

REX

Radonexhaláció mérése

A természetes ionizáló sugárzások emberre gyakorolt hatása több részről tevődik össze. Ezek közül a biológiai hatás több mint fele a radon és leányelemeinek sugárzásától származik. Főleg a lakóterekben felhalmozott radon fontos ebből a szempontból, amit éjjel alvás közben belélegzünk, és ez a tüdőnkben elbomolhat. A lakóterekben viszont általában a talajból, kisebb részben az építőanyagokból vagy a vizekből jut be a radon. Egyrészt a talajok urán- és rádiumtartalma határozza meg, hogy mennyi radon szabadulhat ki a szemcsékből. Másrészt szemcsén belüli diffúzió szabályozza, hogy a szemcsékben keletkező radon hány százaléka tud belőle diffúzióval kijutni. Ezután a szemcsék közötti térből is ki kell jutni a gáznak ahhoz, hogy az épületekbe bejusson. Egy makroszkopikus minta szemcséiből, majd utána a szemcséközi térből a levegőbe időegység alatt kilépő atomok számát hívjuk exhalációnak. A talajok radonexhalációja fontos paramétere annak, hogy a rájuk épült házakban milyen radonkoncentráció halmozódik fel, és a lakók mekkora dózist természetes radioaktív sugárterhelést kapnak emiatt.

A laboratóriumi gyakorlaton talajminták radonexhalációját vizsgáljuk radonkamra segítségével. Célunk, hogy meghatározzuk, hány radonatom lép ki a talajmintából másodpercenként. A mérés elve az, hogy hosszú időre bezárjuk a talajmintát egy kamrába, és megvárjuk, míg radioaktív egyensúly alakul ki. A kamra légterében a radonatomok száma egyrészt nő, mert a radon kiáramlik a talajmintából, másrészt a kamra légterében az atomok folyamatosan elbomlanak. Egyensúlyban annyi atom bomlik el, mint amennyi kiáramlik a légtérbe. $A=E$, ahol A a radon aktivitása, E pedig a radonexhaláció. A radonkoncentráció mérésével meghatározhatjuk a radonexhalációt.

A mérést RAD7 radondetektorral végezzük, amely félvezető szilícium-detektort tartalmaz, és pontosan képes az alfa-részecskék energiájának megállapítására. A mérés során a minták alfa-spektroszkópiai vizsgálatát is elvégezzük, amivel megkülönböztethetők az uránsorban keletkező radon (^{222}Rn), a tórium sorban keletkező toron (^{220}Rn) leányelemeinek alfa-sugárzásai. A toron tehát egy radonizotóp, amely rövid, 55 s-os felezési ideje miatt csak ritkán képes a szemcsékből észrevehető mennyiségben kiszabadulni elbomlása előtt.

A radon kiáramlásának időfüggése egy lezárt radonkamrában

A radonatomok (^{222}Rn) a rádium (^{226}Ra) alfa-bomlásakor keletkeznek. A mintáinkban a rádium a talajszemcsékben van, azoknak valamelyik ásvány-alkotójában. A rádium két módon kerülhet ide. Vagy egy uránatom került bele az ásványba annak keletkezésekor, és az urán bomlásával a bomlási sornak megfelelően egyszer csak rádium keletkezett, és a sorban keletkezett izotópok közül egyik sem hagyta el az ásvány térfogatát. Ilyenkor a rádium „beleszületett” ebbe a kristály-környezetbe. Másik esetben a rádium maga is része a szemcse keletkezésének. Amikor a szemcse anyaga keletkezett, akkor a rádium is beépült a kristályba. Harmadik esetben a rádium a talajszemcsék felületére kivált valamilyen kémiai reakció során. Az első két esetben a rádium bomlása után keletkező radon nehezen jut ki a szemcséből, a harmadik esetben könnyen. A radonnak azért van egyáltalán esélye kijutni, mert az elektronfelhője nemesgáz szerkezetű. A lezárt szerkezetnek köszönhetően a radon és a környező atomok közötti kölcsönhatás kicsi, a radon nem kötődik a kristályrácsához. A szemcséből kijutó radonatomok számát *emanációnak* hívjuk. Amelyik nem jutott ki, azok a diffúzió közben elbomlottak. Minél tovább tart a kidiffundálás, annál nagyobb az elbomlás valószínűsége. A radon emanációval jut a szemcsék közötti pórusterbe, és onnan *exhalációval* jut a levegőre.

