

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

TERMÉSZETES ÉS MESTERSÉGES RADIOAKTIVITÁS ELKÜLÖNÍTÉSE A PAKSI ATOMERŐMŰ LÉGTERÉBEN

OFKD DOLGOZAT

STRÁDI ANDREA
KÖRNYEZETTUDOMÁNY MSc

és

HORVÁTH ANDRÁS
FIZIKA BSc

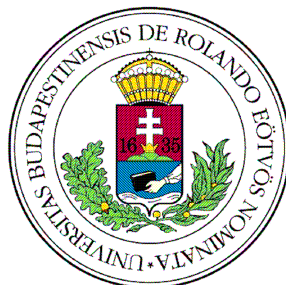
Témavezetők:

HORVÁTH ÁKOS
Egyetemi docens
ATOMFIZIKAI TANSZÉK

és

SZABÓ KATALIN ZSUZSANNA
Doktorandusz
KÖZETTANI ÉS GEOKÉMIAI TANSZÉK

Paksi Atomerőmű ZRt. kapcsolattartó: **C. SZABÓ ISTVÁN**
MŰSZAKI SZAKÉRTŐ, SUGÁRVÉDELMI OSZTÁLY



Budapest

2010

Tartalomjegyzék

Köszönetnyilvánítás.....	4
1. Bevezetés, célkitűzés.....	5
2. Természetes és mesterséges radioaktivitás.....	7
2.1 Természetes radioaktivitás.....	7
2.1.1 Bomlási sorok.....	8
2.1.2 Radon és toron.....	9
2.2 Mesterséges radioaktivitás.....	10
2.2.1 A maghasadás.....	10
2.2.2 Hasadási termékek.....	11
2.2.3 Transzurán elemek.....	12
3. A sugárzások biológiai hatásai.....	13
4. Mérési módszerek.....	15
4.1 RAD7 detektor.....	15
4.2 Az MGP aeroszol-detektor.....	16
4.1.1. Az aeroszol-detektor működése és adatainak jellege.....	16
4.1.2 Az aeroszol-detektor spektrumai és ezek szimulációja.....	16
4.3 Dózisszámítás módszere.....	21
5. Mérési adatok bemutatása és értelmezése.....	22
5.1 RAD7 detektorral mért radon-koncentrációk.....	22
5.1.1 A 222/A helyiség.....	22
5.1.2 A 305-ös helyiség.....	22

5.1.3 Egyéb helyiségek.....	23
5.2 Aeroszol-detektor mérési eredményei a 222/A helyiségben.....	25
5.2.1 A detektálási intenzitás időfüggései.....	25
a) Tíz perces átlagok.....	25
b) Egy órás átlagok.....	27
c) Napi átlagok.....	28
5.2.2 ^{212}Po és ^{218}Po aránya az idő függvényében.....	29
5.2.3 ^{214}Po és ^{218}Po aránya az idő függvényében.....	31
5.3 Az aeroszol-detektor mérési eredményei a 305-ös helyiségben.....	32
5.3.1 Beütésszámok időfüggései az alfa-csatornában.....	32
5.3.2 ^{212}Po és ^{218}Po aránya az idő függvényében.....	33
5.3.3 ^{214}Po és ^{218}Po aránya az idő függvényében.....	34
5.3.4 Az izotópok arányainak értelmezése egy egyszerű modellben.....	35
6. Eredmények.....	39
6.1 Kúrium kimutatásának módszere (a $^{212}\text{Po}/^{218}\text{Po}$ arányból).....	39
6.2 A radon-koncentráció számolása az aeroszol-detektor adataiból.....	40
6.3. Radon dózisok a belső légterekben.....	43
7. Összefoglalás.....	44
Irodalomjegyzék.....	45

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk megköszönni témavezetőinknek, Horváth Ákosnak és Szabó Katának a kitartó és segítőkész hozzáállásukat, valamint C. Szabó Istvánnak, hogy lehetővé tette számunkra az adatok hozzáférését és megosztotta velünk a tudását és tapasztalatait. Hálásak vagyunk családjaink megértéséért és munkánk támogatásáért, illetve Álmosdi Péternek és Andrási Gábornak a technikai megvalósításban nyújtott segítségéért.

1. Bevezetés, célkitűzés

Napjaink egyre növekvő népessége hatalmas energiaszükséglettel rendelkezik melynek megtermelése során jelentősen szennyezi környezetét. Az atomerőművek jó ideig megoldást jelenthetnek az elektromos energia ellátásra. Annak ellenére, hogy a légköri szennyezők kibocsátása ily módon jóval alacsonyabb, mint a fosszilis tüzelésű erőművekbenⁱ, az üzemeltetés közben felmerülő kockázatok miatt megoszlanak a vélemények a nukleáris energiát illetően. Ahhoz, hogy megfelelően kordában tudjuk tartani a reaktorban lejátszódó magreakciókat nagyon részletes óvintézkedésekre van szükség. A világtörténelemben néhány baleset hívja fel a figyelmet az aprólékos tervezés szükségességére.ⁱⁱ A leginkább érezhető negatív hatása hazánkban a csernobili balesetnek volt, amely 1986. április 26-án történt a mai Ukrajna területén, jelentős radioaktív szennyezést juttatva a környezetbe. Mindezek tudatában, a modern atomerőművekben szigorú szabályok alapján ellenőriznek mindent, a reaktortértől a használt kesztyűkig. Magyarország egyetlen villamos áramot termelő nukleáris erőműve a Magyar Villamos Művek Zrt. (MVM) által működtetett paksi atomerőmű. A létesítmény névleges teljesítménye az idén befejeződött teljesítménynövelési program után már 2000 MW, ezzel az ország villamosenergia-termelésének kb. 40%-át biztosítja, miközben nagyon alacsony a szén-dioxid kibocsátása, így 2 millió ember oxigénszükségletét takarítja meg évente.ⁱⁱⁱ

Dolgozatunk célja a paksi atomerőmű sugárvédelmi aeroszol-detektoraiban felhalmozódó természetes eredetű radon leányelemek és az esetlegesen megjelenő mesterséges, a reaktor működtetése során üzemeltetési hibára utaló alfa-bomló transzurán elemek (pl. ^{241}Am , ^{239}Pu , ^{242}Cm) elválasztása. Ezen, az aktív zónából származó mesterséges magok, illetve a radon leányelemek egy része is alfa-bomló izotóp (mint a ^{218}Po és a ^{214}Po). A transzurán magok alfa-bomlásának energiája 4,0 és 6,1 MeV közé esik, a természetes úton a reaktor légtérébe kerülő polónium alfa-bomlásainak energiái pedig 6,0 és 9,0 MeV közé esnek^{iv} (lásd *1. és 2. táblázat*). A helyi sugárvédelmi rendszer az energiában átfedő izotópokat (pl. ^{242}Cm és ^{218}Po) nem tudja elkülöníteni. Célunk egy olyan algoritmus kidolgozása, amely mindezt lehetővé teszi.

Nuklid	Energia (MeV)	Felezési idő
²⁴² Cm	6,1	162 nap
²⁴⁴ Cm	5,8	18 év
²⁴¹ Am	5,5	432 év
²³⁸ Pu	5,5	87 év
²³⁹ Pu	5,1	24065 év
²⁴⁰ Pu	5,1	6537 év
²³⁵ U	4,3	$0,7 \times 10^9$ év
²³⁸ U	4,2	$4,4 \times 10^9$ év

1. táblázat. Az alfa-bomló transzurán izotópok és a természetes urán izotópok alfa-energiája és felezési ideje

Nuklid	Energia (MeV)	Felezési idő
²¹² Po	8,95	0,3 μ s
²¹⁴ Po	7,83	163 μ s
²¹⁸ Po	6,11	3,11 min

2. táblázat. A légtérbe természetesen bekerülő radon bomlási sorában előforduló alfa-bomló polónium izotópok bomlási energiája és felezési ideje

További célunk volt, hogy megvizsgáljuk az atomerőmű termeiben a légtér radontartalmát, valamint annak időfüggését. Célul tűztük ki a különböző helyiségekben, az általunk kihelyezett radon monitorral mért aktivitáskoncentrációk, és a sugárvédelmi rendszer aeroszol-detektorai által érzékelt radonleányelem-aktivitások összehasonlítását. Ebből szeretnénk meghatározni egy összefüggést, amely lehetővé teszi a későbbiekben az erőmű helyi detektorai segítségével meghatározni a levegő radon-tartalmát, és ezzel a dolgozók radontól származó sugárterhelését.

2. Természetes és mesterséges radioaktivitás

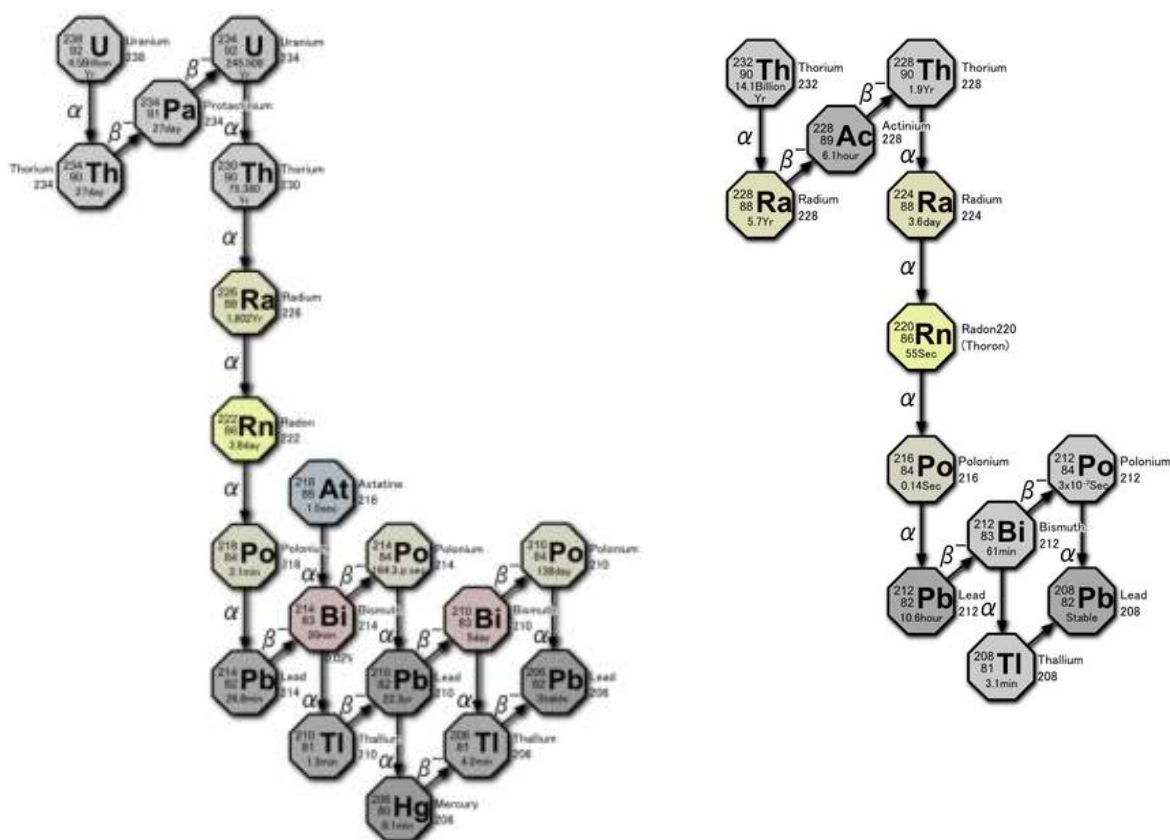
2.1. Természetes radioaktivitás eredete a Földön

A Naprendszer és Földünk sok millió évvel ezelőtt szétrobbant csillagokból, azaz szupernóvákból kirepült, valamint a folyamat során szintetizálódott elemekből épült fel.^v A létrejött stabil elemek mellett keletkeztek olyan atommagok, melyek instabilak és bolygónk korához - 4,6 milliárd év - képest viszonylag rövid élettartamúak. Ezek mára már elbomlottak, így csak a belőlük keletkezett stabil elemekkel találkozhatunk a talajban, kőzetekben, a légkörben és a bioszféra egészében. Fennmaradtak azonban olyan nehéz magok is, melyek lassan bomlanak, például a tórium és az urán, melyek főként a litoszférában rejtőznek, de a kitermelt ásványi anyagokkal együtt vagy természetes módon a felszínre kerülhetnek. A radioaktivitás vizsgálatának történetében több kutatónak is Nobel-díjat ítéltek munkájukért, de csak a második világháború haditechnológiai fejlesztései során fedezték fel, hogy mekkora energia is rejtőzik az atommagokban. A Föld szféráiban 81 elem található stabil nuklid formájában, további 11 ólomnál nehezebb pedig radioaktív a ^{84}Po és a ^{94}Pu között (rajtuk kívül mintegy 30 további elem természetben is előforduló radioaktív izotópjai ismertek és kísérleti úton több ezer is előállítható). Ez a 11 elem a nukleoszintézistől fogva folyamatosan bomlik, radioaktív tulajdonságaikat azért őrizték meg, mert felezési idejük nagyságrendje ugyanakkora, mint ahány éve kialakultak.

A környezetünkben előfordulnak könnyebb, hosszú felezési idejű magok is, például a kálium 40-es izotópjá, ami 0,0118% gyakorisággal van jelen a stabil 39-es tömegszámú izotóp mellett. A dolgozatunk szempontjából fontos izotópok közül legjelentősebb mennyiségben az urán és a tórium valamint a bomlásukból származó szintén radioaktív leányelemek találhatók meg. A bomlási lánc azonban nem áll meg addig, míg stabil magokban nem végződik. Mindkét anyaelemből végső soron az ólom különböző, immáron nem radioaktív izotópjá jön létre.

2. 1. 1 Bomlási sorok

A radioaktív bomlás során tehát egy anyamagból egy másik kémiai elem, a leányelem jön létre, mely tovább bomlik, míg egy sor instabil elemen keresztül végül stabil izotóppá válik. Az alfa-bomlás során az anyaizotóp tömegszáma 4-gyel csökken, míg a béta- és gamma-bomlás esetében nem változik. A 4-gyel való oszthatóság alapján 4 radioaktív családot írhatunk fel, amelyből a neptúnium-sor ($4n+1$) tagjai rövid felezési idejüknek köszönhetően mára elbomlottak a $^{209}_{83}\text{Bi}$ -ig. A tórium-sor ($4n$) a $^{232}_{90}\text{Th}$ -ből, az urán-sor ($4n+2$) $^{238}_{92}\text{U}$ -ből (1. ábra), az aktínium-sor ($4n+3$) pedig a $^{235}_{92}\text{U}$ -ből indul és stabil végmagként minden esetben az ólom valamely izotópjá szolgál.^{vi}



1. ábra. Az urán- és a tórium-sor sémája

2. 1. 2. Radon, toron és leányelemeik a környezetben

A radon (^{222}Rn) a természetben előforduló, radioaktív nemesgáz, mely a háttérsugárzás dózisének nagyjából felét adja (ld. még 4. ábra.). Az urán-sor, melynek felezési ideje ($T_{1/2}$) 4,46 milliárd év, 6. eleme a radon. A radon felezési ideje ehhez képest meglehetősen rövid, mindössze 3,823 nap. Általunk vizsgált leányelemei közül a polónium 218-as izotópja ($T_{1/2} = 3,11$ perc) közvetlenül belőle, egy alfa-bomlással keletkezik. Egy újabb alfa- és két béta-bomláson át a szintén alfa-bomló ^{214}Po ($T_{1/2} = 163$ μs) jön létre.

