár a teljes zónakészlet légtérbe kerülése esetén is lineárisan mér.

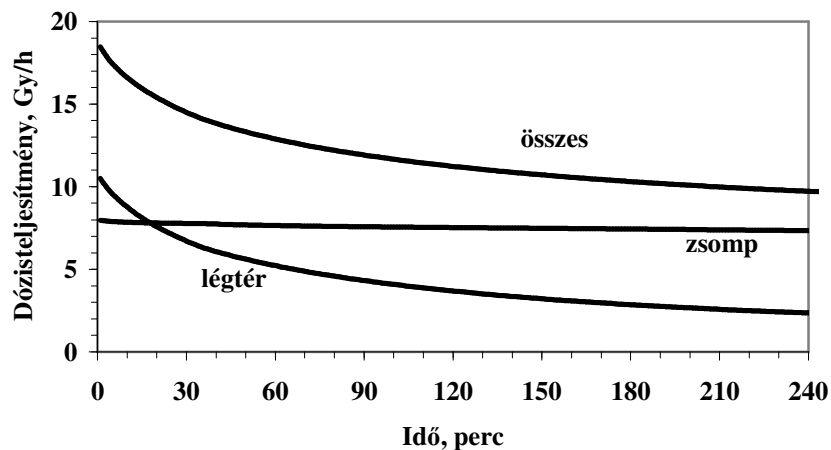


4. ábra. A hermetikus térből kilépő és a helyiségláncokon át a környezetbe kibocsátott aktivitás számításának logikai vázlata

2. táblázat: Részleltár (EU legjobb közelítés, a fragmentálódásból származó járulékot is tartalmazza) és a 100%-os fűtőelemburkolat-sérüléshez tartozó, a hermetikus tér légtéréből, illetve a zompvízből származó dózisteljesítmények különböző vízszintek esetén a törés utáni t=0 időpontban

Nuklid	Felezési idő (óra)	Részleltár (Bq)	Dózisteljesítmény Gy/h-ban			
			levegő komponenstől, ha zompvíz		zompvíz komponenstől, ha a zompvíz	
			40 cm	153 cm	40 cm	153 cm
^{85m} Kr	4,48	4,71E+15	9,41E-02	8,64E-02	-	-
⁸⁵ Kr	94000	2,12E+15	5,37E-04	4,93E-04	-	-
⁸⁷ Kr	1,272	4,71E+15	3,62E-01	3,33E-01	-	-
⁸⁸ Kr	2,84	8,19E+15	1,38E+00	1,27E+00	-	-

Nuklid	Felezési idő (óra)	Részletár (Bq)	Dózisjeljesítmény Gy/h-ban			
			levegő komponenstől, ha zsonpvíz		zsonpvíz komponenstől, ha a zsonpvíz	
			40 cm	153 cm	40 cm	153 cm
⁸⁹ Kr	0,0528	3,16E+15	5,46E-01	5,01E-01	-	-
⁹⁰ Kr	0,00898	2,07E+15	2,58E-01	2,37E-01	-	-
^{131m} Xe	285,6	4,92E+14	9,07E-03	8,32E-03	-	-
¹³³ Xe	125,88	7,47E+16	1,28E+00	1,18E+00	-	-
^{135m} Xe	0,255	2,34E+15	1,23E-01	1,13E-01	-	-
¹³⁵ Xe	9,09	1,08E+16	3,08E-01	2,83E-01	-	-
¹³⁸ Xe	0,236	9,76E+15	1,11E+00	1,01E+00	-	-
¹³¹ I	192,96	1,06E+16	3,15E-01	2,89E-01	1,11E-01	5,00E-02
¹³² I	2,3	5,22E+15	8,57E-01	7,87E-01	3,05E-01	1,38E-01
¹³³ I	20,8	1,23E+16	5,37E-01	4,93E-01	1,91E-01	8,60E-02
¹³⁴ I	0,8767	6,77E+15	1,22E+00	1,11E+00	4,34E-01	1,95E-01
¹³⁵ I	6,61	8,87E+15	9,41E-01	8,64E-01	3,49E-01	1,57E-01
⁸⁴ Br	0,53	4,47E+14	1,40E-02	1,29E-02	5,43E-03	2,45E-03
⁸⁷ Br	0,0155	5,88E+14	4,03E-02	3,71E-02	1,55E-02	7,01E-03
⁸⁸ Rb	0,297	1,75E+15	1,04E-02	9,54E-03	7,27E-02	3,26E-02
⁸⁹ Rb	0,253	2,25E+15	4,64E-02	4,26E-02	3,18E-01	1,43E-01
⁹⁰ Rb	0,0425	1,53E+15	2,68E-02	2,46E-02	1,80E-01	8,12E-02
⁸⁹ Sr	1212	2,05E+16	-	-	-	-
⁹⁰ Sr	255000	3,36E+15	-	-	-	-
⁹¹ Sr	9,52	6,35E+15	7,07E-02	6,49E-02	4,74E-01	2,14E-01
⁹² Sr	2,71	5,05E+15	6,74E-02	6,19E-02	4,57E-01	2,06E-01
⁹⁵ Zr	1535,5	3,88E+16	3,16E-01	2,90E-01	2,03E+00	9,16E-01
⁹⁷ Zr	16,9	9,82E+15	1,88E-02	1,73E-02	1,23E-01	5,53E-02
⁹⁵ Nb	843,6	3,22E+16	2,71E-01	2,48E-01	1,75E+00	7,88E-01
⁹⁷ Nb	1,2	5,51E+15	4,10E-02	3,77E-02	2,65E-01	1,19E-01
⁹⁹ Mo	66	1,52E+16	2,52E-02	2,32E-02	1,65E-01	7,44E-02
¹⁰³ Ru	942,7	2,78E+16	1,73E-01	1,58E-01	9,96E-01	4,50E-01
¹⁰⁶ Ru	8847,6	1,55E+16	3,61E-02	3,29E-02	2,34E-01	1,06E-01
¹³² Te	78,2	1,19E+16	4,70E-02	3,97E-02	3,35E-01	1,51E-01
¹³⁴ Cs	18100	5,77E+15	9,94E-02	9,14E-02	7,64E-01	3,44E-01
¹³⁷ Cs	263000	4,54E+15	2,96E-02	2,72E-02	1,86E-01	8,34E-02
¹³⁸ Cs	0,537	5,28E+15	1,23E-01	1,13E-01	8,49E-01	3,83E-01
¹³⁹ Ba	1,378	6,38E+15	2,85E-03	2,61E-03	1,76E-02	7,92E-03
¹⁴⁰ Ba	305,8	2,26E+16	5,78E-01	5,29E-01	3,76E+00	1,70E+00
¹⁴⁰ La	40,27	1,30E+16	2,99E-01	2,75E-01	2,03E+00	9,16E-01
¹⁴¹ Ce	780	2,95E+16	3,56E-02	3,27E-02	1,83E-01	8,22E-02
¹⁴³ Ce	33	1,07E+16	4,86E-02	4,46E-02	3,58E-01	1,61E-01
¹⁴⁴ Ce	6823,2	4,00E+16	2,97E-02	2,72E-02	1,47E-01	6,62E-02
¹⁴⁴ Pr	0,288	3,25E+15	1,00E-01	9,18E-02	6,90E-01	3,12E-01
Összeg			1,19E+01	1,09E+01	1,78E+01	8,02E+00



5. ábra: A légtérben és a zsompvízben lévő radionuklidoktól származó, valamint az összegzett dózisteljesítmény időfüggése 153 cm-es zsomp vízszint esetén a radioaktív bomlás, a kiülepedés és a kimosás figyelembevételével

A leírt módszerrel a mért on-line adatok alapján közel valós időben meghatározható a környezeti radionuklid kibocsátás még abban az esetben is, ha a kibocsátás nem csak a szellőzőkéményen át történik, illetve akkor is, ha a kéménykibocsátás esetén a kibocsátott levegő aktivitáskoncentrációja meghaladja a kibocsátást mérő műszerek felső méréshatárát.

A módszer a legjobb közelítésnek megfelelő adatbázist (résaktivitás, fűtőelem fragmentáció, légtér/zsompvíz megoszlási tényező, kimosási és kiülepedési állandók) használja, azonban e tényezők, valamint a detektorjelzés számítási bizonytalansága, a felületi szennyeződések hatásának elhanyagolása miatt a kibocsátás számítása csak közelítő eredményeket adhat, ugyanakkor olyan esetekben is tájékoztatást nyújt, amikor a jelenlegi mérőrendszerek nem képesek megfelelően adatot szolgáltatni.

A LOCAREL PROGRAM

A leírt módszer alapján kifejlesztett programot a LOCAREL-nek neveztük el. Még 2009-ben elkészült a LOCAREL_A (autonóm) változat, mely néhány üzemzavari esetre meghatározott, szimulált adatsor alapján, autonóm módon végzi a számítást. 2010-ben került sor a LOCAREL_I (interaktív) program kifejlesztésére. A program bemenő hermetikus téri nyomás és dózisteljesítmény adatait a HERMET [3] program továbbfejlesztett változata, a HERMAKT program adja meg nyolc tipikus csőtöréses üzemzavar esetére. A LOCAREL_I program struktúráját a 6. ábra mutatja be.

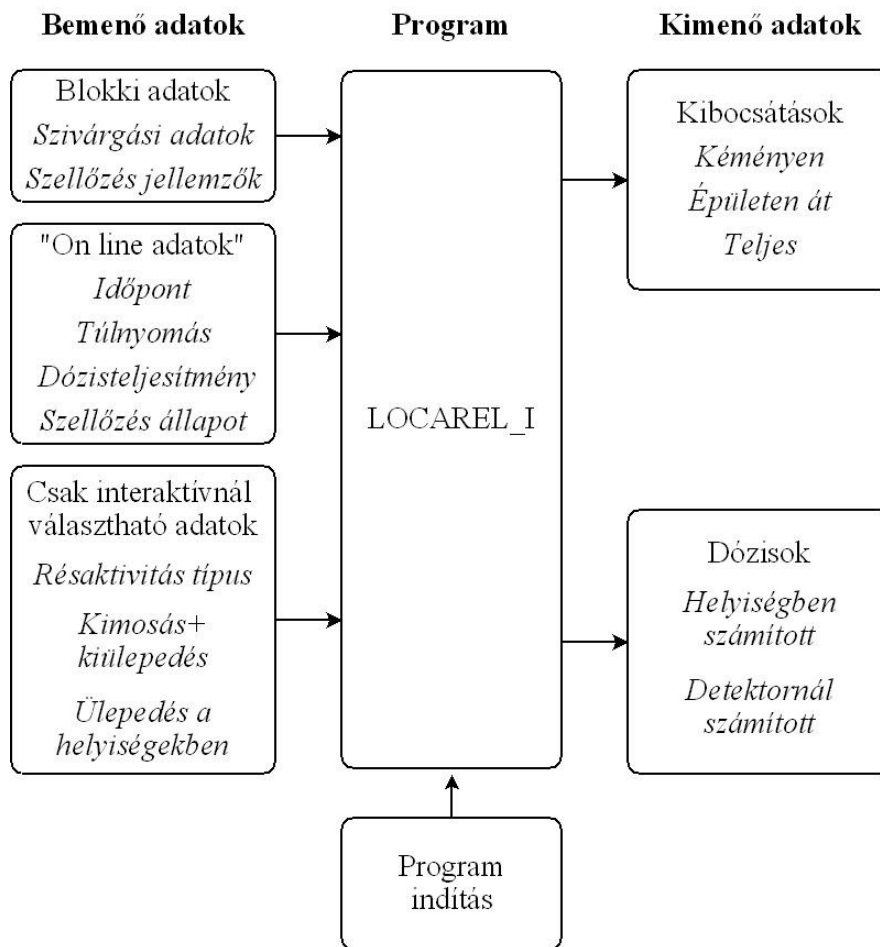
A LOCAREL_I program futásához a következő, előre kiszámított, időfüggő adatok szükségesek:

- a hermetikus téri nyomás eltérése a környezet légnyomásától (túlnyomás),
- a hermetikus térben elhelyezett nagy méréshatárú, úgynevezett baleseti dózisteljesítmény-mérő jelzése (dózisteljesítmény).

A felhasználónak meg kell adnia:

- a szivárgási adatokat,
- a hermetikus teret körülvevő helyiségláncok szellőzésének jellemzőit,
- a LOCA bekövetkezésének időpontját,
- a szellőzés állapotát,
- a résaktivitás típusát,

- figyelembe vegye-e a hermetikus téren belüli kiülepedést és kimosást,
- figyelembe vegye-e a helyiségekben bekövetkező kiülepedést.



6. ábra: A LOCAREL_I programcsomag szerkezete

Ezeket az adatokat felhasználva a LOCAREL_I program meghatározza:

1. a hermetikus térből az érintett helyiségekbe kilépett radionuklidok aktivitását az adott pillanatig, kiszámítva a radioaktív anyagok áramlását az érintett szellőzőrendszereken át a kémény felé, illetve az esetleges szekunderköri helyiségeken át közvetlenül a szabadba,
2. az erőművön belüli terjedés időbeli pufferhatását figyelembe véve a szellőzőkéményen és/vagy közvetlenül az épületen át kibocsátott radionuklidok aktivitását az adott, kerek 10 perces időintervallumokra,
3. a gamma-sugárzásból és az inhalációból eredő dózis(teljesítmény) időfüggését a hermetikus térrel közvetlenül érintkező helyiségekre,
4. a szellőzőkéményben fellépő gamma-sugárzási dózisteljesítményt, a kéményben elhelyezett PING mérőeszközök várható jelzéseit, valamint egyes, a hermetikus térrel határos és dózisteljesítmény-mérő műszerrel ellátott helyiségekre vonatkozóan a gamma-sugárzás bemerülési dóziséit.

A rendszer kimenete a környezeti kibocsátást nuklidszelektíven adja meg, 10 perces időfelbontással olyan formátumban, hogy az egy környezeti terjedésszámító program bemeneti adataként szolgálhasson.

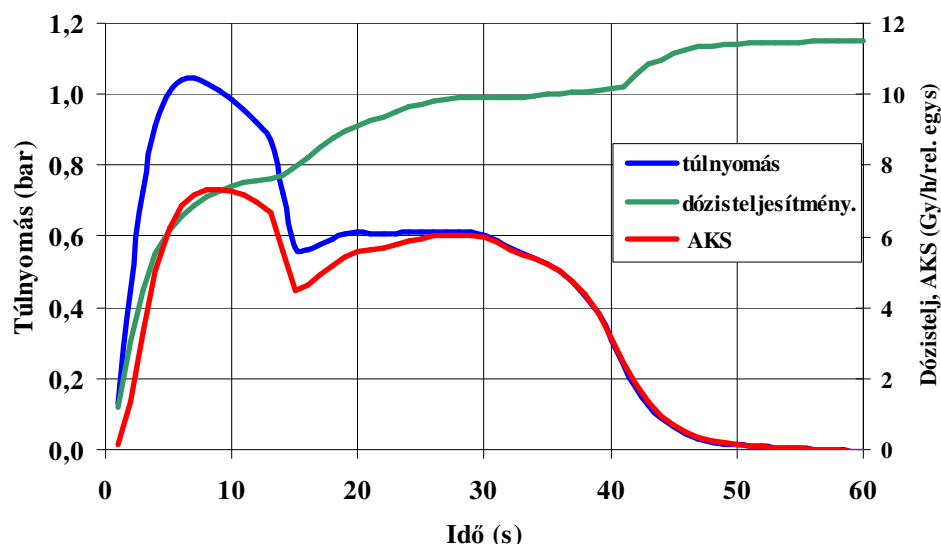
A LOCAREL_I program olyan oktató és fejlesztő változat, amely önálló személyi számítógépen futtatható, a programban szereplő szabad paraméterek módosíthatók, és ennek révén esettanulmányok, érzékenységvizsgálatok végezhetőek.

A hároméves fejlesztés végcélja a LOCAREL_O (on-line) real-time, on-line programrendszer, amely egy hermetikus téri túlnyomással járó üzemzavar esetén a ténylegesen mért hermetikus téri nyomás, dózisteljesítmény és zsonpvíz magasság adatokból on-line kapcsolattal, valós időben számítja a környezeti kibocsátást. Maga a LOCAREL_O program a LOCAREL_I program olyan változata, amelynél a bemeneti adatok nem szimulált, hanem a mért üzemzavari technológiai és sugárzási adatok. A program a hermetikus tér nyomását figyeli, a számításokat a hermetikus tér nyomásnövekedése automatikusan indítja. A mért és a számított adatok numerikusan és grafikusán is megjeleníthetők. A program kimeneti adatsora, a tízpercenkénti nuklidszelektív kibocsátás bemenő adatsora lehet a környezeti sugárterhelést számító csatlakozó programnak.

A LOCAREL_O program paksi üzembe helyezése még 2011-ben várható.

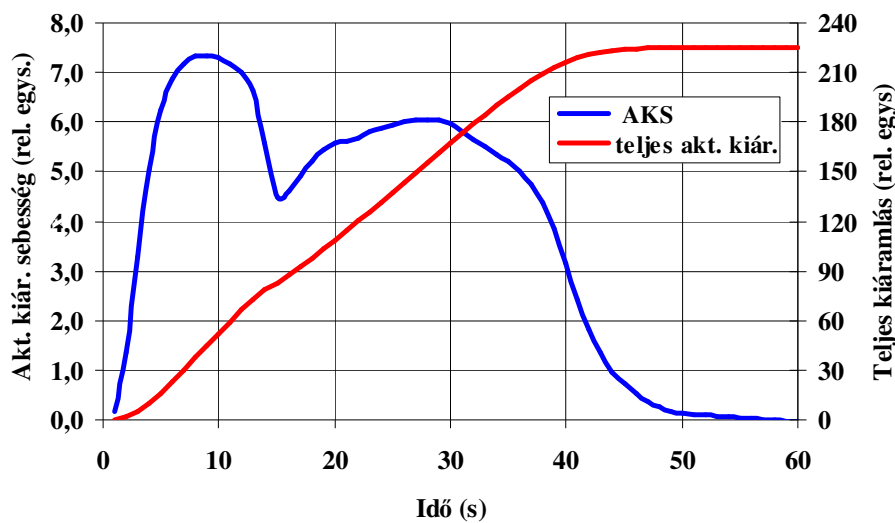
A LOCAREL PROGRAM ALKALMAZÁSA

Példaként a 492 mm átmérőjű fővezeték hidegági törés következményeit vizsgáljuk meg. A 7. ábrán bemutatjuk a törés következtében létrejövő túlnyomás időfüggését [3]. Ugyanezen az ábrán látható a számított hermetikus téri dózisteljesítmény légtérfogatból eredő komponense, amelyik a hermetikus tér légtérének aktivitásával arányos. A hermetikus térből az aktivitás kiáramlás sebessége arányos a hermetikus téri túlnyomás és a hermetikus téri dózisteljesítmény szorzatával, így kapjuk az aktivitáskiáramlási sebességet (AKS), ezt az adatot is mutatja a 7. ábra. Az adott esetben feltételeztük, hogy az összes fűtőelem hermetikus burkolata sérül és az ennek megfelelő résaktivitás és fragmentum kerül a hermetikus térbe.



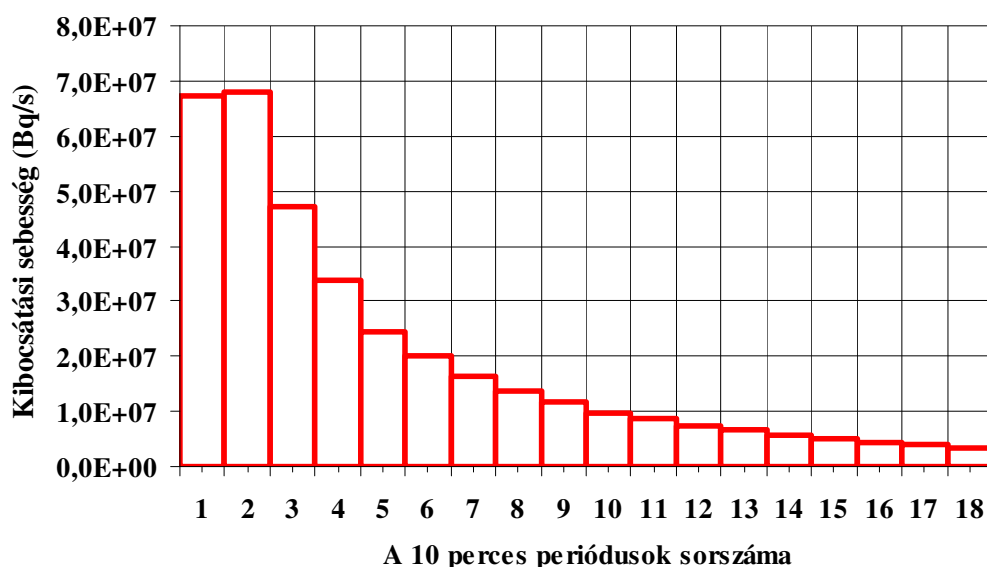
7. ábra. A 492 mm átmérőjű fővezeték hidegági törése következtében létrejövő túlnyomás, dózisteljesítmény és aktivitáskiáramlási sebesség (AKS) időfüggése

A hermetikus térből kiáramló összes aktivitás arányos az aktivitáskiáramlási sebesség időintegráljával (8. ábra), annak abszolút értéke függ a hermetikus tér teljes szivárgási hányadtól.



