

Gamma-spektrometriai módszer magyarországi salakminták ^{226}Ra aktivitáskoncentrációinak meghatározására a 186 keV-os csúcs használatával

Völgyesi Péter^{1,3*}, Szabó Zsuzsanna², Salupeto-Dembo Judith³, Kis Zoltán¹, Szabó Csaba³

¹MTA Energiatudományi Kutatóközpont, 1121, Budapest, Konkoly-Thege Miklós út. 29-33

²Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, 1143, Budapest, XIV., Stefánia út 14

³ELTE TTK, 1117, Budapest, Pázmány Péter sétány 1/c

*petervolgyesi11@gmail.com

A kézirat beérkezett: 2016.07.06.

Közlésre elfogadva: 2016.10.04.

Using the 186-keV peak for ^{226}Ra activity concentration determination in Hungarian coal-slag samples by gamma-ray spectrometry - The uranium isotopic abundance and the ^{238}U – ^{226}Ra secular equilibrium were studied in nine Hungarian coal slag samples by using a low-background counting chamber and the related gamma-spectrometric measurement system. The ^{226}Ra activity concentration was measured based on the radon decay products and also the ^{226}Ra peak at 186 keV. Secular equilibrium existed in eight samples, whereas one sample showed a slight disequilibrium. The direct and fast measurement using only the 186 keV peak was validated which can be used after measuring the uranium isotopic ratio and verifying the ^{238}U – ^{226}Ra secular equilibrium. This method can be used to measure the ^{226}Ra content of high number of samples from the same geochemical background.

Uranium isotopic abundance, ^{238}U – ^{226}Ra secular equilibrium, Building materials, Coal slag

Alacsony háttérű kamrával és a benne lévő gamma-spektrometriai mérőrendszerrel az uránizotóp-arányt és a ^{226}Ra – ^{238}U közti szekuláris egyensúlyt vizsgáltuk 9 erőművi salakmintában. A ^{226}Ra meghatározása a radon leányelemek és a ^{226}Ra 186 keV-os csúcsa segítségével történt. Nyolc mintában fennállt a szekuláris egyensúly, míg egy minta enyhe eltérést mutatott. A módszer lehetővé teszi a rádium gyors és direkt meghatározását a 186 keV-os csúcs segítségével, amely a természetes uránizotóp-arány és a szekuláris egyensúly fennállása esetén megfelelően használható. A módszer alkalmas nagyszámú és hasonló geokémiai háttérrel rendelkező minták rádiumtartalmának (^{226}Ra) meghatározására.

Uránizotóp-arány, ^{238}U – ^{226}Ra szekuláris egyensúly, Építőanyagok, Szén salak

BEVEZETÉS

A környezeti minták mérése, a kis aktivitáskoncentráció értékek miatt, hatékonyabbá tehető alacsony háttérű kamrák alkalmazásával. A mérőrendszer megfelelő beállításával és tesztelésével a környezeti minták számos tulajdonságáról kaphatunk információt [1]. A bennünket érő sugárterhelés egyik lehetséges forrása az építőanyagokban jelenlévő radio-nuklidok (urán és/vagy tórium sor tagjai, ^{40}K) gamma-sugárzása. Magyarországon a 20. századi ipari tevékenység (pl.: bányászat, kohászat, széntüzelésű erőművek) következtében nagy mennyiségben keletkeztek különböző melléktermékek és szennyező anyagok, amelyekben a technológiai folyamatok során feldúsulhattak toxikus elemek és radioaktív izotópok is. Például a szén elégetése során a kiindulási állapothoz képest jelentősen megnövekedett radioaktív izotópok aránya a keletkezett melléktermékekben (erőművi salak és

