

## Vízben oldott radon meghatározása folyadékszintillációs (LSC) technikával

Osváth Szabolcs\*, Homoki Zsolt  
Országos Közegészségügyi Központ  
Országos Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Igazgatóság  
Lakossági és Környezeti Sugáregészségügyi Osztály  
1221 Budapest, Anna utca 5.  
[\\*osvath.szabolcs@osski.hu](mailto:*osvath.szabolcs@osski.hu)

*Determination of radon in water using liquid scintillation spectrometry (LSC)*

*Abstract – Monitoring of radon in drinking water will be necessary after implementation of the 2013/51/EURATOM directive in the near future. An old standard, based on liquid-liquid extraction and LSC measurement has been tested. As most challenging part of the procedure is degassing of radon, practical solution were checked to overcome this problem in the field. The method was tested by analyzing water samples with known activity concentration of  $^{222}\text{Rn}$ .*

*Keywords: radon in water, liquid-liquid extraction, liquid scintillation spectrometry (LSC)*

**Kivonat – Az Európa Tanács 2013/51/Euratom irányelvének a közeli jövőben várható hazai bevezetésére való felkészülés jegyében megvizsgáltunk egy régi szabványt, amelyben a vízben oldott radon meghatározása folyadék-folyadék extrakciót követő LSC méréssel történik. A legnagyobb kihívást a radon kigázósodásának a megakadályozása jelenti, ezért gyakorlati megoldásokat teszteltünk avval kapcsolatban, hogyan lehet ennek a kihívásnak terepi viszonyok között is megfelelni. A módszert ismert  $^{222}\text{Rn}$ -aktivitáskonzentrációjú vízmintákon teszteltük.**

**Kulcsszavak: vízben oldott radon, folyadék-folyadék extrakció, folyadékszintillációs spektrometria (LSC)**

### BEVEZETÉS

Az Európa Tanács 2013/51/EURATOM irányelvét [1] még idén át kell ültetni a tagállamok jogrendjébe (Magyarországon e cikk írásakor a tárcaközi egyeztetés zajlik). Az irányelv értelmében az ivóvizekben – további radioaktív komponensek mellett – a radon aktivitáskonzentrációját is ellenőrizni kell.

Az irányelvből nem derül ki, hogy „radon” alatt a 86-os rendszámú *elemet*, vagy annak a 222-es tömegszámú *izotópját* kell érteni; azonban más uniós irányelvek [2] és nemzetközi ajánlások [3] szóhasználatát és a többi radonizotóp rövid felezési idejét alapul véve feltehető, hogy az utóbbiról van szó. (Ez a bonyodalom, miszerint egy elemet és annak egy izotópját ugyanazon névvel azonosítják, lényegében egyedülálló a periódusos rendszerben. Csak a hidrogén esetében hasonló a helyzet, bár ott korántsem ennyire rossz, ugyanis az  $^1\text{H}$  nuklidot nem csak hidrogénnek, hanem próciumnak is nevezhetjük.) A  $^{222}\text{Rn}$  és rövid felezési idejű bomlástermékeinek fontosabb nukleáris adatait foglalja össze az 1. táblázat. Vízminták esetében a bomlási sornak a  $^{214}\text{Po}$ -ot követő tagja (a  $^{210}\text{Pb}$ ) 22,3 éves felezési idejének köszönhetően nincsen bomlási egyensúlyban az anyanuklidjával, így a radon témakörétől külön tárgyalandó.

1. táblázat. A  $^{222}\text{Rn}$  és rövid felezési idejű bomlástermékeinek fontosabb nukleáris adatai [4] alapján. (A  $\beta$ -sugárzó nuklidoknál „A sugárzás energiája” oszlopban a maximális  $\beta$ -energia és a hozam szerepel.)

Nuklid	Felezési idő	Bomlástípus	A sugárzás energiája
$^{222}\text{Rn}$	3,82 nap	$\alpha$	5590 keV
$^{218}\text{Po}$	3,10 perc	$\alpha$	6002 keV
$^{214}\text{Pb}$	26,8 perc	$\beta^-$	672 keV (48,9%) 729 keV (42,2%)
$^{214}\text{Bi}$	19,9 perc	$\beta^-$	3272 keV (18,2%) 1542 keV (17,8%) 1508 keV (17,0%)
$^{214}\text{Po}$	164,3 $\mu\text{s}$	$\alpha$	7687 keV

A vízben oldott radon aktivitáskoncentrációjának meghatározására többféle technika is kínálkozik. Az egyik lehetőség az, hogy zárt rendszerben valamilyen gáz (pl. levegő) átbuorítással kihajtják a vízmintából a benne oldott radont, és a gáz radonaktivitását határozzák meg a radon vagy valamelyik bomlásterméke sugárzásának detektálásával. Ebből a vízminta és a teljes rendszer térfogatának ismeretében kiszámolható a vízben oldott radon aktivitáskoncentrációja. Intézetünk rendelkezik akkreditációval (NAT-1-0969/2014) ezen az eljárás alapján radon-meghatározásra [5]. A mérést DurrIDGE RAD7 típusú mérőműszerrel végezzük a radon leányelemek aktivitásának ionimplantált Si félvezető detektoros mérésével. A módszer kimutatási határa 1,9 Bq/l.