8. ábra. A 492 mm átmérőjű fővezeték hidegági törése következtében létrejövő aktivitáskiáramlási sebesség (AKS) és időintegráljának időfüggése

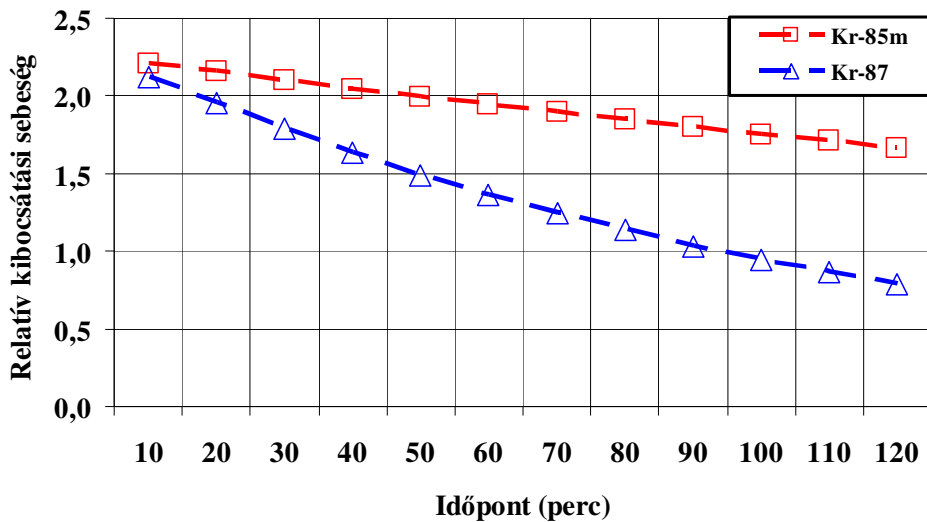
A helyiségláncok légtérfogatának késleltető hatása miatt a környezeti kibocsátás még a nagyon rövid túlnyomás esetén is viszonylag hosszú időig tart még. Tipikus szivárgási értékekre (nincs közvetlen kibocsátás a szabadba) vonatkozó kéménykibocsátás számításaink eredményét a ^{85}Kr -re vonatkozóan a 9. ábra mutatja. Ebben az esetben a helyiséglánc helyiségeiben nem lép fel sem a nemesgáz nuklid részleges kiülepedése és a bomlása is elhanyagolható, mert e nuklid felezési ideje 10,7 év.



9. ábra. A ^{85}Kr számított kéménykibocsátása a csőtörést követő első három órában.

A helyiséglánc visszatartó (puffer) hatását mutatja, ha megvizsgáljuk a 4,45 órás felezési idejű ^{85m}Kr és az 1,27 órás felezési idejű ^{87}Kr szellőzőkémény kibocsátásának időfüggését a

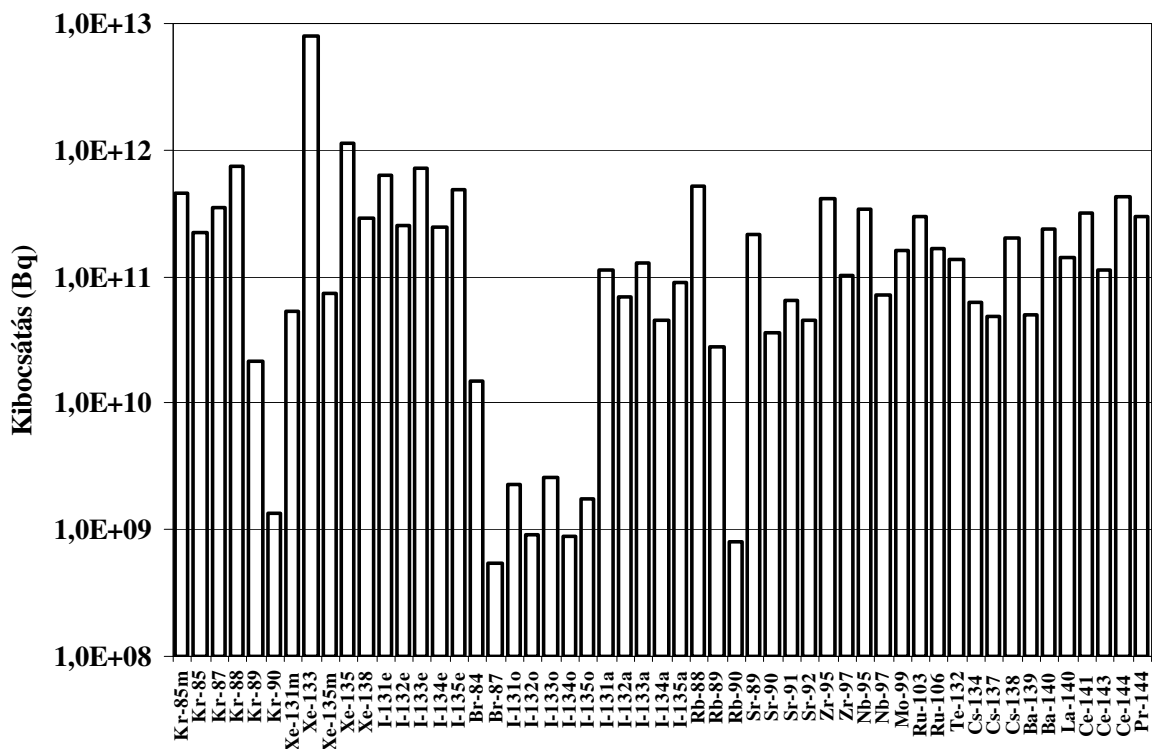
nagyon hosszú felezési idejű ^{85}Kr kibocsátására normalva (10. ábra). Különösen szembevető a csökkenés a ^{87}Kr esetében, amelynél a bomlás következtében a kezdeti aktivitás két óra alatt az eredeti érték 37%-ára csökken



10. ábra A 4,45 órás felezési idejű ^{85}mKr és az 1,27 órás felezési idejű ^{87}Kr kibocsátása a ^{85}Kr kibocsátására normalva, az első két órában

A radioaktív bomlás mellett az aeroszolok és az elemi jód kibocsátását tovább csökkenti a helyiségek falára történő kiülepedés és a sprinkler általi kimosás is.

A bemutatott esetben a 2. óra végéig történő teljes kibocsátást nuklidonkénti megoszlásban a 11. ábra mutatja.



11. ábra A nuklidok szerinti teljes kéménykibocsátás a csőtöréstől eltelt első két órában A jódizotópok jelölése: e – elemi, o – szerves (organikus), a – aeroszol forma

HIVATKOZÁSOK

- [1] 89/2005. (V. 5.) Korm. rendelet a nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről
- [2] W. Stephenson, L. M. C. Dutton, B. J. Handy, C. Smedley: Realistic methods for calculating the releases and consequences of a large LOCA, EUR 14179 EN, 1993.
- [3] EVVEREST modular design file. HERMET code. CORYS-BELGATOM-SIEMENS-THOMSON, EVST-DCS/4-PG, 8 May 1996.
- [4] Mirion Technologies SA., <http://www.mirion.com/en/products/datasheets>
- [5] Microshield 6.02 programcsomag. Framatome Technologies, Inc. d.b.a. Grove Engineering

A közlemény a SOMOS Alapítvány támogatásával készült

PIN dióda felhasználása energiaszelektív szcintillációs detektorrendszerhez

Nagy Gábor*¹, Sarkadi András², Zagyvai Péter³

¹SOMOS Kft., 1118 Budapest Sasadi út 70., ²Gamma Műszaki Zrt., 1097 Budapest Illatos út 9.,

³KFKI Atomenergia Kutatóintézet, 1121 Budapest Konkoly-Thege Miklós út 29-33.
gabor.nagy@somos.hu

Title – Application of PIN diode for energy selective scintillation detector system

Abstract - Rapid qualitative and quantitative radioanalysis of environmental fallout on soil can be appropriately performed by means of portable and/or easily installable gamma spectrometers in mobile survey units making use of solid state scintillation detectors. Reproducible operation of these devices requires a photosensor insensitive to ambient conditions (temperature, mechanical effects, magnetic field etc.) PIN diodes are capable substitutes for photomultiplier tubes due to their several advantageous features.

In order to obtain a device with suitable energy selectivity a series of electronic and mechanic problems should be solved. Most important examples are noise reduction and improvement of resolution, respectively. The analytical problem owing to the poor resolution of scintillation crystal detectors can be tackled by specially designed data processing algorithms. Our paper describes the difficulties of constructing a gamma spectrometer containing scintillation detector and PIN diode which is applicable for field surveys as well as the offered solutions.

Keywords – PIN diode, scintillation crystal, noise analysis

Kivonat - A talajra kihullott gamma-sugárzó radioaktív izotópok gyors, helyszíni izotópszелеktív kimutatására alkalmasak a szilárd szcintillációs detektorokat alkalmazó hordozható, illetve mobil mérőállomásra is telepíthető spektrométerek. Ezek reprodukálható működéséhez azonban egy, a környezeti körülményekre (hőmérséklet, mechanikai igénybevétel, mágneses tér, stb.) nem érzékeny fotoérzékelőre van szükség. A fotoelektron-sokszorozó kiváltására ígéretes eszköz a PIN dióda, amely számos előnyös tulajdonsággal rendelkezik.

Ahhoz, hogy megfelelő energiaszelektivitással rendelkező eszközt kapjunk, számos elektronikai, mechanikai problémát kell megoldanunk. Két ilyen fontos probléma a zajcsökkentés illetve a felbontás javítása. A szcintillációs detektor gyengébb felbontásából eredő analitikai probléma speciális, célorientált kiértékelési algoritmusokkal kiküszöbölhető.

Cikkünkben egy terepi körülmények közötti is használható, szcintillátor kristályból és PIN diódából álló detektor kialakításának nehézségeit mutatjuk be, illetve megoldást adunk ezekre.

Kulcsszavak - PIN dióda, szcintillátor kristály, zaj analízis

BEVEZETÉS

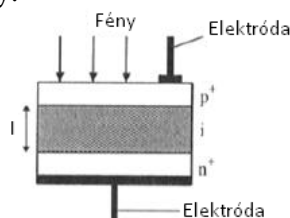
A talajra kihullott gammasugárzó radioaktív izotópok gyors, helyszíni kimutatására alkalmas eszközök már ismertek. A félvezető detektort és sokcsatornás analizátort alkalmazó eszközök drágák, óvatos kezelést és speciális szakértelmet igényelnek, katonai alkalmazhatóságuk gyakran nehézségekbe ütközik. A másik eszközcsoport szcintillációs detektorokat alkalmaz, ennek működéséhez azonban egy, a környezeti körülményekre (hőmérséklet, mechanikai igénybevétel, stb.) érzékeny fotóelektron-sokszorozóra van szükség [1]. A fotoelektron-sokszorozó (PMT) kevésbé érzékeny komponenssel történő kiváltásával és a hozzá tartozó elektronikának a miniatürizálásával jelentős méretbeli, fogyasztásbeli és mechanikai érzékenységbeli csökkenés érhető el.

A fotóelektron-sokszorozó kiváltására ígéretes eszköz lehet egy speciális félvezető eszköz, a PIN dióda [2]. A PIN dióda a fotóelektron-sokszorozóhoz képest számos előnyös tulajdonsággal rendelkezik, melyek közül a legfontosabbak a kis fogyasztása és mérete, kvantumhatásfoka és a mágneses térrel szembeni érzéketlensége. Mivel a PIN dióda is egy egyszerű p-n átmenet, ezért, ha a rétegek nem sérülnek, gyakorlatilag tönkreterhetetlen. Ha optikai csatolást létesítünk a PIN dióda és egy szcintillátor kristály között, a dióda segítségével érzékelhetjük a kristályban létrejött fény impulzusokat. Megfelelő elektronika és sokcsatornás analízátor segítségével a sugárforrás gamma-spektrumának felvételére van lehetőség, így a gyakoribb gammasugárzó izotópok azonosíthatóak lennének.

PIN DIÓDA

A rétegdíóda egyetlen p-n átmenettel rendelkező félvezető eszköz. Olyan kétpólus, ahol az egyik kivezetés (az anód) egy félvezető kristály p-típusúra adalékolt oldalához, a másik kivezetés (a katód) az n-típusú oldalhoz csatlakozik.

Viselkedésének jellegzetességeit szerkezete adja meg, mivel olyan a felépítése, hogy a p és az n réteget egy széles és viszonylag nagy ellenállású szakasz választja el egymástól: a sajátvezetésű („intrinsic”) tartomány.



1. ábra. PIN dióda sematikus ábra

A PIN dióda működése közben adott zárófeszültségnél a kiürített réteg fajlagos ellenállása nő. A dióda felépítése olyan, hogy az intrinsic tartományhoz csatlakozó n és p típusú kristályrétegek rendkívül keskenyek, tehát a beeső fény hatására keletkező töltéshordozó párok keltése döntő többségben a kiürített réteg tartományban történik. A kiürített rétegben a rekombináció valószínűsége kicsi, tehát a keltett töltéshordozók csaknem száz százalékban hozzájárulnak a fotóáramhoz. A működési sebességet a töltéshordozók kiürített rétegben való áthaladási ideje, az úgynevezett futási idő fogja megszabni, ami nagyban térerősség függő [3].

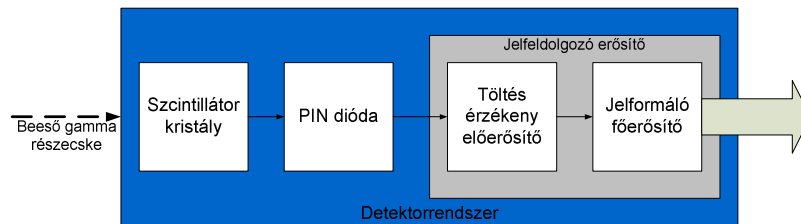
1. táblázat. PMT és a PIN dióda összehasonlítása

	PMT	PIN dióda
Méret [cm]	Ø1 -10	1x1
Működési feszültség [V]	~1000	24
Kvantum hatásfok [%]	~25	90
Mágneses mező hatására	érzékeny	érzéketlen
Elektromos zaj	érzékeny	érzékeny
Hőmérsékletváltozásra	érzékeny	érzékeny
Belső erősítés	van	nincs

ZAJ ANALÍZIS

Ahhoz, hogy minél pontosabb információt kapjunk az egyes gammasugárzó izotópokról, az érzékelőkben keltett jeleket amplitúdó szerint szét kell válogatni. A környezetben található különböző zavarforrások (elektromos, elektromágneses) nagyban nehezítik ezt.

A feladat, hogy megkülönböztessük a számunkra hasznos jelet a zavarjeltől. A feladatot megvalósító rendszer rendszertervét a 2. ábrán láthatjuk



2. ábra. A detektorrendszer terve

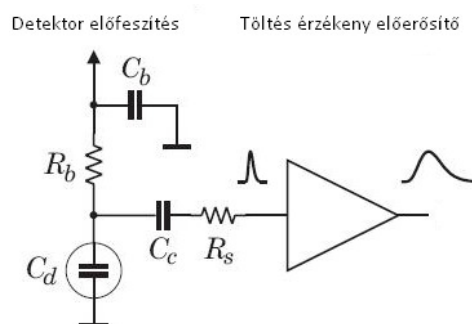
A 2. ábra szerint a tervezett detektorrendszert három fő egységre oszthatjuk:

- szcintillátor kristály CsI(Tl);
- PIN dióda;
- jelfeldolgozó elektronika (töltés érzékeny előerősítő és jelformáló főerősítő).

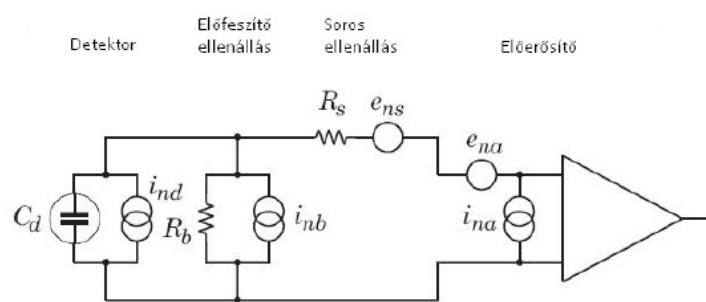
A szcintillátor kristály és a PIN dióda a zaj szempontjából adott tulajdonságokkal rendelkeznek, amiket legfeljebb konstrukciós megoldásokkal (jobb fényzárás, jobb fényillesztés, stb.) tudunk javítani. A teljes rendszer megértéséhez azonban ezeket a zaj tulajdonságokat is ismernünk kell.

A szcintillátor kristály fontos tulajdonsága a lecsengési időállandója, amit a töltés érzékeny erősítő illetve a jelfeldolgozó elektronika időállandójának meghatározásánál figyelembe kell venni. Ha valamelyik időállandót ennél kisebbre vesszük, az amplitúdó csökkenést okoz [4]. Ez az időállandó a CsI(Tl) szcintillátor kristálynál kb. $1\mu\text{s}$. Az általunk alkalmazott töltés érzékeny előerősítő időállandója $\tau_F = R_F \cdot C_F = 50\text{M}\Omega \cdot 2\text{pF} = 100\mu\text{s}$, ami lényegesen nagyobb, így elhanyagolható hibát okoz.

A detektor és az előerősítő zajanalízisét a zaj ekvivalens áramkör vizsgálatával végezhetjük.



3. ábra. A detektor és előerősítő egyszerűsített kapcsolási rajza



4. ábra. A bemeneti áramkör zaj ekvivalens áramköre

Az egyes elemeket a zaj szempontjából modellezhetjük feszültség- illetve áramforrással, amelyek hozzájárulnak a teljes zajhoz. Attól függően, hogy feszültség vagy áram jellegű a zaj forrása, szokás soros vagy párhuzamos zajnak is hívni őket. A 4. ábrán láthatjuk a zaj szempontjából legfontosabb elemek helyettesítéseit.

i_{nd} : a dióda sörétzaja (szivárgási áram), értéke $i_{nd}^2 = 2eI_d$
ahol I_d - a szenzor szivárgó árama [A]

i_{nb} : a dióda előfeszítő ellenállásának zaja, értéke $i_{nb}^2 = (4kT)/R_b$

e_{ns} : soros ellenállás zaja, értéke $e_{ns}^2 = 4kTR_s$

e_{na} , i_{na} : az alkalmazott erősítő elem zaj adatai, amit az eszköz adatlapja tartalmaz

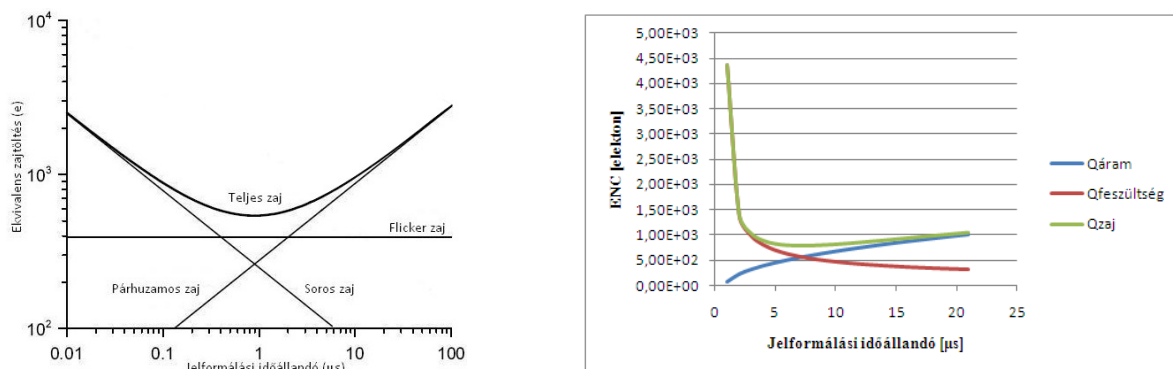
Habár a zajforrások feszültség- illetve áram jellegűek, mivel a sugázmérő detektorok töltést mérnek, a rendszer zajszintjét szokás az ún. Q_n ekvivalens zajtöltéssel kifejezni. Az ekvivalens zajtöltés nem más, mint annak a detektorból érkező jelnek a nagysága, ami egységnyi jel/zaj viszonyt eredményez. Mértékegysége a Coulomb [C].

A fenti áramkör ekvivalens zajtöltésének négyzetes hibaösszege (ENC – equivalent noise charge) [5]

$$Q_n^2 = ENC_p^2 + ENC_s^2 + ENC_{\frac{1}{f}}^2 = \left[\left(2eI_d + \frac{4kT}{R_b} + i_{na}^2 \right) \cdot \tau + (4kTR_s + e_{na}^2) \cdot \frac{C_d^2}{\tau} + 4A_f C_d^2 \right] \quad (1)$$

A kifejezés első tagja az áram jellegű zajok összege, az erősítő időállandójával együtt nő. A második tag a feszültség jellegű zajok összege. A kapacitás növekedésével nő, az időállandó növekedésével viszont csökken. A harmadik tag a *flicker zaj*, ami a félvezető eszközök gyártástechnológiájából adódik, a technológia fejlődése miatt, elhanyagolható a szerepe.

Az ekvivalens zajtöltés összefüggéséből látszik, hogy ha kis jelformálási időt választunk, akkor a soros (feszültség) zaj jelenetős, míg nagyobb időállandót választva a párhuzamos (áram) zaj válik meghatározóvá. A következő, 5. ábra egy optimális időállandójú illetve a megvalósított rendszer zaját ábrázolja.



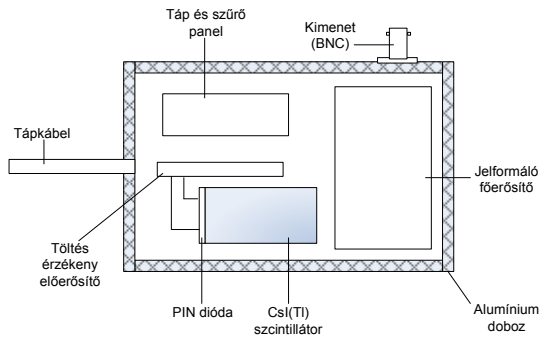
5. ábra. Ekvivalens zajtöltés a jelformálási idő függvényében (elméletben, valóságban)

A valós értékekkel kiszámított ábráról leolvasható, hogy kb. 6 μ s körül kell keresni a legoptimálisabb időállandót, ami a legnagyobb jel-zaj viszonyt adja.

Fontos megemlíteni, hogy jelformáló főerősítőnek nem csak egy integrálási illetve differenciálási időállandóval rendelkező erősítőt szoktak alkalmazni, hanem több erősítőt kapcsolnak egymás után. Ezek feladata, az analizátor számára megfelelő jelszint és jelforma biztosítása, a jel-zaj viszony kellő szinten tartásával.