A toron a radon 220-as tömegszámú izotópja (^{220}Rn , $T_{1/2} = 55,6$ s), mely a tórium-sor tagja. Egy alfa-bomlással a ^{216}Po -má ($T_{1/2} = 0,15$ s), majd ismét egy alfa és két béta-bomláson (melyek felezési ideje 1 óra ill 10,6 óra) keresztül a ^{212}Po -má ($T_{1/2} = 0,3$ μs) bomlik. Mindkét tárgyalt bomlási sor végső, stabil nuklidja egy ólom (Pb), az urán-sor esetén a ^{206}Pb , míg a tórium-sorban a ^{208}Pb . A radon utáni leányelemek sorában a ^{210}Pb felezési ideje 22 év, ami azt jelenti, hogy a méréseink időtartamát tekintve végtelenül hosszú, bomlását lehet detektálni, de mennyiségének csökkenése elhanyagolható (keletkezése nem elhanyagolható).^{vii}

Közvetlen környezetünkbe természetes módon a talajból és a kőzetekből, ill. antropogén hatásra az építőanyagokból kidiffundálva jut ki a radon. A széntüzelésű erőművek salakját és pernyéjét illetve a bányászatkor kitermelt meddő kőzetet is sok esetben felhasználják építőanyagok gyártásakor. Az alapanyagban lévő urán és tórium bomlása során keletkező radioaktív nemesgáz, az apró réseken keresztül kijut és zárt térben (az épületekben) a leányelemeivel együtt felhalmozódik. Hatósági vizsgálatok kiderítették, hogy sok esetben igen magas urán tartalmú szén használata miatt, mint például az ajkai erőmű esetén ezért az ötvenes években betiltották a létesítmény melléktermékeinek építőipari alkalmazását.^{viii}

Az Európai Unióban egységes sugárvédelmi direktívában (EURATOM 96/29) határozzák meg az építőanyagok megengedhető radioaktivitását, míg Magyarországon a hatályos 16/2000. sz. egészségügyi miniszteri rendelet csak a munkahelyek átlagos radon-szintjére nézve tartalmaz előírást (maximálisan 1000 Bq/m³ lehet).^{ix}

A paksi atomerőmű sugárvédelmi igényű árnyékolása a talajból kiszivárgó radont leárnyékolja, ezért annak jelenléte a légtérben leginkább az építőanyagból származhat. A belső termek közül azokban, ahol munkavégzés folyik, rendszeres szellőztetés van. Ilyen termekben a radon leányelemeinek megjelenése sem nagyon valószínű. De vannak olyan

termek, ahol emberek ritkán fordulnak meg, ahol nincs szellőztetés. Itt radonkoncentráció az építőanyag urántartalmának függvényében éri el egyensúlyi értékét. Ilyen vizsgálatokat az atomerőműben még nem végeztek.

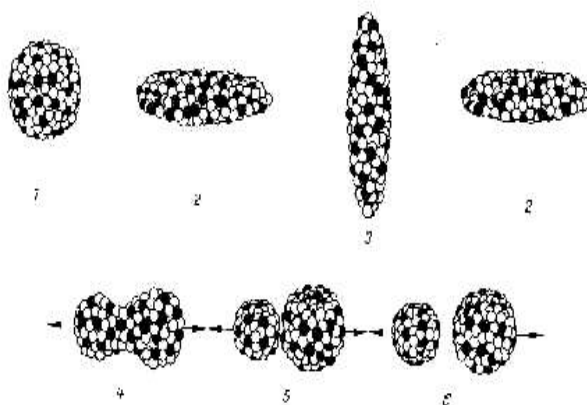
2. 2 Mesterséges radioaktivitás

2. 2. 1. A maghasadás

A maghasadást Otto Hahn és Fritz Strassman fedezték fel. A neutronnal besugárzott uránt salétromsavban feloldották. Az oldatból kénsav hatására bárium, és a vele egy oszlopban levő elemek (pl. rádium) oldhatatlan csapadék (BaSO_4) formájában kiváltak. Mivel a radioaktivitás egy része a csapadékkal ment, a német kutatók rádium keletkezésére gyanakodtak. A salétromsavas oldathoz rádium-sót adtak, majd a kénsav becsöpögtetés hatására kivált csapadékból finomabb kémiai módszerekkel elkülönítették a báriumot és a rádiumot. A béta- aktivitás a báriummal maradt.

Ezzel rámutattak arra, hogy a megfigyelt béta-sugárzást a periódusos rendszer közepén elhelyezkedő ritka földfémek környékén található elemek emittálják.

Lise Meitner osztrák elméleti fizikus az akkor már pontosabban ismert kötési energia alapján megmutatta, hogy ezen elemek keletkezése a maghasadás útján lehetséges. Feltételezte, hogy a neutron befogó uránmag oszcillálni kezd, ennek hatására a mag közepén vékony „nyak” alakul ki, és a két fél között a Coulomb-taszítás, felülmúlva a mag felületi feszültségét, szétveti a magot. Ezt szemlélteti a 2. ábra.



2. ábra. A maghasadás folyamata

A két hasadvány nem pontosan egyenlő tömegű. Olyan hasadások valószínűbbek, amelyeknél az atommagból több energia szabadul fel. A héjszerkezet szerint a mélyebb

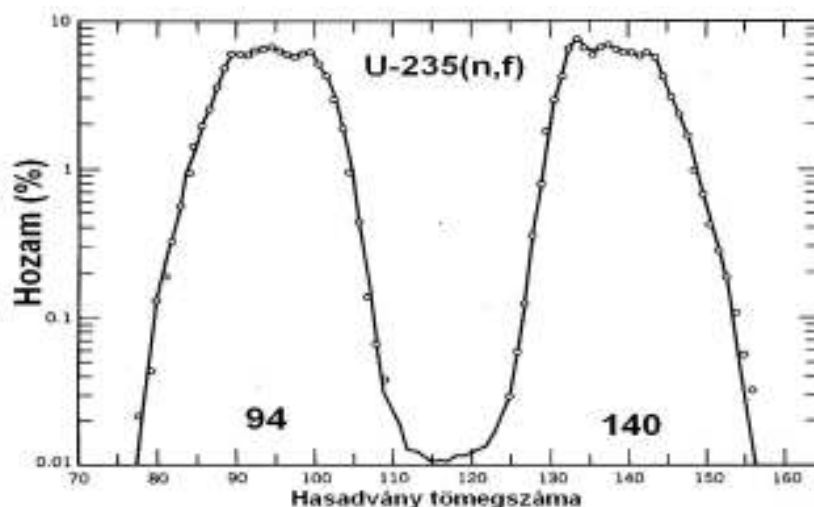
kötési energiájú atommagok keletkezése gyakoribb, ezért a hasadás többnyire aszimmetrikus.

2. 2. 2. Hasadványok, hasadási termékek

A gerjesztett és a spontán hasadásnál általában két (ritkább esetben három) középnehéz mag, ún. primer hasadási termék, illetve hasadvány, és két- három (ritkán ennél több) gyorsneutron, ún. hasadási neutron keletkezik.

A neutronelnyelés révén kialakuló közbelső mag sokféle módon hasadhat szét, így ugyanabból a hasadó képes izotópból kiindulva sokféle középnehéz hasadvány keletkezhet.

A hasadási termékek vizsgálata során azt tapasztalták, hogy azok energiája zömmel a 60 MeV, és a 100 MeV köré csoportosulnak. Ez csak úgy lehetséges, hogy – mivel a maghasadás során is teljesül az impulzus-megmaradás – hogy a hasadásnál általában egy nagyobb energiájú könnyebb, és egy kisebb energiájú nehezebb középnehéz mag keletkezik. Ezt szemlélteti a 3. ábra az ^{235}U esetében.



3. ábra. Az ^{235}U maghasadása során keletkező könnyű- és középnehéz mag

A 3. ábrán a ^{235}U hasadványainak tömegszám eloszlása látható. A nehéz hasadványokra vonatkozó csúcs az $A=135-145$, míg a könnyebb hasadványoké az $A=90-100$ tömegszámnál van. A szimmetrikus hasadási gyakoriság nagyon kicsi, kb. 0,01%. A hasadó mag neutrontöbblete és neutron/proton arány igen nagy. Mivel a hasadásnál felszabaduló neutronok száma kicsi, ebből következik, hogy a

hasadványokban (primer hasadási termékekben) is közel ekkora lesz a neutron/proton arány, a neutrontöbblet pedig a hasadványok között oszlik meg. A stabilizálódás során az izobár bomlásokkor keletkező izotópokat hasadási termékeknek (szekunder hasadási termék) nevezzük.

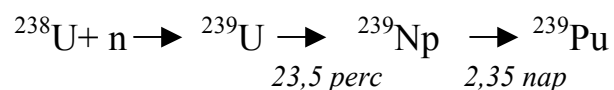
A hasadványok, és hasadási termékek között sok olyan van, amelyek neutron-abszorpciós hatáskeresztmetszete jelentős. Ezek a hasadásnál keletkező neutronok egy részét elnyelik, tehát a hatásuk a reaktorra nézve kedvezőtlen, ezért reaktormérgeknek nevezzük őket. (A legjelentősebb a nagy valószínűséggel (~6,5%) keletkező 10^6 barn befogási hatáskeresztmetszettel rendelkező ^{135}Xe izotóp).

A hasadvány magok között nem fordul elő alfa-bomló izotóp, ezek negatív béta-bomlással bomlanak. Ez a magerők tulajdonságai miatt csak a nagy rendszámú atommagok között fordul elő (néhány kivételtől eltekintve, melyeknek külön magszerkezeti okuk van).

2. 2. 3. Transzurán elemek

Ha egy atommag neutront nyel el, akkor a természetes proton-neutron arányhoz képest több neutron fog tartalmazni. Elképzelhető, hogy a felesleges neutronból béta-bomlással fog megszabadulni, tehát a rendszáma egyel nő, vagyis új elemmé alakul át. Ezt a jelenséget nevezzük mesterséges radioaktivitásnak, melyet *Frédéric Joliot-Curie*, és felesége *Irène Curie* fedezett fel.

Amikor az urán neutront nyel el, akkor a fent említett gondolatmenet alapján újfajta, ún. transzurán elemek jönnek létre. A 238-as urán mennyisége nagyobb, és a befogási hatáskeresztmetszetek nagysága is úgy alakul, hogy ennek a befogásai fontosak:



Az így keletkezett elemek aztán további neutronok befogásával tovább alakulhatnak. A domináns transzurán izotópok közé a ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu és a ^{242}Pu izotópokat sorolják. Minél hosszabb egy reaktor működési ideje, annál több transzurán tud felhalmozódni, és annál nagyobb rendszámú transzuránok keletkezése válik fontossá. A paksi atomerőműben a hosszabb élettartamú fűtőelemek használatával a nagyobb rendszámú transzuránok megjelenésére is lehet majd számítani. Ilyen a kúrium is.

A fontosabb transzurán izotópok adatait foglalja össze az 1. táblázat. Az ott említett alfa-bomlásokon kívül fontosak lehetnek még a következők: ^{241}Pu - 0,02078 MeV; ^{242}Pu - 4,984 MeV; ^{237}Np - 4,959 MeV; ^{242}Am - 5,637 MeV és ^{243}Am - 5,438 MeV. Látható, hogy ezeknek a bomlási energiái is 6 MeV alatt maradnak.

A kúrium izotópok alfa-bomlási energiái nagyobbak az említett transzuránok alfa-energiáinál, és elérik a 6 MeV-et (1. táblázat). Így ezek közelítőleg megegyeznek az első radon leányelem a ^{218}Po alfa-energiájával, ezért az aeroszol-detektor nem tudja megkülönböztetni őket. A kérdés azért is fontos, mert a kúrium felezési ideje jóval kisebb az előtte keletkezett transzuránok felezési idejénél, így amíg számuk nem is emelkedik olyan nagyra, de aktivitásuk gyorsabban felülmúlhatja a többi transzurán aktivitását. Az üzemidő meghosszabbítás ezért emeli annak a kérdésnek a fontosságát, hogy a kúrium izotópjait a sugárvédelmi rendszer szét tudja választani a radon leányelemeitől.

3. A sugárzások biológiai hatásai

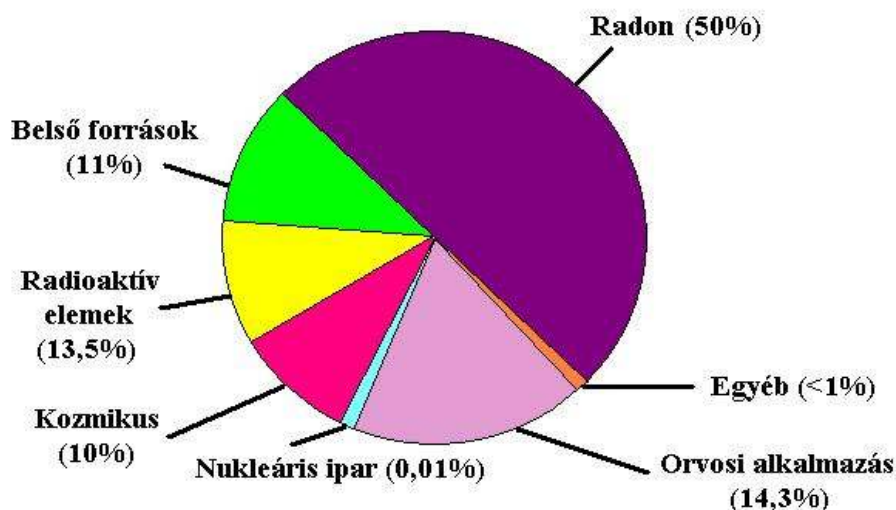
Élettani hatásuk szempontjából a legfontosabbak az ionizáló sugárzások, melyek a testekkel való kölcsönhatás során elektront képesek eltávolítani az atomokból vagy a molekulákból. Ezt a jelenséget többféle, akár részecske- (proton, elektron, alfa- vagy más töltött részecske) vagy elektromágneses (távoli ultraibolya, röntgen- és gamma-) sugárzás is kiválthatja. A testekkel való kölcsönhatás minden esetben roncsol és különböző súlyos vagy kijavítható következménnyel járó folyamatokat indíthat el. Jellegére nézve megkülönböztethetünk sztochasztikus és determinisztikus sugárhatást. Az előbbi a besugárzott csoportban véletlenszerűen kialakuló hatásokat jelenti, melynek a valószínűsége függ a kapott dózistól, küszöbérték pedig nincsen. Ezzel ellentétben a determinisztikus sugárhatás esetén fontos a küszöbérték meghatározása, de a károsodás minden esetben fellép, súlyossága függ a dózistól.

A sugárvédelemben különböző dóziszfogalmakat határoztak meg. A biológiai hatások vizsgálatára az egyenérték dózis alkalmazandó, amely az abszorbeált dózis (gray-ban mérve, ami a tömegegységre jutó leadott energia Joule/kg-ban) és egy minőségtényező (quality factor, QF) szorzatából adódik, mértékegysége a sievert (Sv). Az emberi szervezet több mint 12 féle szervére határoztak meg külön súlyfaktorokat, amelyek által a károsodás jó közelítéssel leírható, így az egyenérték dózisok és az adott szerv súlyfaktorainak szorzatainak összegéből kifejezhető az effektív dózis. Fontos

„választóvonal” a letális dózis (LD_{50}), amely a besugárzott csoport felének elhalálójával járó sugárzás mennyiségét jelenti.

A kialakuló szöveti károkat különféle tényezők befolyásolják. Ilyen az időfaktor (vagyis hogy az illető mennyi ideig van kitéve a sugárzásnak), a koncentráció, az oxigén effektus (oxigén-dús környezetben alacsonyabb dózissal is nagyobb károsodás) illetve a kémiai környezet, azaz a kölcsönhatásban résztvevő vegyületek milyensége.^xÖsszességében az emlősök érzékenyebbek leginkább az ionizáló sugárzásra (főként a gyorsan szaporodó sejtek, ivarszervek és a szem), a vírusok pedig a legkevésbé.^{xi}

A Földön, mint azt a korábbiakban említettük, jelen van a radioaktivitás a mindennapokban is, a légkörben, talajban, kőzetekben. Emellett az épületeink anyagából, az orvosi alkalmazások során, és ha nagyon kis mennyiségben is, de a nukleáris iparból, tehát antropogén forrásokból is ér minket sugárzás. Ezen természetes (átlagosan 2,4 mSv/év) és mesterséges (0,4 mSv/év) sugárdózisokat közös néven háttérsugárzásnak nevezzük (4. ábra). Viszonyítási alapként az éves foglalkozási dóziskorlát 50 mSv, 0,1 Sv felett pedig már kimutathatóan biológiai károsodást okoz a sugárzás.^{xii}

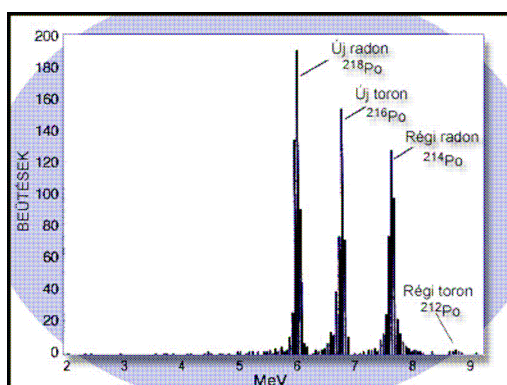


4. ábra. A háttérsugárzás természetes és mesterséges forrásai^{xii}

4. Mérési módszerek

4.1 RAD7 detektor

A radon és a toron levegőbeli koncentrációjának meghatározására alkalmas alfa-spektrométer, amely az ionizáló sugárzás és a félvezető detektor anyagának kölcsönhatása alapján működik. A műszer egy pumpa segítségével beszívja a levegőt, majd egy pára-, egy por-, és egy belső szűrőn keresztül megtisztítva juttatja azt a detektor felé. A RAD7 a radon és a toron leányelemeit alfa sugárzásuk energiája alapján különbözteti meg. Az első leányelem (a radonnál a ^{218}Po , a toronnál a ^{216}Po) beütésszámai alapján meghatározza az aktivitáskoncentrációt (egységnyi térfogatra jutó aktivitás, mértékegysége Bq/m^3). A 0 és 10 MeV közötti energiájával rendelkező alfa-részecskéket 200 csatornába gyűjti össze (0,05 MeV-os energiasávonként), ezeket A, B, C és D ablakba osztja be. Az „A” (ún. új radon) csatornában az első radon leányelem, a ^{218}Po (6 MeV), a „B” (ún. új toron) csatornában az első toron leányelem, a ^{216}Po (6,78 MeV), míg a „C” (ún. régi radon) csatornában a negyedik radon leányelem, a ^{214}Po (7,69 MeV) és a „D” (ún. régi toron) csatornában a negyedik toron leányelem, a ^{212}Po (8,8 MeV) beütéseinek számát tárolja el (5.ábra). Mindezek mellett az E, F, G, H hibajelző csatornák az előzőek energiatartományaitól eltérő energiájú beütéseket jelzik, ezek együttesen adják az O csatornát.^{xiii}