Egy másik módszer szerint kb. 10 ml vízmintát egyszerűen elegyíteni kell kb. 10 ml (vízzel elegyedő) LSC koktéllal, ezt követően az elegy LSC készülékben megmérhető. A módszer kimutatási határa a jelenlegi legjobb LSC készülék, a Quantulus használata esetén 0,2 Bq/l [6].

Egy harmadik esetben az LSC méréstechnikához vízzel nem elegyedő koktélt használnak. A radon szerves oldószerekben jobban oldódik, mint vízben; vagyis folyadék-folyadék extrakcióval a radont koncentrálni lehet, így a kimutatási határ csökkenthető. Az eljárás egyik változata olvasható az MSZ 19383:1988 szabványban [7], aminek alapján a Hydrosys Labor végzi akkreditált méréseit (NAT-1-1714/2012) 1 Bq/l-es kimutatási határral [8].

Munkánk célja az említett szabvány elméleti hátterének megértése, az abban szereplő eljárás gyakorlati szempontú vizsgálata (eszközök kiválasztása, mintavétel, mintaszállítás, extrakció kivitelezése) és esetleges továbbfejlesztése volt (különös tekintettel a szabvány bevezetése óta eltelt negyed század műszaki fejlődésére, pl. az azóta megjelent koktélokra); részben a vonatkozó szakirodalom tanulmányozása, részben saját kísérletek segítségével.

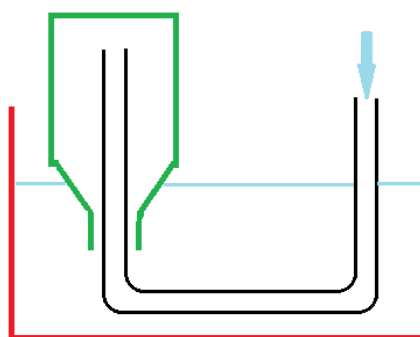
## MÓDSZER, ANYAGOK, ESZKÖZÖK

Vizsgálatainkat zömmel a Rudas Ivócsarnokban vételezhető Juventus, Attila és Hungária gyógyvizekkel végeztük, ugyanis ezek könnyen elérhetőek, és Resch Anita [9] szerint viszonylag állandó a radontartalmuk. A vízmintát műanyag flakonba vettük, majd hozzáadtunk 20 ml-t a szabvány [7] szerinti koktélból. Ezt a koktélt úgy készítettük, hogy 1 l analitikai tisztaságú toluolban feloldottunk 4 g 2,5-difenil-oxazol (a folyadékszintillációs irodalomban gyakran használt nevének PPO-t) és 0,1 g 1,4-bisz-(5-feniloxazol-2-il)-benzol (alias POPOP-ot). A radont néhány perces intenzív rázással extraháltuk, majd a fázisok szétválása után a koktélt LSC küvetába juttattuk. A mérést Perkin Elmer gyártmányú Tri-Carb 2900TR típusú LSC készülékkel végeztük  $\alpha/\beta$ -diszkriminációs üzemmódban. A jelalak-diszkrimináció értékét 125 ns-ra állítottuk be, és tipikusan 100 perces méréseket végeztünk.

## AZ ELJÁRÁS VIZSGÁLATA (DISZKUSSZIÓ)

### A radon szökése (kigázosodás)

Az egész eljárás legproblematicusabb jellegzetessége a radon kigázosodása, vagyis hogy a radon szabad levegővel érintkezve nagyon könnyen távozik a folyadékfázisokból. (Ezt kísérletileg is teszteltük: nyitott LSC-küvetéből 25 perc alatt a radon negyede elillant.) Ennek már a mintavétel során jelentősége van, nem könnyű ugyanis a mintázandó vizet úgy palackba zárni, hogy az előtte ne kerüljön érintkezésbe a levegővel. A kérdésre Csige Istvánék azt a megoldást találták [10, 11], hogy a mintavevő edényt egy vízzel teli vödörbe állították fejjel lefelé, és egy gumicső segítségével perceként keresztül öblítették a mintavevő edény térfogata többszörösének megfelelő mennyiségű friss mintázandó vízzel. A mintavételt követően a mintavételi edény száját még a víz színe alatt ledugaszolták. (A mintavételi elrendezést az 1. ábra mutatja.)