Ha a mintánkban N_{Ra} rádiumatom van, akkor ennek az aktivitása $A = \lambda_{Ra} N_{Ra}$, ahol λ_{Ra} a rádium bomlási állandója. Ez azt jelenti, hogy másodpercenként A db radon keletkezik. Ennek egy része, $e = \varepsilon_1 A$ darab, kijut a szemcsékből. Ekkor e az emanáció, és ε_1 az emanációs együttható. Az e darab radonatom közül a mintából $E = \varepsilon A$ darab tud kijutni, akik a pórusterben való diffúziós mozgás során sem bomlanak el. ε az exhalációs együttható. Az exhaláció így arányos a minta rádiumtartalmával, rádiumaktivitásával, de nem csak az határozza meg, hanem a diffúziós körülmények is, amit az ε együttható ír le. Egy adott talajra épült házban kialakuló radonkoncentrációk szempontjából az E exhaláció a meghatározó.

Ha az A aktivitású rádiumot tartalmazó mintából E radon jut a légtérbe a diffúzió útján, de a légtérből többé nem tud radon visszajutni a mintába, akkor a légteret állandó sebességgel feltöltő exhalációról van szó. Az exhaláció egységnyi felületre vett értékét hívjuk radonfluxusnak. Egy adott mintánál a kettő arányos egymással, ezért használhatjuk a kiáramló radonfluxus elnevezést is. Ilyenkor a légtérben lévő radonatomok számát $N_{lev}(t)$ meghatározó differenciálegyenletben a keletkezési tag mellett ott van a szokásos radon elbomlását leíró tag is ($-\lambda N_{lev}$, ahol $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ a radon bomlási állandója).

$$\dot{N}_{lev}(t) = -\lambda N_{lev}(t) + E$$

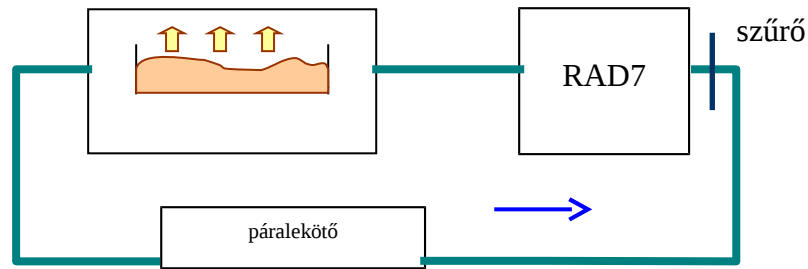
Ennek az egyenletnek a megoldása $N_{lev}(t=0) = 0$ esetben a következő: $N_{lev}(t) = \frac{E}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$, és a radon aktivitása a levegőben:

$$A_{Rn} = E (1 - e^{-\lambda t}). \quad (1)$$

Ha a radon felezési idejének 5-szörösét kivárjuk, akkor a lezárt radonkamrában lévő radon aktivitása egyenlő lesz az exhalációval, mert az exponenciális tag elhanyagolhatóvá válik az 1-hez képest. Ha a mérést sok idő eltelte után végezzük, akkor $A_{Rn} = E$ fennáll. A mérés során a radon aktivitáskoncentrációját határozzuk meg RAD7 műszerrel, azaz $c_{lev} = A_{Rn} / V = E / V$ -t.

