

Radonmérés és környezeti monitorozás

Bevezetés

A radioaktív bomlás és a radioaktív sugárzások

Az izotópok stabilak vagy radioaktívak lehetnek. A radioaktív izotópok instabilak, vagyis bizonyos idő múlva, valamilyen ionizáló sugárzás kibocsátásával elbomlanak. Az adott időtartam alatt elbomlott atomok száma egyenesen arányos az időtartam hosszával (dt) és a bomlásra képes atomok számával (N), ezért a bomlásra képes atomok számának megváltozása (dN):

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt \quad [1]$$

Az arányossági tényező (λ) a bomlási állandó, melynek értéke minden radioizotóp esetében más és más. A bomlási állandó dimenziója 1/idő, mértékegysége lehet 1/s, 1/h, 1/év, stb.

Az [1] differenciálegyenlet megoldása, ha a kezdeti $t=0$ időpontban N_0 atomunk volt:

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad [2]$$

A radioaktív izotópok mennyiségét az aktivitással jellemezzük. Aktivitásnak az időegység alatt elbomlott atommagok számát nevezzük, azaz felírható, hogy:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N \quad [3]$$

Az aktivitás mértékegysége a Becquerel, melynek jele: Bq. 1 Becquerel aktivitás 1 bomlást jelent másodpercenként, azaz: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$.

A gyakorlatban előforduló aktivitások megadásakor gyakran használjuk az SI előtagokat: k [kilo] = 10^3 , M [mega] = 10^6 , G [giga] = 10^9 , T [tera] = 10^{12} .

A [2] és [3] egyenlet összevonásával kapjuk az aktivitás időbeli változását leíró exponenciális bomlástörvényt:

$$A(t) = A_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t), \quad [4]$$

ahol A_0 jelöli az aktivitást egy kezdeti időpontban,

$A(t)$ pedig az aktivitást az előzőhöz képest t idő múlva.

A gyakorlatban kényelmesebb és szemléletesebb a felezési idő ($t_{1/2}$) használata. Felezési időnek azt az időtartamot nevezzük, amely alatt az adott radioizotóp aktivitása a felére csökken.

$$A_0 / 2 = A(t_{1/2}) = A_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t_{1/2}) \quad [5]$$

Az [5] egyenletet $t_{1/2}$ -re megoldva:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad [6]$$

Ezt visszahelyettesítve a bomlástörvénybe azt kapjuk, hogy

$$A(t) = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{\ln(2) \cdot t}{t_{1/2}}\right) = A_0 \cdot 2^{\left(-\frac{t}{t_{1/2}}\right)} \quad [7]$$

Környezetünkben számos radionuklid (radioaktív izotóp) fordul elő. Ezek egy része *természetes*, más része *mesterséges* eredetű. A radioaktív izotópok bomlásukkor 3-féle sugárzást bocsáthatnak ki:

- α -sugárzás: kétszeres pozitív töltéssel rendelkező He ionok (He atommagok). Bár kinetikus energiájuk viszonylag nagy, (3-8 MeV), hatótávolságuk – nagy tömegük és töltésük miatt – kicsi, akár egy papírlap, vagy néhány cm vastag levegőréteg is elnyeli őket;

- β -sugárzás: elektronok vagy pozitronok, melyek szintén az atommag átalakulása során keletkeznek. Hatótávolságuk nagyobb, pl. levegőben energiájuktól függően 1-2 m-t is elérhet, szilárd vagy folyékony közegben azonban nem több mint 1-2 cm;
- γ -sugárzás: nagy energiájú elektromágneses sugárzás (fotonok), melyek megjelenése az előző két bomlási mód valamelyikét kísérheti. Áthatolóképessége még szilárd közegben is nagy (több méter), intenzitásának gyengítésére nagy rendszámú és sűrűségű anyagokat (Pb, beton) használnak.

A radioaktív sugárzások detektálása az emittált sugárzás és az anyag (detektor) közötti kölcsönhatáson alapszik. A kölcsönhatás formája a sugárzás fajtájától, energiájától ill. az anyag tulajdonságaitól (rendszám, sűrűség) függ. A detektorok nagy része az ionizációt és gerjesztést „hasznosítja” és elektromos impulzusokat szolgáltat (elektromos detektorok).