1. ábra. A Csige Istvánék-féle mintavétel. A mintavevő edényt zöld, a vödört (vagy lavórt) piros, a gumicsövet fekete, a vízszintet világoskék színnel jelöltük. A mintázandó víz a gumicsövön keresztül öblíti a (vízzel teli) mintavevő edényt, és annak szájánál áramlik ki a vödörbe (a vödörben lévő víz szintje alatt)

A mintát annak vétele és laboratóriumba szállítása között huzamosabb ideig (hetekig) tárolni a  $^{222}\text{Rn}$  felezési idejére való tekintettel értelmetlen; de hazánk méretét és úthálózatának fejlettségét figyelembe véve szükségtelen is. Más a helyzet pl. Ausztráliában, ahol 17 napos komoly vizsgálatot folytattak avval kapcsolatban, hogy különböző palacktípusokból (közönséges ásványvizes PET palack, nagy sűrűségű polietilénből készült savpalack, egyszerű laboratóriumi spriccflaska) milyen gyorsan szökik meg a radon. A mi szempontunkból releváns eredmény, hogy 1 óra alatt 3-5%, 1 nap alatt 5-10% a veszteség [6].

Megjegyzendő, hogy a radonnak a mintaszállítás alatti szökése bármely mérési technika alkalmazása esetében probléma, ezért számos gyakorlati tanács született már evvel kapcsolatban: pl. a mintavételhez jól záródó üvegedényt érdemes választani; a mintavevő edényt csurig kell tölteni; célszerű minél nagyobb mennyiségű, de legalább 1 l mintát venni; ha lehetőség van rá, akkor a minta hűtendő stb. Ehhez annyit tehetünk hozzá, hogy hasznos lehet a szerves fázist minél előbb (akár közvetlenül a mintavétel után) ráönteni a mintára, noha eddigi eredményeink nem támasztják alá ennek a szükségességét.

A szabvány szerint a mintát „óvatosan, buborékképződés mentesen” kell a választótölcsérbe tölteni [7]. Ezt azonban – minden igyekezetünk ellenére – egyszer sem sikerült megfelelően elvégeznünk: a radon vesztesége 50% fölött volt minden olyan esetben, amikor a mintát (akár a szerves fázissal együtt, akár külön) a mintavevő edényből rázótölcsérbe töltöttük át. Mivel a mintát közvetlenül rázótölcsérbe venni meglehetősen

bizarr, a mindennapi gyakorlat szempontjából nehézkes eljárás (ami terepi viszonyok között az üvegeszköz-állomány komoly amortizációjához vezetne), a használatáról le kellett mondanunk, noha tagadhatatlan, hogy a fázisok szétválasztása rázóütölcserben a legkényelmesebb. (Az extrakció kivitelezésének leírása a későbbi, „Az extrakció a gyakorlatban” című alfejezetben szerepel.)

### *Az extrakció elméleti háttere ([12 és 13] alapján)*

A radon (illetve bármilyen gáz) folyadékokban való oldhatóságát az Ostwald-koefficienssel ( $L$ ) lehet számszerűen kifejezni. Ez nem más, mint a légnemű radon és az oldásához szükséges folyadék térfogatának a hányadosa; avagy (ugyanazt másképp fogalmazva) a radon oldatbeli és gázbeli [aktivitás]koncentrációjának a hányadosa:

$$L_{\text{oldószer}} = \frac{c_{\text{oldat}}}{c_{\text{gáz}}} \quad (1)$$

Konkréten a víz Ostwald-koefficiense  $L_{\text{víz}} = 0,285$ . A koktélokhoz oldószerként használt szerves folyadékok Ostwald-koefficiense tipikusan 10 és 20 közötti szám, pl.  $L_{\text{toluol}} = 13,24$ . (Az Ostwald-koefficiens a gáz és az oldószer anyagi minőségén túl függ a hőmérséklettől is, ennek jelentőségét például Baradács Eszter [14] vizsgálta. Jelen cikkben az összes említett Ostwald-koefficiens 20 °C-ra és magától értetődően radonra vonatkozik.)