A mérési eljárás

A méréskor a radonkamrával sorba műanyag csövekkel bekötünk egy páralekötő anyagot tartalmazó egységet, és a RAD7 detektort. A detektorban lévő pumpa bekapcsolás után keringetni kezdi a levegőt, ami átmegy a páralekötőn, megszabadul víztartalmától. Ezután átmegy egy vékony szűrőpapíron, ami kiszűri az aeroszolatokat a levegőből (amire általában a radon leányelemei kiülnek). Ezután bejut a detektorba, ahol a radon alfa-bomlásakor keletkező ^{218}Po ionokat egy elektromos tér a szilícium-félvezető detektorra vonzza, és azok ott a felületen megragadnak. A detektor a ^{218}Po és leányelemeinek alfa-bomlásakor felszabaduló alfa-részecskéket tudja detektálni, nem közvetlenül a radont, hiszen a radon által kibocsájtott alfa-részecske a levegőben nem tud eljutni a detektorig. A páratlanítás miatt szükséges, hogy a ^{218}Po ionok könnyebben eljuthassanak a detektorra. A levegőben lévő aeroszolatokat pedig azért akarjuk kiszűrni, mert csak azokra a ^{218}Po atomokra vagyunk kíváncsiak, amelyek a mérés során a radon bomlásából keletkeztek a műszer belsejében. A RAD7 műszer alfa-detektálási határfoka, a ^{218}Po ionok detektorra való eljutásának valószínűsége (korrigálva a páratartalomra) mind bele vannak számolva abba a kalibrációs faktorba, amelyet a RAD7 műszer maga használ arra, hogy a detektált alfa-részecskék számát átváltsa a másodpercenként és térfogategységenként elbomló polóniumatomok számára, tehát a nekünk hasznosabb aktivitáskoncentrációra, amelyet már közvetlenül Bq/m^3 egységekben ad meg. A mérési elrendezés az ábrán látható.



A radonkamrában felhalmozódott radon aktivitáskonzentrációja a csövek és a RAD7 bekapcsolásával felhígul. A csövek térfogatát és a RAD7-ben lévő detektortér térfogatát együtt V_{det} -nek nevezzük, ezekben a mérés kezdetekor a laboratórium levegője van. Ezt a térfogatot le kell mérnünk, figyelembe véve, hogy a RAD7 belső térfogata 7 dl. A radonkamrában a légtér térfogata a kamra teljes térfogata, mínusz maga a minta térfogata, ezt V_{net} -tel jelöljük. A méréskor a csövekben és a detektor légterében lévő levegőt nem tudjuk elkerülni, ezért a mért koncentráció (c_m) a radonkamrában lévő c_{lev} eredeti radonaktivitásnál kisebb lesz. A radon felhígul. Ezért háttérmerést is kell végeznünk, hogy a detektorban és a csövekben levő radontartalmat (c_h) ismerjük. A mérés során aktivitáskonzentrációt mérünk, ami $c=A/V=\lambda N/V$ (Bq/m³). A rendszerben található radonatomokat összeszámolva:

$$c_m = \frac{\lambda}{V_{\text{összes}}} (N_{lev} + N_h) = \frac{c_{lev} \cdot V_{net} + c_h \cdot V_{det}}{V_{net} + V_{det}}, \text{ amiből következik, hogy}$$

$$c_{lev} = c_m \left(1 + \frac{V_{det}}{V_{net}} \right) - c_h \frac{V_{det}}{V_{net}}$$

A radonkoncentráció mérési elve

Maga a radon **5,6 MeV** energiájú alfa-részecskéket bocsát ki a bomlásakor. A leányeleme a ²¹⁸Po (felezési ideje 3 perc) pedig **6,1 MeV**-es alfákat emittál. A sorban ezután két béta-bomlás következik, a ²¹⁴Pb és a ²¹⁴Bi bomlásai, melyeknek körülbelül 20 perc a felezési idejük. A következő elem a ²¹⁴Po **7,7 MeV**-es alfa-részecskéket bocsát ki és 36 mikroszekundum felezési idővel alakul a ²¹⁰Pb atommá, melynek a felezési ideje 21 év, és béta-bomlással bomlik. Ez az elem a radonsor végét jelenti a laboratóriumi időskálát tekintve.