5. ábra. A RAD7 detektált alfa-sugárzásainak energiaspektruma

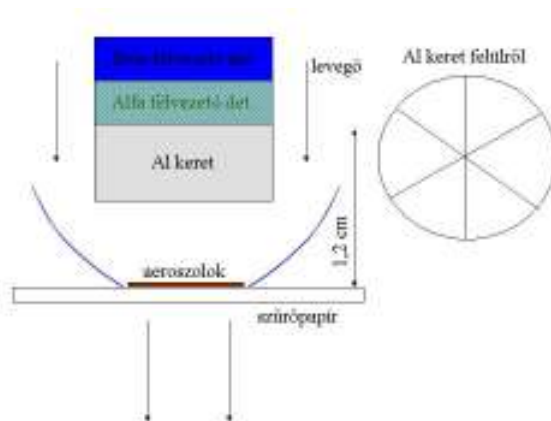
Összesen 6 teremben vizsgáltuk a légtér radon-tartalmát. Hosszabb vizsgálatokat végeztünk a 222/A és 305 jelű termekben, ahol a sugárvédelmi rendszer aeroszol-detektorával is összehasonlítottuk a méréseinket. A 222/A terem egy karbantartó helyiség, jó szellőztetéssel, amit portalanított levegő befűvésével oldalnak meg. Radonkoncentráció

és a leányelemek felbukkanása nem nagyon várható. Mégis mind a két detektor használható adatokat regisztrált. A 305-ös terem egy kevésbé szellőztetett, a hermetikus térrel közvetlen kapcsolatban levő zsilipszoba melletti terem. Itt a szellőztetés hiánya fokozza a radon felhalmozódásának valószínűségét. További 4 terembe helyzetük el a RAD7 detektort a radonkoncentrációk vizsgálata céljából. Két jól (204 és 301) és két kevésbé szellőztetett (253 és A016) teremben is ezt a műszert alkalmaztuk. Méréseik során fél órás időintervallumokra mértük az átlagos radon-koncentrációt. Az általunk elhelyezett RAD7 és a sugárvédelmi rendszerben telepített vagy mozgatható (mobil) aeroszol-detektor eredményeinek összehasonlításához ezeket az értékeket egy órára átlagoltuk.

4. 2 Az MGP aeroszol detektor

4. 2. 1. Az aeroszol-detektor működése és adatainak jellege

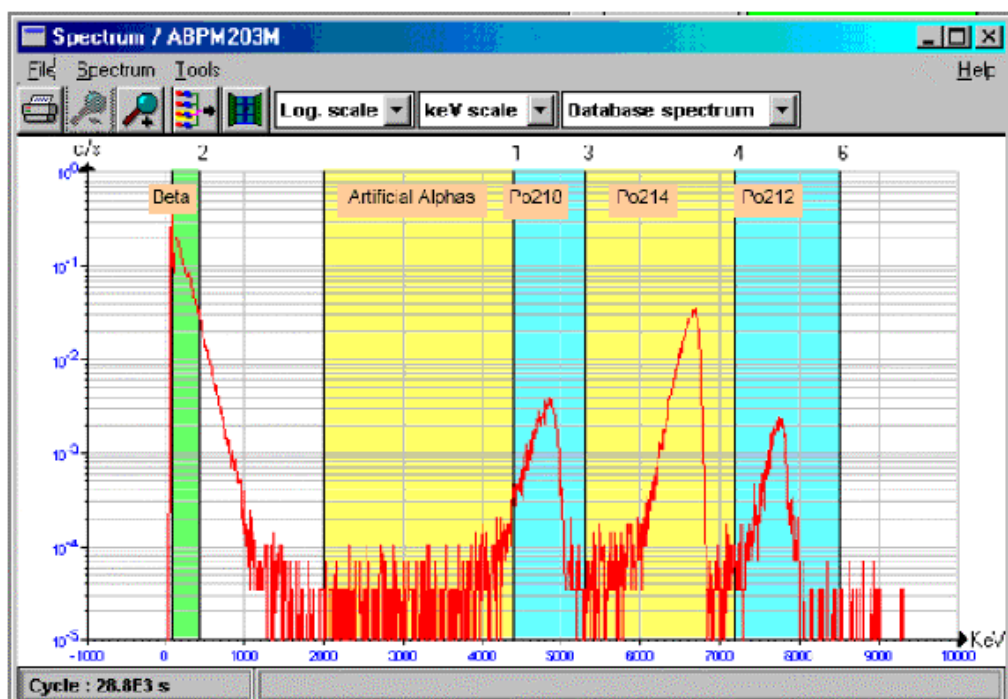
A készülék a levegő aeroszol részecskéire tapadt alfa-, béta- vagy gamma-sugárzó elemeket képes detektálni, oly módon, hogy a felül beszívott levegőt egy szűrőpapíron keresztül áramoltatja, ahol az aeroszolok kiülepednek, és az azokon lévő radioaktív izotópok sugárzását, két, egymás felett igen közel elhelyezkedő szilícium félvezető egykristály detektálja (6/A. ábra). Az aeroszolon kiült instabil magok bomlásából az alfa részecskék az első egykristályban elnyelődnek (ábrán zöld négyszög), rövid hatótávolságuk miatt, és a béta részecskéket illetve a gamma-sugárzást a második félvezetőben detektáljuk, így elkülöníthetők az alfa-bomlásoktól (az ábrán kék négyszög).



6/A. ábra Az aeroszol-detektor sematikus vázlatja

A paksi atomerőmű 222/A termébe telepített ilyen detektor adatait értékeltük ki, valamint a 305-ös teremben mobil aeroszol-detektor végezte a méréseket. Az ezekhez tartozó számítógépes kiértékelő programmal (Mass) különböző izotópokat vagyunk képesek energiájuk alapján azonosítani. A toron és a radon leányelemei között 4 alfa-bomló atommag található. A detektor a polónium 212-es, 214-es, és 218-as tömegszámú izotópjainak alfa-sugárzását detektálja. Ugyanis a 216-os polónium elbomlik mielőtt egy aeroszorra kiülepedve eljutna a detektor szűrőpapírjáig. Ezek közül a ^{218}Po éppen a 6 MeV körüli energiaintervallumban sugároz, akár csak a transzurán kúrium izotópok, azok észlelését ez által megnehezítve.

Az aeroszol detektor néhány percenként összegzi a beütéseket, és ezekből különböző időre integrált átlagokat számol ki. Így T=10 perc, 1 óra és 1 nap összegzési idejű detektálási intenzitásokat határozott meg az idő függvényében. Ezen kívül egy-egy időintervallumban detektált beütések spektrumát is rögzíti. A beütésszám alapján (counts per secundum, azaz cps egységben, mely a másodpercenkénti beütések száma) több mérési időtartományra vonatkozó adatokat is elemeztünk. A 222/A-ban tíz percenként, óránként és naponta összegzett beütések száma, a 305-ösből óránként vett energiaspektrumok időfüggései álltak rendelkezésünkre. Az adatokat részben saját magunk töltöttük le a detektorról, részben az erőmű munkatársainak segítségével kaptuk meg őket.



6/B. ábra. Az aeroszol detektor energiaspektruma

4. 2. 2 Az aeroszol-detektor spektrumai és ezek szimulációja

Az aeroszol detektor két félvezető kristálya alapján egy energiaspektrumot is rögzít a mérési idő alatt. A spektrumban egyaránt benne foglaltatnak a béta-bomlásból származó elektronok okozta beütések, és az alfa-bomlások is. Egy tipikus spektrumot mutat be a 6/B. ábra.

A spektrumban a béta-beütések a bal oldali zöld ablakban találhatóak, és az aeroszolon lévő radon leányelemek alfa-bomlásaihoz tartozó csúcsok jól láthatóak a jobb oldali két sárga és egy kézzel jelzett ablakban. Az „artificial alpha” feliratú ablakba esnek a transzuránok alfa-sugárzásai. Azonban ezek nem a táblázatbeli energiájuknál (2. táblázat) találhatóak, hanem ennél alacsonyabb energiánál. Ennek oka, hogy az alfa-részecskék a levegőben energiát veszítenek. A detektált csúcs maximumának energiáját és az alfa-részecskék eredeti energiáját összekötő összefüggés kidolgozásához a detektálási folyamat szimulációját végzetük el.

Az alfa-részecskéknek a detektorba jutás előtt 12 mm vastag levegőn kell áthaladniuk. Emiatt veszítenek az energiájukból, így a detektorba való becsapódáskor már csak a lecsökkent energiát tudjuk mérni. Célunk a detektált és az eredeti energiák közötti összefüggés megtalálása, valamint a kapott spektrumok értelmezése számítógépes szimulációval.

A papírlapra az aeroszol-részecskék egy kör alakú tartományban tudnak kiüledni a levegő befújó csőnek megfelelően. Ennek sugara 10 mm. A papíron lévő részecskék bomlásakor induló alfa-részecskék a tér minden irányába ki tudnak repülni, de a detektor csak azokat tudja detektálni, amelyek a felületére csapódnak be. A detektor és a papír között el van helyezve egy alumínium keret (6/A. ábra szürke négyszög). Ez kör alakú, és 60°-onkénti térelválasztó lapokkal rendelkezik. Magassága 7 mm. Kialakítása olyan, hogy a részecskék a teljes kör egy hatodáról csak a detektor pont felettük található egy hatod körcikkére tudnak eljutni. A többi az alumíniumon fennakad. Ez a detektor energiamérésének félérték-szélességét javítja. Ez azért van így, mert az alfa-részecskék számottevő energiát veszítenek a levegőben, a keret a levegőben megtett út hosszának szórását csökkenti le.

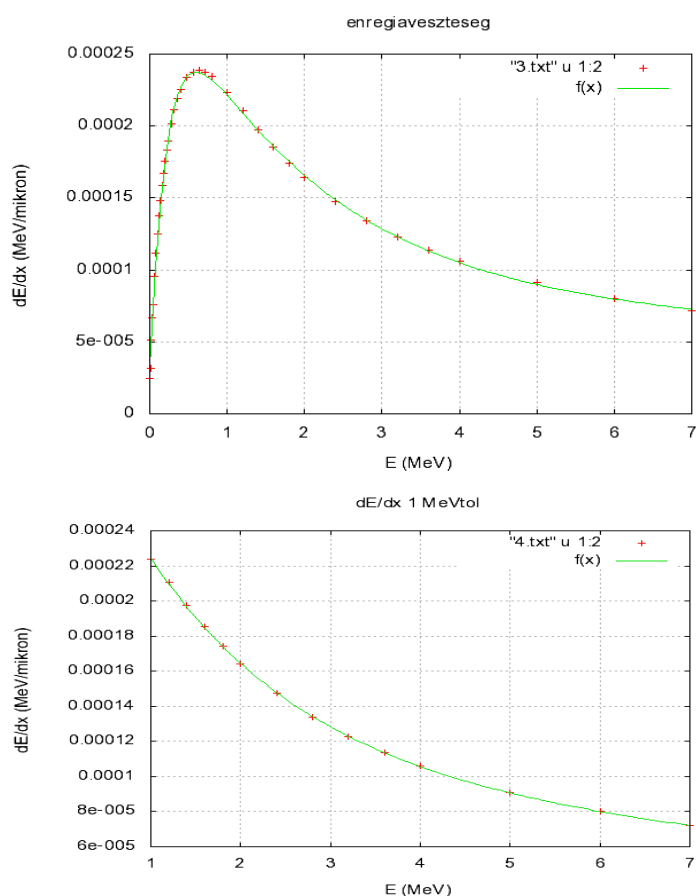
A mért alfa-energia szimulációjának elve a következő:

A papírlapon, az R_1 sugarú 60° -os körcikken véletlenszerűen kiválasztunk egy pontot x és y koordinátáinak egyenletes generálásával. A pontot az r , φ mennyiségek jellemzik ($r \leq R_1$, $\varphi < 60^\circ$).

Ebből a pontból indul az alfa-részecske, a függőlegeshez képest θ szögben, és a körcikk egyik szárával φ -szöget bezárva, majd becsapódik a detektor felületére a hozzá tartozó szektorban, ami egy R_2 sugarú körcikk. Amennyiben nem erre a felületrészre érkezik, a beütést nem vesszük figyelembe. Valamint a szűrőpapír $d = 1,2$ cm-re van a felső körlaptól (detektor felülete).

$$l = \frac{d}{\cos \theta}$$

Ahol l a részecske által megtett út. Ezen úthossz alatti energiaveszteséget a Bethe-Bloch formula alapján számoljuk. Először az alfa-részecskére és levegő közegre az egységnyi útra eső energiaveszteséget a LISE++ program segítségével számoltuk ki (<http://groups.nsl.msui.edu/lise/lise.html>). Majd ennek segítségével kiszámoltuk a teljes úton a leadott energiát.



6/C. ábra A Bethe-Bloch formula által megadott egységnyi útra eső energiavesztesége az alfa-részecskének levegőben. Az alsó panel az $E > 1$ MeV esetre vonatkozó görbe, amit paramétereztünk az ábrán látható görbével.

Az l úthosszat 1000 részre osztottuk, és minden darabon megnéztük az energiaveszteséget, a már csökkenő mozgási energiát felhasználva. A program felhasználta az egységnyi útra eső energiaveszteség energiafüggését. Ezt a függvényt $((dE/dx)(E))$ a LISE++ adataira történő illesztéssel állapítottuk meg. A kapott adatokat és függvényeket ábrázoltuk a 6/C. ábrán.

A teljes energiaintervallumra 3 exponenciális függvény összegét illesztettük (gnuplot), melynek alakja a következő: $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) - c \cdot \exp(-d \cdot x) + e \cdot \exp(-f \cdot x)$.

Az illesztés az egész tartományra vonatkozó viselkedést visszaadja, de az általunk vizsgált tartományban nem teljesen pontos egyezést mutatott. Mivel a bomlások során a kirepülő részecske energiája az út mentén végig nagyobb, mint 1 MeV, ezért az adatsorból kivettük az 1 MeV alatti értékeket, majd a maradékot ábrázoltuk csak. Ez látható az alsó panelen. A pontokra egy exponenciális függvényt illesztettünk, amivel ezen a részhalmazon az előzőnél jobb illesztés nyerhető.

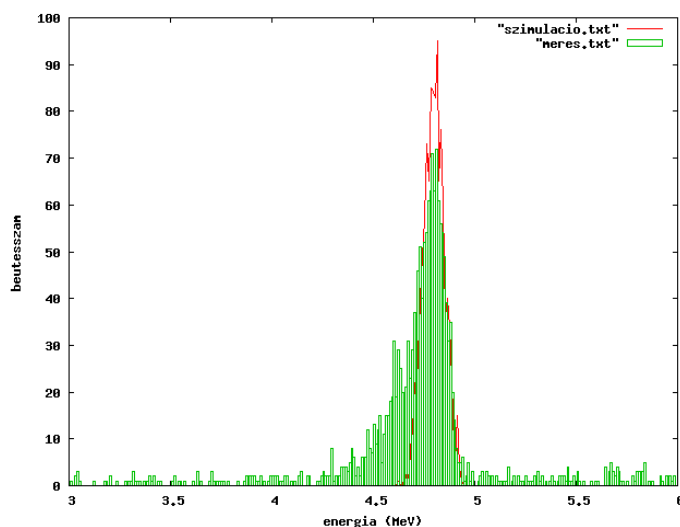
A függvény alakja a következő: $f(x) = a \cdot \exp(-b \cdot x)$

Illesztett paraméterek:

a =	8,16029e-005	±	4,357e-007	(0,534%)
b =	-0,0307743	±	0,001594	(5,18%)

Az szimuláció során kapott eredmények:

A ^{218}Po 6 MeV energiájú alfa-sugárzása használatával a szimuláció a piros folytonos vonal eredményt adta, a zöld hisztogram a mérés eredményét mutatja (6/D ábra).