Az anyagban elnyelt ionizáló sugárzási energia fizikai, az élő anyagban, az emberi test szöveteiben emellett kémiai, biokémiai és biológiai hatást fejt ki. A hatás mértékeként a tömegegységben elnyelt és jelentős részben ionizációra fordított összes sugárzási energiát, a dózist választották. A három legfontosabb dóziszfogalom az elnyelt dózis, az egyenérték dózis és az effektív dózis. Ezek összefoglalása a „Dózisteljesítmény mérése” gyakorlat leírásában található.

A környezeti sugárzási helyzet ellenőrzése

A természetes sugárterhelés dózisa Magyarországon évente átlagosan 2,4 mSv effektív dózis. Ennek 60-70%-át belső sugárterhelés okozza (ezen belül nagyobb részt képvisel a levegőben lévő aeroszol-részecskékhez kötött radioaktivitás, a radon-leányelemek hatása, kisebbet az emberi szervezetben természetes okokból megtalálható ^{40}K radioizotóp dózisa. A légköri atombomba-robbantási kísérletek és a nukleáris létesítmények balesetei (elsősorban Csernobil) óta csekély mennyiségben megtalálható még a természetben számos mesterséges eredetű radionuklid is.

Fontos kérdés, hogy van-e jelen a környezetben még más, mesterséges eredetű radioaktív anyag, amely adott esetben a szervezetünkbe juthat. A BME NTI (mint atomenergiát alkalmazó kiemelt létesítmény) a 489/2015. kormányrendelet előírásai szerint részt vesz az országos környezeti sugárzásellenőrző rendszer munkájában.

Az Oktatóreaktor épülete mellett elhelyezett detektor folyamatosan méri a külső gamma-dózisteljesítményt, az aktuális érték a reaktorportán elhelyezett képernyőről bármikor leolvasható. Mivel a BME NTI tagja az Országos Környezeti Sugárvédelmi Ellenőrző rendszernek, az archivált adatok (a hálózat más tagjainak archivált adataival együtt) megtekinthetők a <http://omosjer.reak.bme.hu/> honlapon.

A levegő radionuklid-tartalmának vizsgálata érdekében a levegő aeroszoltartalmából (csapadéktól védett mintavevőben elhelyezett) aeroszolszűrő és légszivattyú segítségével folyamatosan mintát veszünk. A szűrőt hetente 3 alkalommal cseréljük, és néhány napos pihentetés után alacsony háttérű összesbéta-számlálóval elemezzük.

A levegőből kihulló anyagokat (fall-out: száraz kihullás, ülepedő aeroszolok, wash-out: nedves kihullás, csapadékvíz) egy nagy felületű tálcában folyamatosan gyűjtjük. Gondoskodni kell arról, hogy a tálcában mindig legyen folyadék (tisztá illetve etilén-glikolos víz, fagyálló), melyet havonta egyszer leeresztünk és bepárolunk. A bepárlási maradékot elhamvasztjuk, majd alacsony háttérű összesbéta-számlálóval elemezzük.

A Duna vizéből kéthetente veszünk egy mintát, melynek 500 ml-es részletét bepároljuk és alacsony háttérű összesbéta-számlálóval elemezzük.

A reaktor környéki talajból és fűből félévente veszünk egy-egy mintát, melyet megszáritunk, elhamvasztunk, majd alacsony háttérű összesbéta-számlálóval elemzünk.

Folyóvízi üledék, talajvíz, takarmány, indikátornövény mintázását, illetve elemzését nem végezzük.

A környezet ellenőrzésekor mindig figyelemmel kell lenni a természetes eredetű radioaktív izotópokra és azok sugárzására. Ha például a levegő radioaktív szennyezettségét vizsgáljuk (ahogyan azt ezen a laborgyakorlaton tesszük), a levegőben lévő radioaktivitás (normális esetben) döntő részét kitevő, rövid felezési idejű radon bomlástermékek hozzájárulását egy erre alkalmas eljárással le kell vonnunk az eredményből.

A radon

A földkéregi eredetű természetes radioaktivitás jelentős részét képező ^{238}U és ^{232}Th bomlási sorának egyik tagja radon nemesgáz, a ^{222}Rn (a "radon" sok esetben csak ezt, a ^{226}Ra -ból (rádium) keletkező radioizotópot jelenti) illetve a ^{220}Rn ("toron"). Mivel az előbbi felezési ideje 3,8 nap, az utóbbié pedig csak 54 s, a talajból és a talaj alatti kőzetből, valamint épületek esetében az építőanyagokból a ^{222}Rn jelentősen nagyobb mennyiségben kerülhet ki a légterbe.