A radonkoncentrációt a leányelemei alapján határozzuk meg. A műszer detektálja a ²¹⁸Po bomlásait, és a ²¹⁴Po bomlásait is. Ezeket az energiájuk alapján jól meg tudja különböztetni. Az előbbi beütéseit az **A** csatornában gyűjti a gép, míg az utóbbi energiatartományát hívjuk **C** csatornának. (A **B** és **D** csatornában a toron leányelemeit detektáljuk.) A ²¹⁸Po bomlása a radon bomlása után pár perccel következik be, ezt „friss”-radonnak hívjuk, míg a ²¹⁴Po bomlása csak a két lassú béta-bomlás után következik be, ezért ezek bomlása az eredeti ²²²Rn bomlása után kb. fél órával történik. Gyors radonkoncentráció változásokat ez utóbbival nem lehet követni, ezért ha műszert *sniff módban* használjuk, akkor a radonkoncentrációt csak a ²¹⁸Po beütései alapján állapítja meg.

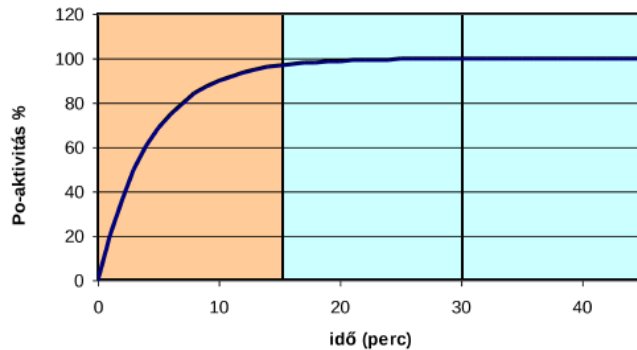
Mivel magát a radont nem detektáljuk, meg kell várni, míg a radon és a ²¹⁸Po radioaktív egyensúlyba kerülnek egymással. Ha a radontartalom állandó a radonkamra légterében, akkor a ²¹⁸Po atomok száma a következők szerint alakul, ahol A az állandó radonaktivitás a mért levegőben:

$$\dot{P}(t) = A - \lambda_p P(t)$$

ez a fentiekhez hasonló alakú differenciálegyenlet, és megoldása:

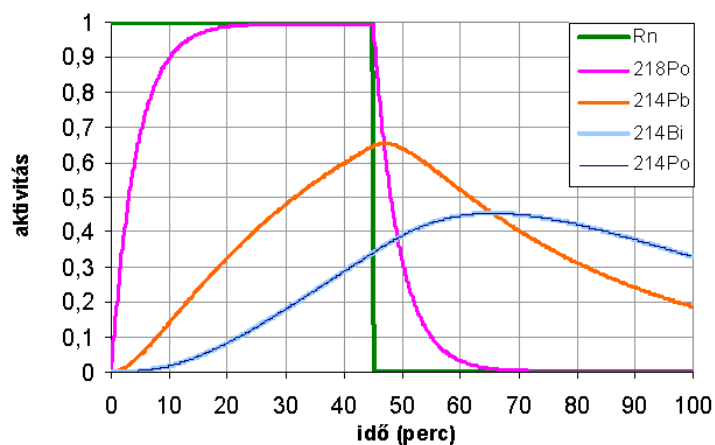
$$\lambda_p P(t) = A(1 - e^{-\lambda_p t})$$

Ezt grafikusán ábrázoltuk az alábbi ábrán. A narancssárga terület jelöli az első mérés idejét, amikor még a radioaktív egyensúly nem állt be.