A szerves és vizes fázisok közötti megoszlási hányados (a radon aktivitáskoncentrációinak aránya) kiszámolható a szerves oldószer és a víz Ostwald-koefficienseinek hányadosaként. Ennek értéke a koktélokhoz oldószerként használt szerves folyadékok esetében 30 és 60 között van, például

$$K_{\text{toluol}} = \frac{L_{\text{toluol}}}{L_{\text{víz}}} \approx 44 \quad (2)$$

A megoszlási hányados ismeretében kiszámolható az extrakció elvileg elérhető maximális hatásfoka, például 1,3 l vízből 20 ml ásványolajba csak a radon 43%-a rázható át, amint azt Fred Leaney és Andrew Herczeg [6] is tapasztalták.

Talán ennél is fontosabb, hogy az Ostwald-koefficiensek segítségével az extrahálóedényben lévő (és az eredményt meghamisítani képes) légbuborék szerepét kvantitatíven figyelembe lehet venni. A víz, a szerves oldószer és a levegő térfogatának ismeretében ugyanis az egyik (célszerűen a szerves) fázis radonaktivitását meghatározva az összes fázis radonaktivitása kiszámolható. (Erre egy konkrét példa a Függelékben szerepel.)

### *Az extrakció a gyakorlatban*

Mivel a radonvesztés csökkentése érdekében el akartunk kerülni mindenféle áttöltést, az extrakciót – Fred Leaney és Andrew Herczeg [6] ötlete alapján – a (műanyag) mintavételi edényben végeztük el; majd a fázisok szétválása után egy, a kupak helyére erősíthető meghajlított cső („csőr”) segítségével, az edény falát óvatosan összenyomva juttattuk a koktélt a küvetába. (A művelet fényképe megtalálható a hivatkozott cikkben.) Eleinte kiürült ásványvizes flakonokat használtunk (ilyesmi számos háztartásban nagy mennyiségben található); előnyben részesítve azokat, amelyeknek sima a fala (pl. a Mizsée ilyen, a Visegrádié illetve a sűrke kupakos Borszékié [felirata szerint: Borsec] nem), hogy minél kisebb legyen a falon megtapadó koktél miatti veszteség.

Sajnos nem sikerült olyan „csőrt” szereznünk, ami szívárgásmentesen illeszkedett volna a PET palackok nyakára; így egy idő után áttértünk laboratórium spricflaskákra, melyek kiválóan megfelelnek a célnak: olcsón és könnyen beszerezhetőek, a szükséges mértékig áttetszőek és összenyomhatóak, méretük megfelelő (1 l), faluk sima, zárókupakjuk és „csőrük” is pontosan illeszkedik a nyakukra. A koktélnak bizonyos mértékű vesztesége természetesen ebben az esetben is fellép, ezt azonban az extrakció előtt hozzáadott és a

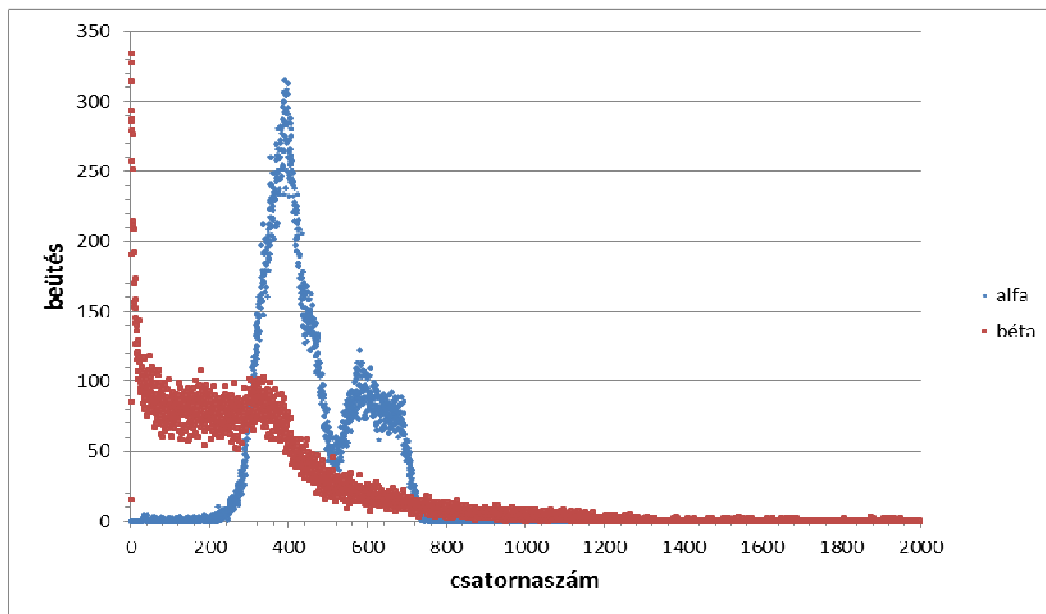
küvettaiba eljutott, LSC mérésre kerülő koktél tömegének mérésével könnyű korrekcióba venni.