pernye) [2]. Magyarországon főként a Dunántúli Középhegységben bányászott szenek urántartalma (és rádiumtartalma is) nagyobb az ország más részeiben bányászottakhoz képest [3]. A második világháború után az erőművi salakot és pernyét nagy mennyiségben használták fel építőanyagokban, építőipari adalékanyagokban és térkitöltő- vagy szigetelőanyagokban. A salakok és pernyék radioaktivitása elsősorban az elégetett szén radioaktív izotóp tartalmától függ, amelyek közül legfontosabb az urán és rádium izotópok jelenléte. Noha a ^{226}Ra meghatározása jelenti a legnagyobb mérés-technikai kihívást, pontos mérése elengedhetetlen, hiszen a ^{226}Ra és leányelemei az ^{238}U -sor leglényegesebb szegmensét képviselik, továbbá a rádium számos építőanyag minősítő indexben is jelen van. A legtöbb kutatásban a ^{226}Ra és ^{238}U közötti szekuláris egyensúlyt csupán feltételezik, de nem támasztják alá mérésekkel. Ehhez hasonlóan a minták uránizotóp gyakoriságát sem vizsgálják. Fontos megjegyezni, hogy az elemek eltérő geokémiai viselkedése [4], a radon (nemesgáz) jelenléte [5] és a különböző antropogén folyamatok (pl. erőművi égetés, [6]) mind befolyásolhatják a szekuláris egyensúly meglétét a teljes bomlási sorban. Éppen ezért az erőművi melléktermékek gamma-spektrometriai vizsgálata különösen érdekes kihívást jelent.

A kutatás célja alacsony háttérű mérőrendszerrel budapesti és ajkai salak minták uránizotóp-arányának (^{235}U - ^{238}U) és a rádium és urán közti szekuláris egyensúly fennállásának vizsgálata, így a 186 keV-os csúcs segítségével történő pontos rádium meghatározás bizonyítása.

MÓDSZEREK

Mérőrendszer

A vizsgálatokhoz az MTA Energiatudományi Kutatóintézet neutronvezető csarnokában lévő alacsony háttérű mérőhelyet használtuk [1]. Az alacsony háttérű kamra falanyaga a II. világháború során felrobbantott Erzsébet híd anyagából származik, így mentes a légköri atomrobbantások szennyezésétől. A kamra árnyékolása 15 cm vas, 5 mm ólom és 1,5 mm nagy tisztaságú vörösréz rétegekből áll össze. Teszteléseink során azt tapasztaltuk, hogy a kamra belsejében a 7-3150 keV-os tartomány beütéseinek száma 152-ed része a kamrán kívülinek. A mintákat egy Canberra GR1319 típusú (13%-os relatív hatásfokú) HPGe detektorral mértük. Az adatgyűjtést Canberra DSA-2000 digitális gamma-spektrométer végezte. A GR1319 HPGe detektort használva a teljes mérési energiatartományra (7-3150 keV) vonatkozó spektrális háttér beütésszáma 1,39 impulzus/s. A detektor energiafelbontása 1,53 keV a 662 keV-os és 1,99 keV az 1332 keV-os csúcsokon. Mivel környezeti mintákról van szó, így a mérési idők 65,5 óra és 360 óra között mozogtak a megfelelő statisztikai pontosság elérése érdekében. A holtidő nem haladta meg egyik mérés esetén sem a 0,05%-ot. A spektrumok kiértékelése Hypermet-PC szoftverrel történt. A környezeti minták alacsony aktivitása miatt a teljes-energiás hatásfok meghatározása közeli, kiterjedt geometriára történt, amit EFFTRAN 1.2 [1, 7, 8] hatásfok transzfer programmal végeztünk. A program ismert, pontszerű és valódi koincideneciától mentesnek tekinthető források hatásfokának méréséből, korábbi Monte Carlo szimulációk eredményeinek felhasználásával határozza meg az aktuálisan érvényes teljes-energia hatásfokot. A radon leányelemek (^{214}Pb és ^{214}Bi) segítségével (a rádium és leányelemei közötti szekuláris egyensúly beállása után, ami ~30 nap) meghatározható a minta rádium aktivitáskoncentrációja. Ehhez radonra zárt mintatartóra van szükség, amit HDPE (nagysűrűségű polietilén) felhasználásával, saját tervezéssel és gyártással valósítottunk meg. A radonzártságot fluorokarbon elasztomer (Viton) tömítőgyűrű alkalmazásával biztosítottuk. A módszer tesztelésének részletes leírása Kis és munkatársai [1] által publikált cikkben található.