SUGÁRFORRÁSOKKAL VÉGZETT MÉRÉSEK

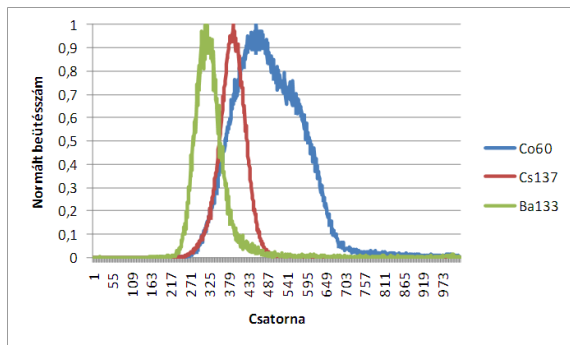
A megvalósított rendszert egy S3590-08 PIN dióda és egy 6cm³ térfogatú CsI(Tl) szcintillátor kristály alkotja. A vizsgálatokhoz 3 sugárforrást használtunk, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co.



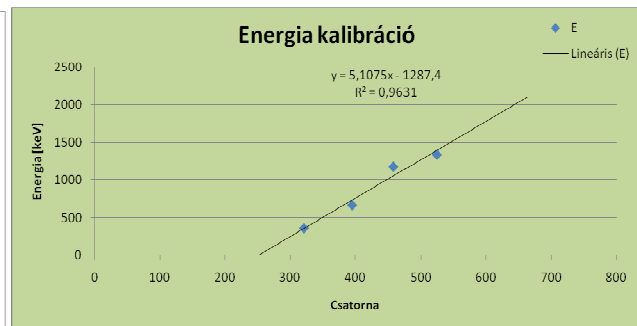
6. ábra. Az elkészült detektorrendszer prototípus blokk-sémája

2. táblázat. A detektorrendszer paraméterei

PIN dióda érzékeny felülete	10mm x 10mm
CsI(Tl) kristály csatlakozó felülete	10mm x 10mm
Előfeszítés	24V
Detektor mérete [mm]	10x10x60



7. ábra. 6cm³-es kristály, 24V-os előfeszítésnél felvett, normált teljesenergia-csúcsok



8. ábra. Energia kalibráció simítás illetve második derivált meghatározása után (6cm³-es kristály, 24V előfeszítés)

A spektrumok felvétele egy 1024 csatornás spektrum analízátorral történt. Fontos megemlíteni, hogy a mérés során a diszkriminációs szintet mindig a főcsúcs alá, azaz a Compton-él végére állítottuk. Valamint a kirajzolt spektrumok háttérlevonással készültek, azaz levontuk a csúcs alatti alapvonal trapézzal közelített hozzájárulását a beütésekből.

JELFELDOLGOZÁS

A detektorok fontos tulajdonsága a félértékszélesség, ami a detektor energia felbontóképességének mértéke. Értéke a teljesenergia-csúcs szélessége a maximális beütésszám felénél. A szcintillációs detektoroknál a teljes energiacsúcsokhoz tartozó félértékszélességek a gamma-energia függvényében változnak.

Mielőtt az egyes csúcsok félértékszélességét meghatároznánk, a spektrumokat simítani kell, hogy a nukleáris bomlás statisztikus szórásának hatását csökkentsük. A simításra kiválóan alkalmas a konvolúciós szűrés, Savitzky és Golay módszere szerint. Lényege, hogy a nyers adatsort egy megfelelő függvénnyel konvolválják [7]. A simított pontok az alábbi módon adódnak:

$$y_s(k) = \sum_{j=-n}^{+n} c_j^{(2n)} y(k+j) \tag{3}$$

ahol

$y_s(k)$ – a k-adik szűrt pont

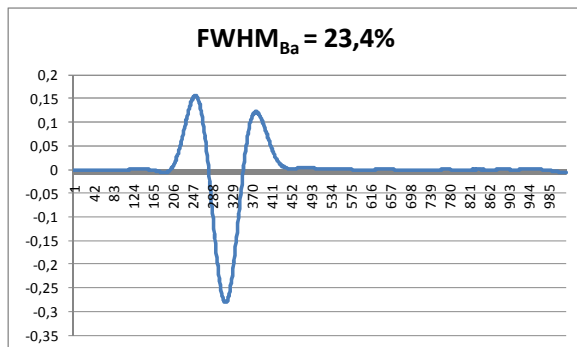
$y(k)$ – a k-adik eredeti, mért pont

$c_j^{(2n)}$ – a simító függvény, amely 2n+1 pontból áll

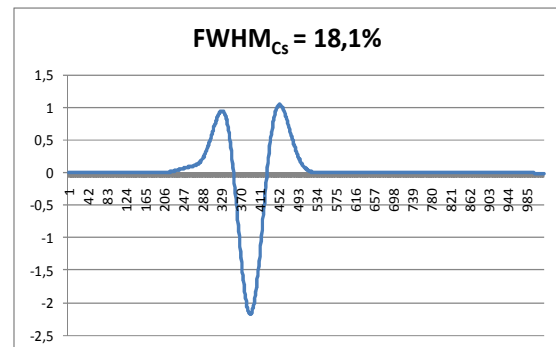
2n – a simítás ún. ablakszélessége

Különböző alakú függvényeket lehet használni, szimmetrikusakat és nem szimmetrikusakat egyaránt. Az egyik legelterjedtebben használt a Savitzky és Golay által közölt szimmetrikus simító függvény. Az algoritmus alapján egy y_k eredeti adatpont szűrésére olyan simító függvényt használnak, amellyel konvolválva az adatpont $2n$ környezetében lévő „zajos” adatsort, az eredmény egyenértékű azzal, mintha adott rendű polinomot illesztettek volna a kérdéses számú zajos pontra a legkisebb négyzetek módszerével. A függvényablakot tovább léptetve (mozgatva) az y_{k+1} adatpontra is lefuttatható az algoritmus, mely a többi adatpontra is hasonlóan megismételendő.

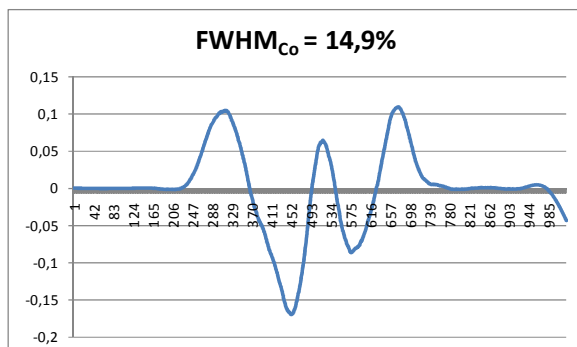
Az eredeti spektrumoknak a csúcsok tartományában (ROI, region-of-interest) végzett simításával és kétszeres deriválásával kapott adatsorok láthatók a 9-11 ábrán.



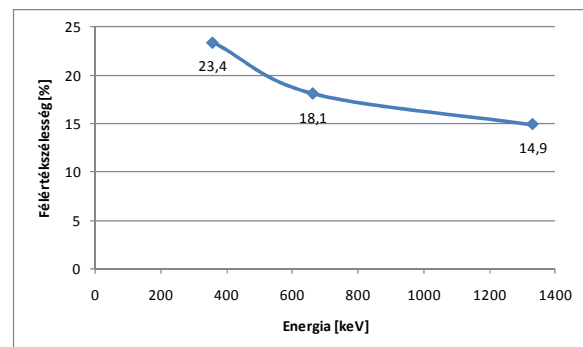
9. ábra. ^{133}Ba spektrum második deriváltja



10. ábra. ^{137}Cs spektrum második deriváltja



11. ábra. ^{60}Co spektrum második deriváltja



12. ábra. A félértékszélesség energiafüggése

A csúcsok félértékszélessége jellemző a detektálási folyamatok révén kialakuló vonalszélesedésre. A grafikonon kiírt félértékszélesség a maximális nettó beütésszám felét képező beütésszámok között mérhető távolság, a csúscentrumra vonatkoztatott relatív számként kifejezve. Gauss-csúcsalakot feltételezve a félértékszélesség pontjai kb. 1,18-szor távolabb vannak a centrumtól, mint a 9.-11. ábrákon látható második deriváltak zérushelyei által is jelzett szórás pontjai. A 12. ábrán látható, hogy a PIN diódás eszköz prototípusával kapott félértékszélesség energiafüggése hasonló az irodalomban publikált detektorokéhoz. Sajnos ezek az értékek, az irodalomban ismertetett detektorok félértékszélességénél valamivel nagyobbak, azonban véleményünk szerint további konstrukciós megoldásokkal, illetve a kristály és a dióda jobb fényillesztésével ez tovább javítható. Erre a továbbfejlesztésre szükség van a mennyiségi kiértékelés bizonytalanságának csökkentésére.

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben felvázoltunk egy terepi körülmények között is használható, energiaszelektív detektorrendszert. Az eszköz várhatóan minden olyan helyen bevethető lehet, ahol a méret, a fogyasztás, a kompakt kivitel fontosabb a vizsgálandó minta pontos, mennyiségi izotóp összetételének meghatározásánál. Ha a későbbiek folyamán a megvalósított detektorrendszert összekapcsolnánk egy kompakt, kisméretű többcsatornás analizátorral (digitális jelfeldolgozóval), kijelzővel látnánk el, és mindez a terepi körülményekhez igazodó külső borítást kapna, létre jönne egy olyan eszköz, amely robusztusságát és energiaszelektivitását tekintve felveszi a versenyt a jelenleg használatos terepi eszközökkel.

IRODALOM

- [1] [1] Nagy Lajos György – Nagyné László Krisztina: Radiokémia és izotóptechnika, Műegyetemi Kiadó, 1997
- [2] [2] http://ric.uthscsa.edu/personalpages/lancaster/DI2_Projects_2003/Photodiode_vs_PMT.pdf, letöltés dátuma: 2010.08.08
- [3] [3] Szentiday Klára: Félvezető fotódetektorok, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977
- [4] [4] John Valentin, Valentin Jordanov, David Wehe, Glen Knoll: Charge calibration of CsI(Tl)/photodiode spectroscopy systems, 1992, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A, Vol A314, pp. 119-124
- [5] [5] Helmuth Spieler: Semiconductor Detector Systems, Oxford University Press, Oxford, 2005, ISBN 0-19-852784-5
- [6] [6] C. D. Motchenbacher, F. C. Fitchen: Kis-zajú elektronikus áramkörök tervezése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977
- [7] [7] Savitzky A., Golay M.J.E: Smoothing and differentiation of data by simplified least square procedures, 1964, Analytical Chemistry, vol. 36, pp. 1627-1639

A közlemény a SOMOS Alapítvány támogatásával készült

A kiterjesztett INES skála alkalmazása hazai radiológiai eseményekre

Ballay László, Elek Richárd, Vida László, Turák Olivér
Országos „Frédéric Joliot-Curie” Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézet
1221 Budapest, Anna u. 5.
ballay.laszlo@osski.hu

Title – Application of extended INES scale for domestic radiological events

Abstract – The International Nuclear and Radiological Event Scale (INES) extended for radiological events is applicable for events other than nuclear ones to judge reliably the security significance of events concerning radioactive sources, accelerators and transportation. With the support of HAEA we have done the adaptation of INES scale’s national adaptation, in the form of a study: „The Development of the National Radiological Event Scale”. One of the study’s accomplishments was a brief guide for the rating of events, adapted for the national regulatory background, for the use of the radiation protection network’s regulatory personnel and it’s support organization, and for National Service for Radiation Health Emergency Preparedness. In this study we have collected and rated 22 national radiological events of the last forty years, thus we have created the database for the national radiological events.

Keywords: INES, radiological events, orphan sources, unintended irradiation, database of radiological INES events

Kivonat – A radiológiai eseményekre kiterjesztett Nemzetközi Nukleáris és Radiológiai Esemény Skála (INES) a nukleáris eseményeken túlmenően alkalmas a radioaktív sugárforrásokkal, gyorsítókkal és szállítással kapcsolatos események biztonsági jelentőségének megbízható megítélésére. Az OAH által támogatott „nemzeti radiológiai eseményskála kidolgozása” című tanulmánnyal a nemzetközi INES skála hazai adaptációját végeztük el. A tanulmány egyik eredménye a hazai sugáregészségügyi hatósági hálózat és háttérintézménye (OSSKI-OSKSZ) részére egy tömör, a hazai sugárvédelmi szabályozási háttérhez adaptált besorolási útmutató kidolgozása volt. A tanulmány során összegyűjtöttük és besoroltuk az utóbbi negyven év 22 hazai radiológiai eseményét, megteremtve ezzel a hazai radiológiai események eddig hiányzó adatbázisát.

Kulcsszavak: INES, radiológiai események, gazdátlan sugárforrás, nem tervezett sugárterhelés, radiológiai INES események adatbázisa

BEVEZETÉS

A nukleáris események biztonsági jelentősége egységes megítélését megalapozó 7 szintű INES (International Nuclear Event Scale) skálát a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) 1990-ben még kísérleti jelleggel vezette be. A bevezetés jó időben és jó irányban megtett lépés volt. A lakosság és a média azonnali és következetes tájékoztatása, továbbá nem utolsósorban szakmai kommunikáció céljaira az INES skála olyan sikeres eszköznek bizonyult, hogy rövid időn belül számos ország alkalmazni kezdte. Mára az alkalmazó országok száma közel 70. A nukleáris létesítményekben bekövetkező események besorolására Magyarország 1991. július 1.-je óta alkalmazza az INES skálát. A hazai INES koordinátor hivatala az OAH.

AZ INES SKÁLA KITERJESZTÉSE RADIOLÓGIAI ÉS SZÁLLÍTÁSI ESEMÉNYEKRE

Bevezetése óta az INES skálát a NAÜ irányításával nemzetközi szakértők csoportjai folyamatosan fejlesztik. Az INES skála alkalmazásához a NAÜ ad ki felhasználói kézikönyveket. Az 1992-es első kiadás után a NAÜ 2001-ben, majd legutóbb 2009-ben ismét kiadta a felhalmozódó tapasztalatok alapján átdolgozott felhasználói kézikönyvet. Az átdolgozott kiadásokban az INES skála megnevezése Nemzetközi Nukleáris és Radiológiai Esemény Skála (INES), jelezve, hogy a skála alkalmazását kiterjesztették az ionizáló sugárzás nem nukleáris alkalmazási területeinek és a radioaktív anyagok szállításának rendkívüli eseményeire is. A kiterjesztett skála tehát magában foglalja a radioaktív sugárforrások gyakorlati alkalmazásainak teljes spektrumát, az elvesztett vagy talált sugárforrások eseteit, a nyitott radioaktív készítményekkel végzett tevékenységeket, továbbá a szállítások során, valamint a gyorsítókkal bekövetkező eseményeket is. A nemzetközi eseményskála jelenleg még nincs kiterjesztve a betegek rendellenes orvosi sugárterhelésének és a saját vagy mások egészségét veszélyeztető szándékos károkozásnak az eseteire.

A NAÜ 2009-ben kiadott 150 oldalas INES felhasználói kézikönyve [1] (a továbbiakban Kézikönyv) egy dokumentumban foglalja össze az atomenergia nukleáris és nem nukleáris alkalmazása során bekövetkező események besorolására vonatkozó útmutatásokat. A Kézikönyv az Országos Atomenergia Hivatal (OAH) fordításában magyarul is hozzáférhető.

NUKLEÁRIS ÉS RADIOLÓGIAI ESEMÉNYEK BESOROLÁSA AZ INES SKÁLÁN

Az eseményeket a skálán hét szinten osztályozzák. A skála logaritmikus, azaz egy adott szintű eseménynél a skálán eggyel magasabb szintre sorolt esemény súlyossága közelítőleg egy nagyságrenddel jelentősebb. A legsúlyosabb nukleáris esemény a Csernobilban 1986-ban bekövetkezett katasztrófális baleset volt, aminek a súlyossága elérte a 7. szintet. A közelmúlt története, a Fukushima Daiichi atomerőmű blokkjaiban bekövetkezett baleset és nagymértékű környezeti kibocsátás, aminek a következményei kevésbé katasztrófálisak, de a jelenlegi javaslat szerint súlyossága eléri a 7. szintet

Az INES skála egységes, nincs külön a nukleáris és külön a radiológiai eseményekre alkalmazható skála. Az egységes skálán az eddigi legsúlyosabb (ami egyúttal az elképzelhető legsúlyosabb) radiológiai baleset az 5. szintet érte el (Goiania, Brazília, 1987). Magyarországon a 3. szintnél súlyosabb eseményre az elmúlt 35-40 évben szerencsére nem került sor.

AZ INES RADIOLÓGIAI ÉS SZÁLLÍTÁSI ESEMÉNYEKRE TÖRTÉNŐ HAZAI ADAPTÁCIÓJA

Magyarországnak közel két évtizede van INES koordinátora, mégis, egészen a közelmúltig, csak a nukleáris események jelentésének volt a koordinátorig jól kiépített csatornája. A nem nukleáris események az OAH-ig csak lassan jutottak el. Nemzetközi adatbázisban is szereplő két eset kivételével a hazai radiológiai eseményeknek nem volt adatbázisuk és INES besorolásuk. A sugáregészségügyi hálózat, nevezetesen a hatóságok (Sugáregészségügyi Decentrumok) és az Országos „FJC” Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézet (OSSKI), és ezen belül az OSSKI Országos Sugáregészségügyi Készenléti Szolgálat (OSKSZ), az INES skála alkalmazásával nem foglalkoztak. Ezen a helyzeten szándékozott változtatni a „nemzeti radiológiai eseményskála kidolgozása” című OSSKI tanulmány, ami „az atomenergia biztonságos alkalmazásának hatósági ellenőrzését szolgáló műszaki megalapozó tevékenység (ABA MMT)” program keretében az OAH támogatásával (OAH/NBI-ABA-22/10-M) 2010-ben készült.

Köszönetemet szeretném kifejezni azért, hogy az OSSKI tanulmány, ezen belül a besorolási útmutató elkészítéséhez az OAH, személy szerint Nyisztor Dániel végig jelentős segítséget nyújtott.

Egy „nemzeti radiológiai eseményskála” nem lehet más, mint a nemzetközi skála adaptációja. A nemzeti adaptáció bizonyos fokig szükséges lépés, mivel a Kézikönyv besorolási kritériumai között vannak olyanok, amelyek számértéke az adott ország hatósági előírásaitól függ. Nyilvánvalóan ilyen a „hatósági éves dóziskorlát”, vagy a „dolgozók dózismegszorításán felüli besugárzása”. A nemzetközi skála létezése még bizonyos nemzeti megközelítések alkalmazását sem zárja ki. Az eseményskála nemzeti adaptációja során azonban minden országnak tartani kell magát ahhoz az alapelvhez, hogy a nemzeti sajátosság beépítése csak olyan eseményskálát eredményezhet, ami a Kézikönyv besorolási elveivel teljes összhangban marad.

A „nemzeti radiológiai eseményskála kidolgozása” tanulmány keretében elkészítettünk egy viszonylag tömör, 19 oldalas besorolási útmutatót (a továbbiakban BÚ). Az elmúlt 35-40 év radiológiai eseményei többségének az összegyűjtésével és INES besorolásával létrehoztuk a hazai radiológiai események adatbázisát. A hazai események gyűjtése nem terjedt ki a hatvanas évekre vagy a még korábbi eseményekre.

A BÚ a Kézikönyv besorolási útmutatásait követi. A BÚ célja, hogy a hazai felhasználók, ezen belül elsősorban a sugárvédelmi hatóságok és az OSKSZ munkatársainak a kezébe olyan besorolási útmutatót adjon, ami alkalmas a tipikus radiológiai és szállítási események gyors, előzetes besorolására. Törekedtünk arra, hogy kiépítsük azt az információs láncot, ami mentén az esemény rövid esettörténete és előzetes INES besorolása, az OSKSZ közreműködésével, a hazai INES koordinátorhoz minél rövidebb időn belül eljut. Az események „hivatalos” INES besorolása és skála fölötti események NAÜ felé történő továbbítása már az INES koordinátor feladata.

A cikkel arra is fel szeretnénk hívni a figyelmet, hogy az események INES koordinátorhoz történő továbbításának, a keletkező adatok kezelésének hazai szabályozási háttere még erősen hiányos.

Az INES kézikönyv sugáregészségügyi hálózat számára készülő adaptációja során arra törekedtünk, hogy a 150 oldalas Kézikönyvből minél tömörebb, de a kitűzött célnak még megfelelő BÚ készüljön. Ennek érdekében a BÚ nem tartalmazza a nukleáris vonatkozásokat, és a radiológiai események besorolási elvei közül azokat, amelyekre az utóbbi 40 év hazai eseményeinek a besorolásához nem volt szükség és az esemény bekövetkezése hazai viszonyaink között valószínűtlen. Ebből az elvből az következik, hogy előfordulhat olyan nagyon váratlan, a hazai körülmények között valószínűtlen esemény, aminek a besorolásához a BÚ nem lesz alkalmas. Ebben az esetben a Kézikönyvet kell majd használni.

A BÚ semmilyen tekintetben nem tér el a Kézikönyv besorolási elveitől, ugyanakkor tartalmaz egyszerűsítéseket, néhány kevésbé lényeges kiegészítést és egy nemzeti kiegészítést, az ún. „feljegyzési szintet”. A biztonsági jelentőség nélküli (skála alatti/0. szint) események közül ugyanis a BÚ „feljegyzési szint” bevezetésével igyekszik kiemelni és pl. képzési célból megőrizni azokat az eseményeket, amelyeknek a szakterületen belül biztonsági tanulságai vannak.

A HETVENES ÉVEKTŐL BEKÖVETKEZŐ HAZAI RADIOLÓGIAI ÉS SZÁLLÍTÁSI ESEMÉNYEK

A hazai radiológiai események gyűjtését, esettanulmány szintű feldolgozását, és INES besorolását a hetvenes évek eseményeitől kezdődően végeztük el. A legalább INES 1. szintet elérő súlyosságú események adatbázisba történő felvételét nagy valószínűséggel hiánytalanul elvégeztük. Az elmúlt 40 évből is több olyan eseményről van azonban tudomásunk, amelyek ahhoz, hogy bekerüljenek az adatbázisba még nem elég jól dokumentáltak. (Fúrólukba

szakadt források, LDR afterloading technika sugárforrásai, szennyezések, stb.). Hiányoznak az adatbázisból a hetvenes éveket megelőző események. Közöttük olyan nevezetes ügyek, mint a KBFI B szintű izotóplaboratóriumában történt nagymértékű Sr-90 szennyezés, vagy a Pestvidéki Gépgyárban alkalmazott rádiumos világító festékes technológia helyszínen elásott hulladékaitól származó talajszennyezés, vagy a Budapest XI. ker. Bártfai utcai épület tóriumos szennyezés miatti lebontása, stb. A rádium korszak hazai nevezetes eseményeinek a dokumentálása is meglehetősen esetleges és szétszórta. A jelenlegi adatbázis feltöltését a felsorolt hiányosságok pótlásával folytatni kívánjuk.