Evvel a technikával akár az extrakció és a fázisok szétválasztása is elvégezhető a terepen, így a liternyi víz helyett elegendő a 20 ml koktélt beszállítani a laboratóriumba. Ez nagy mintaszám és korlátozott szállítási kapacitás esetén lehet fontos; eddigi kísérleteink alapján a mérési eredmény megbízhatósága tekintetében nincs jelentősége.

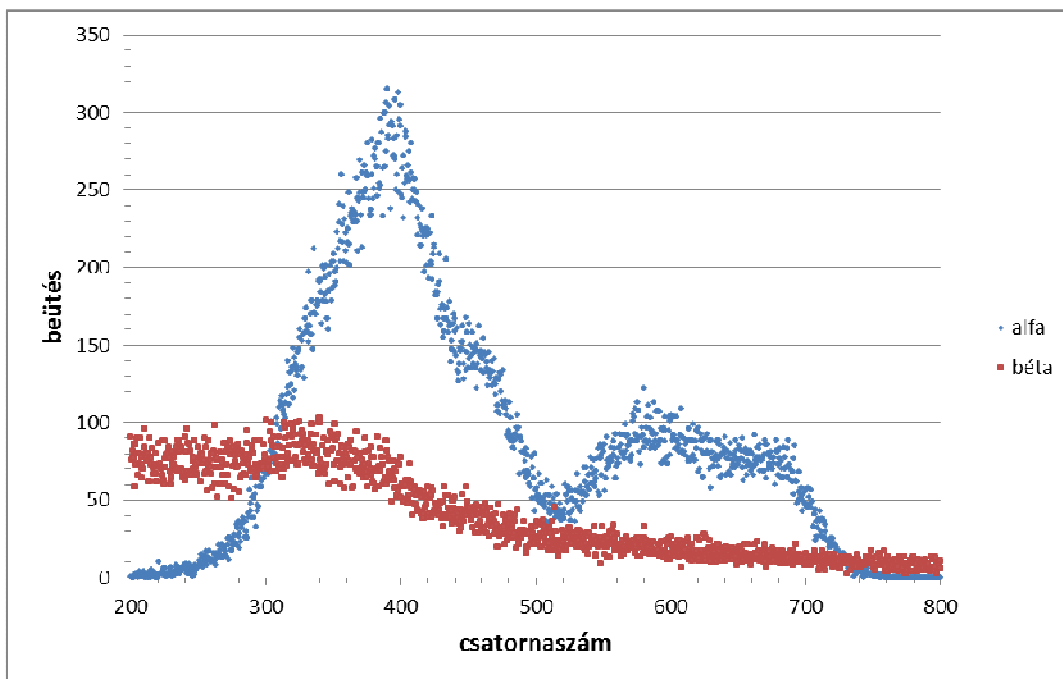
### Az LSC mérés

A már tárgyalt kigázosodásnak az LSC mérés során is van jelentősége. Egy kísérletünk szerint lezárt műanyag küvettaiban a  $^{222}\text{Rn}$  és alfa-sugárzó lányainak a számlálási sebessége egy felezési idő alatt nem a felére, hanem kb. a negyedére csökkent. (Egy párhuzamos kísérletben ennél lényegesen csekélyebb mértékű, ám még mindig igen jelentős szivárgást tapasztaltunk.) A kísérletet üveg küvettaival és a hozzá tartozó, betétes küvettakupakkal megismételve 4 nap alatt alig (<10%) tapasztaltunk szivárgást. Ez az eredmény is a jól záródó eszközök körültekintő kiválasztására hívja fel a figyelmet.

A mérőminta (azaz az üvegeküvettaiban található koktél) radontartalmának meghatározásához az LSC-spektrumnak csak az  $\alpha$ -tartományát használtuk, jellemzően a 250. és a 850. csatornák közé jelölve ki a ROI-t. Bizonyos mértékig a vízminta számos komponense extrahálódhat a koktélba, ami az LSC mérés során változó kioltást (quench-et) eredményez. Ezért a spektrum alakja nem állandó, minden spektrumot egyedileg kell kiértékelni. Egy tipikus spektrumot mutat a 2. ábra, ugyanazon spektrum középső (a kiértékelés szempontjából releváns) tartományát pedig kinagyítva a 3. ábra. Az ábrákon jól látszik, hogy míg a  $^{222}\text{Rn}$  és a  $^{218}\text{Po}$  csúcsai egybeolvadnak, addig a  $^{214}\text{Po}$  csúcsa eléggé elkülönül. A detektálási határfokot a három (egyenként 100%-os  $\alpha$ -gyakoriságú) radionuklidra és a ( $^{241}\text{Am}$ -mal meghatározott) 2%-os  $\alpha$ - $\beta$ -áthallásra figyelemmel 294%-nak vettük. „Vakmintaként” tiszta koktélt mérve megállapítottuk, hogy 60 perces mérés esetén a kimutatási határ 2 mBq, ami eredeti mintára átszámolva néhány mBq/l-t jelent.



