

RADIOKARBON: ALKALMAZÁSOK ÉS PERSPEKTÍVÁK A KÖRNYEZETVÉDELEMBEN ÉS AZ IPARBAN

Molnár Mihály

PhD, fizikus, laboratóriumvezető-helyettes
mmol@atomki.hu

†Hertelendi Ede

kandidátus, fizikus, osztályvezető,
a laboratórium alapjainak létrehozója

Veres Mihály

fizikus, vezérigazgató

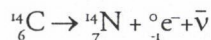
MTA ATOMKI – Isotoptech Zrt.
Hertelendi Ede Környezetanalitikai Laboratórium, Debrecen

Már egy évtizeddel a természetes radioaktivitás felfedezése után, 1906-ban, Ernest Rutherford rámutatott arra, hogy például a kőzetekben lévő radioaktív atommagok bomlása felhasználható a kőzetek kialakulása óta eltelt idő, a földtani kor meghatározására. A radioaktivitás csökkenésének mérésén alapuló időmérés alapjául a radioaktív bomlás törvénye szolgál, amely szerint zárt rendszerben a minta adott izotópjának radioaktivitása (A) az idővel folyamatosan csökken úgy, hogy a csökkenés arányának természetes logaritmus egyenesen arányos az eltelt idővel (Δt) az adott izotópra jellemző bomlásállandó (λ) mellett.

$$\Delta t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_{\text{kezdo}}}{A}$$

A földi élet szempontjából egyik legjelentősebb elem, a szén 14-es tömegszámú radioaktív izotópja (*radiokarbon*, ^{14}C) természetes úton van jelen a Földön. A kozmikus sugárzás a Föld felsőlégkörében jelentős mennyi-

ségben hoz létre szabad neutronokat. Ezen neutronok hatására a radiokarbon a légkörben főként nitrogénből magreakció végmagjaként keletkezhet. A keletkezett ^{14}C β -bomlással 5730 ± 40 év felezési idővel ($E_{\text{max}} = 160$ keV) ^{14}N -né bomlik:



Az eddigi számítások szerint 2–2,5 ^{14}C atom keletkezik másodpercenként a Föld felületének egy négyzetcentiméterére vonatkoztatva. A radiokarbon a légkörben gyorsan oxidálódik szén-dioxiddá, és folyamatosan „nyomjelzi” a légköri szén-dioxidot, melynek fajlagos aktivitása 14,1 bomlás/min/gC. Mivel a kozmikus sugárzás intenzitása hosszú idő óta közel állandó, és ehhez képest a ^{14}C 5730 éves felezési ideje rövidnek tekinthető, a Földön a kozmogenikus ^{14}C radioaktív egyensúlyi állapotban van. Az egyensúlyi izotóparány $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 1,17 \times 10^{-12}$. Az akkumulálódott ^{14}C -mennyiség a Földön 51 tonna, ami kicse-

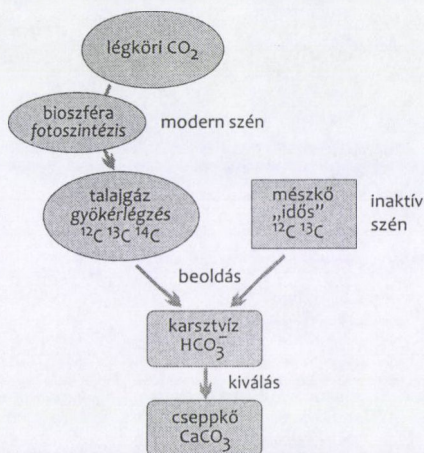
rélődési folyamatok révén a hidro-, bio-, illetve atmoszférában 94,3%, 3,8%, illetve 1,9% arányban oszlik el.

A légköri szén beépülésével formálódó képződmények létrejöttékor azok szenének fajlagos radioaktivitása folyamatosan követi az atmoszferikus szén fajlagos radiokarbon-aktivitását. Ekkor széntartalmukat radiokarbon-tartalom szempontjából modernnek nevezzük. A beépülési folyamat megszűnte után, például egy élőlény elpusztulásával az anyagcsere leállásakor további ^{14}C -felvétel nem történik, ezért a ^{14}C koncentrációja az adott anyagban a felezési időnek megfelelően exponenciálisan csökken a radioaktív bomlás miatt. Ez a radiokarbon kormeghatározás elve. A módszernek nagy jelentősége van a régészetben, mivel segítségével a leletek ~ 60 ezer évig visszamenően dátumozhatók. A módszer kidolgozásáért Willard F. Libby 1960-ban kémiai Nobel-díjat kapott.