A hetvenes évektől napjainkig 23 esemény feldolgozását végeztük el. Az események közül három érte el az INES 3, három az INES 2, nyolc az INES 1 szintet. Kilenc esemény skála alatti/0. szintű, tehát biztonsági jelentőség nélküli eseménynek értékelhető. A „biztonsági jelentőség nélküli”, eseményekre általunk bevezetett feljegyzési szint nyolc olyan eseményt emelt ki, és helyezett az adatbázisba, mint amelyeknek a szélesebb szakmai közvélemény számára is érdekes körülményei, biztonsági tanulságai vannak. A skála alatti események közül a cikk táblázatai a feljegyzési szintű nyolc eseményt, 0. szintű eseménynek jelölve tartalmazzák. Jelen cikk táblázatai tehát összesen $23-1=22$ eseményt tartalmaznak. A továbbiakban vázlatosan ismertetjük a hazai adatbázis alapját képező ezen 22 eseményt és azok besorolását.

Az események hatása és jelentősége három besorolási szempontrendszer keretében vizsgálható. Amennyiben egy eseményre több szempontrendszer is alkalmazható, az esemény osztályát az értékelések után kapott legmagasabb besorolás határozza meg.

1. BESOROLÁS AZ „EMBEREKRE ÉS KÖRNYEZETRE VALÓ HATÁSOK” ALAPJÁN

Ezt a szempontrendszert valós eseményekre kell alkalmazni. Ebben a szempontrendszerben valós eseménynek az emberek nem tervezett (rendkívüli vagy baleseti) sugárterhelésével járó, és/vagy nagy mennyiségű radioaktív anyag környezetbe kerülésével járó eseményeket nevezzük.

A legsúlyosabb környezeti hatások a környezetbe kerülő és ott szétterjedő, nagyon nagy mennyiségű nyitott radioaktív anyagoktól várhatók. A radiológiai események közül súlyos környezeti kihatással járhatnak a környezetbe került és ott nyitottá váló nagy aktivitású zárt sugárforrások, az illékony sugárforrás beolvasztásából származó kibocsátások, valamint a szállítás során bekövetkező balesetek.

Az eddigi (és elképzelhető) legsúlyosabb radiológiai sugárbaeset során, a már említett INES 5. szintű brazíliai eseménynél (Goiania, 1987.) sugárterápiás cézium forrás nyitottá válása miatt került nagy mennyiségű radioaktív anyag a környezetbe. A környezet kisebb elszennyezésével járó esemény, pl. zárt sugárforrás nyitottá válása Magyarországon is előfordult, azonban olyan mértékű kibocsátásra, aminek biztonsági jelentősége lett volna, a hetvenes évek óta nem került sor.

A valós események közül a legfontosabbak, amelyek emberek nem tervezett sugárterhelését okozzák. A személyekre vonatkozó tényleges következmények osztályozásának legegyszerűbb módja az elszennvedett dózis alapján történhet. Ez az osztályozás a leginkább egyértelmű és itt lehet leginkább tartani a logaritmikusságot. A legnagyobb súlyú (legmagasabb INES osztályú) események mindig emberek besugárzásával járó súlyos sugárbaesetek.

A félreértések elkerülése érdekében hangsúlyozni kell, hogy a dózis alatt minden esetben az adott eseményhez tartozó, nem tervezett besugárzás dózisértékét kell érteni.

1.1. Besorolás az elszennvedett dózisok alapján

Ennek a közleménynek már csak terjedelmi okokból sem lehet a célja az esetenként nagyon szerteágazó és nagyon aprólékosan kidolgozott, a Kézikönyvben 150 oldalon kifejtett besorolási szempontrendszer ismertetése, az elszennvedett dózisok alapján történő besorolás esetében mégis kivétel tehető. A szakmai közvélemény számára ez a legfontosabb és leginkább ismert típusú besorolás, aminek a súlyponti elemei, jelentős egyszerűsítéssel ugyan, de röviden ismertethetők.

- 5. szint, egynél több személy halálával járó esemény besorolása.
- 4. szint a minimális besorolás egy személy halálával járó eseményre.
- 3. szint a minimális besorolás determinisztikus hatással járó eseményre.
- 2. szint a minimális besorolás olyan eseményre, ami a lakosság egy tagjának 10 mSv-t meghaladó effektív dózisu besugárzását; vagy egy dolgozónak a hatósági éves dóziskorlátoknál magasabb besugárzását okozza.
- 1. szint a minimális besorolás olyan eseményre, ami a lakosság egy tagjának a hatósági éves dóziskorlátokon felüli besugárzását; vagy egy dolgozónak a dózismegszorító(ko)n felüli besugárzását okozza.

Megjegyzés: Magyarországon a dolgozókra vonatkozóan nincs érvényes (tehát az Országos Tisztifőorvosi Hivatal által kiadott) dózismegszorítás. A munkahelyi sugárvédelmi szabványokban ugyanakkor van dózismegszorítás funkciójú mennyiség: általános tervezési határérték a 100 mSv/5 év dóziskorlát időarányos részének a 3/10 része, tehát 6 mSv/év effektív dózis. A hazai sugárvédelmi előírásokhoz adaptált INES skála szerint tehát:

„1. szint a minimális olyan eseményre, ami a lakosság egy tagjának a hatósági éves dóziskorlátokon felüli besugárzását; vagy egy dolgozónak 6 mSv effektív dózison felüli besugárzását okozzák.”

1.2. Legalább INES 1. szintű nem tervezett besugárzással járó hazai események

1. táblázat. Jelentősebb személyi dózisokkal járó hazai események

Év	Város	S.forrás Aktivitás	Felhasználási terület	Személyi dózis	INES szint
1977	Győr	Ir-192 nincs információ	Ipari radiográfia Árnyékolatlan sugár- forrás közúti szállítása	1,2 Gy egésztest	3
1984	Tiszafüred	Ir-192 1,11 TBq	Ipari radiográfia Kézbevert sugárforrás	20-30 Gy, ujsérülés	3
1999	Százhalombatta	Ir-192 300 GBq	Ipari radiográfia Árnyékolatlan sugár- forrás szállítása	2 radiográfus 1 fő 350 mSv és 1 fő 200 mSv	2
1999	Paks	Ir-192 70 GBq	Ipari radiográfia Elvesztett sugárforrás	3 takarító, max. 6 mSv/fő 2 munkás, max. 2,5 mSv/fő	1
2008	Budapest	Co-60 280 TBq	Sugárterápia Kobaltágyú	75 mSv effektív dózis	2
2011	Pécs	18 MV	Sugárterápia Lineáris gyorsító	20 mSv	1

Az adatbázisunkba felvett 23 hazai esemény közül az elszenvedett dózisos alapján hatot lehetett besorolni. A fenti táblázat első két sorában feltüntetett két legsúlyosabb hazai eseményt a nemzetközi adatbázisok már korábban is feltüntették. Erről a két sugárbalesetről először az UNSCEAR 2000. évi kiadványa közölt adatokat.

A „győri esemény” ipari radiográfiai sugárforrással bekövetkezett szállítási esemény, amennyiben a legnagyobb sugárterhelést kapott radiográfus a besugárzást árnyékolatlan radiográfiai sugárforrás hosszú közúti szállítása közben szenvedte el.

Tiszafüreden a radiográfus a sugárforrást befogó eszköz, az ún. „torpedó” elgörbült rugós részét úgy próbálta megjavítani, hogy a torpedó sugárforrást tartalmazó végét bal kezével megfogva jobb kezével hajlítgatta a rugós részt. A bal kéz három sérült ujjja közül az egyiknek az ujjpercét el kellett távolítani.

Százhalombattán a felvét elkészítő eszköz (defektoszkóp) kapkodó, szabálytalan szétszerelése következtében a sugárforrást tartalmazó „torpedó” a kivezető gégecsőben maradt. A szétszerelt eszközöket, közöttük az árnyékolatlan forrást „rejtő” gégecsövet, a gépkocsi rakfelületére helyezték. A hiba felfedezéséig a gépkocsival több rövid utat tettek meg az üzemi területen belül és annak közelében. A dózismérők szabálytalan viselése miatt a sugárterhelés mértékét biodozimetriai módszerekkel kellett közelíteni.

Pakson a radiográfusok nem vették észre, hogy a (szerencsére kis aktivitású) torpedó leoldódott. Takarítók a többi szeméttel együtt összegyűjtötték és a szeméttárolóba helyezték, ahol a sugárforrást másnap délelőtt megtalálták. Az esemény során néhány lakossági kategóriájú személy az éves egészséges dóziskorlátot (1 mSv effektív dózis) meghaladó sugárterhelést kapott.

Budapesten egy kobalt sugárterápiás kezelőben túl korán indították a besugárzást. A beteget pozicionáló asszisztens még nem hagyta el a kezelőt és az oldalirányú besugárzás miatt mellkasának nagy részét direkt expozíció érte. A film-dózismérő jelzése 140 mSv személyi dózisegyenérték volt. A biodozimetriai eredmények 100 mSv effektív dózis alatti sugárterhelést valószínűsítettek. A film-dózismérő jelzése és a 30 cm x 40 cm mezőméret alapján kijelenthető volt, hogy az asszisztens sugárterhelése legfeljebb 75 mSv effektív dózis lehetett.

2. BESOROLÁS A „LÉTESÍTMÉNYI MÉRNÖKI GÁTAK ÉS SUGÁRVÉDELMI KORLÁTOK” ALAPJÁN

Ez a szempontrendszer csak a potenciális radioaktív kibocsátás szempontjából jelentős létesítményekben előforduló, „valós” eseményekre alkalmazható. Magyarországon az ipari nagybesugárzók és a zárt sugárforrást gyártó A szintű izotóplaboratóriumok tekinthetők e szempontból jelentős létesítménynek.

Ebben a szempontrendszerben „valós” események közé a következőket soroljuk. Amikor meghibásodás, emberi mulasztás, stb. következtében a sugárbiztonság jelentősen sérül, emiatt az üzemen belül nagy intenzitású sugárzási tér, és/vagy jelentős mennyiségű radioaktív kibocsátás lép fel, de a súlyos sugárbalesetet megakadályozó elsődleges gátak (műszaki megoldások, árnyékolások, védelmi eszközök), épek maradnak, és a biztonságának elsőbbséget adó, megfelelő (biztonsági) kultúrának köszönhetően az eseménynek komolyabb környezeti vagy személyi következményei (dózisai), nincsenek.

2. táblázat. Jelentős létesítményben bekövetkező hazai események

Év	Város	Sugárforrás Aktivitás	Felhasználási terület	A besorolás alapja	INES szint
1983	Buda- pest	Co-60 720 TBq	Terápiás besugárzó sugárforrás gyártás	Kikerült radioaktív anyag néhány GBq	0
1992	Buda- pest	Co-60 2,7 PBq	Ipari nagybesugárzó	Sugárzási tér 1 m-re a forrástól > 1 Sv/h	3

1983. Terápiás kobalt sugárforrások gyártásának alapanyagát tartalmazó tartályban túlnyomás keletkezett, emiatt a tartály fedelének lecsavarásakor a rossz minőségű, poros alapanyag a forró fülkébe „kifűjt”, majd onnan kijutva elszennyezte az üzem ellenőrzött területét.

1992. A meghibásodás vizes tárolású, panoráma besugárzó berendezéssel történt, nevezetesen a berendezés sugárforrásokat tartalmazó két tartókeretének egyike a kiemelési folyamat közben, nem sokkal a vízszint alatt, elakadt. A labirintus belső végénél elvégzett mérések szerint az elakadt sugárforrások miatt a teremben nagy intenzitású sugárzási tér alakult ki. Az elakadt tartókeret drótkötélről történő levágását gondosan megtervezték, begyakorolták és a terveknek megfelelően végrehajtották. Ennek köszönhetően ezt a potenciálisan nagy kockázatú eseményt sikerült „valós következmények” nélkül elhárítani. Az elhárítók személyi dózissai jelentéktelenek voltak, illetve egy személy sugárterhelése megközelítette a 2 mSv effektív dózist.

3. BESOROLÁS A „MÉLYSÉGBEN TAGOLT VÉDELEM” ALAPJÁN

Az első két szempontrendszer alapján egy valós következmény nélküli esemény csak skála alatti/0. szintű eseményként lenne osztályozható. A tényleges következmények nélküli, más szóval nem valós események a baleset valószínűségének növekedésével járnak. Ezeket az eseményeket, a lehetséges következményeket is figyelembe vevő szempontrendszer, a mélységben tagolt védelem szempontrendszerének az alkalmazásával lehet besorolni.

Ahol súlyos sugárbaleset következhet be, ott a hatékony sugárbiztonság csak többszörös biztonsági intézkedéssel teremthető meg, amelyet „mélységben tagolt védelemnek” neveznek. A biztonsági intézkedések lehetnek műszaki megoldások (pl. egy radiográfiai munkatartó konstrukciójának a biztonsága), lehetnek sugárvédelmi gátak (lokális és nem lokális árnyékolások), védelmi eszközök (kényszerkapcsolatok, fénnel, hanggal riasztók, vészleállítók, stb.) egyéni védőeszközök, sugárvédelmi és egyéb biztonsági előírások (rendeletek, szabványok, MSSZ, hatósági előírások). Az olyan létesítmények esetében, mint a nagy aktivitású, zárt sugárforrást használó orvosi és ipari besugárzók, vagy a lineáris gyorsítók, a megfelelő sugárbiztonságról többszörös biztonsági intézkedések gondoskodnak.

3.1. Radioaktív sugárforrásokkal kapcsolatos események

Az események besorolásánál a radioaktív sugárforrásoknak a [2] NAÜ kiadvány szerinti kategorizálását kell alkalmazni. A kiadvány a sugárforrásokat a legsúlyosabb lehetséges következmények szerint kategorizálja. A legsúlyosabb lehetséges (az összes biztonsági intézkedés elvesztése esetén bekövetkező) következményeket a sugárforrás aktivitása és az adott sugárforrásra vonatkozó D értékből ([3] és [4]) képzett A/D hányados alapján kell meghatározni. A D értékek olyan aktivitás értékek, amelyek fölött a sugárforrás veszélyesnek

tekintendő, mivel súlyos, determinisztikus hatásokat okozhat, ha nem kezelik megfelelő biztonsággal és védettséggel.

A gyakori alkalmazási területek tipikus sugárforrásaira és aktivitás értékeire képezve az A/D hányadosokat, a 3. táblázat szerinti kategóriákat kapjuk.

3. táblázat. Gyakori alkalmazások sugárforrásainak tipikus kategorizálása

A/D arány {kategória}	Alkalmazási terület	Tipikus izotópok
A/D ≥ 1000 {1}	Besugárzók (ipari, orvosi, laboratóriumi)	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs
	Gamma kés	⁶⁰ Co
10 ≤ A/D < 1000 {2}	Ipari gamma radiográfia	⁶⁰ Co, ⁷⁵ Se, ¹⁹² Ir
	Nagy/közepes dózisteljesítményű brachyterápia	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ¹⁹² Ir
1 ≤ A/D < 10 {3}	Nagy aktivitású zárt sugárforrást alkalmazó, ipari mérő és szabályozó berendezések	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs
	Geofizikai mérések (karotázs)	²⁴¹ Am/Be, ¹³⁷ Cs,
0,01 ≤ A/D < 1 {4}	Vastagságmérők, szintmérők	⁸⁵ Kr, ⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs, ²⁴¹ Am, ¹⁴⁷ Pm, ²⁴⁴ Cm
	Hordozható mérőműszerek (pl. nedvesség/sűrűség mérők)	¹³⁷ Cs, ²²⁶ Ra, ²⁴¹ Am/Be, ²⁵² Cf
	Statikus eliminátorok	²¹⁰ Po, ²⁴¹ Am
A/D < 0,01 {5}	Alacsony dózisteljesítményű brachyterápia (szemlemezek és beültetett sugárforrások)	⁹⁰ Sr, ¹⁰⁶ Ru/Rh, ¹⁰³ Pd
	Röntgen fluoreszcenciás eszközök	⁵⁵ Fe, ¹⁰⁹ Cd, ⁵⁷ Co
	Elektronbefogásos detektorok (ECD)	⁶³ Ni, ³ H
	Mössbauer spektrometria	⁵⁷ Co
	Pozitron emissziós tomográfia (PET) ellenőrző zárt sugárforrásai	⁶⁸ Ge

A felsorolt alkalmazási területek közül hazánkban (is) a helyszíni ipari gamma radiográfia sugárforrásaival történik, történt a legtöbb, „nem valós” (azaz jelentős személyi sugárterheléssel, környezet szennyezéssel nem járó), tehát csak a „mélységben tagolt védelem” szempontrendszerével kiértékelhető rendkívüli esemény is. Sok közöttük a biztonsági jelentőség nélküli, tehát INES 0. szintű esemény. Ugyanakkor tanulságaik miatt a skála alatti radiográfiai események többségét is fel kell jegyezni. Ez az alkalmazási terület a leginkább balesetveszélyes, ahol az oktatásnak, különösen a megtörtént események oktatásának biztonságnövelő jelentősége van.

4. táblázat. A helyszíni ipari gamma radiográfia 2-es kategóriájú sugárforrásaival bekövetkező, egy sugárbaesetet vagy jelentős környezetszennyezés kockázatát jelentősen növelő, illetve nagyobb lakossági érdeklődést kiváltó hazai események.

Év	Város	Sugárforrás Aktivitás	INES szint	Megjegyzés
1991	Győr	Ir-192 1,1 TBq	0	Lakótelepen leoldódott forrás. Élénk helyi lakossági és média érdeklődés
2001	Duna- újváros	Ir-192 800 GBq	0	Üzemcsarnokban leoldódott forrás. Szakszerűen eljárva gyorsan felfedezték, szakcéggel elszállították.
1976	Budapest	Ir-192	1	Lengyel gyártmányú radiográfiai sugárforrás(ok) nyitottá válása. Amire felfedezték számos eszköz szennyeződött
1988	Diósgyőr	Cs-137	1	Egyszeres alumínium tokozású, több évtizede a Szovjetunióban gyártott radiográfiai forrás(ok) vált(ak) nyitottá. Mintegy 10 GBq nagyságrendű, üzemi területen belül maradó szennyezés.
2009	Szeged	Ir-192 1 TBq	0	Radiográfiai sugárforrás vált nyitottá. Időben felfedezték.

A sugárforrásokkal kapcsolatos események másik fontos csoportja a gazdátlan sugárforrásokhoz köthető. Gazdátlan sugárforrások több alkalommal is előkerültek, de személyi sérülést egyetlen esetben sem okoztak. Az utóbbi évtizedekben elvesztett, elloptott sugárforrásokkal kapcsolatban sem került sor jelentősebb hazai eseményre. Geofizikai forrásokkal előfordulhat, hogy a mélyben rekednek és a visszaszerzésükről le kell mondani.

5. táblázat. Gazdátlan és elvesztett sugárforrásokkal kapcsolatos események.

Év	Város	Sugárforrás Aktivitás {Kategória}	INES szint	Megjegyzés
1997	Székes- fehérvár	Co-60 ≈80 MBq {5}	0	Üzemi sugárkapu által feltartóztatott tehervagon 20 t alumínium hulladékából előkerülő zárt sugárforrás
1999	Budapest	Co-60 ≈3-5 GBq {4}	1	Határról visszaküldött kamion ócskavas szállítmányából előkerülő zárt sugárforrás
2006	Budapest	Cs-137 ≈2-3 GBq {4}	2	Felügyelet nélkül hagyott trezorból véletlenül előkerülő brachyterápiás sugárforrás. A biztonsági kultúra súlyos megsértése
2000	Pécs	Cs-137 3,5 GBq {4}	1	Fúróluk szondázás közben leszakadt geofizikai sugárforrás, amelynek a visszaszerzéséről lemondtak

3.2. Szállítással kapcsolatos események

A jelentősebb személyi sugárterheléssel járó szállítási eseményeket a személyi dózisosk alapján történő besorolások táblázata tartalmazza.

6. táblázat. Szállítással kapcsolatos események.

Év	Város	Sugárforrás Aktivitás {Kategória}	INES szint	Megjegyzés
1993	Budapest	Ir-192 180 GBq {3}	0	Rosszul lezárt „kifújó” tartóban külföldre szállított használt HDR afterloading sugárterápiás forrás
2002	Budapest	Ir-192 170 GBq {3}	1	„Üres” feliratú hordozó ládában szállított, rosszul lezárt, „kifújó” radiográfias munkatartó

3.3. Létesítményekben bekövetkezett, „valós következmények” nélküli események

A gyorsítóknak vagy az 1. kategóriás radioaktív sugárforrásokat alkalmazó (orvosi és ipari besugárzó) létesítményekben bekövetkező összes olyan esemény, amelynek nincsenek tényleges következményei, tartozik ide.

Az alapbesorolást a legsúlyosabb lehetséges következmények, továbbá a rendelkezésre álló biztonsági elemek számának és hatékonyságának, valamint a kiegészítő tényezők figyelembevételével kell meghatározni.

7. táblázat. Létesítményekben bekövetkezett hazai események.