Minták

Összesen 9 salakminta (5 budapesti; 4 ajkai) begyűjtésére került sor különböző lakossági kérésre elvégzett felmérések során. A salak minden esetben térkitöltő anyagként volt jelen a vizsgált régi építésű (>40 év) házakban a parketta alatt vagy a padlásokon. Az ajkai minták a helyi szénbányákból származó szenek elégetéséből származtak, míg a budapesti salakok esetében a forrás legtöbbször nem ismert, hiszen a szenek az ország számos pontjáról érkezhettek a fővárosba. A minták tömege 81 és 127 g között változik, amelyet a szemcseméret különbözősége okoz. A mintákat a mintatartóba helyeztük, majd legalább 24 napra lezártuk, így létrejöhett a radon és leányelmei közti szekuláris egyensúly. A mintatartókat minden esetben teljesen teletöltöttük a vizsgálandó anyag konstans geometriájának biztosítása és légrés elkerülése érdekében. Az egyszerűség kedvéért az antropogén hatásnak kitett erőművi salakot is a környezeti minták csoportjába soroltuk.

A ^{226}Ra , ^{235}U és ^{238}U meghatározása

A rádium meghatározására két módszer terjedt el. Az egyik esetben a radon (^{222}Rn) leányelemek (^{214}Pb és ^{214}Bi) segítségével mérhető a rádium [9]. Ehhez azonban szükséges 30 napot várni a radon és a rádium közötti szekuláris egyensúly beállásáig, továbbá biztosítani kell az alkalmazott mintatartó radonzártságát és a benne lévő minta homogén eloszlását [5]. Így ez a módszer komplikált minta előkészítést igényel [4].

A másik módszer a rádium közvetlen mérésén alapszik, amely a 186 keV-os csúcs segítségével kivitelezhető [10]. Ebben az esetben nem kell 30 napot várni a lezárástól a mérésig és nem szükséges radonzárt mintatartó alkalmazása sem. Azonban ezen az energián a ^{235}U fel nem bontható spektrális interferenciát okoz a leggyakrabban rendelkezésre álló detektorok esetén. Ahhoz, hogy ezen az energián a rádiumot kellő pontossággal meg lehessen határozni, két feltétel együttes teljesülése szükséges: az ^{235}U és az ^{238}U aktivitás (vagy izotóp) arányának ismerete, valamint a ^{226}Ra és az ^{238}U közti szekuláris egyensúly fennállása.

A minták ^{238}U aktivitásának meghatározása a $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 1001 keV-os vonalának felhasználásával lehetséges. Annak ellenére, hogy ennek a csúcsnak kicsi az intenzitása, kellően alacsony háttérrel alkalmazva – a minta viszonylag nagy urán aktivitáskoncentrációja (>100 Bq/kg) esetén – megbízhatóan használható. Amennyiben ezen az energián mért értékeket a radon leányelemek értékeivel összehasonlítjuk, a szekuláris egyensúly, továbbá a 186 keV-os csúcs alkalmazása is tanulmányozható.

A számolások során a $^{234\text{m}}\text{Pa}$, ^{226}Ra , ^{214}Pb és ^{214}Bi izotópok legerősebb és lehetőleg interferencia mentes vonalait használtuk (1. táblázat). Amennyiben egy másik csúcs által okozott interferencia nem elhanyagolható, úgy azt is figyelembe vettük. A ^{214}Pb és ^{214}Bi vonalai közül csak azokat használtuk, amelyek esetében a számolt aktivitáskoncentráció érték egy szigma standard szóráshoz (1σ) tartozó bizonytalansága $\leq 5\%$.

1. táblázat. A számításokhoz használt gamma-vonalak adatai [11, 12]

Energia (keV)	Nuklid	Gyakoriság (gamma/100 bomlás)	Spektrális interferencia	Bomlási sor (2)	Gyakoriság (gamma/100 bomlás)
186,211	^{226}Ra	3,55	^{235}U	^{235}U	57,2
241,997	^{214}Pb	7,26	nincs ill. elh.		
295,224	^{214}Pb	18,41	^{210}Tl	^{238}U	79
351,932	^{214}Pb	35,60	^{211}Bi	^{235}U	13
609,312	^{214}Bi	45,49	nincs ill. elh.		
665,453	^{214}Bi	1,53	nincs ill. elh.		
768,356	^{214}Bi	4,89	nincs ill. elh.		