2. ábra. Egy tipikus mérőminta spektruma



3. ábra. A 2. ábrán látható spektrumnak a kiértékelés szempontjából lényeges tartománya

Mivel ma már kevesen használnak saját készítésű koktélt, megvizsgáltuk azt is, hogy anélkül hogyan végezhető el az analízis. Az ismertetett eljárást a szabvány szerinti koktél helyett toluóllal ismételtük meg (egyebekben változatlanul hagytuk), majd az LSC mérés előtt hozzáadtunk 5 ml Ultima Gold LLT nevű, Perkin Elmer gyártmányú, vízzel elegyedő folyadékszintillációs koktélt. Az eredmények lényegében megegyeztek a korábban kapottakkal, tehát a módszer így is működik. Ezt azért tarjuk fontosnak, mert míg PPO-val illetve POPOP-pal csak kevesen rendelkeznek, addig a toluol viszonylag könnyen hozzáférhető vegyszer, segítségével a mintavételt és az extrakciót egy szerényebben felszerelt laboratórium is el tudja végezni.

### EREDMÉNYEK ÉS ÖSSZEGEZÉS

A 2. táblázatban foglaltuk össze a Rudas Ivócsarnok gyógyvizeinek elemzése során kapott eredményeket. A tárgyalt módszerrel mért értékek jól illeszkednek az akkreditált módszerrel meghatározott saját eredményeinkhez, azonban nincsenek igazán összhangban mások eredményeivel. E helyen azonban fel kell hívnunk a figyelmet arra, hogy saját vizsgálatainkat az elmúlt 1-2 évben végeztük, míg az irodalmi értékek több évvel ez előtről származnak és egymástól is jelentős mértékben eltérnek. Elképzelhetőnek tartjuk, hogy ezeknek a gyógyvizeknek a radontartalma évtizedes időskálán ennyit változzék annak ellenére, hogy Resch Anita néhány évre kiterjedő vizsgálata [9] szerint radontartalmuk állandó.

2. táblázat. A Rudas Ivócsarnok gyógyvizeinek  $^{222}\text{Rn}$ -aktivitáskoncentrációja [Bq/l]. A „hivatalos érték”-eket az Ivócsarnokban kifüggesztett [15] „radiumemanatio”-kból számítottam (1 eman = 3,7 Bq/l), származási idejük sajnos ismeretlen

Gyógyvíz	Saját mérés (a cikkben tárgyalt módszerrel)	Saját mérés (az akkreditált módszerrel)	Resch Anita [9] (2005)	Resch Anita [9] (2008/9)	„Hivatalos érték”
Attila	294±35	193—342	384±44	377±61	218
Hungária	207±21	188—257	303±26	328±66	272
Juventus	98±34	96—117	139±12	152±25	209

Olyan mintákat is vizsgáltunk, amelyekben a  $^{222}\text{Rn}$  a mintában lévő  $^{226}\text{Ra}$ -ból keletkezett, tehát bomlási egyensúlyban volt vele. Az eredmények (melyek a 3. táblázatban szerepelnek) az elvárt értékek alatt voltak. Az eltérést sejtésünk szerint az magyarázza, hogy a minták tárolására szolgáló ásványvizes flakonokból a több hetes „belenövési” idő alatt a radon egy része megszökött.

3. táblázat. Ismert  $^{226}\text{Ra}$ -tartalmú vizek elemzési eredményei [Bq/l]. A  $^{222}\text{Rn}$  aktivitáskoncentrációját a cikkben tárgyalt módszerrel, a  $^{226}\text{Ra}$  aktivitáskoncentrációját bepárlás és hamvasztás után  $\gamma$ -spektrometriával határoztuk meg

Víz minta	$^{222}\text{Rn}$	$^{226}\text{Ra}$
Régi Hungária gyógyvíz	387±45	447±18
Kék kupakos Borszéki ásványvíz	170±38	238±17