6/D. ábra Az aeroszol-detektor szimulációjának ellenőrzésére szolgáló spektrum

Ez alapján elfogadjuk, hogy a szoftver a detektort helyesen írja le. További alfa-energiákra lefuttatva a programot megkaphatjuk a detektált energia-eloszlás átlagos értékét. Ezeket az adatokat mutatja a 3. táblázat.

eredeti energia (MeV)	9	8	6	4	3
detektált eloszlás közepe (MeV)	7,9	6,87	4,8	2,72	1,68

3. táblázat

Ezeket az energiaértékeket a következő lineáris összefüggés jó közelítéssel összeköti:

$$E_{detektált} = 1,0369 \cdot E_{eredeti} - 1,4275 (MeV)$$

Ezen összefüggéssel egy az aeroszol-detektorban megjelenő ismeretlen alfa-energiához tartozó eredeti bomlási energiája meghatározható.

4. 3 Dózisszámítás

A méréseink egyik alkalmazási lehetősége az, hogy megbecsüljük az egyes termekben dolgozók munkahelyi dózist, amit a levegő radon-tartalmának belégzése miatt kapnak. A vizsgált termekben a radon-tartalom a lakótéri radon-szintek alatti értéken maradt, ezért a probléma nem hangsúlyos, de ez az ellenőrzés az atomerőműnél még nem lett végrehajtva.

A levegő radon-tartalma miatti dózis értékét az irodalom alapján számoljuk. Jing Chen (2005)^{xiv} összefoglaló publikációja alapján 1 Bq/m³ radon-koncentrációban eltöltött 1 óra a tüdő szöveteiben okozott biológiai károsodás alapján 3,6 nSv effektív dózist jelent, feltételezve hogy a radon és leányelemeinek egyensúlyi faktora 0,4. Ez egész évre vonatkoztatva egy 100 Bq/m³ radontartalmú teremben dolgozva (50 munkahét, heti 40 óra) 0,72 mSv effektív dózissal felel meg.

Ennek a dózisbecslésnek természetesen vannak feltételei, ami az atomerőmű termeiben nem igazoltan állnak fenn. Ilyen a 0,4-es egyensúlyi faktor. A jól szellőztetett helyiségekben ennél alacsonyabb értékek is adódhatnak, de az aeroszolban esetleg gazdag, nem szellőztetett helyiségekben 0,4-nél magasabb faktort is kaphatunk.

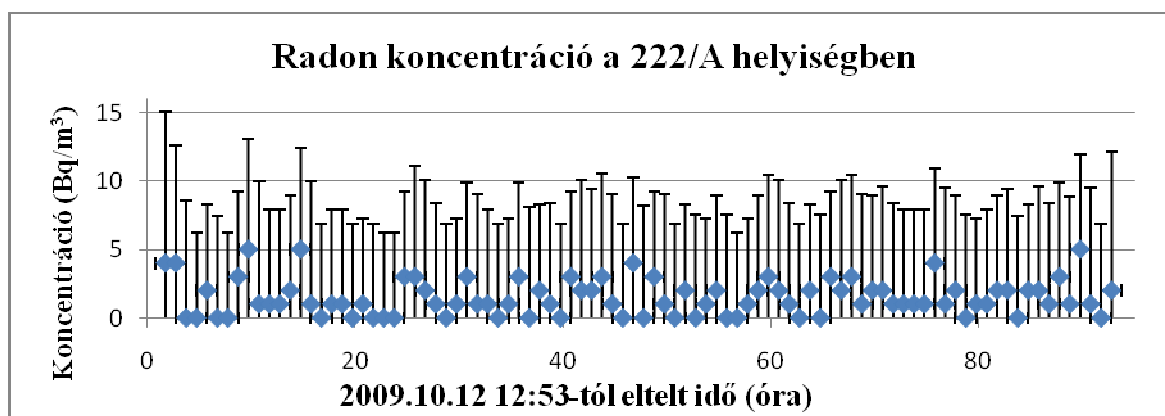
A mérési adatokból kiszámított konkrét eredményeket a **6. 3. alfejezetben** írtuk le.

5. Mérési eredmények bemutatása és értékelése

5. 1. RAD7 detektorral mért radon-koncentrációk

5. 1. 1. A 222/A helyiség

Az egy óra mérési időre átlagolt radon koncentrációkat a műszer által meghatározott hibaértékekkel együtt ábrázoltuk a 7. ábrán. Láthatjuk, hogy a koncentráció igen alacsony, 0 és 6 Bq/m³ között ingadozik, ez abból adódik, hogy a szoba kellően szellőztetett (mivel egy viszonylag gyakran használt karbantartó helyiségről van szó), így a radon a falból való exhalációját (kijutását) követően hamar távozik a légtérből. A RAD7 csak magát a radon atomokat engedi be a detektortérbe, így a levegő aeroszol-tartalmától független eredményt mutat. A portalanított levegő befújása (így az aeroszol részecskék alacsony száma) az aeroszol-detektor eredményeit azonban jelentősen befolyásolja.

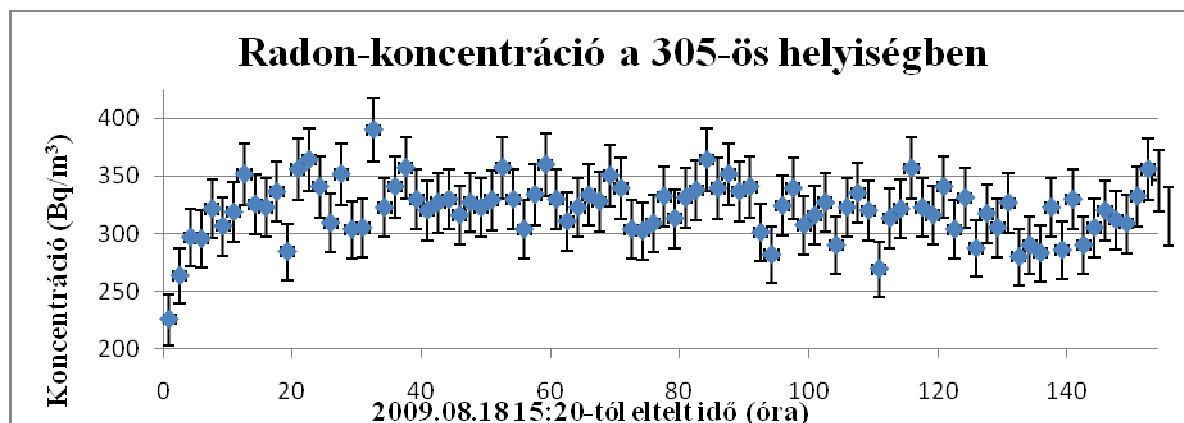


7. ábra. A RAD7 által mért radon-koncentrációk a 222/A helyiségben az eltelt idő függvényében

5. 1. 2. A 305-ös helyiség

Az előzőekhez képest jóval magasabb koncentrációkat találtunk a 305-ös szobában (300-350 Bq/m³). Ezt a 8. ábrán mutatjuk be. A detektor elhelyezésekor (0. időpont) volt egy rövid szellőztetés (pusztán a belépéskori és kilépéskori ajtónyitogatás miatt), ami a terem radontartalmát lecsökkentette. A terem zárása után a radon felhalmozódása figyelhető meg. 20 óra után beállt a szobában jellemző (aeroszol-, illetve) radon-

koncentráció. Mivel ebben a szobában csak ritkán tartózkodnak, ezért nem portalanítják a befűjt levegőt, így a porszemcsék jelentős mennyiségű radon (illetve toron) leányelem kitapadását teszik lehetővé. Ezt az aeroszol-detektorokon fogjuk majd tapasztalni.

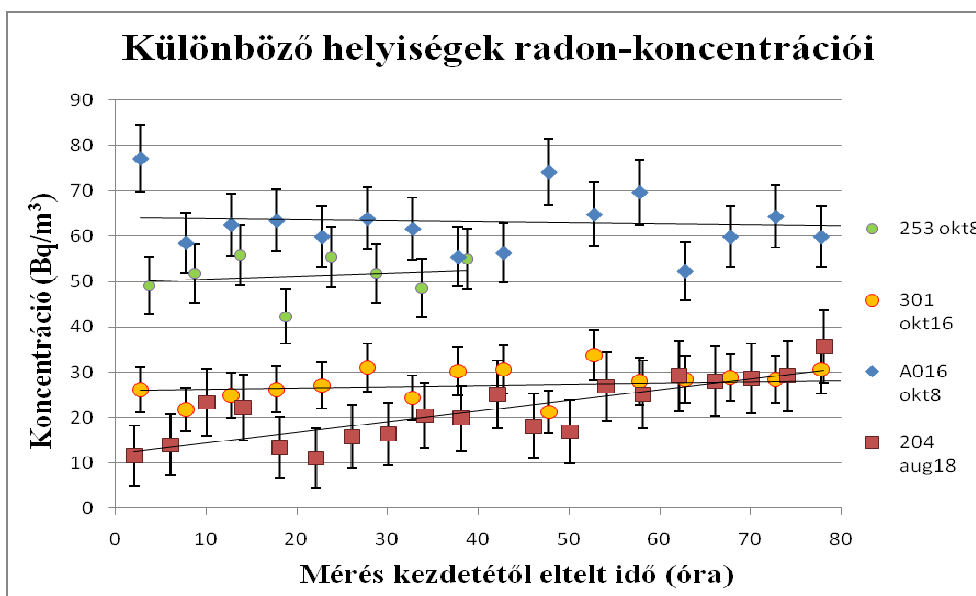


8. ábra. A RAD7 által mért radon-koncentrációk a 305-ös helyiségben az eltelt idő függvényében

5. 1. 3. Egyéb helyiségekben mért radon mennyisége

A RAD7-et több szobában is elhelyeztük, amelyek különbözőképpen vannak szellőztetve. Hogy megfigyeljük és összehasonlíthassuk, a radon-koncentrációkat egy ábrán jelenítjük meg ezeket (9. ábra).

A 253-as (zöld körök) és az A016-os (kék négyzet a 9. ábrán) termék a 305-öshöz hasonlóan zsilipes belépőrendszerrel vannak ellátva, ezért ritkán cserélődik a levegő. Mivel egy gépház mellett helyezkednek el, csak meghibásodás vagy karbantartás esetén mennek keresztül rajtuk. Mindezek okán a radon felhalmozódni képes, szemben a 204-es (az ábrán piros négyzettel jelölve) és 301-es (sárga körrel jelölve) rendszeresen szellőztetett és portalanított levegőjű helyiségekben, tehát a radon-koncentráció alacsonyan tartása végett érdemes rendszeres szellőzést és alacsony aeroszol-koncentrációt biztosítani.



9. ábra. Különböző helyiségekben, különböző időtartamokban mért radon-koncentrációk, a terem számát és a mérés kezdésének napját a jelmagyarázat mutatja

Összefoglalásként a teremek átlagos radonkoncentrációit adjuk meg, a vizsgált időtartamokra. Ez látható a 4. táblázatban. Ezen átlagok mögött időben állandó radontartalmat tapasztaltunk a két eset kivételével. A 204-es teremben a radontartalom folyamatosan nőtt. Itt nem mértük ki a telítődési értéket. A 305-ös teremben a mérési idő 150 óra elegendő volt ahhoz, hogy a telítődést is kimérjük. Ennél a teremnél a felfutás nélküli átlagot adjuk meg.

Terem száma	Átlagos radonkoncentráció (Bq/m ³)	Terem száma	Átlagos radonkoncentráció (Bq/m ³)
253	51±2	301	27±1,5
A016	63±2	A305	321±3
222/A	3,5±0,6	204*	22±2

4. táblázat

* felfutás közbeni átlag

5. 2. Az MGP aeroszol-detektorral mért detektálási intenzitások a 222/A teremben

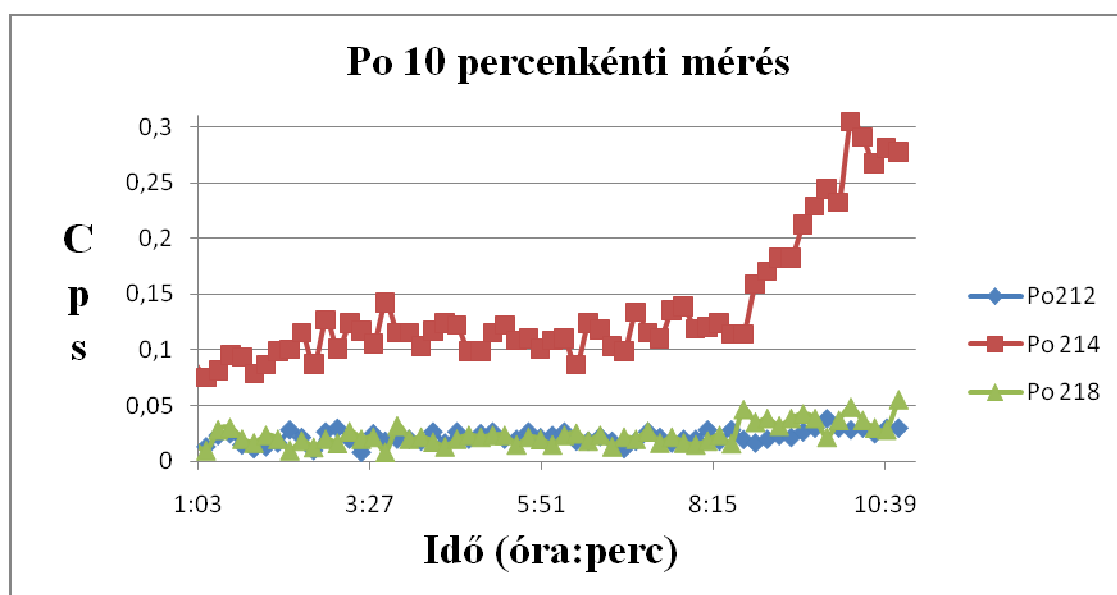
5. 2. 1. A detektálási intenzitás időfüggései a 222/A teremben

Ebben a helyiségben biztosított a folyamatos szellőzés miatt a szabad levegő nagyságrendjébe eső radonkoncentrációt tapasztaltunk a RAD7 detektorral ($3,5 \text{ Bq/m}^3$). Ezen felül a levegő portalanított is, ezért nem várható, hogy a radon és a toron leányelemeit aeroszol-részecskékre tapadva is nagy mennyiségben érzékeli tudja az aeroszol-detektor. Az október 16-án a detektorról letöltött adatokat a következőkben mutatjuk be. A 10. ábrán a 2009. október 16-án hajnali 1 órától délelőtt kb. 11-ig terjedő intervallum során felvett cps adatokat láthatjuk. Az egyes polónium izotópok alfa-sugárzását kiválasztva az energiaspektrumból alakulnak ki az egyes izotópok feltüntetett idősorai. Az ábra alapján a ^{214}Po detektálási intenzitása $0,1 - 0,3 \text{ cps}$ tartományba, a másik két Po izotópé $0,05 \text{ cps}$ alatti tartományba esik.

Három különböző időtartományú átlagolással végeztünk mérést:

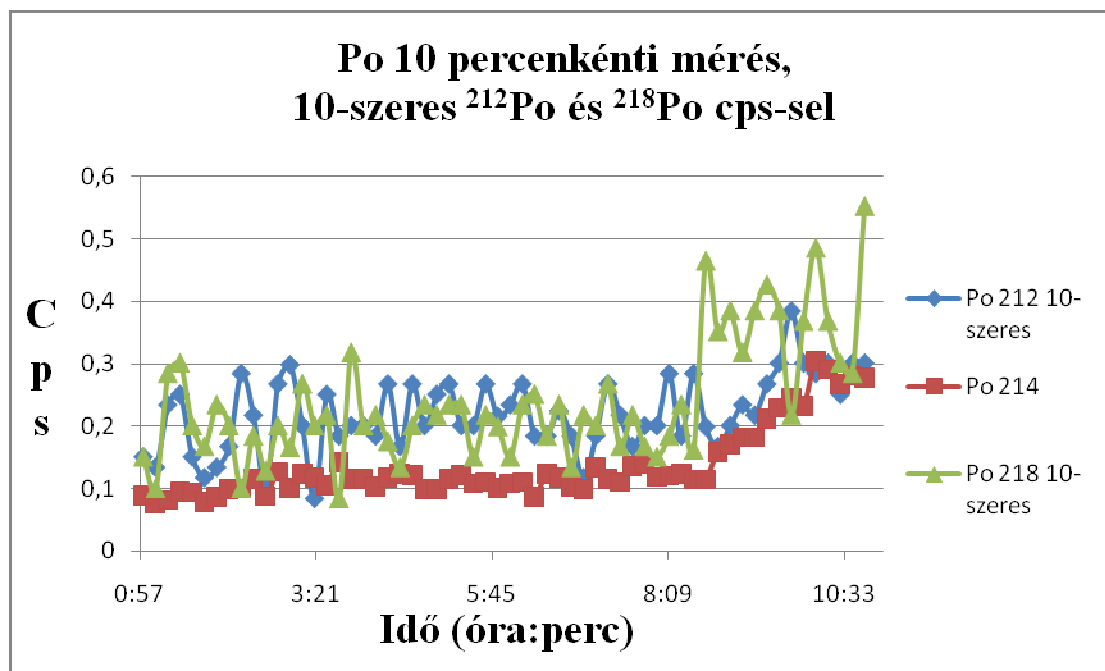
- 10 perces átlagok: október 16-án 1:00 – 10:50-ig,
- 1 órás átlagok: szeptember 10-én 2:00 – 16-án 10:00 -ig
- napi átlagok: 2009. augusztus 14 – október 16-ig.

a) Tíz perces átlagok



10. ábra. Az aeroszol-detektor detektálási intenzitásai a 212, 214 és 218 polónium ablakokban cps-ben kifejezve a 10 perces átlagolással október 16-án.