Energia (keV)	Nuklid	Gyakoriság (gamma/100 bomlás)	Spektrális interferencia	Bomlási sor (2)	Gyakoriság (gamma/100 bomlás)
806,174	²¹⁴ Bi	1,26	nincs ill. elh.		
934,061	²¹⁴ Bi	3,10	nincs ill. elh.		
1001,026	^{234m} Pa	0,84	nincs ill. elh.		
1120,287	²¹⁴ Bi	14,91	nincs ill. elh.		
1155,19	²¹⁴ Bi	1,64	nincs ill. elh.		
1238,11	²¹⁴ Bi	5,83	nincs ill. elh.		
1280,96	²¹⁴ Bi	1,44	nincs ill. elh.		
1377,669	²¹⁴ Bi	3,97	nincs ill. elh.		
1401,5	²¹⁴ Bi	1,33	nincs ill. elh.		
1407,98	²¹⁴ Bi	2,39	nincs ill. elh.		
1509,228	²¹⁴ Bi	2,13	nincs ill. elh.		
1661,28	²¹⁴ Bi	1,05	nincs ill. elh.		
1729,595	²¹⁴ Bi	2,84	nincs ill. elh.		
1764,494	²¹⁴ Bi	15,31	nincs ill. elh.		
1847,42	²¹⁴ Bi	2,03	nincs ill. elh.		
2118,55	²¹⁴ Bi	1,16	nincs ill. elh.		
2204,21	²¹⁴ Bi	4,91	nincs ill. elh.		
2447,86	²¹⁴ Bi	1,55	nincs ill. elh.		

elh.: elhanyagolható

EREDMÉNYEK ÉS DISZKUSSZIÓ

A vizsgált mintákban 1σ hibahatáron belül természetes aktivitáskoncentráció arányt mértünk a két urán (²³⁵U és ²³⁸U) izotópra (2. táblázat), amely értékek jó egyezést mutatnak az irodalmi adatokkal (0,0462; [13]). A kapott eredmények alapján az összes mintára használható a természetes uránizotóp aktivitáskoncentráció arány.

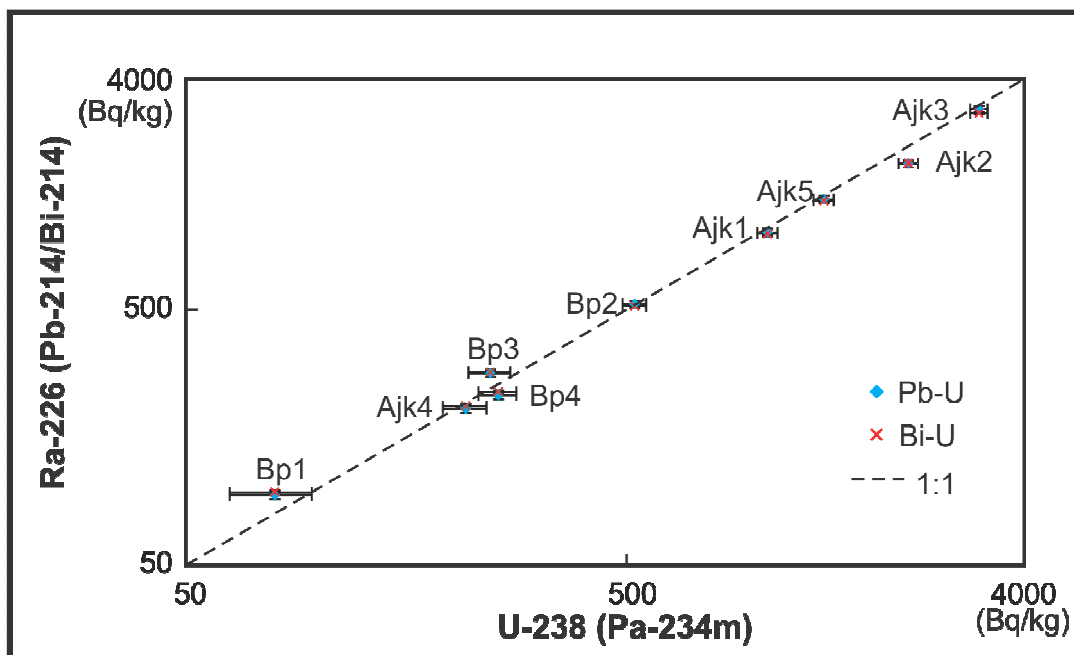
2. táblázat. A minták urán aktivitáskoncentráció értékei (²³⁵U és ²³⁸U)