Összegzésképpen elmondhatjuk, hogy egy, vízben oldott  $^{222}\text{Rn}$  meghatározására szolgáló szabványt a szakirodalom és saját vizsgálatok segítségével igyekeztünk nagyszámú minta terepi mérésére alkalmasabbá tenni. Ennek keretében azonosítottuk az eljárás legfontosabb gyengéjét, a radon szökését. Megakadályozására (vagy legalábbis visszaszorítására) a következő technikákat javasoljuk alkalmazni: a Csige Istvánék-féle mintavételt, a műanyag mintavevő edényben történő extrakciót, betétes kupakkal ellátott üvegeküvetta használatát, a koktélnak a küvetta juttatására pedig „csőr” alkalmazását. Megmutattuk, hogy hogyan lehet számításba venni az extrakció során a vizes fázisban maradó, illetve a gáztérbe kerülő radon mennyiségét. A feltételezett felhasználói igények kielégítésére ötletet adtunk a szállítandó folyadék mennyiségének csökkentésére (az extrakciónak a terepen történő elvégzésével), továbbá a házilagos koktélkészítés elkerülésére (toluol és a kereskedelemből beszerezhető koktél alkalmazásával).

## IRODALOM

- [1] A Tanács 2013/51/EURATOM irányelve (2013. október 22.) a lakosság egészségének az emberi fogyasztásra szánt vízben található radioaktív anyagokkal szembeni védelmére vonatkozó követelmények meghatározásáról. Az Európai Unió Hivatalos Lapja, 2013.11.7., L296/12-21. oldal
- [2] A Tanács 2013/59/EURATOM irányelve (2013. december 5.) az ionizáló sugárzás miatti sugárterhelésből származó veszélyekkel szembeni védelmet szolgáló alapvető biztonsági előírások megállapításáról, valamint a 89/618/Euratom, a 90/641/Euratom, a 96/29/Euratom, a 97/43/Euratom és a 2003/122/Euratom irányelv hatályaon kívül helyezésétől. Az Európai Unió Hivatalos Lapja, 2014.1.17., L13/1-73. oldal



- [3] International Atomic Energy Agency [Nemzetközi Atomenergia Ügynökség] (1996): Safety Series #115. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Vienna [Bécs]
- [4] LBNL Isotopes Project - LUNDS Universitet. WWW Table of Radioactive Isotopes. <http://ie.lbl.gov/toi/> Letöltve 2015. január 26-án
- [5] <http://www.nat.hu/okiratok/NAT-1-0969-2014-01RO.pdf> Letöltve 2015. május 11-én
- [6] F. W. Leaney and A. L. Herczeg (2006): A rapid field extraction method for determination of radon-222 in natural waters by liquid scintillation counting. Limnology and Oceanography: Methods 4, 254-259 <http://www.aslo.org/lomethods/free/2006/0254.pdf> Letöltve 2014. november 25-én
- [7] MSZ 19383:1988 Vízben lévő rádium-226 és radon-222 aktivitáskoncentrációjának meghatározása folyadékszintillációval
- [8] <http://www.nat.hu/okiratok/NAT-1-1714-2012-02MRO1.pdf> Letöltve 2015. május 11-én
- [9] Resch Anita (2009): A gellérthegyi radonanómia vizsgálata. Diplomamunka, ELTE
- [10] E Baradács, I Hunyadi, Z Dezső, I Csige, P Szerbin (2001):  $^{226}\text{Ra}$  in geothermal and bottled mineral waters of Hungary. Radiat Meas 34 (1-6) 385-390. DOI: 10.1016/S1350-4487(01)00191-3
- [11] Csige István személyes közlése, 2015. április 22.
- [12] M. G. Cantaloub, J. F. Higginbotham, L. Semprini (1997): The determination of Rn partition coefficients for several liquid scintillation cocktails. 43<sup>rd</sup> Bioassay Analytical & Environmental Radiochemistry (BAER) Conference, Charleston, Nov 9-13 <http://www.lanl.gov/BAER-Conference/BAERCon-43p014.pdf> Letöltve 2014. november 24-én
- [13] M. Cantaloub (2001): Aqueous-Organic Partition Coefficients for Rn-222 and Their Application to Radon Analysis by Liquid Scintillation Methods. MSc Thesis <https://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/32870/CantaloubMichaelG2001.pdf?sequence=1> Letöltve 2014. november 25-én
- [14] Baradács Eszter Mónika (2002): Hévízek és ásványvizek radon- és rádiumtartalma. Doktori (PhD) értekezés, Debreceni Egyetem
- [15] [http://gellertthegyonline.network.hu/blog/gellertthegy\\_online\\_klub\\_hirei/kincset-ero-gellertthegyi-forrasviz-egyben-elerheto-gyogyito-ivokura-a-rudas-ivocsarnokban](http://gellertthegyonline.network.hu/blog/gellertthegy_online_klub_hirei/kincset-ero-gellertthegyi-forrasviz-egyben-elerheto-gyogyito-ivokura-a-rudas-ivocsarnokban) Letöltve 2015. május 13-án

## FÜGGELÉK (SZÁMOLÓS PÉLDA)

A cikkben említettük, hogy az Ostwald-koeficiensek segítségével az extrahálódényben lévő (és az eredményt meghamisítani képes) légbuborék szerepét kvantitatíven figyelembe lehet venni; ugyanis a víz, a szerves oldószer és a levegő térfogatának ismeretében az egyik (célszerűen a szerves) fázis radonaktivitását meghatározva az összes fázis radonaktivitása kiszámolható. Erre mutatunk be itt egy konkrét példát.