A ^{14}C lehetséges alkalmazásainak köre mára már messze túlmutat a történettudomány keretein. A földi természetes szén ciklus tanulmányozásának egyik elengedhetetlen eszköze lett ez az izotóp geológiai, hidrológiai és légkörtani értelemben egyaránt.

A hazai példákat tekintve, a régészeti tanulmányokon túl sikerrel alkalmaztuk a ^{14}C -méréseket például *geológiai széndinamikai vizsgálatokra*. Egyik ilyen jellegű hazai kutatás volt a Baradla-barlang cseppköveiben az „öreg”, azaz mészkő eredetű szén arányának mérése (Molnár et al., 2006). A karsztrendszerekben ugyanis a vízből kiváló karbonátok széntartalmának csak egy része származik a mészkőből, a másik rész a légkörből, pontosabban a beszivárgás helyén a talaj felső rétegének talajgázából beoldott modern szén-dioxidból jön. A karsztvíz, amelyből kiválik a karbonátos kőzet, a karsztrendszeren

áthaladva a modern szén-dioxid mellé beold kisebb-nagyobb mennyiségben karbonátot az idős mészkő alapközetből is, ami mérhető mennyiségű ^{14}C -et nem tartalmaz, azaz szene inaktívnak tekinthető (1. ábra). Az öreg és a friss szén arányának alakulása fontos információkat ad a barlang körüli klíma időbeni változásairól, éppen ezért a klímakutatás egyik fontos terepét jelentik a karsztos barlangok. Az „öreg” szén aránya barlangról barlangra igen eltérő értéket mutathat, mely nagyban függ a borító kőzet vastagságától, a felszíni növényborítástól, a terület mikroklímájától és számos további, eddig talán még nem is tisztázott paramétertől. Igen meglepő eredmény volt éppen a Baradla-barlang kapcsán, hogy a frissen formálódó cseppkövekben az alapközetet adó mészkő eredetű (idős) szén aránya igen csekély (<10%), ami azt mutatja, hogy a klasszikus kémiai megközelítés mellett sokkal bonyolultabb izotóp-geokémiai folyamatokat is figyelembe kell vennünk, ha a karsztos rendszerek széndinamikáját meg akarjuk érteni.



1. ábra • Karsztos rendszerek széndinamikájának alapsémája

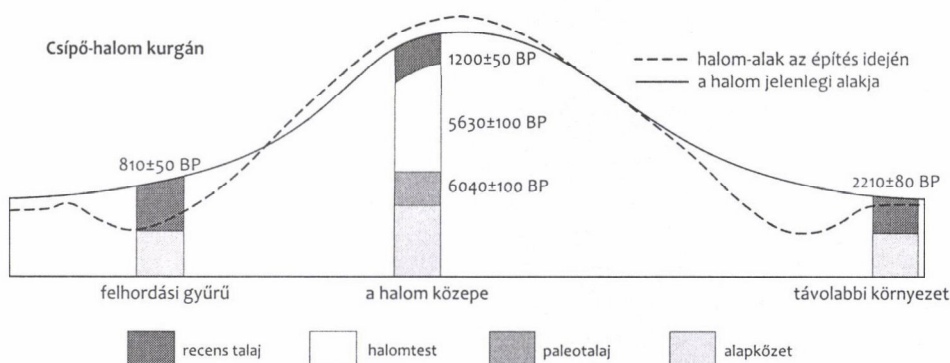
Hazánk egyik legfontosabb természeti erőforrásának, az ivóvíz tisztaságának védelme is jelentős mértékben segíthető a radiokarbonos vizsgálatokkal. Ugyanis az „idős”, azaz vélhetően nem szennyezett, mélységi ivóvízbázisban tárolt értékes víz és a frissen a felszínről leszivárgó, gyakran emberi behatásra elszennyezett vizek keveredése a ^{14}C mérésén keresztül még igen korai stádiumban és nagyon nagy érzékenységgel felfedezhető.