Radioizotóp	Sugárzás	A sugárzás energiája [MeV]	Felezési idő [perc]	Bomlási állandó	
				[1/perc]	[1/s]
^{222}Rn	Alfa	5,49	5501	1,26e-4	2,1e-6
^{218}Po	Alfa	6,00	3,05	0,2272	3,78e-3
^{214}Pb	Béta	1,02	26,8	0,02586	4,31e-4
	Gamma	0,352			
^{214}Bi	Béta	3,27	19,7	0,03518	5,86e-4
	Gamma	0,609			
^{214}Po	Alfa	7,69	2,73e-6	2,54e5	4232

1. táblázat

A ^{222}Rn („radon“) és rövid felezési idejű bomlástermékeinek jellemző adatai

Radioizotóp	Sugárzás	A sugárzás energiája [MeV]	Felezési idő [perc]	Bomlási állandó	
				[1/perc]	[1/s]
^{220}Rn	Alfa	6,30	0,93	0,748	0,0125
^{216}Po	Alfa	6,78	0,0025	277	4,62
^{212}Pb	Béta	0,57	638	0,00109	1,81e-5
	Gamma	0,239			
^{212}Bi	Béta 64%	2,25	61	0,0114	1,91e-4
	Alfa 36%	6,07			
	Gamma	0,727			
^{212}Po	Alfa	8,78	5,0e-9	1,39e8	2,31e6
^{208}Tl	Béta	2,38	3,05	0,227	3,78e-3
	Gamma	0,583; 2,614			

2. táblázat

A ^{220}Rn („toron“) és rövid felezési idejű bomlástermékeinek jellemző adatai

A radon bomlása során keletkező leányelemek adszorbeálódnak a levegőben lévő aeroszolrészecskék (por, füst) felszínén, és belélegzésüket követően lerakódnak az emberi légutakban (orr, garat, légső, hörgők, tüdő). Rövid felezési idejük miatt hamarabb

elbomlanak, mintsem a szervezet tisztító mechanizmusa eltávolítaná őket. Dozimetriai szempontból különösen veszélyes az alfasugárzásuk, amelynek sugárzási tényezője $w_\alpha = 20$, azaz az abszorbeálódott alfa-energia ugyanakkora béta- vagy gamma-energiához képest húszszoros sejtkárosodást okoz.

A levegőbe jutott mesterséges eredetű radionuklidok is túlnyomó részben az aeroszolrészecskék felszínén kötődnek meg, így azok a radon-leányelemekkel együtt juthatnak a légutakba.

Az egyensúlyi egyenérték-koncentráció (EEC)

Ideális esetben a ^{222}Rn aktivitáskoncentrációjából (a radioaktív bomlás törvényeinek és a radionuklidok bomlási állandóinak ismeretében) a többi, a sorban ezt követő radionuklid aktivitáskoncentrációja is számolható. A valóságban az adszorpció, deszorpció, ülepedési, stb. folyamatok miatt nem áll fenn a bomlási egyensúly a radon és leányelemei között, tehát a radon aktivitáskoncentrációjából általában nem lehet kiszámolni a radon-leányelemek aktivitáskoncentrációit. Ugyanakkor általában nem is vagyunk kíváncsiak az egyes radionuklidok aktivitáskoncentrációira, csupán az általuk együttesen okozott légúti dózisa.

Ezért gyakran nem a vizsgált levegőminta radon- illetve radonleányelem-aktivitáskoncentrációit adjuk meg, hanem annak a fiktív, a bomlási egyensúly szempontjából ideális gázmintának a radon-aktivitáskoncentrációját, amely ugyanakkora légúti dózist lenne képes okozni, mint a vizsgált levegőminta. Ezt hívjuk radon-EEC-nek, amely a vizsgált levegőmintában lévő radon-leányelemek aktivitáskoncentrációinak súlyozott átlagaként számolható a következőképpen:

$$^{222}\text{Rn-EEC} = 0,105 * c(^{218}\text{Po}) + 0,516 * c(^{214}\text{Pb}) + 0,379 * c(^{214}\text{Bi}) \quad [8]$$

A ^{220}Rn (toron) egyensúlyi egyenérték koncentrációjára hasonló összefüggés adható meg, a megfelelő radionuklid-aktivitáskoncentrációk, alfaenergiák és bomlási állandók segítségével.