A 10 perces időközönként (2009. október 16-án, 1:00 és 10:50 között) detektált minták esetében (10. ábra) az azt következő adatsorokkal is egyező tulajdonságokat figyelhetünk meg, például, hogy a ^{214}Po aktivitása a szűrőpapíron kb. 5-ször nagyobb a másik két izotópénál, ezért a ^{212}Po és a ^{218}Po beütésszámait tízszeresére növelve ábrázoltuk a következőkben (11. ábra).



11. ábra. Az aeroszol-detektor detektálási intenzitásai a 212, 214 és 218 polónium ablakokban cps-ben kifejezve a 10 perces átlagolással október 16-án. A 212 és a 214 polónium adatai 10-szeresére növelve láthatók.

Közös tulajdonság még a méréseinkben, hogy a 212-es és 218-as (a radon és a toron első leányelemei, vagyis két különböző anyamagból származó) izotópok hasonló cps tartományban mozognak, az átlagos beütésszámaik aránya kevesebb, mint 10%-kal tér el egymástól. Az is látható, hogy a 212 és a 218 izotópok cps értékei időben nem állandóak, de amikor az egyik emelkedik, a másik is emelkedik, tehát időfüggésük ezen a rövid skálán is hasonlóságot mutat.

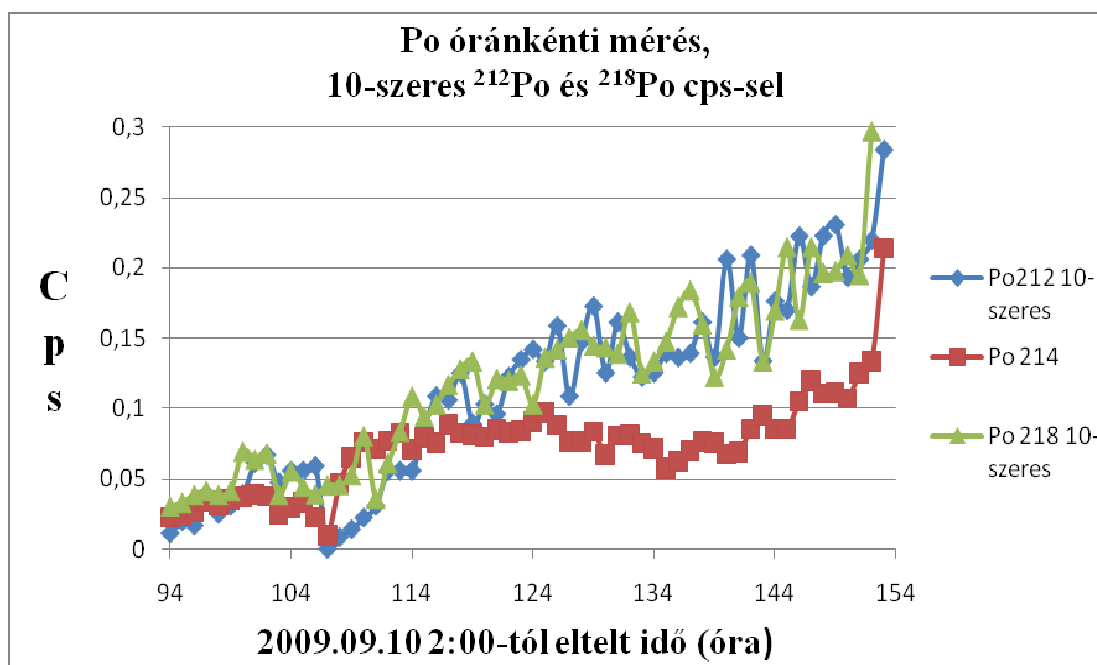
A ^{214}Po minden esetben jóval nagyobb mennyiségben van jelen, mint láthattuk a 10. ábrán. Oka, hogy a beérkező aeroszol-szemcséken megtapadt, viszonylag hosszú felezési idejű (~20 perc) ^{214}Pb -ből és ^{214}Bi -ből (melyek ^{218}Po leányelemek) ^{214}Po keletkezik, ami felhalmozódik a szűrőpapíron. Ezzel egy időben a levegőben lévő ^{218}Po hamar (3,1 perc alatt) elbomlik, egyrészt nem biztos, hogy az aeroszol-szemcsére ki tud tapadni, másrészt ha kitapad, akkor a szűrőpapírra érkezés előtt el tud bomlani az

aeroszolon és az említett ólom és bizmut izotópokká alakul át mire a detektorba jut, ugyanakkor kevésbé tud visszapótlódni a levegőből. A kis aeroszol-sűrűség miatt a leányelemek mire eléri az aeroszolt már elbomlottak az esetek nagy részében, és a második leányelem tapad ki. Ezért nem tud a levegőből visszapótlódni a ^{218}Po . Az ólom és bizmut a szűrőpapíron ragadva majd csak a ^{214}Po -ként fog alfa-sugárzást kibocsátani, és az ábránkra felkerülni.

A radioaktív egyensúly nem áll fenn a 218 és 214 polóniumok között a szűrőpapíron.

A ^{212}Po és a ^{218}Po detektált intenzitásában csak reggel 8 óra körül van eltérés (11. ábra), de ez pár óra alatt kiegyenlítődik, emiatt az egy órára átlagolt cps-ekben jó eséllyel várhatjuk a 212/218 cps-ek arányának állandóságát. A 8:09 utáni ^{218}Po aktivitásában bekövetkező ugrás magyarázható a reggeli munkakezdéssel, és az ezzel járó ajtónyitásokkal, amik megváltoztatják a szellőzési tulajdonságokat és porkoncentrációt a termekben, valószínűleg a nagyon alacsony 3 Bq/m^3 -es radontartalomhoz másik termekből nagyobb radontartalmú (és torontartalmú) levegő keveredett be.

b) 1 órás átlagok

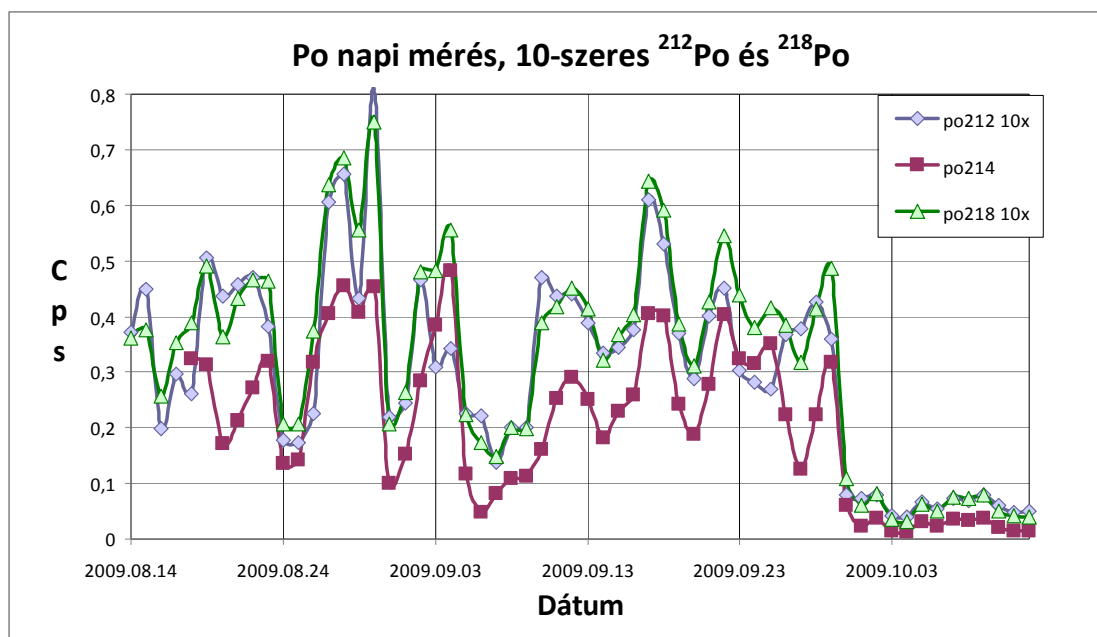


12. ábra. Po izotópok óránként mért beütéseinek időfüggése október 14. és október 16. között.

A 12. ábrán látható időfüggés több napot átfogó időtartamot ölel fel. A korábbiakhoz hasonlóan a ^{212}Po és a ^{218}Po görbéi változnak szorosabban együtt, a ^{214}Po menete csak megközelítőleg követi az előbbi két izotópet. (A 212 és a 218 adatai 10-zel szorozva vannak, az előző esethez hasonlóan.)

Az a meglepő tapasztalat erősödött meg, hogy a toron negyedik és a radon első leányelemének detektált intenzitásának időfüggése ebben a teremben különböző szellőztetési események mellett is több napos vizsgálat során nagyon hasonló. Ez a tapasztalat lehetőséget ad arra, hogy a ^{212}Po intenzitásából meg tudjuk becsülni a 6 MeV energiájú ablakban a ^{218}Po -tól származó járulékot, akkor is ha van más 6 MeV energiájú alfa-bomlás a szűrőpapíron.

c) Napi átlagok



13. ábra. Po izotópok napi átlagolású adatai, 10-szeres ^{212}Po és ^{218}Po adatokkal

A napi átlagok megerősítik az eddig talált tendenciát a radon első és a toron negyedik leányelemeire vonatkozóan. Az aktivitások időfüggését nem célunk leírni, ez a szellőzési viszonyoktól nagyon függenek, melyről nem rendelkezünk információval. A szeptember végén bekövetkezett koncentráció-eséseket tudjuk csak egy ismert adat megváltozásához kötni. A szűrőpapíron áthaladó levegő sebessége szeptember 30-án 22 liter/perc értékről 44 liter/perc értékre változott.

A három izotóp beütési intenzitás idősorainak korrelációit is kiszámoltuk, mindhárom átlagolási időre. A standard korreláció értékeit az alábbi táblázat mutatja be:

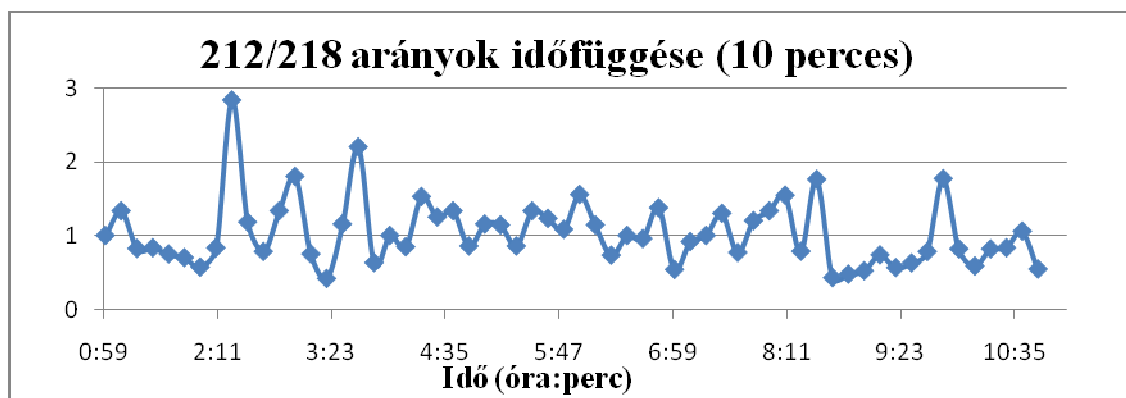
	10 perces okt. 16.	1 órás okt. 13-16.	1 napos 08.18. – 10.12.
212 – 214		0,81	0,83
212 – 218	0,34	0,91	0,94
214 – 218		0,86	0,96

5. táblázat Az egyes természetes izotópok beütési intenzitásai idősorainak korrelációi

A korrelációk az egy napos átlagolásnál a legnagyobbak, itt erős korreláció áll fenn. Ennek oka, hogy ekkor a rövid távú órás változások hatásai már kiátlagolódnak. Egyre kisebb integrálási idővel felvett idősorok esetén egyre kisebb korrelációt tapasztaltunk. A szellőztetés és egyéb változásokra az egyes mért izotópok más idő alatt reagálnak, ezért rövid távon az egyes idősorok nem hasonlóan változnak. A rövid táv adataink szerint 1 óránál kisebb időtartam. Az egy órára átlagolt idősorok esetén is már erős korreláció tapasztalható. A 10 perces adatok korrelációja már nem mutatja az idősorok hasonlóságát. Ez az idő rövid ahhoz, hogy az egyes izotópok követni tudják a levegő radontartalmának változásait. A tapasztalt erős korrelációk miatt érdemes az izotópok arányainak időfüggését vizsgálni, és kb. konstans értékeket mutató tartományokat várunk.

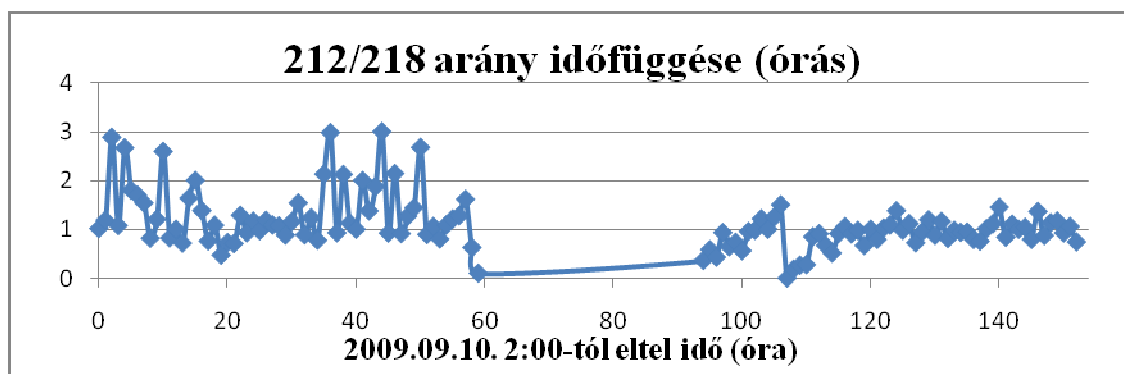
Az összegzésben még ki kell emelnünk hogy a 222/A teremben minden esetben alacsony beütési intenzitás értékeket detektáltunk, amely a RAD7 detektor által a korábbiakban mért eredményekkel egybevág.

5. 2. 2. ^{212}Po és ^{218}Po aránya az idő függvényében a 222/A teremben

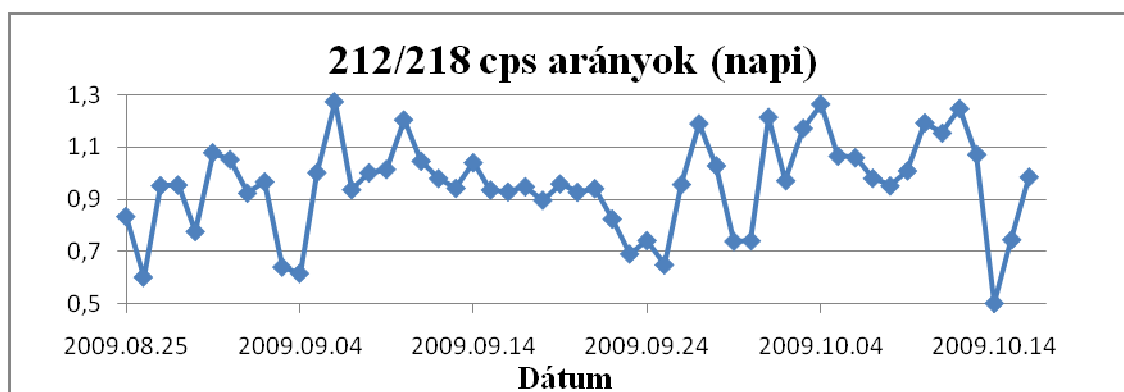


14/A. ábra. ^{212}Po és ^{218}Po egyes beütéseinek egymáshoz mért arányainak időfüggése

Megfigyeltük, hogy minden egyes adatsorban hasonló módon együtt futnak a ^{212}Po -es és ^{218}Po -as tömegszámú polóniumok beütései, illetve hosszabb távon jól korrelálnak (lásd az 5.2.1 alfejezetben), holott két különböző anyamagból származnak (az első a toron a második a radon leányeleme). Egymáshoz mért arányaik az idő és a szellőztetés függvényében a 14/A. ábrán látható módon alakulnak. Az egyes időintervallumok megegyeznek az első fejezetben leírt időintervallumokkal.