Sikerrel alkalmaztuk igen komplex karsztvízbázisok folyamatainak megértéséhez a ^{14}C -vizsgálatokat. Többek között vizsgáltuk a Pasnyag-forrást, ezt az Aggteleki-karszt keleti nyúlványának tövében fakadó karsztvízforrást, amelynek vizét néhány közeli falu ivóvízellátására használják. A környező figyelőkutak vizeit elemezve a ^3H -, ^{14}C - és nemesgáz-mérések segítségével megállapítottuk, hogy a forrás vize egy nagyon fiatal (1–2 év) és egy idősebb (>1000 év), mélyebb rétegből feláramló, úgynevezett *termálkarsztvíz* keveréke. Sorozatos mérések tanúsága szerint a meleg termálkarsztvíz feláramlása a vizsgált három éves időszakon belül közel állandó volt, a Pasnyag-forrásba kerülő hideg és meleg víz keverési arányát a térség csapadékosságán

keresztül a hideg víz hozama szabályozta (Palcsu et al., 2004).

A mezőgazdasági kutatásokon belül a *talajtani vizsgálatokhoz* is kapcsolódott az a kísérletsorozat, melyben egy emberi kéz által több ezer éve emelt kunhalom, a hortobágyi Csípő-halom vizsgálataihoz használtuk a ^{14}C módszert (Molnár et al., 2004). Méréseink segítségével megállapítható volt, hogy a halmot viszonylag fiatal talajréteg fedi (radiokarbon kor: 1200 év BP). A halomtest összehorodott talajból áll, melynek ^{14}C kora 5630 év BP, és alatta megmaradt az eredeti paleotalaj is (^{14}C kor: 6040 év BP). A halomtest és az eltemetett palaeotalaj korának hasonlósága egybevágott azzal a régészeti elképzeléssel, miszerint a halmot egy lépésben hozták létre, nem pedig több kisebb, időben eltolódott fázisban (2. ábra).

A halom lábánál talált recens talaj igen fiatal kora (810 év BP) alátámasztja azt a feltevést, mely szerint ez a terület szolgált felhordási zónaként a halom megépítéséhez („felhordási gyűrű”), így itt az alapkőzetten teljesen új, fiatal talaj kialakulása indulhatott meg. A halom távolabbi környezetéből származó recens talaj idősebb kora (2210 év BP) szintén



2. ábra • A Csípő-halomban és a környezetében feltárt talajrétegek és azok radiokarbon kora (év BP, *Before Present*: konvencionális ^{14}C -kor években, 1950-hez viszonyítva)

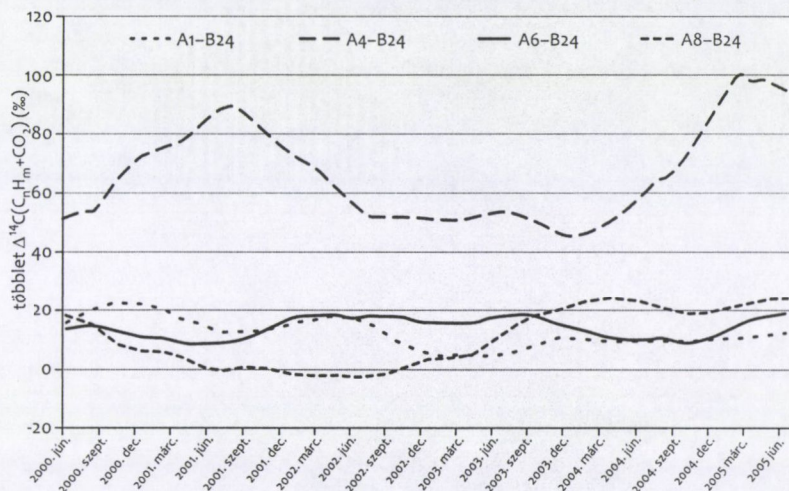
arra utal, hogy a halomtest tetején, illetve a felhordási gyűrűn talált recens talajokhoz képest ez egy kevésbé bolygatott, idősebb talaj. A friss szén beépüléséről a talajokba, a talaj széndinamikájáról, a konzerválódásról és az új talaj képződésének időbeni alakulásáról sokat elárult a fenti vizsgálat sorozat.

Az atomkor beköszöntével, a szándékosan vagy hulladékként a *nukleáris iparban* mesterségesen előállított ^{14}C nyomon követése alapvető feladata lett a *környezetvédelemnek*, a szén biológiai, élettani jelentősége miatt.