A mérési feladatok

A) Környezeti aktivitás mérése és radon EEC mérés AMS-02 M berendezéssel

Az AMS-02 (aerosol monitoring system) berendezés NTI-ben rendelkezésre álló, kézi vezérlésű változata (AMS-02 M) légszivattyúból, aeroszolszűrőből, nukleáris detektorokból, és számítógépből áll. A mintegy $5 \text{ m}^3/\text{h}$ térfogatáramú légszivattyú a környezetből vett levegőmintát átszívja az aeroszolszűrőn. Az aeroszolszűrő felületén gyűlik össze a radioaktivitást is tartalmazó aeroszol, a szűrési hatásfok majdnem 100%. Az aeroszolszűrő mellett elhelyezkedő nukleáris detektorok közül a PIPS (Si alapú félvezető-detektor) az aeroszolminta alfa- és béta-spektrumát, a NaI(Tl) (szcintillációs detektor) pedig a gamma-spektrumát veszi fel. A detektorok jeleit a számítógép fogadja, az azon futó vezérlő, adatgyűjtő, kiértékelő és archiváló program pedig felismeri a mintában esetleg jelenlévő, hosszú felezési idejű mesterséges eredetű radionuklidok (például ^{137}Cs , ^{60}Co) jelenlétét, és egyidejűleg adatokat szolgáltat a radon-leányelemek aktivitáskoncentrációiról, a Rn-EEC-értékekről is. Az AMS-02 használatával a mintavételt és a mérést egyidejűleg vagy egymást követően is megvalósíthatjuk, és lehetőség van a természetes és mesterséges eredetű radioaktivitás megkülönböztetésére.

A levegővel inkorporálható radioaktivitás döntő részben aeroszol-részecskékhez kötött állapotban található. Az alfa-, béta- és gammasugárzó radioaktív izotópok mérésével vizsgálható a levegő radioaktív szennyezettsége. A „mesterséges” eredetű szennyezések

meghatározásánál azonban a minden esetben jelenlévő, de folyamatosan változó koncentrációjú ^{222}Rn és ^{220}Rn leányelemeinek „részesedését” le kell vonnunk. Igen hasznos, ha a környezeti monitorozó berendezések működőképességének és pontosságának igazolásaképpen folyamatosan mérik és rögzítik a mindenkori radon- és toron-aktivitáskoncentrációt, azaz az EEC-eket.

A berendezést háttér mérés után 30 percen át működtetjük. A készülék 5 percenként mért adatait átvevő számítógépes program összeveti a kapott spektrumokat (a vízszintes tengelyen a detektált részecskék energiáját, a függőlegesen a detektált részecskék számát tartalmazó grafikont és adatsort) a kalibráció során rögzített adatprofilokkal, és az időbeli függést is tartalmazó kiértékelő eljárásban megállapítja, hogy van-e jelen a változó aktivitású radon és toron leányelemeken kívül más, mesterséges eredetű radioaktivitás. Ha talál ilyent, meghatározza azok becsült mennyiségét (koncentrációját a mintázott levegőben), ha nem, akkor a kimutatási érzékenységet (c_{LD}), valamint a radon és toron EEC-t adja meg.

A mesterséges radioaktivitás jelenlétének felismerése a detektorok energiaszelektivitásán alapul. Az alfa/béta, illetve a gamma spektrumban is jól meghatározható, hogy hol jelentkeznek a radon-leányelemekhez rendelhető csúcsok. Az ezektől eltérő spektrális területeken is tapasztalhatók beütések a radon- és (bizonyos mintavételi idő eltelte után) a toron-leányelemektől. Ezek nagysága (időfüggő módon) arányos a radon- és toron csúcsok területével, ezért ezek az arányok (áthatás, *cross-talk*) kalibrációs mérésorozattal meghatározhatók. Az áthatási tényezők ismeretében vonható le a mesterséges radioaktivitás kimutatásához szükséges, az időben változó értékű alapvonal.

A mérés végrehajtása

Kapcsoljuk be az AMS-02-t és a hozzá kapcsolt számítógépet, ez utóbbit indítsuk el az AMS-02 programjait! Helyezzünk egy szűrőt az AMS-02-be és indítsuk el a mérést! Az AMS-02 5 percen át méri a háttérrel, majd elindítja a pumpát. Kb. 30 percen át vegyük a mintát! Ez alatt a berendezés folyamatosan méri a szűrőt, 1 percenként frissíti a spektrumokat, melyeket 5 percenként archivál és a képernyőről töröl. A mért spektrumokat a program eltárolja, azokat a mérésvezető segítségével visszahívjuk és áttekintjük. A program a spektrumok kiértékelését is elvégzi, az eredményeket le kell írni a jegyzőkönyvbe.