14/B. ábra. ^{212}Po és ^{218}Po beütésszámainak aránya az óránkénti méréseknél



14/C. ábra. ^{212}Po és ^{218}Po beütésszámainak aránya a napi méréseknél

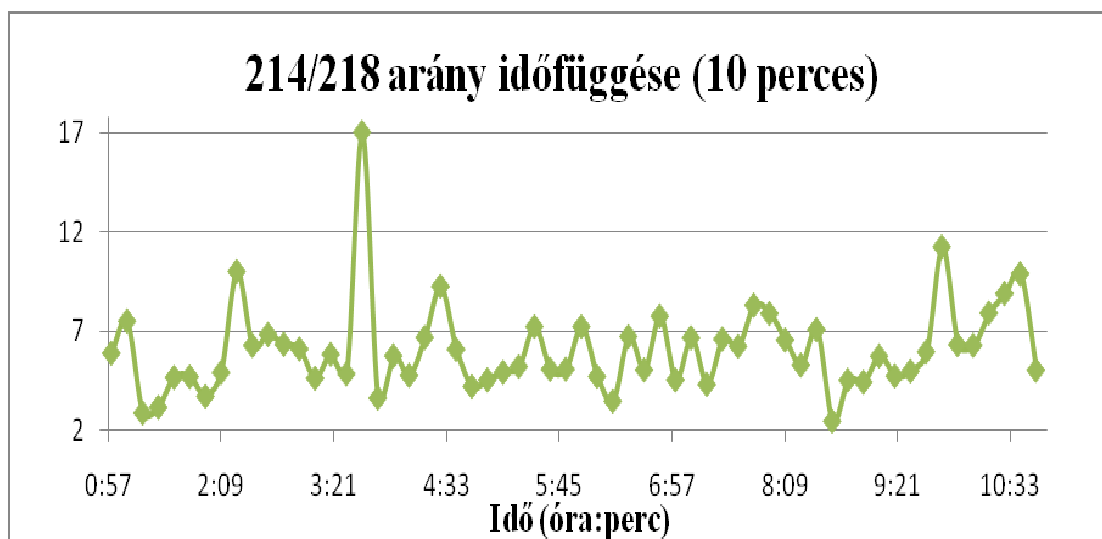
A kapott ábrák alapján azt mondhatjuk, hogy a $^{212}\text{Po}/^{218}\text{Po}$ arány a szűrőpapíron a megjelölt időtartamú átlagolás mellett a 10 perces esetben: 0,4 és 3 között; az órás esetben: 0 és 3 között és a napi átlagolás esetén 0,5 és 1,3 között változott a mérési időszakainkban. Az órás átlagok esetén 3 (14/B. ábra) a többiekénél alacsonyabb mért arány látszik (14/A és 14/C ábrák), de mindentől eltekintve az arányok itt is 0,5 – 3 közé esnek. Ezeket az arányokat kiszűrhetjük, ha a ^{212}Po detektálási intenzitására egy alsó küszöböt határozunk meg.

Mindezen megállapításokat a kúrium-kimutatás módszerében alkalmazzuk a későbbiekben (**6.1 alfejezet**), feltételezve azt, hogy az aránytól való szignifikáns eltérés a detektálni kívánt transzurán elem kijutása miatt történik (a korábban hangsúlyozott energia-egybeesések okán).

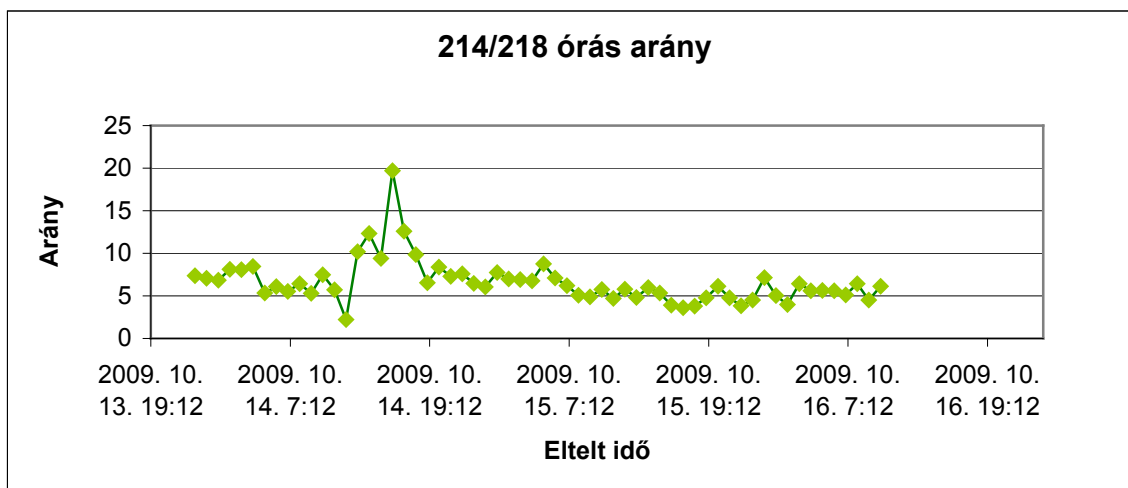
5. 2. 3. ^{214}Po és ^{218}Po aránya az idő függvényében a 222/A teremben

Az urán-sorban helyet foglaló ^{218}Po egyik leányeleme a ^{214}Po , melynek túlsúlyban lévő jelenlétét a korábbiakban magyaráztuk (**5.2.1 alfejezet**).

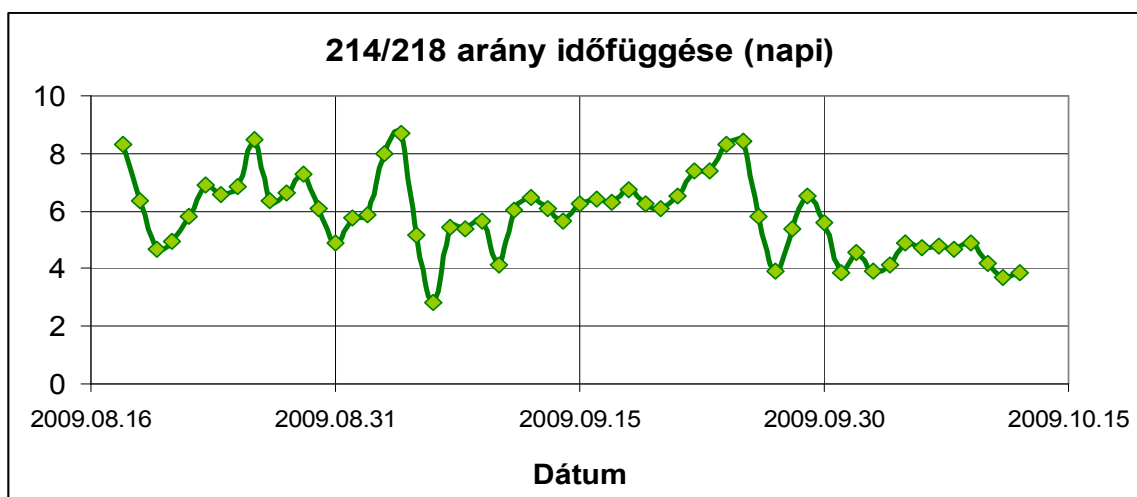
Az adatok alapján megvizsgáltuk ezen két izotóp korreláltságát, amely eredményeink szerint a legrövidebb, tíz perces mérésre (**15/A. ábra**) volt a legnagyobb (0,66), a detektálási idő hosszabbodásával (0,53 az egy órás és 0,44 az egy napos időtartamra) pedig egyre csökkent. Arányuk az idő függvényében igen szélsőségesen alakult, ezért nem tudtuk messze menő következtetések levonására felhasználni. Észrevettük, hogy a szellőzési tulajdonságok változása (szellőztetési sebesség, a levegő aeroszol-eloszlása, stb.) nagyon befolyásolja ezt az arányt, így ez nem használható a ^{218}Po mennyiségének – így a 6 MeV-s ablakban található természetes eredetű beütések – becslésére.



15/A. ábra. ^{214}Po és ^{218}Po 10 percenkénti beütéseinek aránya az idő függvényében



15/B. ábra. ^{214}Po és ^{218}Po óránkénti beütéseinek aránya az idő függvényében



15/C. ábra. ^{214}Po és ^{218}Po napi beütéseinek aránya az idő függvényében

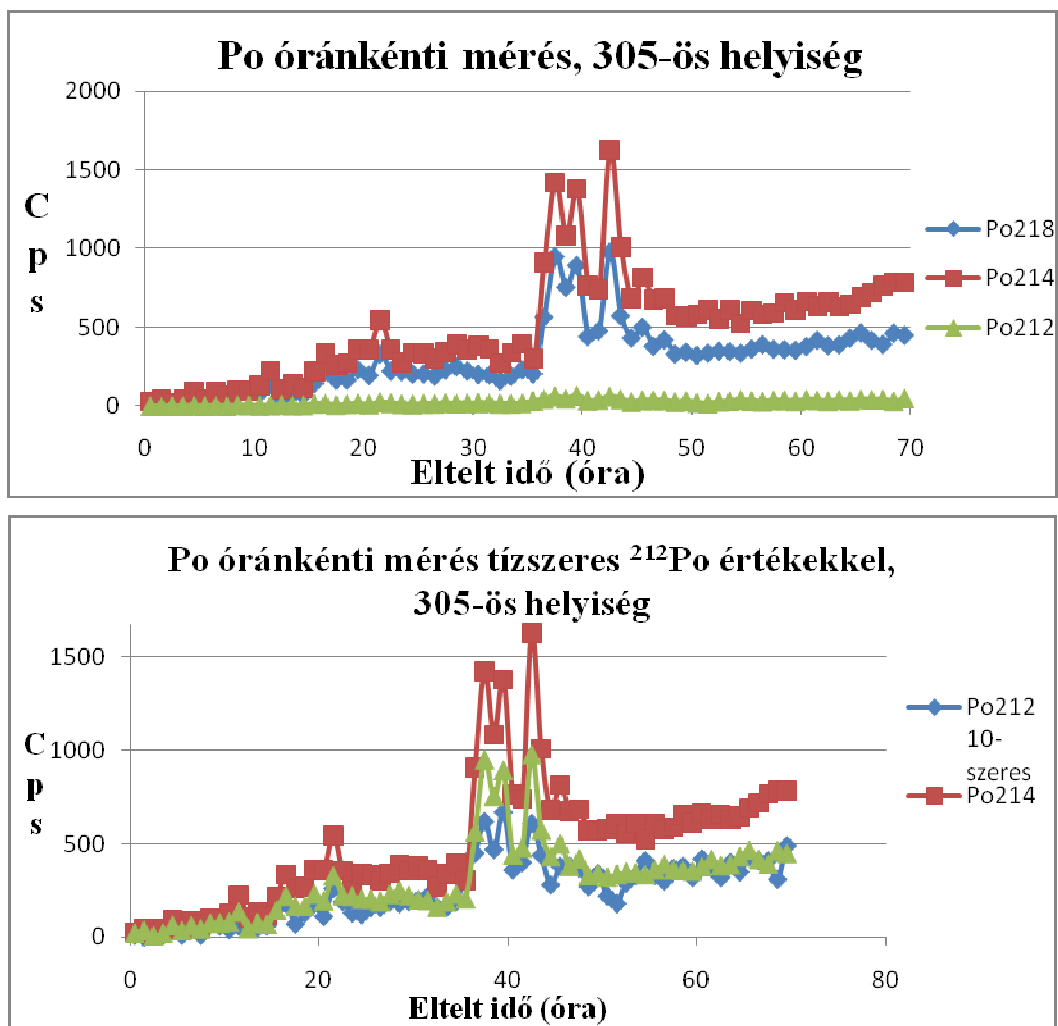
5. 3. Az MGP aeroszol-detektorral mért detektálási intenzitások a 305/A teremben

5. 3. 1. Beütésszámok időfüggései az alfa-csatornában

Ebben a teremben nincs felszerelt aeroszol-detektor, ezért egy ugyan olyan elven működő hordozható műszert alkalmaztunk, a mérési idő egy órára volt beállítva.

Jól kivehető a 16. ábrán, hogy a radon leányelemek, a ^{218}Po és a ^{214}Po , nagyobb arányban fordulnak elő, mint a 222/A helyiség esetén (5.1.1 alfejezet). Ennek oka, hogy a helyiség ritkán szellőztetett (zsilipes belépőrendszerrel van ellátva) és a falakban jelen lévő és kidiffundáló radon felhalmozódni képes. A mérés kezdetén kiszellőztették a

szobát, ezért a grafikon elején alacsony a beütésszám, majd elkezdett hirtelen felgyülni a radon (35-45 óra elteltével már 1000 cps feletti értékeket vesz fel, amelyet egyelőre nem tudunk magyarázni), majd hirtelen lecsökken és telítési görbéhez hasonlóan növekszik tovább. Ezt a menetet mind három izotóp követi, a 16. ábra alsó paneljén tízszeresére növelt ^{212}Po beütések segítik a könnyebb átláthatóságot.

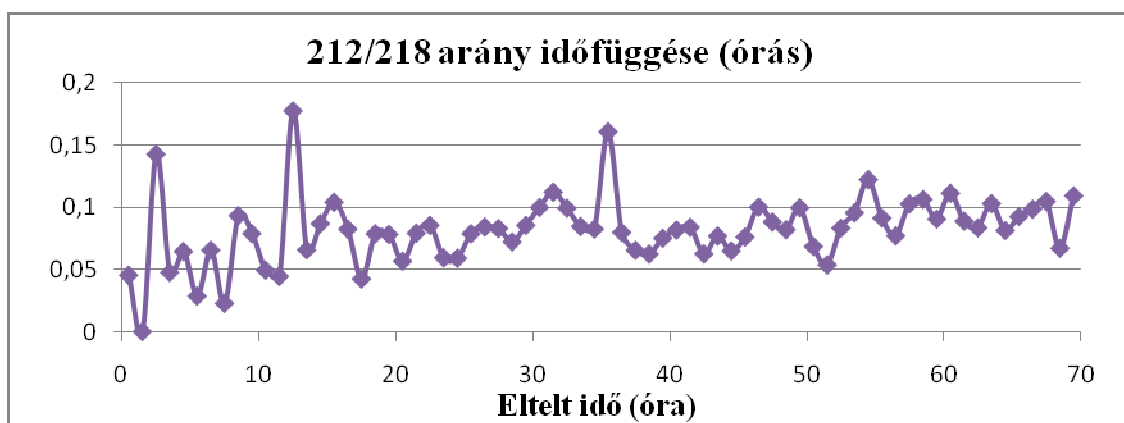


16. ábra. Polónium izotópok óránkénti beütésszámai az idő függvényében, a felső panelen az eredeti, az alsón tízszeresére növelt ^{212}Po értékekkel

5. 3. 2. ^{212}Po és ^{218}Po aránya az idő függvényében

A 305-ös helyiségből egy órás mérési eredmények álltak rendelkezésünkre. Összehasonlítva a 222/A teremben mért ugyan ilyen időtartamú arányokkal (14/B. ábra), jóval alacsonyabb értékeket kaptunk. Mindez belátható, mivel ebben az esetben a ^{212}Po

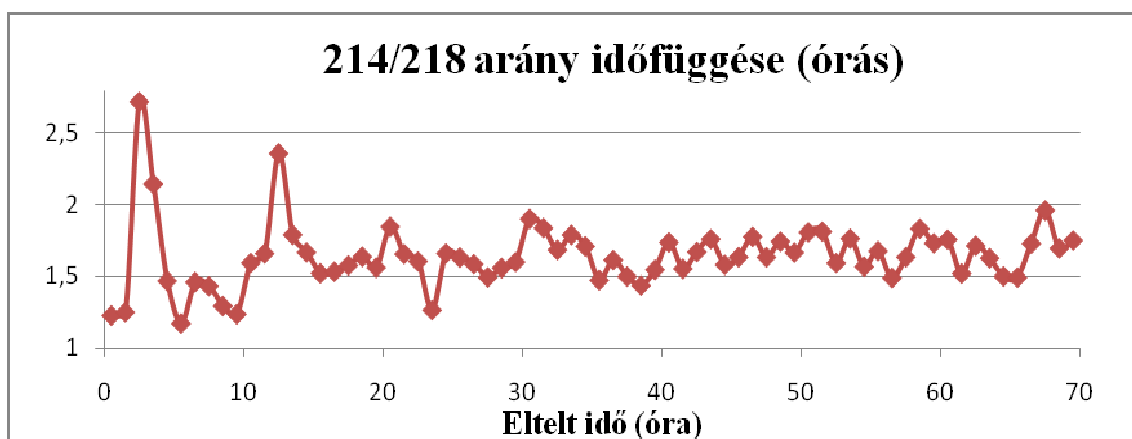
igen alacsony, a radonból származó ^{218}Po pedig nagy mennyiségben volt jelen (16. Ábra, felső panel).