A Paksi Atomerőmű üzeme során is folyamatosan figyelik annak légnemű ^{14}C -kibocsátását, közvetlenül a szellőztető kéményekben, illetve az erőmű környezetében telepített megfigyelőállomásokon is, egy távolabbi referenciaállomáshoz (B24, Dunaföldvár) viszonyítva (3. ábra). Az öt évet feldolgozó eredmény sor azt mutatta, hogy a szénhidrogén és szén-dioxid frakcióját együttesen vizsgálva az atomerőmű közvetlen környezetében, már 1–2 kilométeren belül is csak alig

érzékelhető az a ^{14}C -többség, amelyet a kéményeken keresztül kijuttat a környezetbe (Molnár et al., 2007).

Az atomerőművek hatásánál sokkal erőteljesebb, de mára már a légkörből teljesen kimosódott ^{14}C -többséget adtak az 1960-as évek elején a világ különböző pontjain nagy számban végrehajtott légköri nukleárisfegyver-kísérletek, melyek hatására időszakosan duplájára emelkedett a radiokarbon koncentrációja globálisan a légkörben. A természetes háttérszint megkettőzése egy ilyen gyenge béta sugárzó izotóp esetében természetesen semmilyen egészségügyi kockázattal nem járt, de a jelenségnek a későbbiekben óriási tudományos jelentősége s bizonyos értelemben haszna lett. Ugyanis ebből a nagyon ritka szénizotópból ilyen módon rövid idő alatt, pontszerű forrásokból globális méretekben is jelentős mennyiség került a légkörbe. Valójában egy földgolyó léptékű nyomjelzési kísérletként foghatjuk fel ezt az egyébként egész más céllal végrehajtott kísérlet sorozatot.



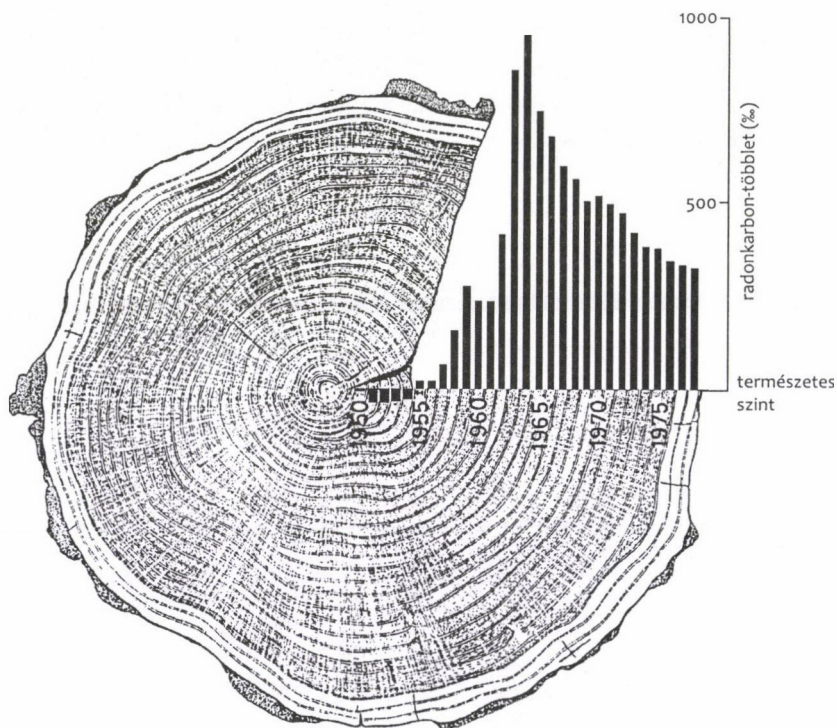
3. ábra • A Paksi Atomerőműtől eredő légköri ^{14}C -többség alakulása közeli megfigyelőállomásokon (A1-, A4-, A6- és A8-állomás), ‰-ben kifejezve a természetes háttérszint (B24) felett

A szenciklus kutatói a ^{14}C -jelzésen keresztül unikális információkat szereztek a légköri szén keveredésének, transzportjának tanulmányozásához. A légköri ^{14}C atombomba-csúcs mindenhol megjelent a Földön, például a Debrecenben ez időszakban növekedett fa-évyűrűkben is (4. ábra) (Hertelendi – Csongor, 1982). Ezt a gyorsan változó légköri ^{14}C -jelet például már a bűnüldözés is felhasználja, olyan hamisítási ügyekben, ahol a kérdés az ebből az időszakból származó bizonyítékok (borok vagy iratok levélpapíron) eredetisége, vagy épp ezek felhasználása régebbi dátumozással ellátott anyagok hamisítására.