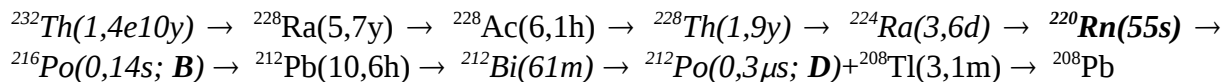
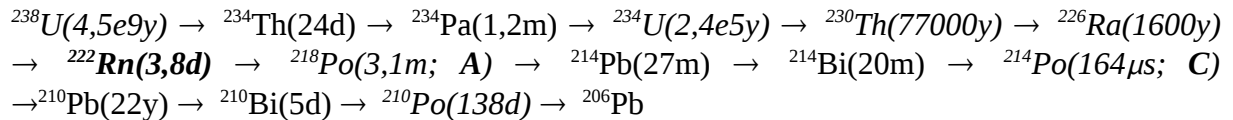
A második és a harmadik mérés idejét a kék terület jelzi. Ezek során a polónium aktivitása már eléri a 100%-ot. Az első tartományban ennek a beütésszámnak kb. 70%-a mérhető, ezért ezt az eredményt nem szabad a radonkoncentráció számolásánál figyelembe venni. A második két időtartamnál a teljesen beállt egyensúlyi esethez képesti beütések 99 és 99,9 százaléka mérhető, és ez az eltérés sokkal kisebb, mint a mérési bizonytalanság. Ezért a második és harmadik 15 perces mérések átlagából kell számolni a radonkoncentrációt az exhaláció mérésénél.

Becsüljük meg, hogy 1 óra alatt az előző minta feletti térben a nulláról mekkora radonkoncentráció alakulhat ki! Azt tudjuk, hogy 3 hét alatt a radonkamra légterében kialakulna a radon egyensúlya. A feltöltődési görbének már a telítési szakaszában lennénk akkor. A kezdeti szakaszban azonban az idővel egyenesen arányosan indul a radonkoncentráció. A telítődési egyenletben (1) az $e^x \approx 1+x$ közelítést alkalmazzuk, így a radonkoncentrációra az $A = E\lambda t$ egyenest kapjuk: $A = E(1 - (1 - \lambda t)) = E\lambda t = E \cdot 0,00012667 \cdot t(\text{perc})$. Ha 3 hét helyett csak 30 percet várunk, akkor a radonkoncentráció az exhalációval nem lesz egyenlő, hanem annak 0,0038-szorosa lesz, azaz kb. 263-ad része lesz. Nagyon nagy exhalációjú mintáknál a radonkoncentráció egyenletes növekedését is ki lehet mérni ezzel, és akkor nem kell három hetet várni.



Az fenti ábra a különböző izotópok aktivitását mutatja (relatív egységekben) abban a esetben, amikor kezdetben nem voltak leányelemek a detektorban, és a radon koncentrációja állandó 45 percig, azután pedig nulla. A különböző görbék a radioaktív bomlás egyenleteinek

megoldásából származnak. Figyeljük meg, hogyan alakulnak a különböző izotópok aktivitásai! A ^{218}Po (A csatorna) néhány perces felezési ideje miatt szorosan követi a radon aktivitását. A ^{214}Pb már csak sokkal lassabban tud beállni az egyensúlyba hosszabb, félórás felezési ideje miatt. A ^{214}Bi és a ^{214}Po (C csatorna) görbék egybeesnek, a ^{214}Po nagyon kicsi felezési ideje miatt. Hasznos megemlíteni itt az urán és tórium bomlási sorát (dőlt betűvel szerepelnek az alfa-bomló atommagok):



Mérési feladatok

1. Határozzuk meg az egyik lezárt talajminta radonexhalációját és rádiumtartalmát!

Válasszunk ki egy, már több mint három hete lezárt talajmintát, és készítsünk elő a RAD7 detektorhoz egy páralekötő hengert és három műanyag csövet.