17. ábra. ^{212}Po és ^{218}Po óránkénti beütéseinek aránya az idő függvényében

A kezdeti, szellőztetés okozta fluktuációt követően az arány $0,1 \pm 0,05$ között alakul (17. ábra), ennek közel konstans mivoltát a kúrium kimutatásának módszerében felhasználjuk (6.1. alfejezet)

5. 3. 3. ^{214}Po és ^{218}Po aránya az idő függvényében



18. ábra. ^{214}Po és ^{218}Po óránkénti beütéseinek aránya az idő függvényében

A radon két leányelemének futása hasonló a 17. ábrán látható arányhoz, nagyjából 25 óra elteltével körülbelül állandó szintre áll be (szemben a kevésbé szellőztetett 222/A szobában mért értékekkel a 15/A,B,C ábrán), a $1,75 \pm 0,25$ közötti tartományban (18. ábra).

5. 3. 4. Az izotópok arányainak értelmezése egy egyszerű modellben

Az aeroszol-detektor a működése során kb. 30 m³/óra sebességgel szívja be a levegőt. A levegőben levő aeroszol-szemcsék kiülepednek a detektorban található vékony papírlapra, és felhalmozódnak, ezzel együtt az aeroszol-szemcséken levő radon leányelemek is.

Ezen izotópok aktivitásának időfüggése a következő egyenletrendszer megoldásával adható meg.

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1 + C_1$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1 + C_2$$

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = -\lambda_3 N_3 + \lambda_2 N_2 + C_3$$

$$\frac{dN_4(t)}{dt} = -\lambda_4 N_4 + \lambda_3 N_3 + C_4$$

N_i – a radon i -edik leányelemének részecskeszáma

λ_i – a radon i -edik leányelemének bomlási állandója

C_i - azon atomok száma, amelyek időegység alatt ráragadnak a detektorban levő szűrőpapírra.

$$C_i = \frac{db}{idő}$$

Ez a következő megfontolások alapján írható fel:

$Q = \frac{\text{térfogat}}{\text{idő}}$ - a detektor levegő-szívási sebessége

$n_i = \frac{db}{\text{térfogat}}$ - az egységnyi térfogatban levő atomok száma

ε - annak a valószínűsége, hogy az atomok kitapadjanak a detektor papírjára

Feltesszük, hogy az aeroszolon radioaktív egyensúly van, ami azt jelenti, hogy:

$$n_i \lambda_i = A_{aer} = \text{állandó} (\text{Bq} / \text{térfogat})$$

Ezek alapján a kitapadó atomok számára a következő összefüggés adódik:

$$C_i = \frac{A_{aer} Q \varepsilon}{\lambda_i}$$

A kezdeti feltételek: $N_1(t=0) = N_2(t=0) = N_3(t=0) = N_4(t=0) = 0$

Azaz amíg nem kezdődött meg a mérés, addig nincs izotóp a papíron.

A megoldás a következő általános alakban kereshető:

$$N_i(t) = K_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} e^{-\lambda_j t}$$

Az első egyenlet általános megoldása az alábbi alakban írható fel:

$$A e^{-\lambda_1 t} + B$$

Ezt visszaírva az eredeti egyenletbe a következő két ismeretlenes egyenlet adódik:

$$-\lambda_1 A e^{-\lambda_1 t} = -\lambda_1 (A e^{-\lambda_1 t} + B) + C_1$$

Ezt az állandó együtthatók módszerével megoldva, valamint a kezdeti feltételt kihasználva az együtthatóra és a konstansra a következő értékek adódtak:

$$a_{11} = -\frac{C_1}{\lambda_1} \quad K_1 = \frac{C_1}{\lambda_1}$$

Rekurzív módszerrel megadható az együtthatók és a konstansok általános alakja:

$$a_{ij} = \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i - \lambda_j} a_{i-1,j} \quad a_{ii} = -\left(K_i + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \right) \quad K_i = \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i} K_{i-1} + \frac{C_i}{\lambda_i}$$

Hogy megtudjuk, hogy milyen aktivitások vannak a detektorban, rövid programot készítettünk, ami megadja az aktivitások időfüggését. A programnak megadtuk a fentebb megoldott egyenletrendszer paramétereit, a konstansokat, illetve az együtthatókat. A program ezután minden egyes időpillanatra megoldotta az egyenletrendszert, majd az aktivitás értékeket kiírja egy fájlba, majd ezt a fájlt GNUplottal ábrázoltuk.

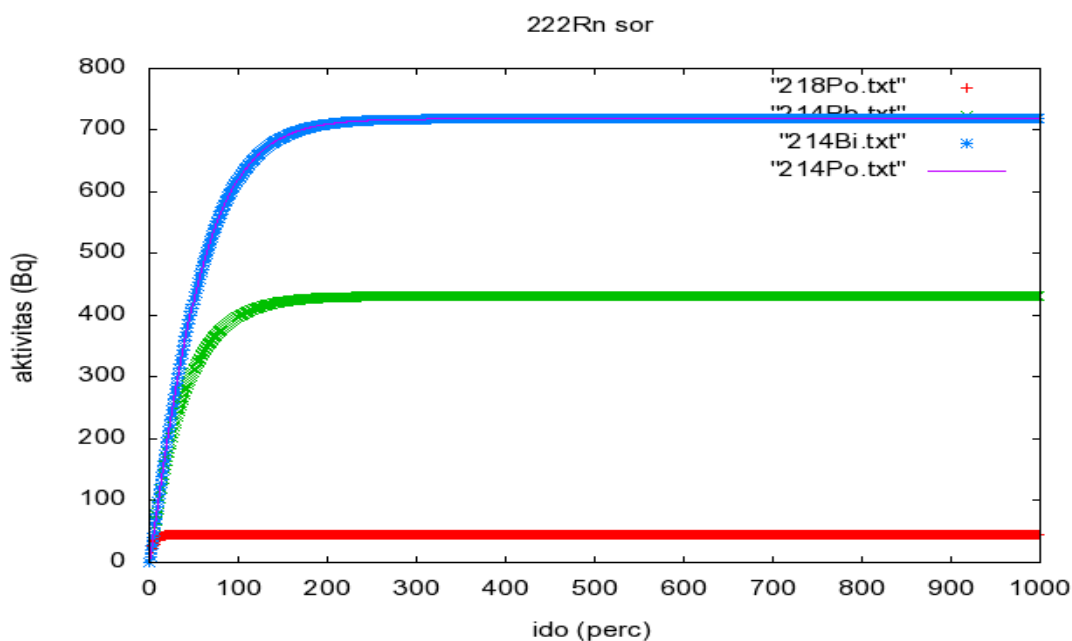
Az első egyenletekben nem a radon izotóp szerepel, hanem a bomlásterméke, a polónium izotóp, mivel a radon nem tapad meg az aeroszolon, mert nemesgáz, így az aeroszol-detektor nem is tudja mérni.

A keletkező izotópok fontosabb adatait mutatja a 6. táblázat.

izotóp	felezési idő	$T_{1/2}$ (perc)	λ (1/perc)
^{222}Rn	3, 8235 nap	5505, 84	$1, 25910^{-4}$
^{218}Po	3, 098 perc	3, 098	0, 2237
^{214}Pb	26, 8 perc	26, 8	0, 02586
^{214}Bi	19, 9 perc	19, 9	0, 03483
^{214}Po	0, 1643 ms	$2, 7383 \cdot 10^{-6}$	253127

6. táblázat. Radon és leányelemeinek felezési ideje

A program által számított értékeket ábrázolva mutatja a 19. ábra.



19. ábra. A leányelemek aktivitásának időfüggései a differenciál egyenletek megoldásai alapján

Az ábrán látható, hogy a ^{214}Bi és a ^{214}Po aktivitása az idő függvényében gyakorlatilag ugyanaz az érték. Ennek az oka, hogy a ^{214}Po -nak nagyon nagy a bomlási állandója, ami a fenti táblázatból is jól látható, és az exponenciálisok a $-\lambda t$ nagy negatív

számértéke miatt elhanyagolhatók. Az ábrán jól látható, hogy a radioaktív egyensúly kb. 200 perc alatt áll be.

Az aktivitásadatokból meghatározható az egyes polónium-izotópok aránya. Először a ^{214}Po és a ^{218}Po arányát határoztuk meg. Az izotópok aránya az idő függvényében a 14. ábrán látható, hogy az arány a radioaktív egyensúly beállása után 16,07 ami azt jelenti, hogy egyensúlyban kb. 16-szor aktívabb a ^{214}Po , mint a ^{218}Po .

Ezt elméleti számításokkal is alátámasztottuk.

Tudjuk, hogy $K_1 = \frac{C_1}{\lambda_1}$ $K_2 = \frac{C_1 + C_2}{\lambda_2}$ $K_3 = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{\lambda_3}$ $K_4 = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_4}{\lambda_4}$, azaz

$$\lambda_i K_i = \sum_i C_i$$

Továbbá ismert a következő összefüggés is: $C_i = Q * \varepsilon * n_i = Q * \varepsilon * \frac{A}{\lambda_i}$

Ez alapján a fenti összefüggés a következő alakban írható:

$$\lambda_i * K_i = Q * \varepsilon * A * \sum_i \frac{1}{\lambda_i} = Q * \varepsilon * A * \frac{1}{\ln 2} * \sum_i T_{1/2}$$

Behelyettesítve a ^{214}Po és a ^{218}Po felezési idejét, majd a két értéket egymással elosztva megkapható a két izotóp aktivitásának aránya ($\xi = A(^{214}\text{Po})/A(^{218}\text{Po})$):

$$\frac{(\lambda * K)_{214\text{Po}}}{(\lambda * K)_{218\text{Po}}} = \frac{Q * \varepsilon * A * \ln 2 * (3,098 + 26,8 + 19,9)\text{perc}}{Q * \varepsilon * A * \ln 2 * 3,098\text{perc}} = 16,07$$

Tehát a mérési eredmények és az elméleti számítások is ugyanarra az eredményre vezettek.

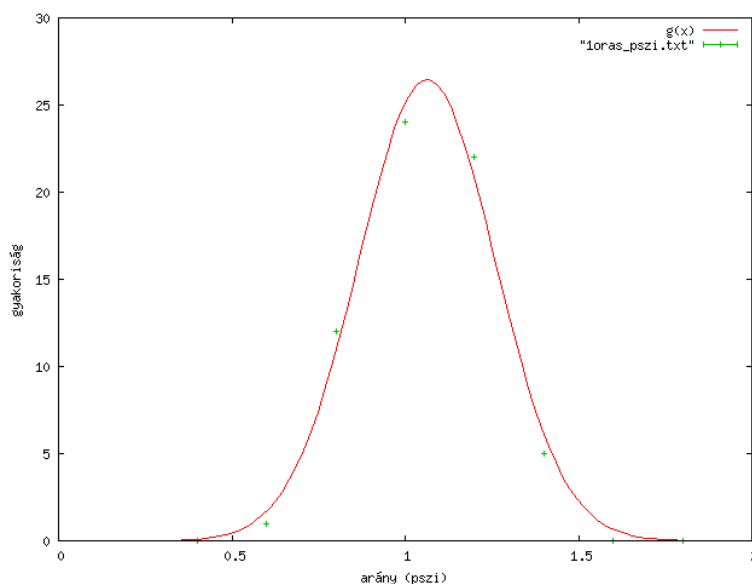
A mért és az így számolt ^{214}Po és ^{218}Po arányából a légtér aeroszoljain létrejövő radioaktív egyensúly meglétére vagy nem létére tudunk következtetni, ami összefüggésben van a szellőztetéssel, valamint a radon-dózisok számolásánál fontos egyensúlyi faktoral.

6. Eredmények

6. 1. Kúrium kimutatásának módszere (a $^{212}\text{Po}/^{218}\text{Po}$ arányból)

Mivel a kúriumot a bomlási energiája alapján az aeroszol-detektor nem képes elkülöníteni a ^{218}Po izotóptól, ezért a kimutatására új módszert dolgoztunk ki, melynek alapját az 5. 2. 2 és az 5. 3. 2 alfejezetekben bemutatott arányokból származtattunk.

Első lépésben meghatároztuk adott helyiségre a ^{212}Po és a ^{218}Po izotópok beütési intenzitásainak arányát ($\psi = A(^{212}\text{Po})/A(^{218}\text{Po})$), amely közel állandónak adódott a méréseink alapján. Ezen érték körül természetesen egy bizonyos szórással helyezkednek el a mért arányok. Ez látható a 20. ábrán.



20. ábra

Az illesztés alapján $\sigma = 0,2$ -nek adódott. Mivel az arányok eloszlása Gauss- eloszlást követ, az ötszörös szóráson (5σ) túl már jó közelítéssel nullának vehető az előfordulási valószínűség (abban az esetben, ha a radon illetve toron exhalációja nagyjából konstans). A kapott terem-specifikus arányból kivont ötszörös szórás értékkel el kell osztani a ^{212}Po másodpercenkénti beütésszámát ($A_{212\text{Po}}$). Amennyiben az így kapott eredmény nagyobb, mint a ^{218}Po detektált beütéseinek száma, abban az esetben valószínűleg kúrium lehetett a légtérben.

$$A_{212\text{Po}} / (\psi - 5\sigma) < A_{218\text{Po}}$$

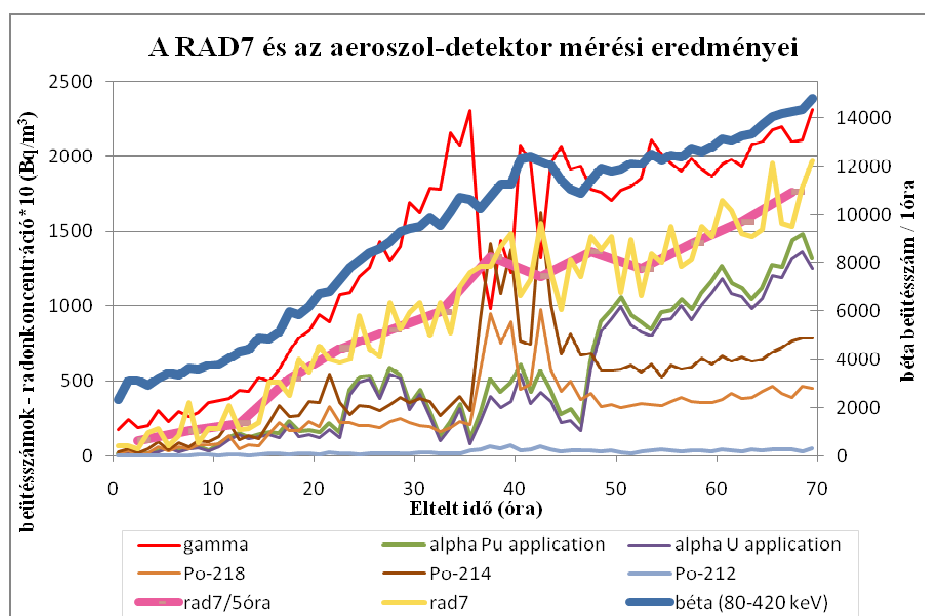
Tehát a $^{212}\text{Po}/^{218}\text{Po}$ arány eltolódása az ötszörös szóráson belül még biztonsággal tulajdonítható a toron és radon exhalációjának, majd kiülepedésének, az ennél kisebb

értékek detektálása pedig a transzurán kúrium jelenlétére utalnak. Mindenképpen fontos még egyszer megemlíteni, hogy a termekben lévő szellőzés és a befűjt levegő aeroszol-tartalma nagyban befolyásolja az arány nagyságrendjét. Jó szellőzés és portalanított levegő befűjtése mellett magasabb értékre kell számítanunk.