A mesterséges radioaktivitás belélegzéséből származó dózis becslése

Sugárvédelmi vizsgálatokban az aktivitás-koncentrációból már egyszerűen megbecsülhető az az inkorporációs effektív dózis is, amelyet a feltételezett szennyezett levegő belélegzésével kapna egy fiktív személy:

$$H_E = c_{LD} \cdot F \cdot t_p \cdot DCF_i \quad [8]$$

A [8] egyenletben F jelöli a szennyezett levegő belélegző személy légzési sebességét (ennek szokásos értéke alvásnál 0,8; normális napi tevékenységnél 1,0; nehéz fizikai munkánál 1.2 m³/h), t_p a személy tartózkodási idejét a szennyezett légtérben, DCF pedig az egységnyi radioaktivitás belélegzésére számított, nemzetközi kompilációkban közzétett belső dózistényezőt [Sv/Bq]. Az „i” index egy kiválasztott radioizotópot jelöl. Alfasugárzó mesterséges eredetű szennyezésnél „i” szokásos választása a ^{239}Pu , a legnagyobb DCF -ű, azaz potenciálisan legveszélyesebb radionuklid. A DCF értéke a ^{239}Pu oldhatatlan oxidjaira 17 évesnél idősebb személyek esetében $1,5 \times 10^{-5}$ Sv/Bq. Végezzük el a feltételezett szennyezett levegő belélegzésétől származó inkorporációs effektív dózis becslését a legutolsó mérés során az alfasugárzó mesterséges szennyezés kimutatási határára kijelzett c_{LD}

értékkel! Az eredményt vessük össze a természetes sugárterhelés dóziséval, valamint a lakossági dóziskorláttal, melynek értéke 1 mSv/év.

B) Radonmérés RADIM 3A berendezéssel

A RADIM 3A mérőberendezés szilícium félvezető detektort és diffúziós cellát tartalmazó radongázmérő. A berendezésben egy szűrőlap akadályozza meg a radon-leányelemek bejutását a mérőcellába. A mérés során csak a cellába bejutott ^{222}Rn -ból a cellában tartózkodás során előálló ^{218}Po leányelem 6,0 MeV-os alfasugárzását regisztráljuk. (A ^{214}Po 7,69 MeV-os alfasugárzásának detektálását diszkriminátorral, illetve kalibrált „áthallás” korrekcióval küszöbölik ki.) A berendezés beépített számítógépén, operátori beavatkozás nélkül fut a mérési adatgyűjtő- és kiértékelő program, ami a készülék gépkönyvében részletesen ismertetett módon számítja ki a mért alfaintenzitásból a légtér radongáz-koncentrációját. Az operátor a kezelőszervek (beviteli billentyűk, kijelző) révén irányítja a berendezés működését, ennek részleteivel a gyakorlaton ismerkednek meg a hallgatók. A berendezés csak ^{222}Rn mérésére szolgál, azaz a két radonizotópot együttesen határozza meg. Ez csak jelentős ^{220}Rn (toron) koncentrációnál vezet módszeres mérési hibához.

A mérési feladat

A mérés során először meg kell ismerkedni a kissé bonyolult rendszerű vezérlő billentyűkkel, majd a rendelkezésre álló mérési időnek megfelelő mintavételi módot beállítva vizsgáljuk a kiválasztott légterek radongáz-koncentrációját. Zárt és nyílt terekben egyaránt mérhetünk, ezzel kiegészítve az előbbieken ismertetett, a kültéri mérésekre kidolgozott AMS-02 rendszerrel végzett méréseket. A mérés eredményeinek kiolvasásához a RADIM-3A-t számítógéphez kell csatlakoztatni, és a telepített kiolvasó programmal kapjuk meg a radongáz-koncentrációt és annak szórását. Az értékeket be kell írni a jegyzőkönyvbe.

Dózisbecslés

A mérés eredménye alapján egyszerű dózisbecslést végezhetünk, ha a szakirodalomban elfogadott, elterjedten használt 20 Bq/m^3 ^{222}Rn EEC $\approx 1 \text{ mSv/év}$ aránypárral számolunk, és szabad téri mérésnél az EEC-t a mért radonkoncentráció 80%-ának, beltéri mérésnél 50%-ának vesszük. Az eredményt be kell írni a jegyzőkönyvbe.