Év	Város	Sugárforrás	INES szint	Megjegyzés
2000	Győr	sugárterápia, gyorsító	0	A gépészeti térben technikus még dolgozott, amikor a gyorsítót rövid ideig üzemeltették
2006	Miskolc	sugárterápia, gyorsító	0	Besugárzás alatt a következő beteg a labirintusba lépett és ott várakozott
2008	Budapest	sugárterápia, gyorsító	1	A beteg pozicionálását végző asszisztens még a kezelőben volt, amikor a besugárzás megkezdődött

ÖSSZEFOGLALÁS

A radioaktív sugárforrásokkal, gyorsítókkal és szállítással kapcsolatos rendkívüli eseményekre kiterjesztett Nemzetközi Nukleáris és Radiológiai Esemény Skála hazai adaptációját, egy OAH által támogatott, OSSKI tanulmány keretében 2010-ben elkészítettük. Ennek során, a sugárvédelmi hatóságok és az OSK SZ munkatársai számára, a radiológiai események előzetes besorolásához tömör besorolási útmutatót állítottunk össze. Összegyűjtve és besorolva az utóbbi 40 év hazai radiológiai eseményeinek többségét, lefektettük a hazai radiológiai események adatbázisát.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] INES User's Manual, 2008 Edition, IAEA, Vienna, 2009.
- [2] Categorization of Radioactive Sources, IAEA Safety Standard Series No. RS-G-1.9., IAEA, Vienna, 2005.
- [3] Dangerous Quantities of Radioactive Material (D-Values), EPR-D-Values-2006, IAEA, Vienna, 2009.
- [4] 11/2010. (III.4.) KHEM rendelet a radioaktív anyagok nyilvántartásának és ellenőrzésének rendjéről, valamint a kapcsolódó adatszolgáltatásról

A barometrikus pumpa hatása a radon és a toron exhalációjára

Csige István*

Debreceni Egyetem - MTA Atommagkutató Intézete, Kihelyezett Környezetfizikai Tanszék,
4026 Debrecen Bem tér 18/c,
csige@atomki.hu

Title – Barometric pumping effect on radon and thoron exhalation rate

Abstract – Fluctuation of atmospheric pressure induces gas flow in the unsaturated surface layers of soils. Pressure drops suck all soil gases into the atmosphere while pressure rise push back only fresh air. This way, pressure variation induced soil gas transport has a pumping effect on the gases that originate in the soil. In this work, we have shown that this barometric pumping effect is common in case of radon gas and in certain circumstances it is the dominant factor that determines the rate of radon exhalation. Our measurements in caves and in wine cellars showed that the phenomena is common and by comparison with model calculations we have found that it is most profound in case of fractured porous embedded medium. Our model calculations also show that the effect on the exhalation rate on soil surface is much greater for thoron (^{220}Rn) than for radon (^{222}Rn). By measuring the depth profile of radon and thoron activity concentration in soil gas we have experimentally verified this difference. These results suggests that in those cases when barometric pumping is the dominant factor in radon exhalation it is more likely that thoron may also be present in significant amount.

Keywords- Barometric pumping, radon, underground quarries, cave, wine cellar

Kivonat – Az atmoszférikus légnyomás időbeli változásai, fluktuációja gázmozgásokat idéz elő a talaj felszínközeli telítetlen rétegeiben. A talajban keletkező gázokra nézve ez a gázmozgás egy aszimmetrikus jelleggel bír. Csökkenő légnyomás esetén a talajban keletkező gázok a légkörbe távoznak, míg növekvő légnyomás esetén a talajba csak a légköri gázok nyomulnak vissza. Vagyis a légnyomásváltozás okozta talajgáz-áramlás a talajban keletkező gázokra nézve egy szivattyú-hatást jelent. Ebben a munkában kimutatjuk, hogy ez a barometrikus szivattyú (vagy pumpa) néven ismert jelenség a radon gáz esetén is jól megfigyelhető, és bizonyos körülmények között a talajból való radonkibocsátás (radonexhaláció) meghatározó tényezője. Barlangokban és borospincékben végzett mérésekkel kimutattuk, hogy a jelenség igen gyakori, és modellszámításokkal való összevetéssel igazoljuk, hogy akkor meghatározó jelentőségű, amikor a befoglaló kőzet repedezett porózus közegnek tekinthető. Modellszámításaink szerint, amit a talajfelszín közelében végzett radon- és toronprofil mérésekkel is igazoltunk, az effektus a toron (^{220}Rn) esetében sokkal nagyobb, mint a radon (^{222}Rn) esetén. Így azokban az esetekben, amikor a radonkibocsátás fő okozója a barometrikus radonszivattyú hatás, nagy valószínűséggel a toronnal is számolni kell.

Kulcsszavak – Barometrikus pumpa, radon, földalatti zárt terek, barlang, borospince

BEVEZETÉS

Közismert, hogy a lakosság természetes eredetű forrásokból származó sugárterhelésének körülbelül a fele, az UNSCEAR 2006 Report [10] szerint átlagosan évente mintegy 1,15 mSv tulajdonítható a ^{222}Rn , és 0,1 mSv a ^{220}Rn rövidéletű bomlástermékeinek a belégzéséből. A radon gáz a rádiumatomok bomlásából keletkezik. Színtelen, szagtalan nemesgáz. Környezetünkben fő forrása a kőzetek (talajok), építőanyagok, stb. rádiumtartalma, ritkább esetekben a vizek oldott radontartalma. A talajokból, falakból kilépve a radon zárt légte-

rekben, épületekben (lakások, munkahelyek, stb.) feldúsulhat. A levegőben lévő radonatomok bomlásából sugárzó fématomok keletkeznek, amelyek hozzátapadnak a levegőben lebegő porszemcsékhez. Ha belélegezzük, a por megtapad a tüdőben, és ezek a fématomok ott sugárzásukkal terhelik a tüdő érzékeny sejtjeit. Bányászok körében végzett epidemiológiai vizsgálatokból tudjuk, hogy a viszonylag magas (nagyobb, mint néhányszor 100 mSv) ^{222}Rn sugárterhelés megnöveli a tüdőrák kialakulásának kockázatát. Ismereteink szerint a lakásokban lévő ^{222}Rn bomlástermékek belégzése a lakosság körében is többlet tüdőrák előfordulásához vezet. Egy Svédország-béli felmérés (Pershagen et al., 1994, [8]) szerint ez a hatás éves átlagban néhányszor 100 Bqm⁻³-nél több ^{222}Rn -t tartalmazó lakásokban élőknel már statisztikailag is szignifikáns (95%-os megbízhatósági szinten).

Szoktak a radonnal más célból is foglalkozni, nem csak sugárvédelmi megfontolásokból. Mivel a radon, még legnagyobb koncentrációban való előfordulásainál is csak egy igen-igen ritka nyomelem, másrészt radioaktivitása folytán könnyen mérhető, ideális nyomjelzője lehet bizonyos folyamatoknak. Különösen a geológiában használják egyes transzportfolyamatok tanulmányozására, földalatti gáz, ritkábban vízmozgások nyomonkövetésére. Így különösen alkalmasnak mutatkozott a légmozgások és szellőzési viszonyok nyomjelzésére barlangokban és borospincékben, de kiterjedt (igaz, eddig eredménytelen) kutatások folynak földrengés-előrejelzésre való alkalmazása területén is.

Összefoglalva, azok a transzportfolyamatok, amelyek révén a radon bekerül a környezetünkbe, fontos vizsgálat tárgyát képezik, mert ennek ismeretében tudunk hatékony védekezési módszereket kidolgozni ellene. Másrészt nyomjelzőként való használata is azt feltételezi, hogy a radon transzportját is magában foglaló terjedési modellek megalkotásával kvantitatívan is értelmezni tudjuk a mérhető térbeli és időbeli változásait. Ebben a munkában most azt vizsgáljuk, hogy az atmoszférikus légnyomás időbeli változása hogyan befolyásolja a kőzetek és a talaj radon (^{222}Rn) és a toron (^{220}Rn) kibocsátását.

MÉRÉSI HELYSZÍNEK

Az MTA debreceni Atommagkutató Intézetének Radon Csoportjában az elmúlt évtizedek során Magyarország, és a Kárpát-medence területén nagyon sok helyen végeztünk radonméréseket a ^{222}Rn és a ^{220}Rn környezetben való előfordulásának és transzportjának tanulmányozása céljából. Ezen vizsgálatok során sokszor kaptunk olyan mérési eredményeket, amelyek esetében úgy tűnt, hogy a ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció változásait leginkább az atmoszférikus légnyomás változásai befolyásolják. Ebben a munkában ilyen mérési eredményekből válogattunk. A mérések helyszíne igen változatos, az egyes méréseknél, ahol ez indokolt, külön kitérünk rá.

MÉRÉSI MÓDSZEREK

A ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció mérésére maratottnyom-detektoros és félvezető detektoros műszereket használtunk.

A Radamon típusú maratottnyom-detektoros radonmérő (Csige and Csegzi, 2001, [3]) egy kisméretű henger alakú eszköz, amelyben az alfa-részecskék detektálására egy CR-39 típusú maratottnyom-detektor lemez szolgál. Főleg a hosszú idejű átlagos ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció meghatározására való. Előnye, hogy egyszerre sok mérési ponton nagyszámú mérés végezhető. A Radamon kísérleti kalibrációja az NRPB (National Radiation Protection Board, Chilton, UK) radonkamrájában történt (Whysall et al., 1996, [13]), és a vele mért érték EU (CEC) összeméréseken csak néhány %-kal tért el a névleges radonexpozíciós értéktől (pl. Miles et al., 1996, [5]).

A Radamonban alkalmazott 40 mikrométer vastagságú polietilén szűrőfólia a ^{220}Rn aktivitáskoncentrációját kb. 0,1%-ra csökkenti. Ugyanakkor, ha a detektorban csak

papírszűrőt alkalmazunk, akkor az átérteszti a ^{220}Rn nagy részét (kb. 98%-át) is. Így tehát egy 2 db. Radamonból álló detektorpárral (1. ábra) meg tudjuk mérni a ^{222}Rn - és a ($^{222}\text{Rn}+^{220}\text{Rn}$)-aktivitáskoncentrációt is, amiből a ^{220}Rn -aktivitáskoncentráció is megkapható.



1. ábra. ^{222}Rn - és ^{220}Rn - aktivitáskoncentráció mérése talajfelszínre kihelyezett Radamon detektorpárral (tényleges méret)

A Dataqua (Dataqua Kft., Balatonalmádi) gyártmányú félvezető-detektoros radonmonitorokat a gyártó az MTA Atommagkutató Intézetével és a Mecsekérc Rt.-vel együttműködésben fejlesztette ki (Várhegyi and Hakl, 1994, [11]). Ezekkel a műszerekkel lehetőség van a gyorsabb, jellemzően napi időbeli változások mérésére is. Automatikus üzemmódban a mérési adatokat saját memóriájában tárolja. Az ebben a munkában használt Dataqua radonmonitorok hőmérséklet és nyomás monitorozására is alkalmasak.

A LÉGKÖRI NYOMÁSVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK MODELLEZÉSE

A környezetünkben előforduló radon keletkezésével és transzportjával kapcsolatos modellszámításaink elsősorban Rogers és Nielson, [9], illetve Nielson et al., [6] munkáin alapulnak. Ebben a fejezetben röviden összefoglalom a számításaim során használt modellek alapvető összefüggéseit.

A talaj pórusait részben kitöltő talajgáz a fellépő nyomásgradiensek miatt a talajban áramolhat. A gáz transzportját a telítetlen zónában a Darcy-egyenlettel közelítjük: $\bar{q} = -K / \mu (\text{grad}P - \rho \bar{g})$, ahol \bar{q} a gáz térfogatáram-sűrűsége; K a talaj gázáteresztő-képessége; μ a gáz dinamikai viszkozitása; P a gáz nyomása; ρ a gáz sűrűsége; \bar{g} a gravitációs gyorsulás. A talajgáz áramlásának kontinuitási egyenlete: $\varepsilon (\partial \rho / \partial t) = -\text{div}(\rho \bar{q})$, ahol ε a talaj gázporozitása. Az ideális gázokra vonatkozó állapotegyenlet: $p = \rho RT$, ahol R az adott gázra vonatkozó gázállandó és T a gáz hőmérséklete.

Az állapotegyenletből kifejezhetjük a gáz sűrűségét, és azt beírjuk a Darcy-törvénybe, valamint a kontinuitási egyenletbe, majd a Darcy-törvény szerinti térfogatáramot behelyettesítjük a kontinuitási egyenletbe, és így kapjuk a talajgáz áramlásának alapegyenletét:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \alpha \left\{ P \Delta P + \beta P \frac{\partial P}{\partial t} + (\nabla P)^2 \right\}, \text{ ahol } \alpha = \frac{K}{\mu \varepsilon}, \text{ és } \beta = \frac{2g}{RT}. \quad (1)$$

A radon gáz transzportegyenletét az alábbi alakba írhatjuk:

$$\beta \frac{\partial C}{\partial t} = D \text{div grad } C - \bar{q} \text{grad } C + G - \lambda \beta C, \quad (2)$$

ahol C a ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció a póruster gázfázisában, $G = f \rho_d A_{Ra} \lambda$ a ^{222}Rn pórusterben való keletkezési üteme, f a ^{222}Rn kibocsátási tényező, ρ_d a száraz talaj sűrűsége; A_{Ra} a száraz talaj ^{226}Ra aktivitáskoncentrációja, λ a ^{222}Rn bomlási állandója. A póruster vízzel kitöltött hányadát víztelítettségnek nevezzük, és m betűvel jelöljük. Feltesszük, hogy a pórusterben lévő ^{222}Rn mindenkor az Otswald-féle megoszlási tényezőnek megfelelően oszlik meg a víz és a gázfázis között. Az L megoszlási tényező: $L = C_w / C_g$, aminek hőmérséklettől való függését a Clever H. L. [2] által levegőre összegyűjtött adatokból a következő formulával illesztettük: $L(T) = 0.425 \exp(-0,05 T) + 0,104$. $\beta = (1 - m + Lm)\varepsilon$, az úgynevezett megoszlás-korrigált porozitás. Mivel ebben a megközelítésben a víz és gázfázisban történő diffúziót nem tárgyaltuk elemi szinten, ezért a D_e effektív diffúziós együtthatóba van beépítve a diffúziós áram összes környezeti feltételtől való függése: $D_e = D_e(\varepsilon, m, \dots)$. A D_e (m^2s^{-1}) effektív diffúziós együttható porozitástól és a víztelítettségtől való függését Rogers és Nielson [9] szerint így közelíthetjük: $D_e = D_{e0} \exp(-6m\varepsilon - 6m^{14\varepsilon})$.

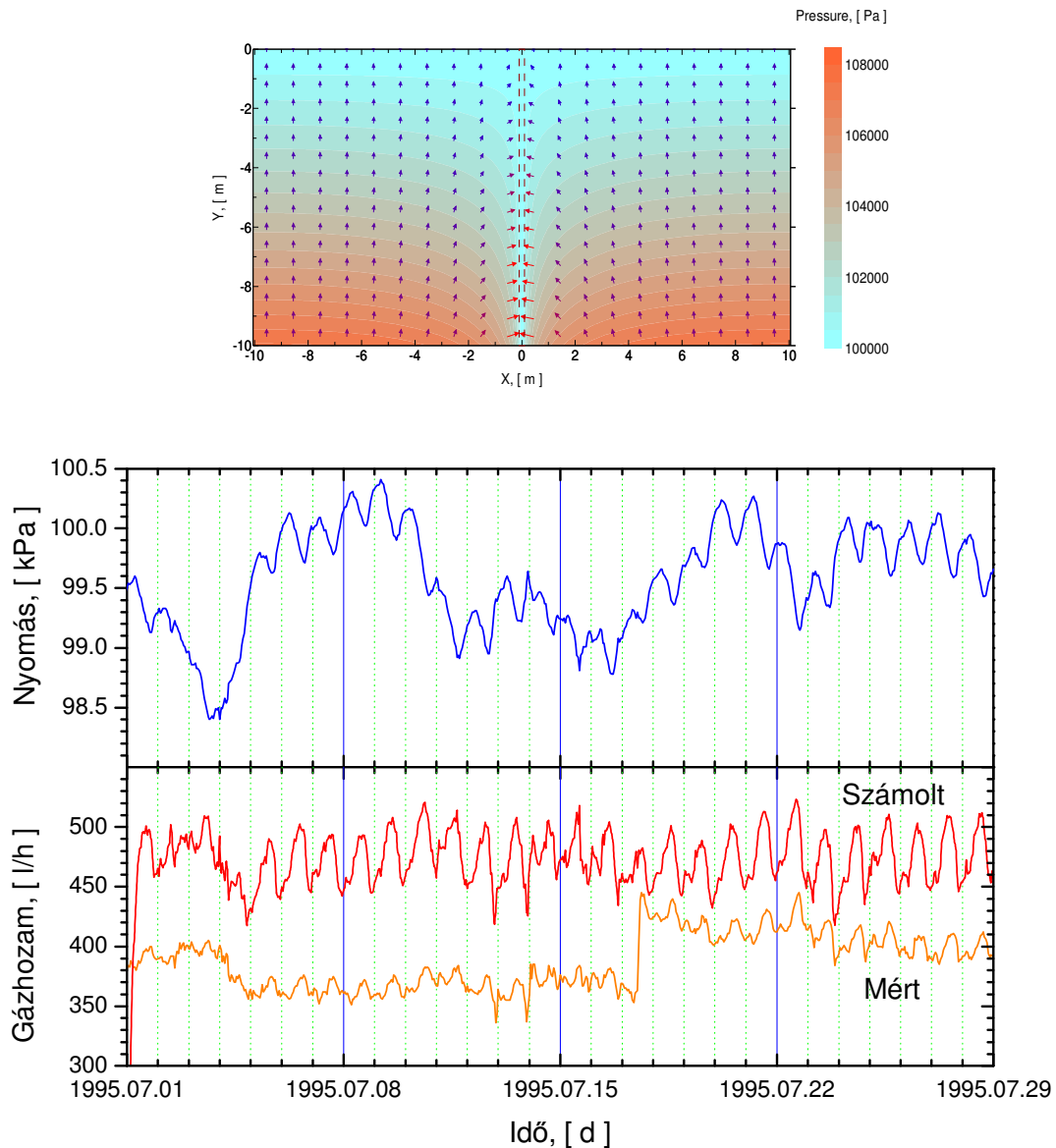
A radontranszport-programrendszerrel részt vettünk egy Európai Unió összehasonlító vizsgálatban (Andersen et al., 1999, [1]), amely igazolta, hogy számításaink pontos eredményeket adnak.

EREDMÉNYEK

A talajgáz áramlásának időbeli változása

A barometrikus radonpumpa azáltal hat a talajok radonkibocsátására, hogy gázmozgást idéz elő a talajban, amely szállítja a radont. (Gázmozgás hiányában az egyedüli transzportmechanizmus a molekuláris diffúzió.) Az atmoszférikus légnyomás változásainak a talajgáz áramlási sebességére való hatását sikerült közvetlenül is megfigyelnünk és megmérnünk. Mátradercskén mélységi eredetű, főleg szén-dioxidból álló mofettagáz szivárog a talajból (Vásárhelyi et al., [12]). A falu határában van egy 20 méter mélységű kutatófúrás, amely csak kb. 5 m mélységig bélelt. A talajvízszint a felszíntől mérve kb. 13 méter mélyen helyezkedik el. A fúrásból időben változó hozamú gáz áramlik ki, amelynek hozamát egy háztartásokban használt kétkamrás mechanikus gázórával mértük. A gázórához egy elektronikus adatgyűjtő berendezést csatlakoztattunk, amely a gázóra forgórészére rögzített mágneskapcsoló által keltett impulzusokat számolta meghatározott mintavételezési (esetünkben 10 perces) ideig. A mérések szerint a kút gázhozamát az atmoszférikus légnyomás változásai modulálják. Modellszámításokat végeztünk a talajgáz telítetlen zónában való áramlására peremfeltételként a mért atmoszférikus légnyomás időbeli változását használva. Az eredményeket összevetettük a mérésekkel (2. ábra), és azt találtuk, hogy a modellszámítások igen jól leírják a megfigyelt gázhozam változásokat.

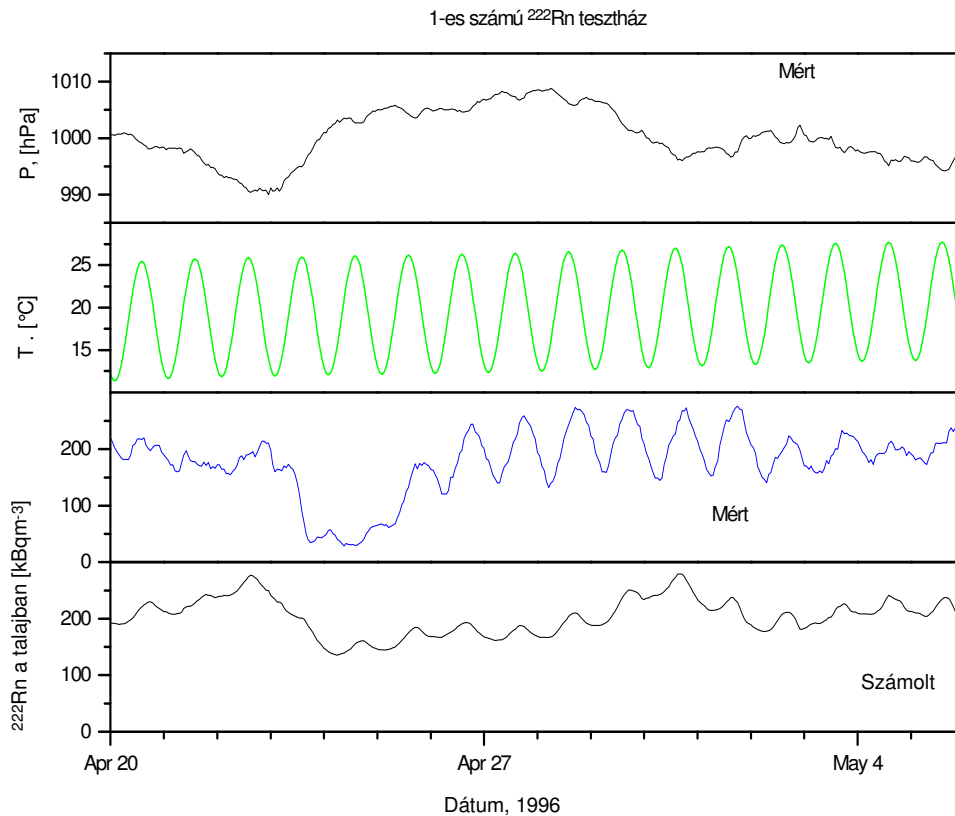
Igen figyelemre méltó azonban, hogy a gázhozam hirtelen megnövekedését (1995. 07. 17-én) a mért idősorban a modellszámítások nem mutatják. Ezt a növekedést egy kb. 1 óra alatt lehullott 60 mm-es eső okozta, ami a modellszámításban nincs benne. Hasonló módon gondolják ilyenfajta mérési adatsorok földrengés-előrejelzésre való használatát is. A megfelelően részletes modellszámításokkal nem magyarázható „jeleket” geodinamikai változások is okozhatják, amelyek akár a földrengések kipattanása előtt is jelentkezhetnek. Már egy néhány perces megbízható előrejelzési lehetőségnek is igen nagy jelentősége lenne, sajnos az eddigi vizsgálatok azonban még nem teszik ezt lehetővé.