- Állítsuk be a RAD7 detektort 15 perces mérési időre. Setup/Cycle/enter+kurzor gombok/enter megnyomásával. 5 perces mérési időt is használhatunk, csak akkor három ilyen mérés eredményének átlagát vegyük.
- A beszívó nyílásra helyezzünk egy gyári filtert, a kifújó nyílást hagyjuk szabadon. A szobában az ablakot ki lehet nyitni. Indítsunk el egy mérést: Test/Start/enter. Ezzel a háttérrel mérjük meg, a RAD7 detektorkamrájában levő levegő radontartalmát.
- Mérjük le a csöveket, és határozzuk meg a belső térfogatukat, a páralekötő légtérfogatával együtt.
- A háttérmérés után a Test/Stop/enter lenyomásával állítsuk le a mérést. Csatlakoztassuk a RAD7-et egy számítógép soros portjához, melyen az adatleolvasó program fut. Állítsuk össze a csövekből, a detektorból, a kamrából és a páralekötőből álló rendszert. Parafilmmel biztosítsuk a csövek csatlakozásainak légmentességét.
- Nyissuk ki a radonkamrán a csapokat és indítsuk el a mérést újra: Test/Start/enter. Mérjük meg a radontartalmat 3×15 (vagy 9×5) percig, és jegyezzük le az eredményeket. Ha a detektorhoz van printer kapcsolva, akkor a printet a mérés végén tegyük el, és a jegyzőkönyvhöz csatoljuk.
- A mérés első 15 percében olvassunk ki egy spektrumot a RAD7-ből: a leolvasó programot indítsuk el a gépen, a RAD7-en pedig a Special/ComSpec/enter parancsot adjuk ki. A leolvasott fájlt nevezzük át a DURRIDGE.DAT-ról spektum1.dat-ra. Ismételjük ezt meg ezt a műveletet a harmadik negyedóra vége felé is. Ennek a fájlnak legyen spektum2.dat a neve.
- A 45 perc mérés után Test/Stop/enter és Test/Save/enter parancsokkal állítsuk le a mérést, és így új számozású mérést kezdhetünk majd később.

Ezekből az adatokból a radonexhaláció már kiszámolható.

- Határozzuk meg az $A = C_{lev} V_{lev}$ -et, ez egyenlő a radonexhalációval.
- Vizsgáljuk meg és adjuk meg a mérés statisztikus és szisztematikus hibáit!
- Adjunk alsó korlátot a talajminta rádiumaktivitására! A rádium aktivitása megadja, hogy hány radonatom keletkezik a szemcsékben másodpercenként, de ezek közül nem mind jut ki a szemcséből, ill. még kevesebb a talajmintából.

2. Vizsgáljuk meg a radon leányelemeinek bomlását!

- a) Állítsuk a mérési időt 5 percre. Setup/Cycle/enter/kurzor gombok/enter majd Setup/SaveUser/enter. Vegyük le a csöveket a RAD7-ről, a kamráról ne. A RAD7 bemenetén csak a gyári filter maradjon. Tekerjük le a radonkamra becsavart ajtaját vigyázva, hogy ne hulljon ki minta! Tegyük félre a kamrát szellőztetés céljából.
- b) Indítsunk egy üres mérést a RAD7-en. Mérjünk 7-8 ciklust és figyeljük a koncentrációt!
- c) A hetedik ciklusban ismét vegyünk le egy spektrumot a számítógépre: Special/ComSpec/enter miközben fut az adatleolvasó szoftver. Nevezzük át a keletkezett fájlt spektrum3.dat-nak.
- d) A mérés végeztével Test/Stop/enterrel állítsuk le a mérést, majd Test/Save/enterrel zárjuk is le. Ezután töltsük át az összes adatot a számítógépre: Special/ComAll/enter. Nevezzük át adatsor1.dat-nak a DURRIDGE.DAT fájlt.
- e) A nyolcadik mérés után tisztítsuk meg a RAD7-et a Test/Purge/enter paranccsal. Tisztítsunk 5 percig!
- f) Az adatfájl értékelésekor határozzuk meg az egyes 5 percekben elbomlott részecskeszámokat az A, B, C, D csatornák beütésszámai alapján, és külön – külön ábrázoljuk időben őket.
- g) Melyikre hasonlít leginkább a gép által megadott radonkoncentráció görbéje?

3. Mérjük meg a radon felhalmozódását az előző minta feletti térben!

- a) Zárjuk le ismét a radonkamrát, miután jól kiszellőzött. Kapcsoljuk vissza a csöveket a RAD7-re és állítsuk 15 percre a mérési időt: Setup/Cycle/enter/00:15/enter majd Setup/SavUser/enter.
- b) Indítsunk új mérést Test/Start/enter, és írjuk fel a 15 perces időközökben mért radonkoncentrációkat. Mérjünk 4 ciklust, majd állítsuk le a RAD7-et.

Az első 15 perc adatpontja nem számít, a többire illesszünk egyenest. Mit ad meg a meredeksége?