6. 2. A radon-koncentráció számolása az aeroszol-detektor adataiból

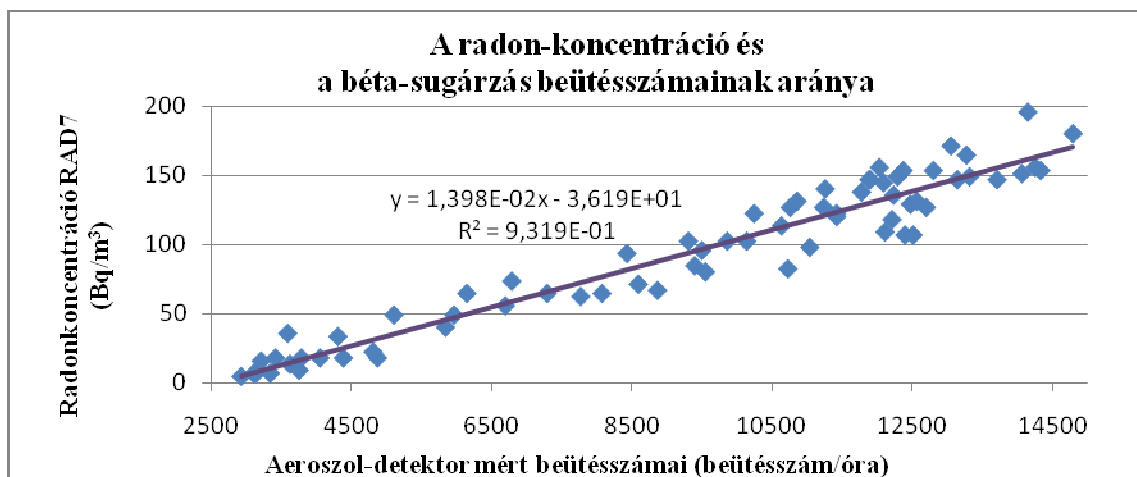
A 305-ös teremben RAD7 detektorral meghatározott radon-koncentrációkat és az aeroszol-detektor különböző mérési eredményeit egy ábrán foglaltuk össze (21. ábra). Arra a következtetésre jutottunk, hogy a béta-ablakban számolt beütések időfüggése (21. ábra, kékkel) nagy hasonlóságot mutat a másik detektor által mért radon-koncentráció időfüggésével (21. ábra, sárgával). A RAD7 adatait 5 órára átlagolva áttekinthetőbb görbét kapunk (21. ábra, rózsaszínnel).

A két adatsort egymás függvényében vizsgáltuk (22. ábra). Az x -tengelyen az aeroszol-detektor béta ablakában egy óra alatt érkezett beütések száma látható, az y -tengelyen pedig a RAD7 által mért radon-koncentráció. A korrelációt igen jónak találtuk, értéke 0,96. Az adathalmazra egyenest illesztettünk, melynek egyenlete megadja, hogyan lehet meghatározni a radon-koncentrációt a béta-ablak egyórás beütésszámaiból. $c_{radon} = 0,01398 \cdot N - 36,19$ (Bq/m^3). Ezen az ábrán az adatpontok időbeli egymásutánja nem látható, ezért megvizsgáltuk a két mennyiség arányának időfüggését.



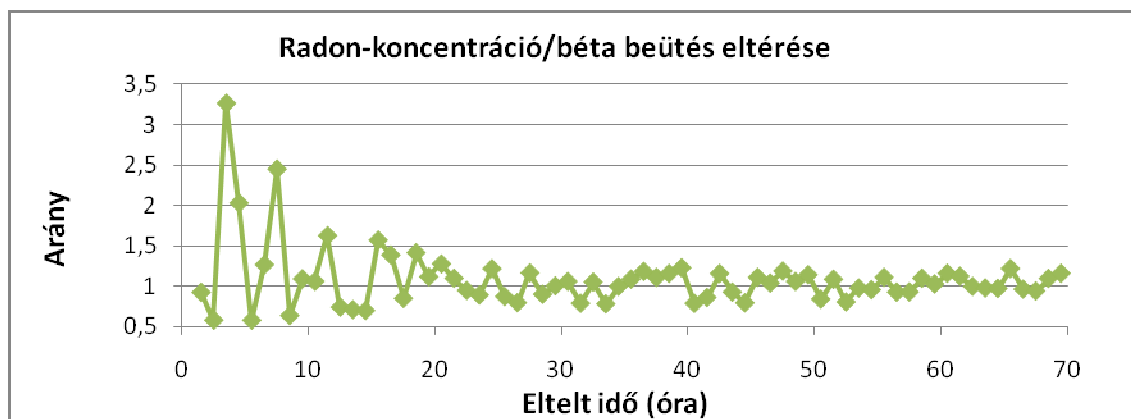
21. ábra. A RAD7 és az aeroszol-detektor mérési eredményei a 305-ös helyiségben

Az időfüggésük aránya 1 körül ingadozik (23. ábra). Megbizonyosodtunk róla, hogy a radon-koncentráció eltérése a béta-sugárzás beütésitől statisztikus az idő függvényében (24. ábra).

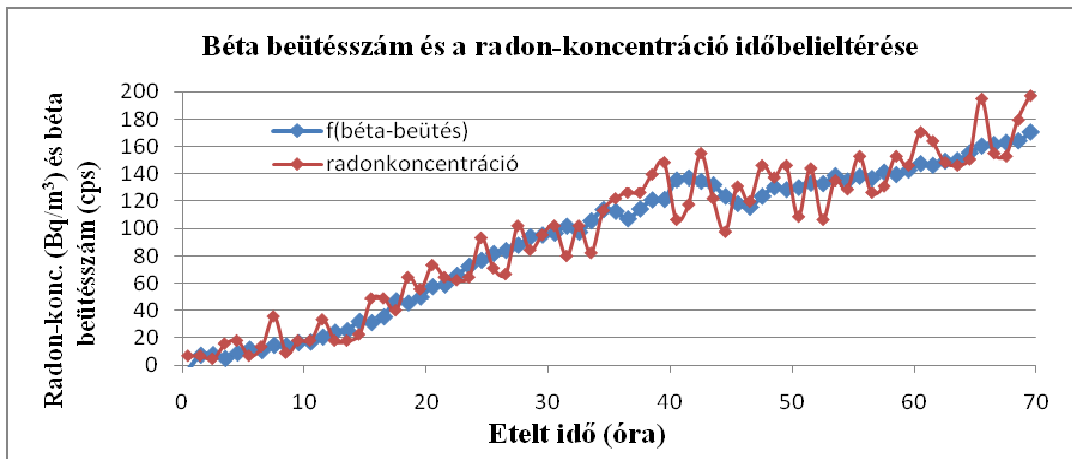


22. ábra. A radon-koncentráció (RAD7) és a béta-sugárzás beütéseinek (aeroszol-detektor) egymáshoz viszonyított aránya

Végül lineáris trendvonalat illesztettünk (22. ábra), így a kapott egyenes egyenletének segítségével ($y=1,398E-02x-3,619E+01$) ha ismerjük a radon-koncentrációt (y) kiszámíthatjuk a béta beütésszámot (x), és fordítva.

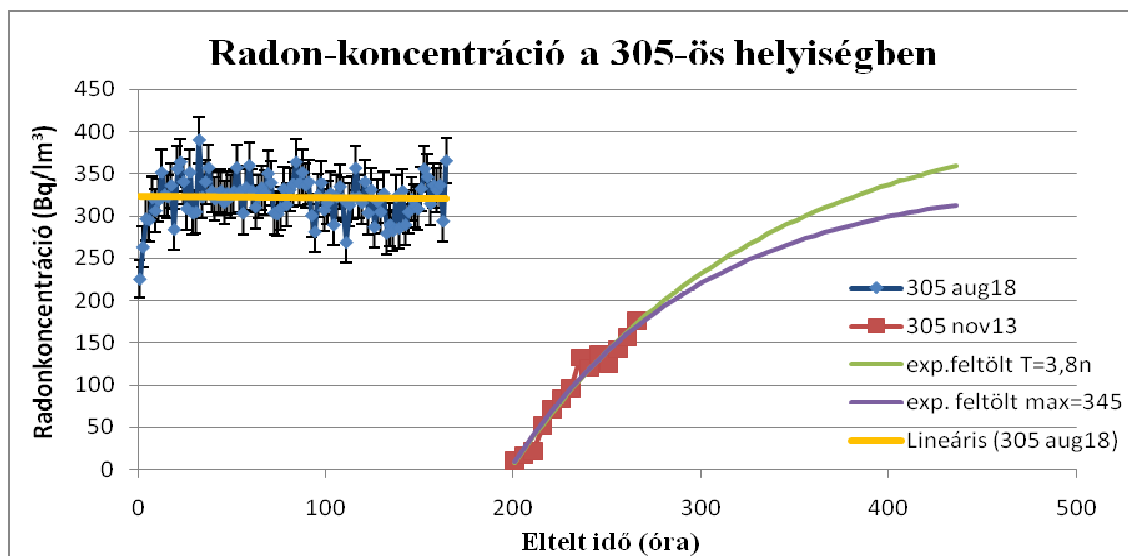


23. ábra. Radon-koncentráció és béta beütés időfüggése



24. ábra. A radon-koncentráció statisztikus eltérése a béta-sugárzás beütéseitől

Annak érdekében, hogy mérési eredményekkel támasszuk alá a szellőztetés fontosságát, kétszer is betettük a radon-detektort a vizsgált 305-ös helyiségbe, de másodszorra egy hosszabb légcserélést követően. A 25. ábrán láthatjuk, hogy a 200. időpillanatban szinte nulla a koncentráció, majd exponenciális telítődésnek megfelelően tart felfelé. Lehetséges felfutását kétféle képen becsültük meg.



25. ábra. A radon-koncentráció augusztus 18-án (eltelt idő 0-200 óra tartományban ábrázolva) és november 13-án teljes szellőztetés után (200 óra eltelt időtől ábrázolva)

Az egyik esetben a felfutás időállandója a radon felezési idejéből számolt érték (25. ábra, zöld felfutási görbe). Ez esetben a telítődési radon-koncentráció 430 Bq/m^3 -nek adódott. A másik becslésnél a telítődési radon-koncentrációt választottuk ismertnek, méghozzá az augusztus 18-i mérés alapján, annak átlagos értékét 345 Bq/m^3 -t állítottunk be. Az illesztési paraméter ebben az esetben a felfutás időállandója volt, ami $0,01 \text{ 1/óra}$ értéknek adódott, a felezési időből számolt $0,0076 \text{ 1/óra}$ helyett. Ez a fajta felfutás úgy értelmezhető, hogy a radon a teremből nem csak a bomlása miatt távozik el, hanem van

egy légcserre miatti távozás is. A két radon atom veszteség egyaránt arányos a teremben lévő radon atomok számával. A teljes időállandó a bomlási és a légcserre miatti állandók összege ($\lambda_{\text{Teljes}} = \lambda_1 + \lambda_2$). Ebből a légcserre okozta rész időállandója $\lambda_2 = 0,0024$ 1/óra. Az ehhez tartozó felezési idő kb. 230 óra, azaz egy nem radioaktív elem mennyisége ennyi idő alatt esik a felére a szellőzés miatt.

6. 3. Radon dózisek a belső légterekben

A meghatározott átlagos radon-koncentrációk és a **4. 3. fejezetben** bemutatott irodalmi ajánlás alapján megbecsültük a munkahelyi dózis radontól és a leányelemeitől származó mennyiségét. A radon-koncentrációval és a teremben eltöltött idővel egyenesen arányos dózist feltételezve a **4. táblázat** mutatja be a havi tartózkodás dózisait.

A termekben a radon-koncentráció alacsony értékeit tapasztaltuk, ezért azt a következtetést vonhatjuk le, hogy ez a fajta dózis elhanyagolható része a munkahelyi dózisonak, ahogy azt vártuk is. Egyedül a 305-ös teremben lehet számottevő a mértéke. Ha hosszabb időt rendszeresen tölt valaki ebben a teremben, pl. havi 160 órát itt dolgozza le, akkor egy hónap alatt kb. 0,2 mSv dózis éri.

Összefoglalva a radon, nem mint dozimetriai tényező a legfontosabb az atomerőműnél, hanem mint nyomjelző gáz használható inkább. Ha szükséges mennyisége a korábbiakban tárgyaltaknak megfelelően, rendszeres, portalanított levegő bejuttatásával minimálisra csökkenthető.

Helyiség	Radon-koncentráció (Bq/m ³)	Effektív dózis (mSv/hónap)
253	51,22	0,03
301	27,24	0,02
a016	63,08	0,04
a305	321,77	0,19
222	3,52	0,002
204	21,95	0,01

7. táblázat. A radontól származó effektív dózis az egyes termekben

7. Összefoglalás

1. Felismertük, hogy habár a ^{212}Po , ^{214}Po és a ^{218}Po izotópok beütési intenzitásai erősen függenek az időtől, a szellőztetési folyamatok miatt, mégis a legalább 1 órára összegzett beütések arányai időben közel állandónak mutatkoztak. Mind a $^{214}\text{Po}/^{218}\text{Po}$, és a $^{212}\text{Po}/^{218}\text{Po}$ aránya jó közelítéssel konstans, de az arány értéke erősen függ az egyes termek szellőztettségétől és a levegő aeroszol-tartalmától.

2. A ^{214}Po és ^{218}Po arányának időfüggését elméleti számításokkal meghatároztuk. Kiszámoltuk az arány aszimptotikus értékét azzal a feltevéssel, hogy az aeroszol részecskéken radioaktív egyensúly áll fenn.

3. Szimulációt készítettünk az MGP aeroszol-detektor alfa-spektrumára. Megvizsgáltuk az alfa-részecskék levegőben való fékeződését és ez által leírtuk az energiaveszteség nagyságát, így az előállított függvénnyel megmutattuk, hogy az aeroszol-detektor méréseiből származó energiaspektrum milyen valós energiaértékeknek felel meg.

4. A kúrium lehetséges kimutatására a ^{212}Po és a ^{218}Po beütésszámainak ismeretében kidolgoztunk egy módszert. A módszer azon a megfigyelésen alapul, hogy a fenti izotópok arányai állandóak. Ebből meghatároztunk egy küszöbértéket, amelyet ha az arány meghalad, akkor kúrium jelenlétére következtetünk. A küszöbérték függ a teremben lévő aeroszol-koncentrációtól.

5. Meghatároztuk, hogy az erőmű egyik helyiségében az ottani aeroszol-detektor által felvett béta energiaspektrum segítségével miként számíthatjuk ki a radon-koncentrációt. Ehhez az általunk kihelyezett RAD7 alfa-spektrométerrel végeztünk összehasonlító mérést.

6. Megbecsültük a radontól származó munkahelyi dózist, $c=0,4$ egyensúlyi faktort feltételezve a leányelemek között. A dózis értéke az általunk vizsgált legmagasabb radon-koncentrációjú teremben (305-ös) 160 óra/hó bent tartózkodás mellett kb. 0,2 mSv évente.

7. Vizsgáltuk az említett magas radon-koncentrációjú, szellőztető-rendszerrel nem ellátott helyiségben (305-ös) a radon-feltöltődést, és meghatároztuk az ezt leíró exponenciális görbét. Meghatároztuk, hogy a terem levegőjének legalább fele 230 óra alatt kicserélődik.

Irodalomjegyzék

-
- i. HANS BLIX (főigazgató, NAÜ): Atomenergia és környezet -*Fizikai Szemle* 1992, 10./365.
 - ii. http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_and_radiation_accidents
 - iii. MVM Villamosenergia Kereskedelmi ZRt., 2008
 - iv. Firestone, R. B et al.: Table of Isotopes 8th edition -*Published by John Wiley & Sons, Inc.*, 1996.
 - v. SZABÓ CSABA, 2009: Környezetgeológia - *ELTE-TTK, egyetemi előadás*
 - vi. KISS ÁDÁM, 2007: Környezetfizika - *ELTE-munkafüzetek*, 2007/ősz, 13.
 - vii. ROHLF, J. W., 1994: Modern Physics from α to Z - *Wiley*, 1994.
 - viii. PAPP Z., DARÓCZY S., 1997: Radontól származó sugárterhelés Ajkán - *Fizikai Szemle* 1997/8. 248.
 - ix. ZAGYVAI P., OSVÁTH SZ., BME NTI, 2009: Építőanyagok radioaktivitásának vizsgálata – *Mérésleírás*, 2009.
 - x. KISS ÁDÁM, 2007: Környezetfizika - *ELTE-munkafüzetek*, 2007/ősz, 24.
 - xi. KISS ÁDÁM, 2007: Környezetfizika - *ELTE-munkafüzetek*, 2007/ősz, 29.
 - xii. KISS ÁDÁM, 2007: Környezetfizika - *ELTE-munkafüzetek*, 2007/ősz, 22-29.
 - xiii. DURRIDGE Co. 2000
 - xiv. JING CHEN: A Review of Radon Doses - *Radiation Protection Management*, Volume 22, No. 4, 2005.