2. ábra. A nyomástér és a mofetta-gázok áramlási iránya a telítetlen zónában egy gáznyerő kút környezetében. A számolt gázhozam összehasonlítása a mátradereskei I-es fúrás mért gázhozamával. A gázhozam hirtelen megnövekedését a mért idősorban 1995. 07. 17-én egy kb. 60 mm-es eső okozta. Ez nincs benne a modellszámításban.

A talajgáz radontartalmának időbeli változása

A talajgáz ^{222}Rn tartalmának gyors időbeli változásait figyeltük meg egy mátradereskei lakóház melletti talajban félvezető detektoros radonmérővel végzett radonméréseknél. Az idősor Fourier spektrum analízisével bizonyítottuk, hogy a félnapos változások nem kapcsolatosak az árapály jelenséggel, hanem az atmoszférikus nyomás (szintén nem árapály eredetű) hasonló periódusú változásával hozhatók összefüggésbe (Vásárhelyi *et al.*, [12]).

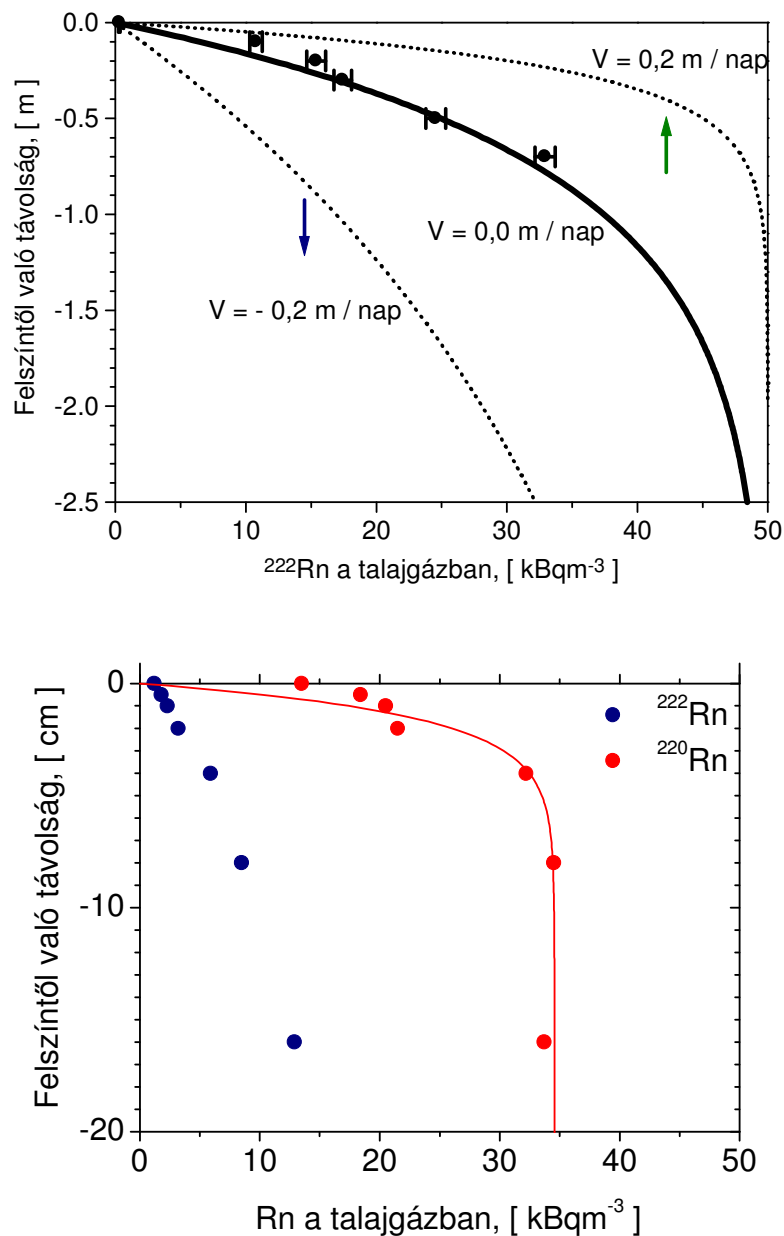


3. ábra. A talajgáz radontartalmára vonatkozó modellszámítás ellenőrzése egy mátraderecskei lakóház melletti talajban Dataqua félvezető detektoros radonmérővel végzett méréssel

A modellszámításokban a talajgáz áramlási terének kiszámítása után meghatároztuk a radonkoncentráció térbeli és időbeli változásait is a talajban. A számításokhoz használt paraméterek értékét, ahol csak lehetett a mérésekből vettük. Peremfeltételként a felszínen időben változó mért nyomás és hőmérséklet adatokat használtuk. Figyelembe vettük a hőtranszportot is, és a talajvíztükörnél állandó geogáz feláramlással számoltunk. A mért és számolt ^{222}Rn görbék hasonlítanak, de a napi változás dinamikája a mért idősorban jóval nagyobb, mint a számoltéban. Úgy tűnik modellünk elég jól képes leírni az atmoszférikus nyomás hatására bekövetkező változásokat, de a hőmérsékleti hatásokkal kevésbé sikeresen birkózik meg.

A talajgáz radontartalmának mélység szerinti változása

Maratottonyom-detektoros módszerrel mértük a talajgáz (2 hetes időszakra vonatkozó átlagos) radontartalmának mélység szerinti változását (4. ábra). Alapesetben a talajgáz radontartalma a diffúziós profil szerint kellene változzon a mélységgel. A mérési eredmények szerint a diffúziós profilhoz képest a felszín közelében nagyobb, a mélyebb rétegekben viszont kisebb a radon aktivitáskoncentráció annál, mint ami a diffúziós profilból következne.



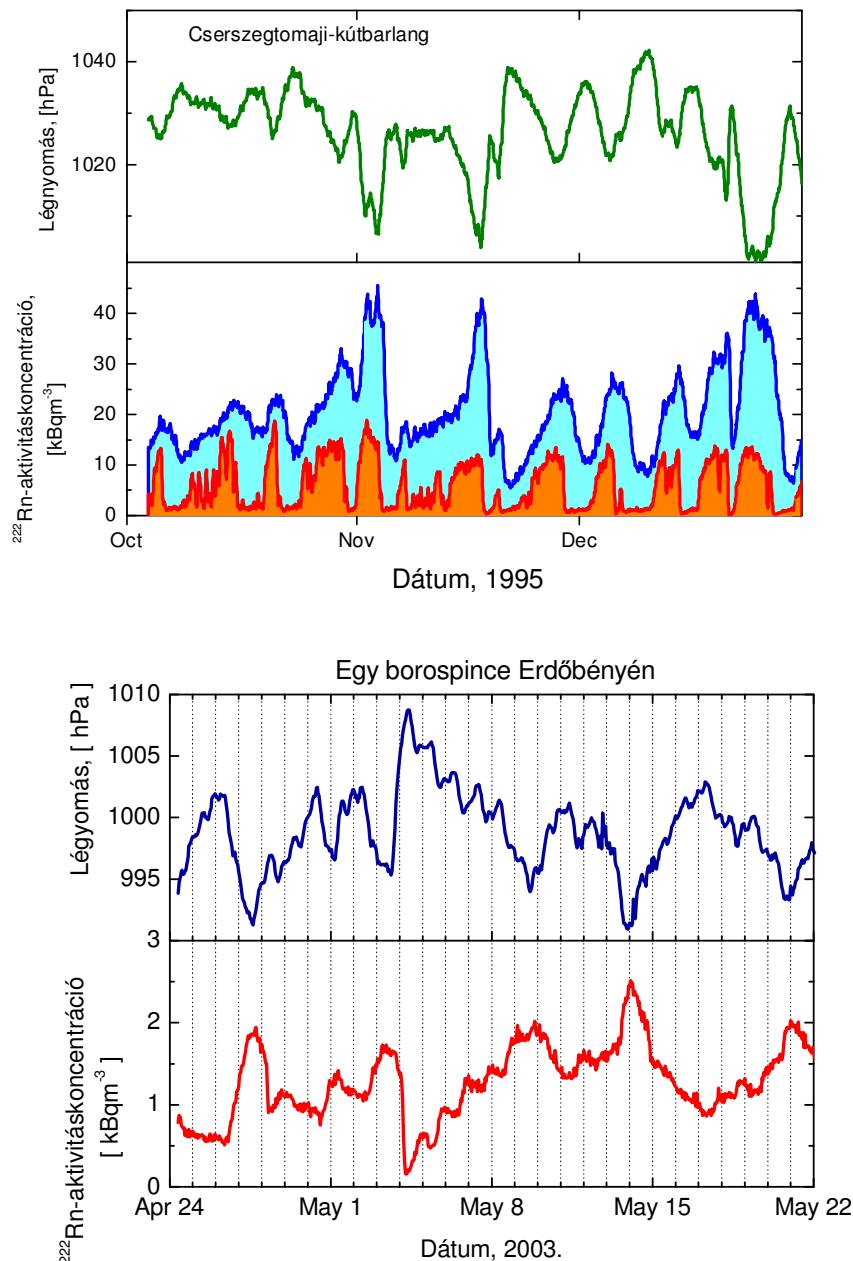
4. ábra. A talajgázban mért ^{222}Rn - és ^{220}Rn -aktivitáskonzentráció mélység szerint változása különböző modellszámítási eredményekkel összevetve.

Ez a fajta profilváltozás viszont jól értelmezhető a barometrikus pumpa hatásának figyelembe vételével. Amennyiben lefelé, vagy felfelé irányuló gázáramlás is van, akkor ez a diffúziós-profil megnyúlik, vagy összenyomódik (4. ábra bal oldala). A radon diffúziós árama ugyanolyan nagyságú felfelé való talajgáz-áramlásnál nagyobb mértékben nő meg, mint amennyire lefelé irányuló áramlásnál lecsökken. Összességében a barometrikus pumpa hatása mintegy kétszeresére képes megnövelni a talaj radonkibocsátását.

A légtér radontartalmának időbeli változása barlangokban és borospincékben

A légnyomásváltozás által barlangi és borospincei levegő légtérében előidézett ^{222}Rn -aktivitáskonzentráció változásokra igen jó példa a Cserszegtomaji-kútbarlang, és például egy erdőbényei borospince esete (5. ábra). Nyomásnövekedéskor a beáramló felszíni friss levegő a

bejárat közelében felhígítja a radonban dús levegőt. Ez a hatás a bejáratától távolodva egyre kisebb.



5. ábra. Az atmoszferikus légnyomás és a ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció időbeli változása a felszínnel csak egy kb. 50 méteres kúton keresztül kapcsolatban lévő, de egyébként nagyjából vízszintes járatrendszerrel rendelkező Cserszegtomaji-kútbarlangban. A két ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció mérési adatsor közül a narancssárga színű a kútból nyíló bejáratához közel, a kék színű pedig távolabb helyezkedett el.

Egy hajósi borospincében mért és modellszámításokkal kapott radon idősorok összehasonlítása azt mutatta, hogy a modellszámítás ugyan jól adja vissza a ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció változás irányát, ugyanakkor sem a ^{222}Rn -aktivitáskoncentráció szintje, sem a változás dinamikáját nem írja le megfelelően (Györfi T. és Csige I., [4]). Ez a számolás is arra hívja fel a figyelmet, hogy a barometrikus radonpumpa ebben a modellben nem eléggé hatékony a megfigyelt változások dinamikájának az értelmezésére. Nielson és mtsi. [7] kimutatták

azonban, hogy repedezett porózus közegekben a barometrikus pumpa hatása akár egy nagyságrenddel is nagyobb lehet, mint repedések nélküli befoglaló közet esetén. Ahhoz hasonló a helyzet, mint a 2. ábrán látható kút esetében. A repedések mentén a gáz áramlása sokkal intenzívebb, mint a közetmátrixban, és az ezeken keresztül történő radonkibocsátás sokkal nagyobb, mint ami repedés nélkül lenne. Ha a felületen sok ilyen repedés található, akkor a barometrikus radonpumpa hatása főleg ezeken keresztül érvényesül, és az átlagos kibocsátás akár egy nagyságrenddel is nagyobb lehet a repedések nélküli kibocsátáshoz képest.

IRODALOM

- [1] Andersen C. E., Albarracín D., Csige I., van der Graaf E. R., Jiránek M., Rehs B. Svoboda Z., Toro L. (1999) ERRICCA radon model intercomparison exercise. RISO National Laboratory, POB 49, DK-4000 Roskilde, Denmark, April, 1999. pp. 1-20
- [2] Clever H. L. ed. (1979) Solubility data series 2, Pergamon Press, 227-234
- [3] Csige I. and Csegzi S. (2001) The Radamon radon detector and an example of application. Radiation Measurements, 34(1-6), pp. 437-440.
- [4] Györfi T., Csige I. (2009) Az atmoszférikus légnyomás változásainak hatása egy borpince légterében lévő ^{222}Rn -aktivitáskoncentrációra. Sugárvédelem, 2, pp. 44-49.
- [5] Miles J. C. H., Algar R. A., Howarth C. B., Hubbard L. M., Risica S., Kies A. and Poffijn A. (1996) Results of the 1995 European Commission intercomparison of passive radon detectors. Final Report. EUR 16949, Luxemburg.
- [6] Nielson K. K., Rogers V. C., Rogers V. and Holt R. B. (1994) The RAETRAD model of radon generation and transport from soils into slab-on-grade houses. Health Phys. 67, pp. 363-377.
- [7] Nielson, R.H., Peterson E. W., Lie K. H., Burkhard N. R., Hearst J. R., 1991. Atmospheric pumping: a mechanism causing vertical transport of contaminated gases through fractured permeable media. Journal of Geophysical Research, 96, 21933-21948.
- [8] Pershagen, G.; Akerblom, G.; Axelson, O.; Clavensjö, B.; Damber, L.; Desai, G.; Enflo, A.; Lagarde, F.; Mellander, H.; Svartengren, M.; Swedjemark, G. A. (1994) Residential radon and lung cancer in Sweden. New England Journal of Medicine, 330, pp. 159-164.
- [9] Rogers, V. C.; Nielson, K. K. (1991) Multiphase radon generation and transport in porous materials. Health Phys. 60(6), pp. 807-815.
- [10] UNSCEAR 2006 Report. Effects of Ionizing Radiation. United Nations sales publications E.08. IX.6 (2008) and E.09.IX.5 (2009). United Nations, New York.
- [11] Várhegyi A., Hakl J. (1994) A silicon sensor based radon monitoring device and its use in environmental geophysics. Geophysical Transactions, 39, pp. 289-295.
- [12] Vásárhelyi A., Hunyadi I., Csige I., Hakl J., Hertelendi E., Borossay J. and Torkos K. (1997) Radon enriched deep earth-gas upflow in a seismically active inhabited area. 3rd Int. Col. on Rare Gas Geochem. Dec. 10-14, 1996. In: Rare Gas Geochemistry. Applications in Earth and Environmental Sciences. Ed.: H. S. Virk. Armitsar, Guru Nanak Dev University. pp. 221-238.
- [13] Whysall K., Miles J. C. H. and Olast M. (1996) Results of the 1991 CEC intercomparison of passive radon detectors. Final Report. EUR 15156, Luxemburg.

Az ELI sugárvédelmi rendszereinek tervezési alapjai

Bodor Károly*

Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézet,
1121, Budapest Konkoly Thege M. út 29-33.

*bodor@aeki.kfki.hu

Title: Principle design elements of the radiation protection systems of the ELI

Abstract - The paper presents the principles of radiation protection of the ELI in the Czech Republic. Numerous particles are generated and accelerated by the laser matter interactions, these particles can get out to the environment or they can activate the materials of the environment.

Keywords- Radiation protection, ELI

Kivonat

A cikk bemutatja a Cseh Köztársaságban épülő ELI (Extreme Light Infrastructure) nagyteljesítményű lézerberendezés sugárvédelmi tervezési alapjait. A nagyteljesítményű lézerfény és az anyag kölcsönhatása során számos részecske keletkezik és felgyorsul, amelyek a kísérleti berendezésből kiléphetnek a környezetbe, illetve felaktiválhatják a környezetükben található anyagokat.

Kulcsszavak – Sugárvédelem, ELI

BEVEZETŐ

Az ELI (Extreme Light Infrastructure) rövid impulzusidejű, és a világon jelenleg létező lézereknél ezerszer nagyobb teljesítménysűrűségű lézerfényt szolgáltató szuperlézer. Az épülő berendezés az alap és alkalmazott kutatásokban a fény és az anyag kölcsönhatását minden eddiginél nagyobb intenzitással lesz képes vizsgálni (az ún. ultra-relativisztikus tartományban). Működése első 10 évében a világon egyedülálló paraméterekkel fog rendelkezni. Az ELI az EU lézer kutató központja lesz Közép-Kelet Európában. A projekt része az European Roadmap for Research Infrastructures programnak (ESS, X-FEL). A nagyberendezés tervezésében 13 európai ország vesz részt ELI-PP (Preparatory Phase). A programot a francia lézerfizikusok kezdeményezték Prof. Gérard Mourou vezetésével. Az ELI berendezés három helyszínen fog megvalósulni:

- Csehország, Prága: lézertechnológiai és lézeralkalmazási központ
- Magyarország, Szeged: attoszekundumos lézertechnológiai központ
- Románia, Bukarest: fotonukleáris lézertechnológiai központ

Az érintett főbb tudományterületek: magfizika, asztrofizika, kozmológia, nagy energiájú fizika, gyógyítás, nukleáris technika, nanotechnológia.

Az ELI teljesítménye a PW többszörösét is elérheti, míg az impulzus időtartama ns-as nagyságrendű. Az ELI segítségével számos alap és alkalmazott kutatás válik lehetővé. A feladat a világon a legnagyobb teljesítményű lézer sugárvédelmének tervezése.

AZ ELI SUGÁRVÉDELMI RENDSZEREINEK TERVEZÉSI ALAPJAI

A nagyteljesítményű lézerberendezések sugárvédelme a sugárvédelem egy speciális, újabb részterülete. A sugárvédelmi rendszerek tervezésénél figyelembe kell venni azt a tényt, hogy a lézer – anyag kölcsönhatás során széles energia tartományban, számos részecske típus keletkezik. Kevés információ áll rendelkezésre a lézerek sugárvédelmének tervezésére. Az

ELI-t annak sajátos műszaki paramétereit miatt nehéz összehasonlítani más nagyberendezésekkel, pl. a National Ignition Facility (NIF)-vel. A tervezéshez az információkat elsősorban a nagyteljesítményű szuperlézerek sugárvédelmével foglalkozó közleményekből lehet beszerezni. A szuperlézerek sugárvédelmének tervezésekor a gyorsítók sugárvédelmi terveit célszerű alapul venni. A gyorsítók esetén a részecske forrás tagja ismert, míg a szuperlézereknél a forrás tagot is meg kell határozni.

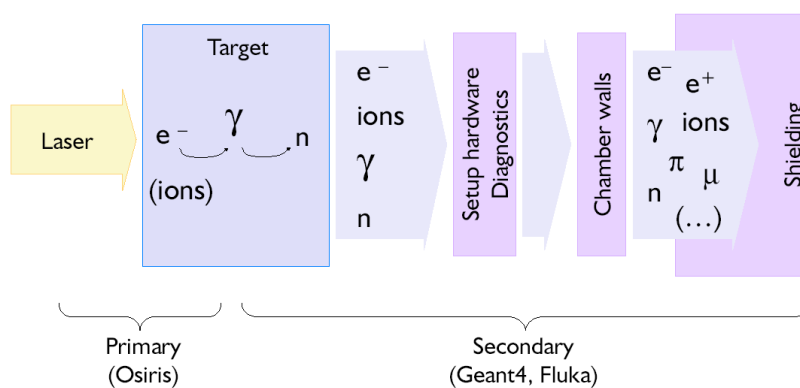
Tervezési alapok, kritériumok

Az ELI tervezésénél a nemzetközileg elfogadott irányelvek a mértékadók, melyeket az IAEA, ICRU, ICRP készített, továbbá az EU direktíváit is figyelembe kell venni, valamint az adott ország sugárvédelmi szabályozásában leírtakat. A tervezésnél az ALARA elvnek kell érvényesülni.

A tervezés lépései

- Tervezési folyamat eszközeinek meghatározása
- Kimeneti lézer paraméterek meghatározása
- Lézer-céltárgy kölcsönhatás szimulálása
- A kísérletek során keletkező részecskék meghatározása
- Árnyékolás tervezése FLUKA kóddal (1. ábra)
- Ellenőrző mérések

A védelem kidolgozásához szükséges ismerni a létesítmény műszaki paramétereit: teljesítmény, szellőzés, eszköz méretek, rendelkezésre álló hely, működési időtartam, sugár karakterisztika, maximális energia, a target anyagi jellemzői, vizsgálati, mérési módszerei, stb. Az 1. ábrán a lézer-anyag kölcsönhatás során felgyorsított részecskék és a részecskék nyaláb csapda kölcsönhatás látható. A lézer-anyag kölcsönhatás során felgyorsított részecskéket az ún. OSIRIS kóddal határozzák meg, majd a nyaláb csapdát a FLUKA programmal tervezik.



1. ábra: Az árnyékolás tervezésének lépései [3]

Az ún. PDCA (Plan, Do, Control, Act) ciklus alapján a rendszer megtervezését és megépítését, üzembe helyezését követően a teszt működés alatt ellenőrző méréseket kell végezni. Amennyiben a mérési adatok alapján a dózisteljesítmény meghaladja a tervezett értékeket, úgy további számítások, szimulációk elvégzése szükséges és az árnyékoló rendszert tovább kell bővíteni. A sugárvédelmi rendszer engedélyezhető, ha a dózisteljesítmény szintek nem lépik túl a hatóság által előírt értékeket.