Az LSC mérés során a megfelelő csatornahatárok közötti  $\alpha$ -tartományban a 20 ml-es mérőminta számlálási sebessége ( $I_m$ ) 17,08 cpm, a háttéré ( $I_h$ ) 0,13 cpm volt. Figyelembe véve, hogy a detektálási hatásfok ( $\eta$ ) 294%, és 1 perc egyenlő 60 másodperccel, a mérőminta aktivitása:

$$A_m = (I_m - I_h) / \eta = (17,08 \text{ cpm} - 0,13 \text{ cpm}) / 294\% = 0,0961 \text{ Bq.}$$

Ha ezt az aktivitást besorozzuk az extrakcióhoz bemért ( $V_t = 25 \text{ ml}$ ) és az LSC küvettában megmért ( $V_m = 20 \text{ ml}$ ) toluolos koktél térfogatának arányával, akkor megkapjuk, hogy az extrakció során mekkora volt a toluolos koktélfázis aktivitása:



$$A_t = A_m * V_t / V_m = 0,0961 \text{ Bq} * 25 \text{ ml} / 20 \text{ ml} = 0,1201 \text{ Bq}.$$

Innentől kezdve számításaink ez extrakciós edényben lévő 3 fázisra (toluolos, vizes és gáz) vonatkoznak. A toluolos fázis aktivitáskoncentrációja:

$$c_t = A_t / V_t = 0,1201 \text{ Bq} / 25 \text{ ml} = 0,004804 \text{ Bq/ml}.$$

Mivel a radon megoszlási hányadosa ( $K$ ) a toluol és a víz között 44, a vizes fázisban a radon aktivitáskoncentrációja:

$$c_v = c_t / K = 0,004804 \text{ Bq/ml} / 44 = 0,0001092 \text{ Bq/ml}.$$

A vizes fázis térfogatát ( $V_v = 1500 \text{ ml}$ ) figyelembe véve megkapjuk a vízben oldva maradt radon aktivitását:

$$A_v = c_v * V_v = 0,0001092 \text{ Bq/ml} * 1500 \text{ ml} = 0,1638 \text{ Bq}.$$

A víz aktivitáskoncentrációjából és Ostwald-koefficienséből ( $L_v = 0,285$ ) számolhatjuk ki a gáztér aktivitáskoncentrációját:

$$c_g = c_v / L_v = 0,0001092 \text{ Bq/ml} / 0,285 = 0,0003831 \text{ Bq/ml}.$$

A gázbuborék térfogatát ( $V_g$ ) úgy kapjuk meg, hogy az edény (csapvíz és mérőhenger alkalmazásával meghatározott) térfogatából ( $V_e = 1555 \text{ ml}$ ) kivonjuk a vizes és a toluolos fázisok térfogatát:

$$V_g = V_e - V_v - V_t = 1555 \text{ ml} - 1500 \text{ ml} - 25 \text{ ml} = 30 \text{ ml}.$$

A gázbuborékban lévő radon aktivitása pedig a gáztér aktivitáskoncentrációjának és térfogatának a szorzata:

$$A_g = c_g * V_g = 0,0003831 \text{ Bq/ml} * 30 \text{ ml} = 0,01149 \text{ Bq}.$$

A mintában eredetileg lévő összes radonaktivitás ( $A_{\delta}$ ) a toluolos fázis, a vizes fázis és a gázbuborék aktivitásának összegeként adódik:

$$A_{\delta} = A_t + A_v + A_g = 0,1201 \text{ Bq} + 0,1638 \text{ Bq} + 0,01149 \text{ Bq} = 0,2954 \text{ Bq}.$$

Ebből pedig az eredeti mintának (amit az extrakcióhoz vizes fázis néven mértünk be) az aktivitáskoncentrációja:

$$c = A_{\delta} / V_v = 0,2954 \text{ Bq} / 1500 \text{ ml} = 0,0001969 \text{ Bq/ml} \approx 197 \text{ mBq/l}.$$