Mintanév	Tömeg (g)	A _{U-235} /A _{U-238}	± (%)	±
Bp1	104,5	0,0569	21,7	0,0123
Bp2	81,6	0,0488	7,6	0,0037
Bp3	92,6	0,0560	11,9	0,0067
Bp4	105,7	0,0443	10,8	0,0048
Ajk1	127,1	0,0462	7	0,0032
Ajk2	91	0,0425	6,8	0,0029
Ajk3	94,4	0,0460	6,4	0,0030
Ajk4	114,6	0,0483	12,3	0,0060
Ajk5	85,5	0,0471	7	0,0033
Súly. átl. Budapest		0,0496	17	0,0085
Súly. átl. Ajka		0,0455	9	0,0041
Súly. átl. Össz.		0,0466	6,4	0,0030

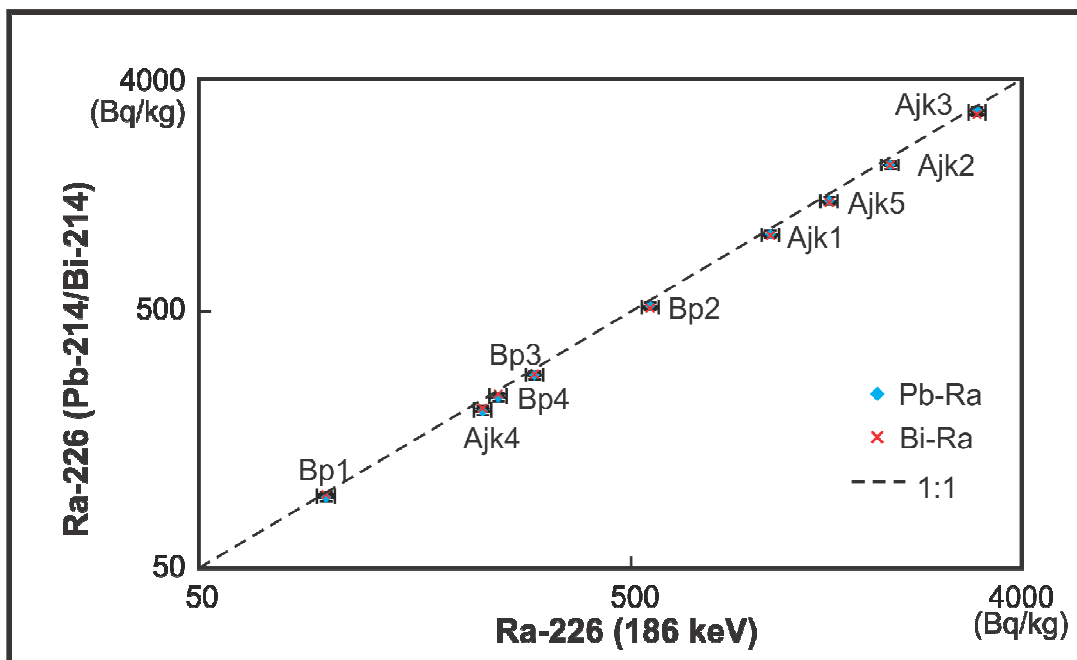
Súly. átl.: súlyozott átlag

A radon leányelemekből meghatározott rádium és a ^{234m}Pa 1001 keV-os csúcsából számított urán aktivitáskoncentrációk összevetése a szekuláris egyensúly fennállását mutatta a vizsgált salakminták nagy részében (1. ábra). Ez azt jelenti, hogy a vizsgált mintákban a

rádium megfelelő korrekciókkal a 186 keV-os csúcs beütésszámából is meghatározható. Ellenőrzésképpen a radon leányelemekből és a 186 keV-os csúcsból meghatározott rádium aktivitáskoncentrációkat is összehasonlítottuk (2. ábra), amelyek hibahatáron belüli egyezéseket mutattak.



1. ábra. A ^{234m}Pa 1001 keV-os csúcsából meghatározott ^{238}U aktivitáskoncentrációk összevetése a radon leányelemekből számolt ^{226}Ra aktivitáskoncentrációkkal.



2. ábra. A 186 keV-os csúcsból meghatározott ^{226}Ra aktivitáskoncentrációk összevetése a radon leányelemekből számolt ^{226}Ra aktivitáskoncentrációkkal.