Az ún. FEP (Features, Events, Process) (események, lehetőségek, folyamatok) lista készítése során minden lehetséges eseményt és hatást felvázolnak az érintett szakemberek (pl. veszély források). A második körben a súlyozott FEP mátrixot definiálják, elsődleges közelítések, becslések, alapján az események valószínűségéhez, kockázatához, hatásaihoz számokat, illetve minősítő pontokat rendelnek, így az események, hatások, kockázatok sorrendje meghatározható. A magasabb pontszámokkal rendelkező eseményekre több, precízebb számítás, szimuláció szükséges, míg a kevésbé releváns események analíziséhez kevesebb erőforrás szükséges. A súlyozott FEP lista segítségével a tervezés során optimalizálható a humán erőforrás és a számítási kapacitások hatékony kihasználása, így a tervezés idő- és költséghatékony. Ez a lista az alap a későbbi ellenőrzések során, a kevésbé releváns eseményeket ez alapján lehet le ellenőrizni, ha mégis jelentős az esemény, akkor azt újra kell vizsgálni.

Az LCA (életciklus) elemzések alapján a sugárvédelmi anyagok (árnyékoló anyagok) optimális megválasztása válik lehetővé, ami ugyancsak a költséghatékonyságot növeli.

A konkrét feladatok definiálásával, határidők kitűzésével, felelősök megnevezésével, azaz a munkaterv kidolgozásával kezdődhet a tervezési folyamat. Az ELI tervezésekor több munkacsoportot is létrehoztak, a sugárvédelmet a 6-os számú (WP6) csoport tervezte. Az elkészült tervek és ellenőrző mérések alapján demonstrálható a hatóságok, befektetők, dolgozók, kormány, társadalom számára, hogy a berendezés teljesíti a szabályozásban, ajánlásokban, törvényekben előírtakat, illetve a létesítmény környezeti hatásai nem jelentősek.

A forrástag meghatározása

A lézer-anyag kölcsönhatás során plazma és indukált elektromágneses tér keletkezik, a töltött részecskék ebben a térben gyorsulnak fel. A kölcsönhatás során egy lézernyaláb irányú részecske sugárzás jön létre, mely nagy energiájú (akár GeV nagyságrendű) elektronokból és protonokból áll. A forrástagot szimulációval ill. a meglévő empirikus adatok extrapolálásával határozzák meg.

Az ELI teljesítménye, műszaki paraméterei ($I=10^{22}-10^{25}$ W/cm²) több nagyságrenddel meghaladja a jelenleg üzemben lévő lézerek teljesítményét. A világ több pontján működő nagyteljesítményű lézerberendezések mért adatai alapján az ELI forrástagja extrapolációval közelíthető. A részecskék definiálása után az adatokat standard adat formában gyűjtötték össze, így a különböző források, kísérletek összehasonlíthatóvá válnak. A keletkező részecskéket leíró egyenlet folyamatos, illetve kvázi-monokromatikus komponensekre bontható.

Az alábbi link tartalmazza az eddig összegyűjtött adatokat és számításokat a már meglévő nagy berendezésekről: <http://eli6.fis.usal.es/>. A nyaláb spektrumát, szögeloszlását empirikus adatok alapján becslik a VULCAN berendezés (STFC) (<http://www.clf.rl.ac.uk/Facilities/Vulcan/12248.aspx>) adatait felhasználva 1, 10, 100 PW-ra, illetve $10^{20}-10^{23}$ W/cm²-re.

A fotonok gyakorlatilag monoenergetikusak, a foton fluens elérheti $3 \cdot 10^{16}$ foton/lövés-t. A proton nyalábban a protonok energiája szélesebb tartományú, míg az elektronok kvázi monoenergetikusak.

10 PW teljesítmény esetére az 1 PW-os adatokat felhasználva extrapolációval határozzák meg a dózisteljesítményeket. A numerikus szimulációk és modellek alapján a nagy energiával rendelkező protonok száma elérheti a 10^{11} db/lövés –t. Elektronok esetén a maximális gyorsulási hosszúság alapján becsülhető a felgyorsított elektronok energiája, 4 m esetén az elektronok a 38 GeV-ot is elérhetik.

100 PW esetén csak szimulációval lehetséges meghatározni a forrástagot, mivel ebben a teljesítmény tartományban jelenleg nincs kísérleti adat. A szimulációkat az OSIRIS 2.0

kóddal végezték. A program a Maxwell-Lorentz egyenleteket felhasználva a szukcesszív approximáció elve alapján lépésről-lépésre újra és újra számolja a részecskék állapotjellemzőit egy „véges dobozban”. A részecskék a lézer nyaláb irányába haladnak, energiájuk a GeV-ot is elérheti a lokálisan indukált nagy elektromágneses térben. Az OSIRIS szimulációs kód akár 100 Tbyte adatot is generál szimulációnként, ezért a kódot csak nagy teljesítményű szuperszámítógépen lehet futtatni. A felgyorsított protonok és elektronok a lézer nyaláb irányába haladnak, az elektron nyalábnak egy kis része azonban 90° -ban szóródik.

SUGÁRVÉDELMI ÁRNYÉKOLÓ ANYAGOK TERVEZÉSE

Az árnyékolás tervezéséhez a rendelkezésre álló bemenő paraméterek (lézer berendezés, cél tárgy paraméterei) alapján, a forrástag meghatározását követően a részecskék spektrum adatait az ún. FLUKA kódban használják fel. A FLUKA kódot a CERN-ben fejlesztik 1962 óta. A kód képes több mint 60 részecske mozgását szimulálni akár TeV energiákon is. Az ELI-ben a részecskék GeV energiára is szert tehetnek, ezért a FLUKA az ELI esetében is használható. További információ a FLUKA kóddal kapcsolatban: <http://www.fluka.org/fluka.php>. A lézer teljesítményétől és ismétlési frekvenciájától, valamint a céltárgy anyagától függ a kialakuló részecske nyaláb karakterisztikája. A nagy teljesítményű, kis ismétlés frekvenciájú lézernyaláb által keltett nyaláb energiája közel egy nagyságrenddel nagyobb, mint a kisebb teljesítményű, nagyobb ismétlés frekvenciájú lézer nyaláb részecske energiája. A kisebb teljesítményű, nagyobb ismétlés frekvenciájú lézer nyaláb által felgyorsított részecskék integrális dózisa adott esetben, azonban meghaladhatja a nagy teljesítményű, kis ismétlés frekvenciájú lézernyaláb által felgyorsított nyaláb integrális dóziséét.

Az árnyékoló anyag választás optimalizálása

Az ELI sugárvédelme esetén a hagyományos árnyékoló anyagok jöhetnek szóba, így a beton, nehéz beton, acél, vas, fa, ólom, ólom ötvözetek, szegényített urán, paraffin, egyéb nagy hidrogén tartalmú anyagok. Szilárd anyagokban, levegőben, vízben keletkezhetnek radioaktív nuklidok a fény-anyag kölcsönhatása, illetve az ebből származó felgyorsított részecskék hatására. A számos lehetőség közül olyan árnyékoló anyagot kell választani, ami hatásosan árnyékol a fellépő sugárzásokkal szemben, továbbá kevésbé aktiválódik fel, így élettartama hosszú.

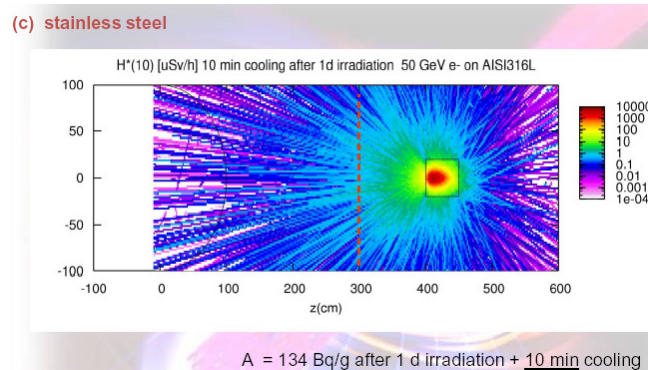
Az árnyékoló anyagok csoportosítása a felaktiválódás szempontjából:

- Kicsi: ólom, beton, alumínium, fa, műanyag
- Közepes: króm, vas
- Nagy: cink, arany, magnézium, kobalt, nikkel

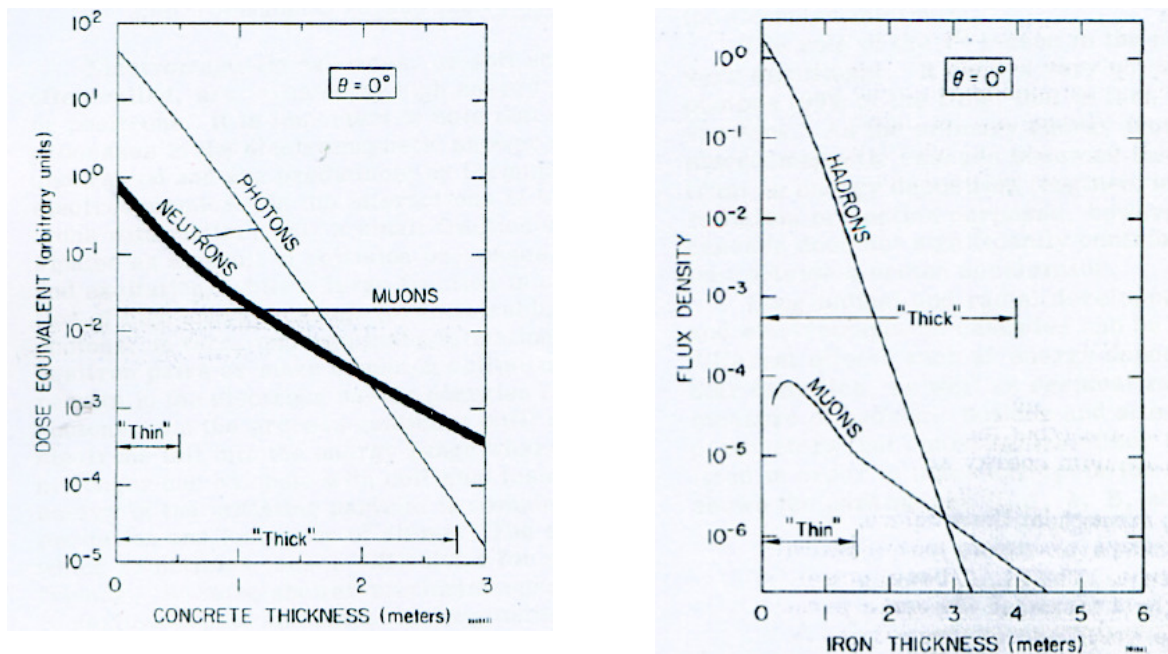
A kísérletek során több fajta részecske gyorsul fel, széles energia tartományban. A hadron-elektromágneses-kaszád hatásos csökkentése érdekében nagy rendszámú árnyékoló anyagokat célszerű választani, ugyanakkor a nagyrendszámú anyagok az elektronok által keltett rezonancia neutronok hozamát növelik, továbbá a hadron-elektromágneses-kaszád is neutron sugárzást generál. Ezért az árnyékoló falat többféle anyagból kell építeni, melyben kis és nagy rendszámú anyagok is megtalálhatóak. Az árnyékoló falat célszerű héj szerkezetűnek építeni, a nagyrendszámú anyagok a müon, proton-elektron-foton kaszkádot nyelik el, a kis rendszámú anyagok a neutron sugárzást csökkentik. Az ilyen héj szerkezetű sugárvédelmi árnyékoló berendezéseket beam dump-nak (nyaláb csapda) nevezzük.

A FLUKA kóddal réz, ólom és rozsdamentes acélon végeztek aktivációs szimulációkat (2. ábra jobb oldalán a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény színekód látható ($\mu\text{Sv/h}$ -ban), 1 napos besugárzás 50 GeV-os elektronokkal). A 2. ábra alapján látható, hogy a felaktiválódás

szempontjából a rozsdamentes acél (AISI-316L) a legmegfelelőbb anyag, mivel kevésbé aktiválódik fel, illetve azért mert a vas hatékonyan gyengíti a müon sugárzást (3. ábra).



2. ábra: Az optimális árnyékoló anyag megválasztása aktiváció szempontjából. Jobb oldalon a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény színekódja látható ($\mu\text{Sv/h}$), az y és z tengelyen a távolság saválló acélban (cm) [3]



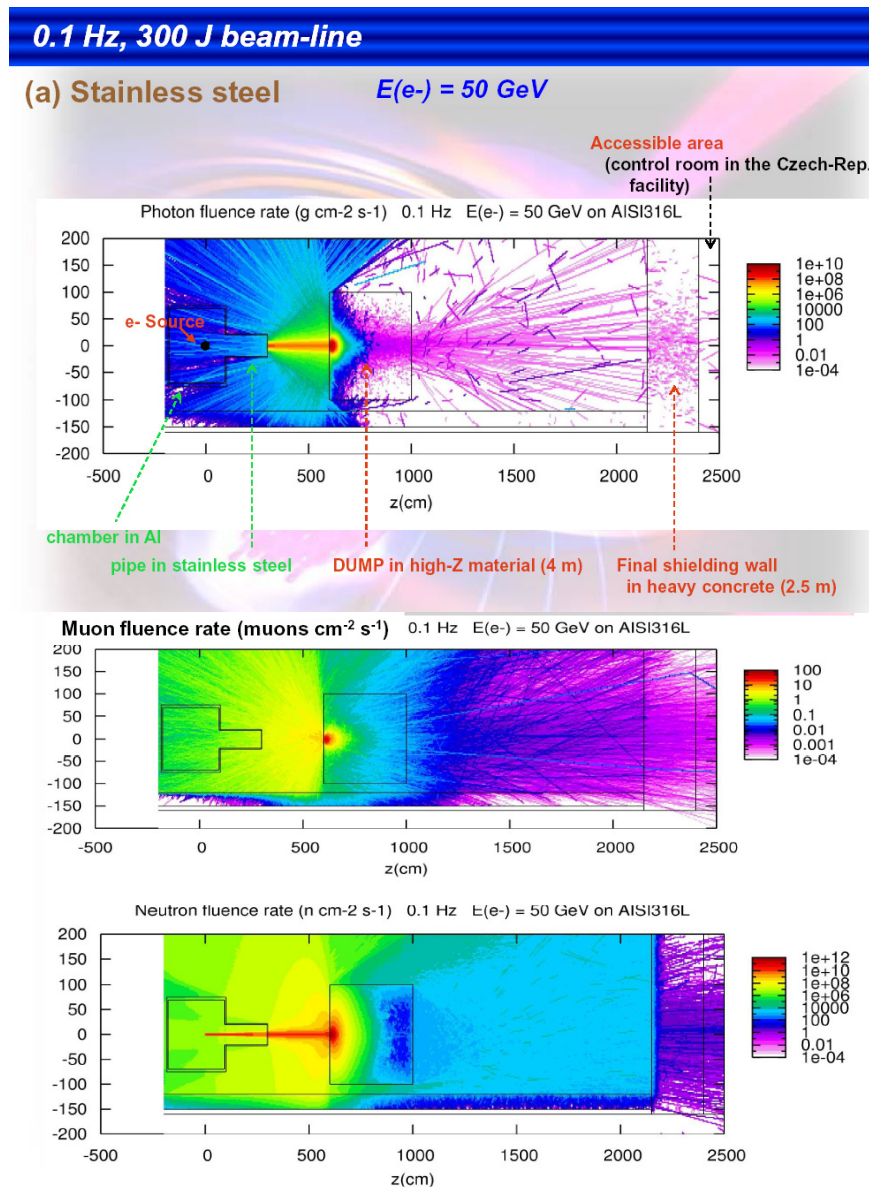
3. ábra: A müon sugárzás hatékony árnyékolása vasból készült falakkal (jobb oldali ábra), a beton gyakorlatilag nem gyengíti a sugárzást (bal oldali ábra) [2]

A céltárgyat a célkamrában helyezik el (anyaga alumínium), mely téglatest alakú (kb. $1,5 \times 1,5 \times 4$ m), a céltárgyat középen helyezik el benne, a bejövő lézer nyalábbal ellentétes oldalon kb. $2 \times 0,5 \times 0,5$ m csonkot helyeznek el, melyet az ún. beam dump-ra (nyaláb csapda) irányítanak. A kamrában vákuum van, a célkamrában, illetve a kamra mellett helyezkednek el a vizsgáló berendezések (4. ábra).

Az 5. ábrán a FLUKA kóddal végzett szimulációk láthatóak. A szimulációt rozsdamentes acél árnyékoló anyagra, 0,1 Hz ismétlési frekvenciájú, 300 J energiájú lézernyaláb esetére vizsgálták, 50 GeV-os elektron sugárzást feltételezve. A lézernyaláb balról érkezik, majd a célkamrába érve a céltárgyba csapódik. A felgyorsított részecske áram a kimenő csonkon keresztül elhagyja a célkamrát, majd közel 3 m múlva éri el a nyaláb csapdát, az ábra jobb oldalán (színekód) a részecske fluensteljesítmény látható (részecske. $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ban). Az ábrák jobb oldalán egy 2,5 m vastag beton fal látható.



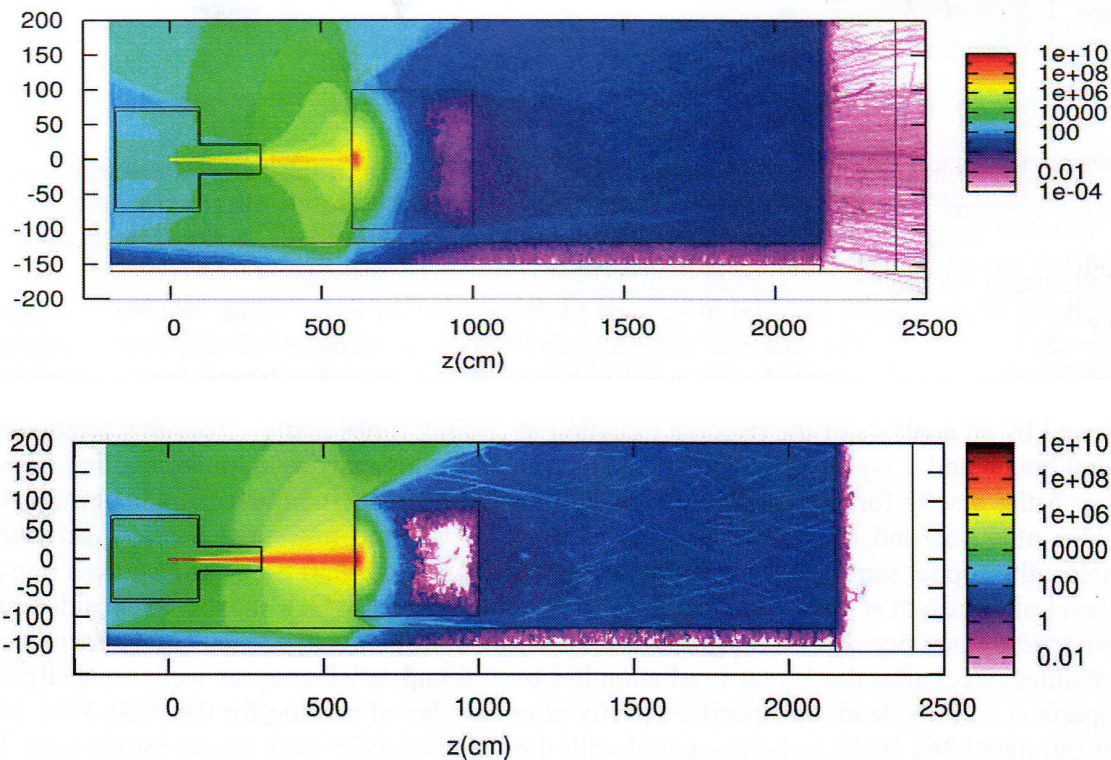
4. ábra: A kísérleti célkamra [1]



5. ábra: 50 GeV-os elektron nyaláb által keltett másodlagos sugárzások okozta részecske fluensteljesítmény eloszlás. Az y és z tengelyen a távolság a saválló acélban (cm), jobb oldalon a fluensteljesítmény színskódja ($\text{részecske.cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Az ábra alapján látható, hogy a nyaláb csapda a fotonokat és müonokat megfelelően árnyékolja a csapda jobb oldalán, de az árnyékoló falat elhagyó neutronok aránya még mindig nagy. Továbbá főleg a müonok és neutronok, de a fotonok is erősen vissza szóródnak a nyaláb csapda felületéről, ezért a célkamra és a csapda közötti terület sugárvédelmi

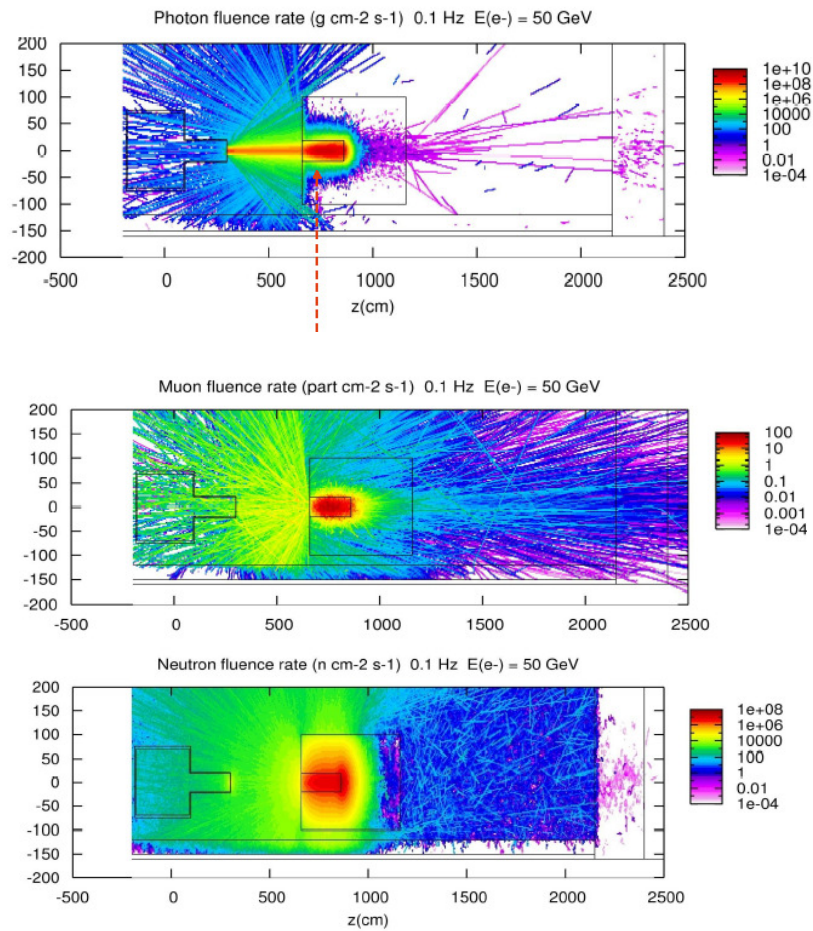
szempontból nem megfelelő. A 6. ábrán a prompt környezeti dózisegyenérték-teljesítmény látható 50, illetve 5 GeV-os elektron nyaláb esetén, az ábra jobb oldalán pedig a színekód van ($\mu\text{Sv/h}$).