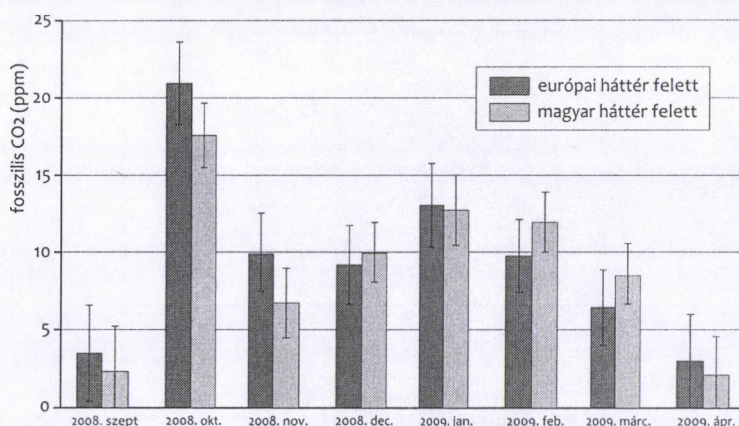
Egy másik jelentős globális jelenség, a légköri fosszilis szén-dioxid szintjének növekedése is jól vizsgálható a ^{14}C segítségével, akár például a klímaváltozás kutatása céljából is.

Az ipari forradalom óta a technika fejlődésével egyre növekvő energiaigényünket jórészt fosszilis tüzelőanyagok elégetésével fedeztük. Mivel a fosszilis tüzelőanyagok alapjául szolgáló szerves anyagok a föld alatt több millió éve kizáródtak a biológiai szenciklusból, így bennük a kozmogén radiokarbon nem pótlódott a légkörből, tehát mára már csak stabil, azaz radiokarbon-mentes szenet tartalmaznak. Ez az inaktív szén a tüzelőanyagok égetése során a légköri szénhez keveredik, s így hígítja annak ^{14}C -tartalmát. Ezáltal a radiokarbon mérésén keresztül jól elkülöníthető egymástól a fosszilis és a friss, biogén szén-dioxid.

Hazai példával élve: a debreceni városi levegőben ezzel a módszerrel mérhető volt a fosszilis CO_2 többlete a természetes európai (Jungfraujoch, Svájc) és akár a hazai (Hegy-



4. ábra • A ^{14}C atombomba-csúcs egy 1945-től 1980-ig növekedett fa évyűrűiben



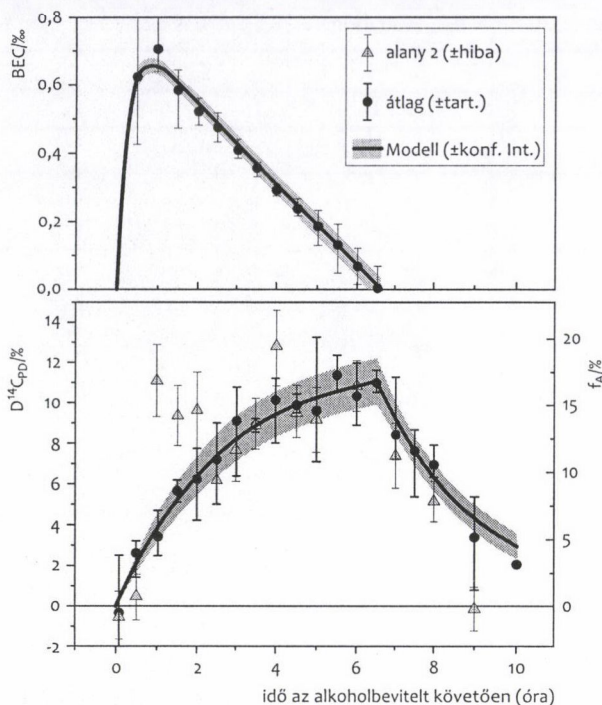
5. ábra • A fosszilis CO₂ mennyisége Debrecen levegőjében 2008 telén az európai, illetve a hazai természetes háttérszínhez viszonyítva

hátsál) háttérszínhez viszonyítva is (5. ábra). A 2008 telén gyűjtött mérési adatok azt mutatták, hogy szeptemberben alig volt kimutatható fosszilis CO₂-többség a város levegőjében. Ezzel szemben októberben viszont átlagosan közel 20 ppm fosszilis eredetű CO₂ jelenlétét detektáltuk ugyanitt (Molnár et al., 2010).