Mivel a rádium saját csúcsából számolt értékek is alkalmasak a salakminták rádium aktivitáskoncentrációinak meghatározására, így nem kell 30 napot várni a rádium és leányelemei közti szekuláris egyensúly beállásáig, a mérés azonnal elvégezhető.

Az erőművi melléktermékekben a ^{226}Ra és ^{238}U közti szekuláris egyensúlyt ritkán tanulmányozzák. A fennállása elsősorban a szén geokémiai környezetétől és a benne lévő rádium és urán megkötődésétől, ásványos összetételétől függ. Ezek az elemek szerves és szervetlen módon is kapcsolódhatnak a szénhez, amely nagymértékben meghatározza illékonyaságukat [14]. Például a szénben ásványos formában az urán oxidos uraninitként (UO_2) vagy szilikátos koffinitként (USiO_4) lehet jelen [15, 16]. Az oxidos forma az égetés során mobilizálja (vaporizálja) a szénben lévő uránt, míg a szilikátos forma nagy valószínűséggel helyben (olvadék fázisban) marad. A másik lehetőség, hogy a rádium nem tudja elhagyni a szilikátos olvadék fázist az égetés során és együtt marad az uránnal a salakban. A legtöbb vizsgált salakminta kapcsán arra a következtetésre jutottunk, hogy a rádium és urán valószínűleg azonos ásványi környezetben van jelen, amely az égetés során nem változik meg, így a szekuláris egyensúly is fennmarad. Statisztikus eltérés figyelhető meg a radon leányelemekből meghatározott rádium aktivitáskoncentráció és az uránaktivitás koncentrációja közt az Ajk2-es mintában (1. és 2. ábra). Ennek oka a két elem eltérő geokémiai viselkedése, az adott kazán égetési mechanizmusa és az adott szén sajátos fizikai és kémiai tulajdonságai lehetnek [15, 16]. Egyes irodalmi adatok alapján a szénekben eleve nincs szekuláris egyensúlyban a rádium és az urán [15, 17], míg Karangelos és munkatársai [16] egyensúlyt mutattak ki az általuk vizsgált szénekben. A kérdés megválaszolásához további geokémiai vizsgálatokra van szükség, azonban az kijelenthető, hogy gamma-spektrometriai módszerrel egyértelműen tanulmányozható a rádium és az urán közti szekuláris egyensúly erőművi salak mintákban.

A kapott aktivitáskoncentrációk alapján ($98 \pm 5 - 3152 \pm 144$ Bq/kg) a vizsgált házakban a salak építőanyagok a világtágnál (50 Bq/kg [18]) szignifikánsan nagyobb értékeket mutatnak, amely felhívja a figyelmet az egykori ipari régiók és a kikerülő szennyezőanyagok vizsgálatára, továbbá az építőanyagokban található radionuklidok minél pontosabb és lehetőleg gyors meghatározásának és minősítésének fontosságára.

KONKLÚZIÓ

Az ^{235}U - ^{238}U aktivitáskoncentráció arány és a ^{226}Ra és ^{238}U közti szekuláris egyensúly vizsgálatát végeztük el salak mintákon annak felderítésére, hogy a ^{226}Ra 186 keV-os csúcsa használható-e a rádium pontos meghatározására az ^{235}U interferenciája mellett. A két feltétel igazolása lehetővé tette a rádium 186 keV-os csúcsából történő pontos és gyors mérését. Az urán és rádium közti szekuláris egyensúly hiánya, ill. fennállása részben ismert geokémiai folyamatok függvénye. A módszer különösen előnyös lehet nagy mennyiségű minta vizsgálata esetén, ugyanis az azonos geokémiai közegből származó mintáknak csak egy szelektált csoportján szükséges a „30 napos” mérés elvégzése, míg a maradék mintákon a rádium mérése a 186 keV-os csúcs alapján történik.

A felkérésre elvégzett mérések jelzik a lakosság érdeklődését a beltéri környezetben található potenciális szennyező források megismerése iránt. Magyarország területén ma is számos olyan, régi építésű lakóházat találhatunk, ahol erőművi salakot és pernyét tartalmazó építőanyagot vagy szigetelőanyagot használtak fel. Az elvégzett vizsgálatok alapján a mérőrendszer alkalmas kis aktivitású környezeti minták radioaktivitásának részletes és pontos meghatározására. Ennek következtében a mérendő minták kiterjeszthetők más természetű – pl. talaj és vályog – minták mérésére is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetünket fejezzük ki a Litoszféra Fluidum Kutatólaboratórium (ELTE TTK) és a Nukleáris Analitikai és Radiográfiai Laboratórium (MTA EK) tagjainak, továbbá Budapest és Ajka lakosainak, hogy lehetővé tették számunkra a minták begyűjtését.