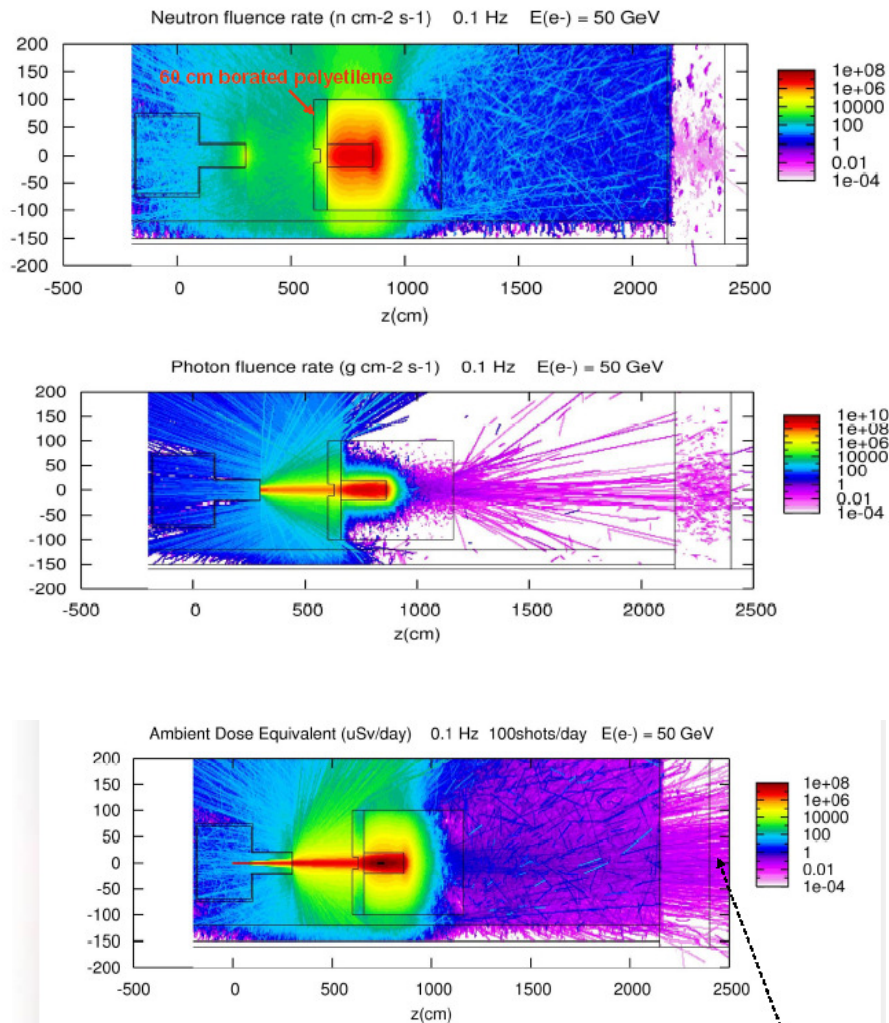
6. ábra: A környezeti dózisegyenérték-teljesítmény 50, illetve 5 GeV-os elektron nyaláb esetén. A jobb oldalon van a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény színekódja ($\mu\text{Sv/h}$), az y és z tengelyen a távolság saválló acélban (cm).

A kisebb energiájú sugárzás hatására a dózis a nyaláb csapda távolabbi részében erősen lecsökken (alsó ábra). A számított környezeti dózisegyenérték-teljesítmény a célkamra – csapda közötti részben ugyancsak nem megfelelő, azaz az árnyékoló fal rendszert tovább kell növelni.

A rendszer további tervezése során a falba egy 2 m hosszú, 50 cm átmérőjű grafit rudat helyeztek el, mely „bevezeti” az elektron sugárzást a nyaláb csapda közepére, így a kaszkád-effektusok és a másodlagos sugárzások elsősorban nem a csapda felületén, hanem annak belsejében keletkeznek (7. ábra). Látható, hogy ekkor valóban a csapda belső felében növekszik meg a részecske fluensteljesítmény és a vissza szóródás volumene is alacsonyabb az előző esethez képest. Ennek ellenére a neutron és müon visszaszóródás még így is jelentős. Ezért a csapda elé egy 60 cm vastag nagy hidrogén tartalmú anyagot, jelen esetben bórozott polietilént raktak a neutron visszaszóródás elkerülése érdekében (8. ábra). Ekkor a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény a beton fal után 10 nSv/nap , 100 lövés/nap esetén. Amennyiben évente 300 napig üzemel a kísérleti berendezés, akkor a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény átlaga $3 \mu\text{Sv/év}$ lesz, ha napi 100 helyett 1000 lövést adna le a rendszer, akkor a 10-szeresére emelkedne, azaz $0,03 \text{ mSv/év-re}$.



7. ábra: A nyaláb csapda tovább fejlesztett változata, grafit rúddal a közepén. A jobb oldalon van a részecske fluensteljesítmény színekódja ($\text{részecske.cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), az y és z tengelyen a távolság saválló acélban (cm).



8. ábra: A nyaláb csapda bórozott polietilénnel kiegészítve. Az első két ábrán a színek a részecske fluensteljesítmény ($\text{részecske} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), az y és z tengelyen a távolság saválló acélban (cm). A harmadik ábra jobb oldalán a színek a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény ($\mu\text{Sv/nap}$).

A nyaláb csapda végső struktúrája

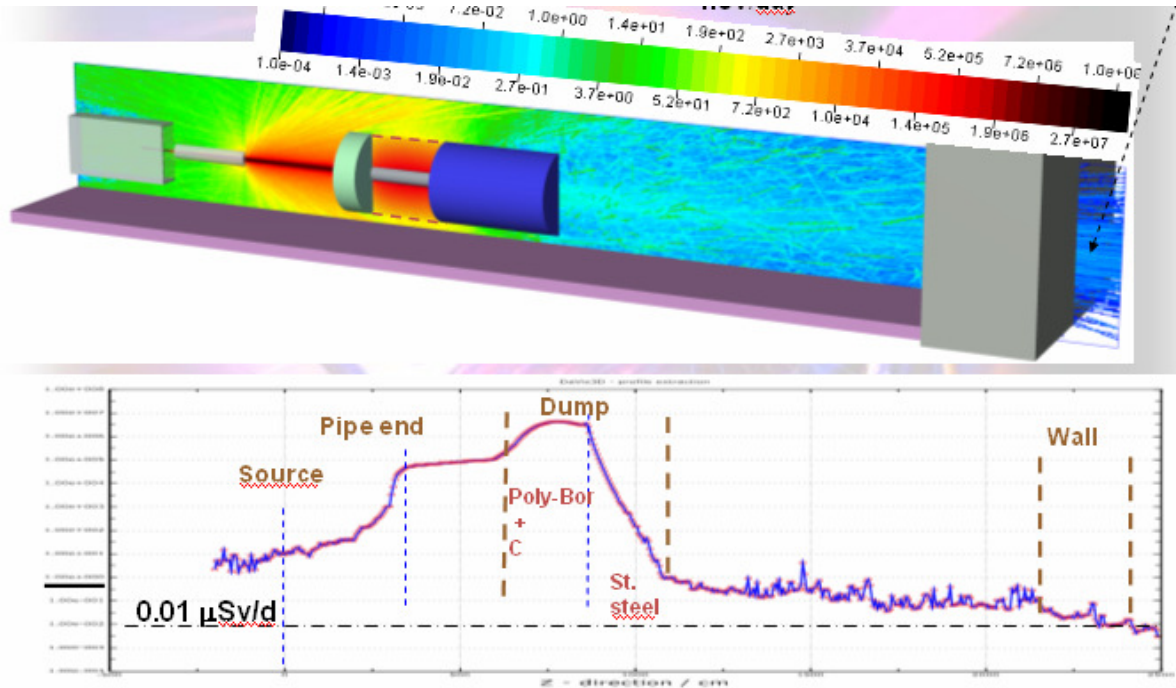
A szimulációs eredmények alapján a csapda három részből áll:

- 60 cm vastag bórozott polietilén a csapda elején, a kis energiájú neutronok visszaszóródásának megakadályozására (az árnyékoló anyag közepének vastagságát csökkentették, így könnyebben a csapda mélyére jut a nyaláb mentén érkező szekunder sugárzás)
- 2 m hosszú, 50 cm átmérőjű grafit rúd a nyaláb csapda közepén (sűrűsége: $1,9 \text{ g/cm}^3$)
- 5 m hosszú rozsdamentes acél henger (AISI-316L), átmérő 2 m

Az elektromágneses sugárzás hatására óriás rezonancia neutronok (Giant resonance neutron) keletkeznek, melyek energiája kisebb, mint 25 MeV, ezt a bórozott polietilén hatásosan gyengíti. A kísérleti labor falai betonból készülnek (2,5 m), melyek a fékezési

röntgen sugárzást és a nagy energiájú neutronokat hatásosan gyengítik. A neutron energia növekedésével a beton relaxációs rétegvastagsága 50 MeV-110 MeV-ig lineárisan nő.

A 9. ábrán a nyaláb csapda végleges struktúrája látható 3D-ben, alatta a csapda és a közelében kialakuló környezeti dózisegyenérték-teljesítmény ($\mu\text{Sv}/\text{nap}$).



9. ábra: A végleges nyaláb csapda képe 3D-ben és a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény alakulása ($\mu\text{Sv}/\text{nap}$) 50 GeV-es elektronok esetén, 0,1 Hz ismétlési frekvencián

A felső ábra alapján látható, hogy a célkamrát elhagyó 50 GeV-os elektron nyaláb a levegővel érintkezésbe lépve szóródik, nagy része a grafit csőnek köszönhetően bejut a csapda közepére, ahol az elektromágneses-hadron-kaszád beindul, majd a csapda második részét elérve a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény csökkenni kezd. A beton falat elhagyva $0,01 \mu\text{Sv}/\text{nap}$ érték alá csökken.

Az alsó ábrán látható a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény alakulása a távolsággal. A lézer-anyag kölcsönhatás során az elektronok a plazmában gyorsulni kezdenek, a célkamrában vákuum van. Mire az elektronok elérik a célkamra kivezető csonkját, addigra energiájuk az 50 GeV-ot is elérheti, a gyorsulás hatására szinkrotron sugárzást bocsátanak ki, emiatt a kezdeti közel $1 \mu\text{Sv}/\text{nap}$ a csonk végén eléri az $1000 \mu\text{Sv}/\text{nap}$ -ot. Az elektron nyaláb a kivezető csonk anyagával ütközve, fékezési röntgen sugárzást, illetve elektromágneses-hadron kaszkádot indukál, emiatt a dózis-teljesítmény exponenciálisan emelkedik (lavina-effektus) majd a csapda és a kilépő csonk közötti térrészben a közel állandó (enyhén növekszik). Miután a részecske nyaláb eléri a csapdát az elektromágneses - hadron kaszkád újra beindul és fékezési röntgen sugárzás is létrejön, elsősorban a csapda első 2,5 m-es szakaszán. A dózis-teljesítmény először exponenciálisan növekszik a lavina-effektus miatt, közben a keletkező részecskék energiája lépésenként csökken, a kezdeti energia „disszipálódik”, eloszlik a részecskék között, miután a dózis-teljesítmény növekedés elérte a maximumát a növekedés logaritmikusan folytatódik. Az ilyen exponenciális-logaritmikus függvényeket logisztikus görbéknek nevezzük.

A folyamatos részecske energia csökkenés révén (pl. szóródás) a részecskék energiája egy kritikus energia szint alá csökken, ekkor a kaszkád folyamatok telítődnek, leállnak és a folyamat „befagy”, nem keletkeznek újabb részecskék a kaszkád folyamatokból. A kaszkád folyamatok leállítását követően a nyaláb csapda második 2,5 m-es szakaszán a dózisteljesítmény közel exponenciálisan csökkenni kezd a csapda végéig 10^6 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ -ról egészen 1 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ -ig, majd a laboratórium beton falában tovább csökken egészen 10 nSv/h-ra. Ha napi 100 lövés van 300 napon át, akkor az éves átlagos környezeti dózisegyenérték-teljesítmény 3 $\mu\text{Sv}/\text{év}$ lesz, napi 1000 lövés esetén ennek tízszeres, azaz 30 $\mu\text{Sv}/\text{év}$. A Cseh Köztársaságban a sugárveszélyes helyen dolgozóakra vonatkozó dózis korlát 20 mSv/év, azaz a dózis korlát 0,002-ét sem éri el [1].

További ajánlások a sugárvédelmi árnyékoló fal kiegészítésére:

- Az 5. és 7. ábrát összevetve jól látható, hogy a kezdetben nyaláb irányú neutronok a grafit rúd elhelyezését követően radiális irányban is szóródnak, ezért a csapda első 2,5 m-es szakasza körül egy ugyancsak bórozott polietilénből készült (kb. 60 cm vastag) elemet kéne felhelyezni, így a radiális irányú neutronok nagy része nem hagyja el a csapdát. A kilépő neutron fluensteljesítmény $\sim 10\,000$ $\text{n}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$, (a színekód alapján sárgás-zöld)
- Ugyancsak az 5. és 7. ábrát összevetve jól látható, hogy a müonok jelentősen visszaszóródnak (1 müon. $\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$) ezért a nyaláb csapda elé, a bórozott polietilén elemhez hasonlóan, egy közel 1-1,5 m vastag rozsdamentes acélból készített elemet kéne elhelyezni, melynek közepén 20 cm vastag fűrt lyuk helyezkedne el.

A KÍSÉRLETI LABORATÓRIUMOK KIALAKÍTÁSA, ELLENŐRZŐ RENDSZEREK

A laboratóriumokat aktív és passzív mérő berendezésekkel kell felszerelni, melyek on-line és off-line rendszerben működhetnek, ezen eszközök a felaktiválódott anyagok mérésére alkalmasak.

Aktív mérő berendezések :

- GM cső,
- Ionizációs kamra,
- Proporciónális számláló,
- Szcintillációs detektor
- Félvezető spektrométer

Passzív mérő berendezések:

- Aktivációs detektorok,
- TLD-k

Az ellenőrző rendszer másik eleme a beléptető rendszer, mely ajtókból, zárákból, figyelmeztető berendezésekből áll. A beléptető rendszer megakadályozza a személyzet belépését az aktív zónába (target, nyaláb környéke), a külső sugárzás okozta károsodás így elkerülhető. Több egymástól független érzékelő rendszert kell kiépíteni a megbízható működés érdekében pl. logikai áramkörök beiktatásával, így csak akkor lehet indítani a kísérleteket, ha azt rendszer minden szinten engedélyezi. A beléptető rendszerhez tartozhat sugárzást jelző rendszer, mely külső-belső térben elhelyezett detektorokból áll, ezek szintemelkedéskor riasztanak és letiltják a belépést. A figyelmeztető jelzéseknek audiovizuálisnak kell lenniük, a vészvillogókat, kapcsolókat jól látható helyen kell elhelyezni,

melyek világítanak, ill. hangot adnak. A belső videokamerás megfigyelő hálózat segítségével nyomon követhető, illetve rögzíthetőek a napi események, melyeket napi jegyzőkönyvbe célszerű regisztrálni. A beléptető ajtók előtt célszerű labirintust kialakítani, mely költség hatékony, így nem kell nehéz pl. ólomból készült ajtókat elhelyezni, melyek működtetése segéd berendezéseket igényel.

A laboratóriumok folyamatos légcseréjét légelszívó berendezéseknek kell biztosítaniuk, így minimalizálható a kísérletek során a levegőben keletkező radioaktív anyagok inkorporációja. A hűtő-fűtő rendszereknek az épület többi hűtő-fűtő rendszerétől függetlennek kell lennie, ezáltal a csövekben lévő felaktiválódott korróziós termékek és a hűtő vízben felaktivált anyagok nem keveredhetnek az épület hűtő-fűtő rendszerében lévő vízzel, így a felaktivált anyagok zárt rendszerben maradnak.

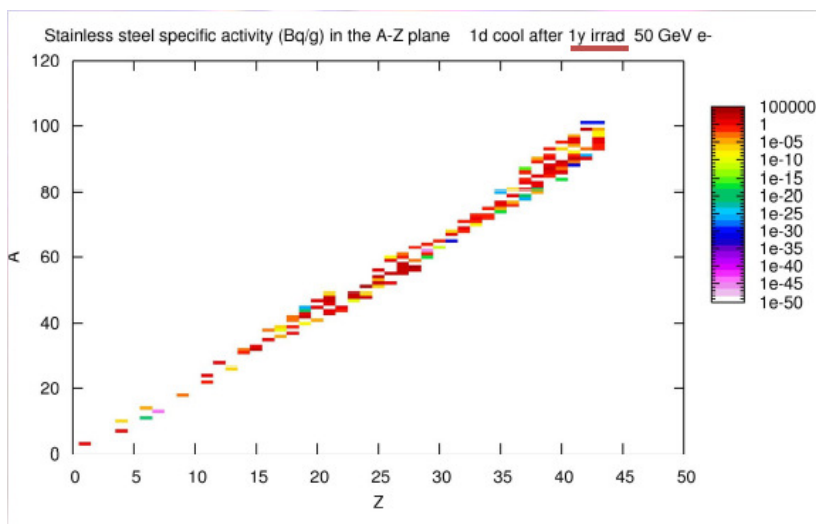
Környezetellenőrző rendszerek

A környezeti monitoring elemei lehetnek on- és off-line mérő berendezések, illetve mintavevő egységek. A központi légcsatornába a ki és belépő csomagnál GM szondákat, aeroszol szűrőket érdemes felhelyezni, a szűrők radioaktív anyagtartalmát gamma-spektrometriai mérésekkel lehet meghatározni. A telephely környékén elhelyezett fall-out mintavételező állomások és GM szondák adatai alapján mérhetőek a környezetbe kerülő radioaktív anyagok. A telepített központi kijelző rendszer, mely az aktív sugárvédelmi berendezések részét képezik, az on-line adatforgalmú GM szondák adatait dolgozza fel és jeleníti meg egy központi kijelzőn. Évente egy esetleg több alkalommal érdemes talaj, növény, víz mintavételezést végezni az épület környékén. A mérési adatok alapján a talajban, talajvízben keletkező radionuklidok mennyiségét, mozgását nyomon lehet követni a környezetben.

A NYALÁB CSAPDA LESZERELÉSE

Radioaktív hulladékok

A kísérletek során a sugárzások által kiváltott különböző magreakciók révén a céltárgyban, a vizsgált műszerekben, illetve a berendezést körülvevő árnyékolásban radioaktív izotópok keletkeznek. A 10. ábrán a rozsdamentes acél hosszú távú felaktiválódása látható szimuláció segítségével. Az egy év alatti nagy energiájú (50 GeV) elektron besugárzás hatására számos radioaktív elem keletkezik, melyek aktivitáskoncentrációja elérheti a 100 kBq/g-ot. Amennyiben az árnyékoló anyagok aktivitáskoncentrációja meghaladja az ún. MEAK (Mentességi aktivitáskoncentráció) értéket, akkor azok radioaktív hulladékoknak minősülnek, ekkor az árnyékoló anyagokat osztályozzák, majd a már nem hasznosítható anyagokat radioaktív hulladéktárolóban helyezik.



10. ábra: Rozsdamentes acél felaktiválódása. A színek a Z rendszámú elem A tömegszámú izotópjának az aktivitáskoncentrációját (Bq/g) jelöli. [3]

ÖSSZEGZÉS

A lézerfény-anyag kölcsönhatás során felgyorsított nagy energiájú részecske sugárzás, hatékony, optimális árnyékolása érdekében közepes rendszámú anyagból készült árnyékoló fal jöhet számításba, mely egyéb kis rendszámú anyagokkal kiegészítve optimálisan gyengíti a részecske sugárzásokat. Az OSIRIS és FLUKA kódokkal elvégzett szimulációk alapján az árnyékoló fal visszaveri a beérkező sugárzást, grafit rúddal kiegészítve a visszaszóródás aránya nagymértékben csökkenthető. A környezeti dózisegyenérték-teljesítmény kezdetben több lépcsőben- elsősorban a különféle anyagok találkozásánál- „lépcsőzetesen” emelkedik, majd a kaszkád-effektusok leállítását követően a az árnyékoló anyagon belül folyamatosan csökken, a betonfal túloldalán a 10 nSv/h alá csökken. Az árnyékolás vastagsága, szerkezete, anyagi felépítése optimális. A tervezett sugárvédelmi rendszerek várhatóan teljesíteni fogják a sugárvédelmi szabályokat, előírásokat nagy dózisteljesítmény tartalékkal, így a jövőben a rendszer teljesítményét tovább lehet növelni.

IRODALOM

- [1] Anna Ferrari: Target areas in the Czech Republic, WP6 találkozó, Prága, 2010. júl. 1-2.
- [2] Adolfo Esposito: Radiation protection for laser-based accelerators, LEI konferencia, Brassó, 2009. október 16-21.
- [3] Anna Ferrari, Daniele Margarone: Shielding assessment at ELI beamline facility (Czech Republic), WP6 találkozó, Salamanca, 2010. 05. 26-27.