

AKTIVÁCIÓS ANALÍZIS AZ ÉLELMISZER-ANALITIKÁBAN VIII. RÉSZECSCKE (PROTON) INDUKÁLT RÖNTGENEMISSZIÓS ANALÍZIS (PIXE)

Szabó S. András,* Borbély-Kiss Ildikó,** Kispéter József*** és Koltay Ede**

* Kertészeti és Élelmiszeripari Egyetem, Élelmiszeripari Kar, Budapest

** MTA Atommag Kutató Intézete, Debrecen

*** Kertészeti és Élelmiszeripari Egyetem, Élelmiszeripari Főiskolai Kar, Szeged

Érkezett: 1989. január 4.

Az „Aktivációs analízis az élelmiszer-analitikában” elnevezésű cikksorozatunkat 1977-ben indítottuk az ÉVIKE hasábjain azzal a céllal, hogy részleteiben is bemutassuk a nukleáris mérés technika egy széleskörűen alkalmazott módszerének, az aktivációs analízisnek (AA) az élelmiszervizsgálatokra történő felhasználási lehetőségeit. Szükségesnek éreztük kihangsúlyozni, hogy az AA tárgykörébe nem csupán azokat az eljárásokat soroljuk, amelyek az ún. klasszikus vagy késleltetett AA (a magreakcióban keletkező radioaktív izotópok sugárzásának detektálása) és az ún. prompt AA (a magreakciókat kísérő prompt sugárzás regisztrálása) területet jelentik. Ide soroljuk – szélesebben értelmezve az AA fogalmát – azokat a mérési eljárásokat is, amelyeknek az alapját nem a magreakció, hanem a gerjesztés következtében keletkező, indukált sugárzás detektálása képezi (1) (2).

A sorozat I. részében (3) ismertettük a klasszikus AA elvi alapjait, a II. rész (4) egyes mikroelemek neutronaktivációs (NAA) mérését tárgyalta. A III. rész (5) a makroelemek NAA meghatározási lehetőségeit ismertette, a IV. részben (6) pedig a bór- és nitrogéntartalom meghatározás kapcsán a prompt mérés technika alkalmazhatóságát mutattuk be. Az V. részben (7) a röntgenfluoreszcenciás elemzés, a VI. részben (8) a töltött részecskékkel történő aktiválás lehetőségeit mutattuk be. A legutóbbi dolgozat, a sorozat VII. része (9) pedig az INAA módszerrel történő vanádiummeghatározás témakörével foglalkozott.

Tekintettel arra, hogy a protonindukált röntgenemissziós eljárást, mint analitikai módszert világszerte széleskörűen alkalmazzák a legkülönbözőbb minták makro- és mikroelem összetételének meghatározására, szükségesnek tartjuk e módszer ismertetését is a cikksorozat keretében. Az eljárás egyébként a 70-es években terjedt el, s igen széleskörűen alkalmazták környezetszennyezési vizsgálatoknál, pl. nehézfém-tartalom mérésére (10).

A módszer elve

Johansson és mtsa (11) kimutatták, hogy töltött részecskékkel bombázva egy mintát, s a mintából kilépő karakterisztikus röntgensugárzás Si(Li) detektorral detektálva, nagy érzékenységgű elemanalitikai módszerként alkalmazható. A módszer angol nevének rövidítése alapján (*Particle Induced X-ray Emission*) PIXE-módszernek nevezték el. Mivel a töltött részecske leggyakrabban proton, a rövidítés úgy is értelmezhető, hogy protonok által indukált röntgensugár emisszió.

A PIXE módszerrel lényegében a $Z \geq 13$ rendszámú elemek mutathatók ki egyidejűleg a minta olyan vastag rétegéből, amelybe a protonok – az energiájuktól függő mértékben – behatolnak. Ez a mélység általában néhányszor $10 \mu\text{m}$.

A módszer relatív érzékenysége rendszerint $10^{-6} - 10^{-7}$ g/g, a minimálisan detektálható anyagmennyiség pedig $10^{-9} - 10^{-12}$ g. A detektálási küszöb természetesen függ a vizsgálandó elemtől s a minta mátrixától is. A koncentráció meghatározás hibája egyébként általában 5–15%, és a hiba nagysága a minta vastagságától is függ. A módszer előnye, hogy többnyire roncsolásmentes mérés tesz lehetővé, s az analízishez szükséges anyagmennyiség nagyon kicsi. Még viszonylag vastag minta készítésénél sem haladja meg a 100 mg-ot.