Éppen a biológiai rendszerekben, illetve az emberi szervezetben betöltött szerepe miatt az orvosi kutatások számára is új dimenziókat nyithat ez az izotóp, mivel olyan szén, amelynek természetes előfordulása igen csekély a Földön (~ 1 : 1 000 000 000 000 a ¹⁴C természetes aránya a stabil ¹²C gyakoriságához viszonyítva). Az elmúlt időkig azonban komoly akadálya volt a szélesebb orvosi felhasználásnak az, hogy általában a bomlások számlálásán keresztül, azaz aktivitásmérés útján határozták meg a minták ¹⁴C-tartalmát, amihez radiológiai léptékű dózisokat kellett használni ebből a gyenge sugárzású, de hosszú felezési idejű izotópból. Mára viszont, a gyorsító tömegspektrométerek (Accelerator Mass Spectrometer – AMS) rohamos fejlődésével és térnyerésével (pontosabban a méret

és a gondozási igény drasztikus csökkenésével) a természetes radiokarbonszint ezredrésének megfelelő bedúsulás is könnyedén mérhető akár milligrammnyi szövetmintából is. Ezzel az áttöréssel a radiokarbon-vizsgálatok a gyógyszer- és egyéb biológiai anyagcseremechanizmusok kutatásának eddig elképzelhetetlen tárházát nyitják meg. A 6. ábrán bemutatott, komoly anyagcsere-információt adó, de rendkívül egyszerű biológiai kísérlet végrehajtásához az AMS-technika használata mellett csak néhány lelkes önkéntesre és némi 1964-es évjáratú konyakra volt szükség (Schulze-König et al., 2011).

A kísérletben használt konyak évjáratá azért fontos, mert 1964-ben a légkörben és így az ital alapanyagául használt szőlőben is a már említett atombomba-csúcs miatt kissé emelkedett (~ +64%) volt a ¹⁴C szintje a mai természeteshez képest. A kísérletsorozatban bevitt ¹⁴C mennyisége (~10 Bq fejenként) messze nem tekinthető radiológiai mennyiségnek, így nagyságrendekkel könnyebb és olcsóbb a kísérletek tervezése és kivitelezése. Ezzel a módszertani fejlődéssel a radiokémia



6. ábra • A véralkoholszint (BEC – Blood Ethanol Concentration) változását kísérő ^{14}C -szint százalékos emelkedése (PD – post dose) és az alkohol eredetű szénfrakció (f_A) a kilélegzett levegő szén-dioxidjában 1,5 dl 1964-es évjáratú konyak elfogyasztása után

területéről a klasszikus gyógyszerkémiai tesztek világába érkezett a ^{14}C , azzal az unikális előnnyel, hogy a bevitt ritka szénizotóp nyomnyi mennyiségben is detektálható lesz a szervezetben. Önmagáért beszél az a tény, hogy a ^{14}C célra ma elérhető legmodernebb kompakt AMS-berendezés (MICADAS – Mini radioCarbon DAting System) kifejlesztését éppen egy gyógyszeripari kutató nagyvállalat (Vitalea Science, Davis, CA, USA) finanszírozta.

Mindezek hatására számos olyan laboratórium épül ma is a világban, amelynek feladata a radiokarbon mennyiségének meghatározása a legkülönbözőbb szerves és szervetlen mintákban, a lehető legkevesebb anyaghasz-