IRODALOM

- [1] Kis, Z., Völgyesi, P., Szabó, Zs. (2013) DÖME - revitalizing a low-background counting chamber and developing a radon-tight sample holder for gamma-ray spectroscopy measurements. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 298, 2029–2035.
- [2] Németh, Cs., Somlai, J., Nényei, Á., Skrinýár, M., Kanyár, B., Németh, P., Hoffer, K. (2000) Measurement of gamma-dose caused by built in coal slags with elevated ^{226}Ra concentration, and the modeling of shielding. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 245, 287–291.
- [3] Szalay, S., Almássy, Gy., Pesty, L. és Lovas, I. (1959) Magyarország egyes fontosabb közsénterületeinek átvizsgálása uránium nyomelőfordulás szempontjából. *Atomki Közlemény*, 1, 7.
- [4] Huy, N. Q., Luyen, T. V. (2004) A Method to Determine ^{238}U Activity in Environmental Soil Samples by Using 63.3-keV-Photopeak-Gamma HPGe Spectrometer. *Applied Radiation and Isotopes*, 61, 1419–1424.
- [5] Manolopoulou, M., Stoulos, St., Mironaki, D., Papastefanou, C. (2003) A New Technique for the Accurate Measurement of ^{226}Ra by Gamma Spectroscopy in Voluminous Samples. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 508, 362–366.
- [6] Somlai, J., Németh, Cs., Lendvai, Z., Bodnár, R. (1997) Dose Contribution from School Buildings Containing Coal Slag Insulation with Elevated Concentrations of Natural Radionuclides. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 218, 61–63.
- [7] Vidmar, T. (2005) EFFTRAN – A Monte Carlo efficiency transfer code for gamma-ray spectrometry *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 550, 603–608.
- [8] Vidmar, T. Kanisch, G., Vidmar, G. (2011) Calculation of true coincidence summing corrections for extended sources with EFFTRAN” *Applied Radiation and Isotopes*, 69, 908–911.
- [9] Muring, A., Gäfvert, T. (2013) Radon Tightness of Different Sample Sealing Methods for Gamma Spectrometric Measurements of ^{226}Ra . *Applied Radiation and Isotopes*, 81, 92–95.
- [10] Köhler, M., Niese, S., Gleisberg, B., Jenk, U., Nindel, K. (2000) Simultaneous Determination of Ra and Th Nuclides, ^{238}U and ^{227}Ac in Uranium Mining Waters by γ -Ray Spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes* 52, 717–723.
- [11] Be´ M-M, Chiste´ V, Dulieu C, Mougeot X, Chechev VP, Kondev FG, Nichols AL, Huang X, Wang B (2013) Monographie BIPM-5—Table of radionuclides, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Sevres
- [12] Janis v4.0, OECD Nuclear Energy Agency (2013) <http://www.oecd-neo.org/janis/>. Accessed 11 June 2014
- [13] Ebaid, YY., El-Mongy, S. A., Allam, K. A. (2005) ^{235}U γ -emission contribution to the 186 keV energy transition of ^{226}Ra in environmental samples activity calculations. *International Congress Series*, 1276, 409–411.
- [14] Eskenazy, G.M., Velichkov, D. (2012) Radium in Bulgarian coals. *International Journal of Coal Geology*, 94, 296–301.

-
- [15] Coles, D. G., Ragaini, R. C., Ondov, J. M. (1978) Behavior of natural radionuclides in western coal-fired power plants. *Environmental Science & Technology*, 12, 442–446.
 - [16] Karangelos, D. J., Petropoulos N. P., Anagnostakis, M. J., Hinis, E. P., Simopoulos, S. E. (2004) Radiological characteristics and investigation of the radioactive equilibrium in the ashes produced in lignite-fired power plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 77, 233–246.
 - [17] Tadmor, J. (1986) Radioactivity From Coal-Fired Power Plants: A Review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 4, 177–204.
 - [18] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly. (NY: UN) (1993).

A pályamű a SOMOS Alapítvány támogatásával készült