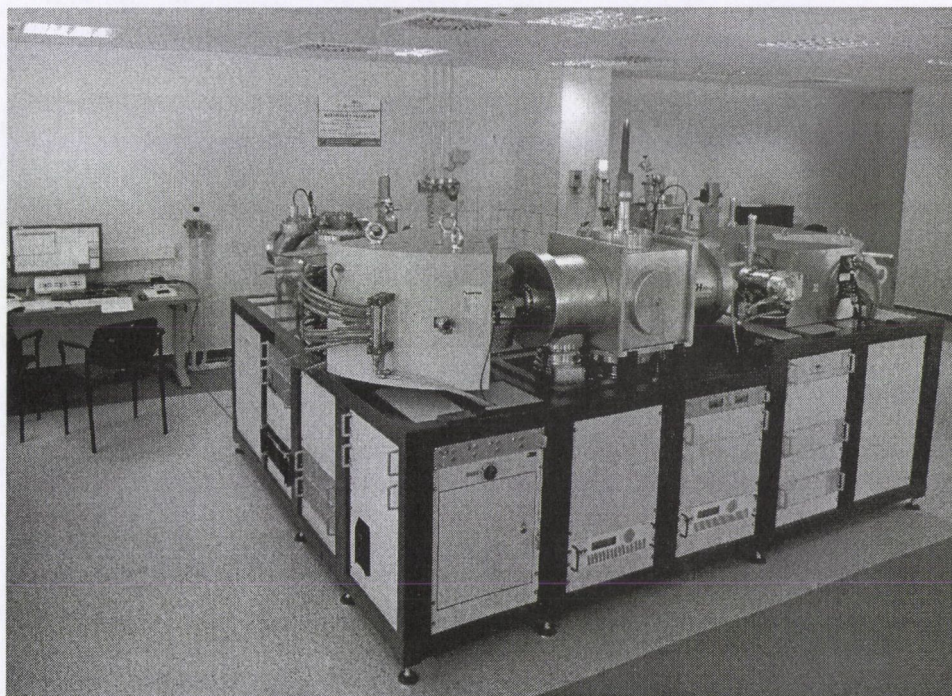
nát és a lehető legrövidebb mérési idő mellett. Magyarországon a radiokarbon-méréseknek több évtizedes hagyománya van az MTA debreceni Atommagkutató Intézetében (Csongor – Hertelendi, 1986). Ezen hagyomány továbbvitelének záloga a svájci Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ, Zürich) műszaki kutatóintézetrel közös fejlesztésben, jórészt magánberuházás keretében (Isotoptech Zrt., Debrecen) 2011 nyarán üzembe helyezett MICADAS típusú gyorsító tömegspektrométer (7. ábra) (Synal et al., 2007). A berendezés beszerzését az Új Magyarország Fejlesztési Terv (GOP-2.1.1-09/A-2009-2008) és az MTA is támogatta.

A magyarországi új ^{14}C AMS mellett, hogy nagy pontosságú régészeti mérések is végezhetők a segítségével, olyan speciális gáz-ionforrással is el van látva, amely nagyban segíti a környezeti és környezetvédelmi jellegű mérések elvégzését, ezért az EnvironMICADAS elnevezést kapta. A gáz-ionforrás opció kidolgozása a svájci és a magyar partner együttes fejlesztőmunkájának eredménye, melyet az OTKA (MBo8-A 81515) és a svájci SCIEX-program is támogatott. A gáz-ionforrás alkalmazása teszi lehetővé a $0,1$ mg alatti széntartalmú minták rutinszerű mérését, aminek például az aeroszolkok összetétel-specifikus elemzésénél, illetve karbonátok és talajvizek gyors és egyszerű mérésénél van nagy jelentősége.

Előnye, de egyben a gyengéje is az AMS- ^{14}C -mérésnek, hogy igen kis mintamennyisé-

geket használ ($0,01$ – 1 mg szén). Ez a tulajdonsága próbára teszi egyrészt a mintavételt végzőt, hiszen megnehezül ezáltal a minta reprezentativitásának biztosítása, másrészt igen kényes kérdéssé válik a minta tisztán kezelése és preparálása. Ezen feladatok megoldására a Hertelendi Környezetanalitikai Laboratóriumban (HEKAL) speciális AMS radiokarbon mintaelőkészítő laboratóriumot alakítottunk ki, amely megfelel a jelenlegi legmagasabb elvárásoknak, azaz a régészeti alkalmazásoknak is. A mintaelőkészítő laboratórium kiépítését az Új Magyarország Fejlesztési Terv támogatta (GOP-1.3.1-09/A-2009-0032).

Az AMS-alapú ^{14}C -mérésekhez általában grafit céltárgyat szokás készíteni a minta széntartalmából, hacsak nem a ma még kuriózumnak számító gáz-ionforrást használják.



7. ábra • EnvironMICADAS gyorsító tömegspektrométer ^{14}C -mérésekre a Hertelendi Környezetanalitikai Laboratóriumban, MTA ATOMKI – Isotoptech Zrt., Debrecen

Ennek érdekében tiszta körülmények között ki kell vonni a minta széntartalmát megfelelő kémiai formában, amit általában szén-dioxiddá alakítanak égetéssel vagy savas feltárással, amelyből aztán legtöbbször hidrogénes redukcióval állítják elő az AMS-berendezéssel már közvetlenül mérhető grafitot. A megfelelő kémiai előkezelések és szén-dioxid-gyártás egyes lépései klasszikus kémiai receptek alapján történnek, speciális tisztasági követelmények mellett. Az egyes mintákból a méréshez szükséges mennyiséget az anyag típusa, széntartalma, annak kémiai formája, valamint a konkrét minta tisztasága határozza meg. A megfelelő kémiai előkészítést követően a minták égetése/feltárása a külső levegő teljes kizárása mellett, csak speciális vákuum-rendszerekben történhet, hiszen a levegő mai modern szén-dioxidot, s benne a mintákhoz képest jelentős mennyiségű ^{14}C -et tartalmaz. Erre a feladatra egyedi *on-line* égető és gáztisztító rendszer épült a Hertelendi Laboratóriumban, amely a legbonyolultabb, lépcsőzetes, kontrollált, alacsony hőmérsékletű égetést és megfelelő gáztisztítást is képes megoldani. E szofisztikált *on-line* égetőrendszer mellett

természetesen a jóval egyszerűbb zárt reakciócsöves égetési és gáztisztítási módszer is elérhető a laboratóriumban.

Komoly kihívást jelent még az égetéssel/feltárással előállított kis mennyiségű ($1\text{--}10\text{ cm}^3$) CO_2 kezelése és redukciója, megfelelően tiszta és reprodukálható körülmények között. Erre a célra egyedi gázkezelő rendszert és grafitelőállító egységet fejlesztettek ki a HEKAL-ban (Rinyu et al., 2007). Az összeállítás elemei jelenleg négy–négy kemence és Peltier-hűtő, mely párosok egyenként öt–öt mintát tudnak fogadni, így egyszerre húsz grafitizáció végezhető el. A teljes rendszer digitálisan vezérelt és programozható.

A debreceni AMS- ^{14}C -laboratórium létrejöttével teljesült egykori karizmatikus vezetője, Dr. Hertelendi Ede (1950–1999) álma, remélhetőleg a magyar és nemzetközi kutatói, környezetvédelmi és nukleáris társadalom közös öröme és hasznára (Svingor, 1999).

Kulcsszavak: *radiokarbon, kormeghatározás, szén ciklus, ivóvízvédelem, talajtan, nukleáris ipar, környezetvédelem, gyógyszeripar, AMS, mintaelőkészítés*

IRODALOM

- Csongor Éva – Hertelendi Ede (1986): Low-level Counting Facility for ^{14}C Dating. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*. 17, 493–497. doi:10.1016/0168-583X(86)90195-3
- Hertelendi Ede – Csongor Éva (1982): Anthropogenic ^{14}C Excess in the Troposphere between 1951 and 1978 Measured in Tree Rings. *Radiochemical and Radioanalytical Letters*. 56, 103.
- Molnár Mihály – Joó K. – Barczy A. et al. (2004): Dating of Total Soil Organic Matter Used in Kurgan Studies. *Radiocarbon*. 46, 413.
- Molnár Mihály – Dezső Z. – Futó I. et al. (2006): Fialat karsztos kőzetek ^{14}C korának mérése és értelmezése. In: Veress Márton (szerk.): *Karsztfelújulás*. 11. Szombathely, BDF Természetföldrajzi Tanszék, 37–46. • [http://www.karsztfelujulas.hu/kotetek/2006/](http://www.karsztfelujulas.hu/kotetek/2006/FIATAL%20KARSZTOS%20KÖZETEK%20%14C%20TARTALMÁNAK.pdf)
- FIATAL%20KARSZTOS%20KÖZETEK%20%14C%20TARTALMÁNAK.pdf
- Molnár Mihály – Bujtás T. – Svingor É. et al. (2007): Monitoring of Atmospheric Excess ^{14}C around Paks Nuclear Power Plant, Hungary. *Radiocarbon*. 49, 1031–1043. • <https://journals.uair.arizona.edu/index.php/radiocarbon/article/view/2996/2755>
- Molnár Mihály – Haszpra L. – Svingor É. et al. (2010): Atmospheric Fossil Fuel CO_2 Measurement Using a Field Unit in a Central European City during the Winter of 2008/09. *Radiocarbon*. 52, 2–3, 835–845. • <https://journals.uair.arizona.edu/index.php/radiocarbon/article/view/3717/pdf>
- Palcsu László – Rinyu L. – Major Z. et al. (2004): A Pasnyag-forrás karsztvízrendszerének izotóphidrológiai vizsgálata. In: Veress Márton (szerk.): *Karsztfelújulás*. 9. Szombathely, BDF Természetföldrajzi Tsz, 91.