Erősen fókuszált, néhány μm átmérőjű protonnyalábbal (proton mikroszkop) végzett PIXE analízissel egyébként elérhető a 10^{-18} g detektálási küszöb is. A kis átmérőjű nyaláb „seprétésevel” egy-egy elem kétdimenziós eloszlása is feltérképezhető a minta kis felület-elemei között. A kis nyalábméret a nagy érzékenységgel párosulva szinte egyedülálló eljárást jelenthet az anyagszerkezet és sejtszerkezet kutatásban (12). Ezen a területen a PIXE módszert az elektron mikroszkóddal szemben 2–3 nagyságrenddel kisebb kimutathatósági határ jellemzi. Magyarországon Budapesten a KFKI-ban s Debrecenben, az ATOMKI-ban folynak rendszeres PIXE analitikai vizsgálatok.

A PIXE módszer fizikai alapja az, hogy az atomot töltött részecskével bombázva, a részecske az atommagot körülvevő elektronhéjak valamelyikéről kiüt egy vagy több elektront, mely(ek) helyén lyukak maradnak vissza. A gerjesztett állapotból az atom többféle héjfizikai folyamat révén szabadulhat meg. Ezek egyike a karakterisztikus röntgensugárzás kibocsátása. Attól függően, hogy az ionizáció melyik belső héjon ment végbe, s melyik magasabb héjról töltődött be a lyuk, beszélünk $K\alpha$, $K\beta$, $L\alpha$, $L\beta$ stb. karakterisztikus röntgen-vonalokról. A folyamat részletes elméleti tárgyalásával egyébként – több más szerző mellett – pl. Garcia és mtsai (13) foglalkoztak, itt ennek ismertetése nem szükséges.

Tekintettel arra, hogy a karakterisztikus röntgensugárzás energiája jellemző a kibocsátó elemre, s intenzitása arányos a mintában jelenlévő atomok számával, továbbá a keltési hatáskeresztmetszet elég nagy, a minta röntgenspektruma általában jól felhasználható elem-analízis céljaira.

A röntgensugárzás keltésére általában Van de Graaff típusú gyorsítók protonnyalábját használják, esetleg más töltött részecskéket. A protonenergia optimalizálásánál figyelembe kell venni, hogy a módszer érzékenysége a röntgensugár-keltés hatáskeresztmetszetétől s a spektrum háttérétől függ. Az 1,5–3,0 MeV energiatartományra az jellemző, hogy a hatáskeresztmetszet már elég nagy, viszont a protonok fékezési sugárzásából s a magreakciókban keletkezett γ sugárzás Compton szóródásából eredő háttér még nem számottevő. Így csupán a háttér harmadik – a szekunder elektronemisszióból eredő – komponense jelentős.

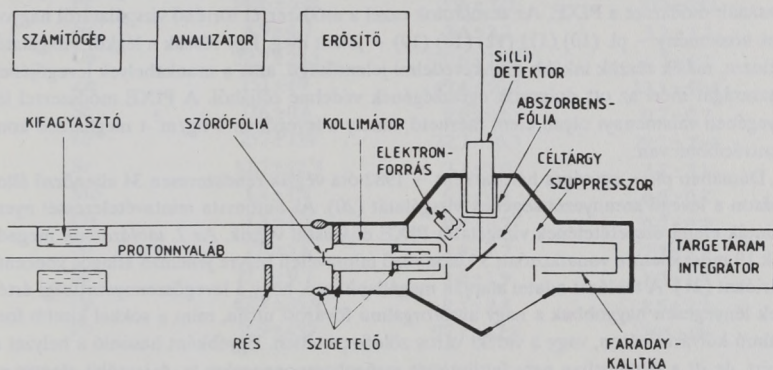
A röntgenspektrum felvételére általában Si(Li) detektorokat használnak. Mivel a Si(Li) detektor átlagos kivétel mellett kb. az 1,3 keV-nél nagyobb röntgensugárenergiaakra mutat elfogadható érzékenységet, így a módszerrel a $Z \geq 13$ rendszámú elemek röntgenvonalai detektálhatók. Mivel a detektor alkalmazhatósága 20 keV felett rohamosan csökken, az elemek azonosítására azokat a vonalakat használjuk, amelyek energiája 1,4 és 20 keV között van. A $Z < 40$ rendszámú elemeknél a K vonalakat, a $Z > 40$ rendszámúaknál az L vonalakat.

A spektrumok kiértékelése két lépésből áll, a csúcsok alatti területek, azaz az egyes röntgensugárzások intenzitásának meghatározásából, majd az intenzitások ismeretében az

elemkoncentrációk kiszámításából. Az ATOMKI-ben a PIXE spektrumok kiértékelésére Zolnai László és Szabó Gyula olyan rendszert (14) (15) hoztak létre, amellyel a spektrumokból közvetlenül koncentrációkat határozhatunk meg. A programrendszer napi 100 – 200 spektrum kiértékelésére alkalmas, vékony és vastag mintákra egyaránt.

A PIXE módszer gyakorlati alkalmazása

Az 1. ábrán az ATOMKI 5 MeV-os Van de Graaff gyorsítójának egyik mérőcsatornáján elhelyezett mérőrendszer sematikus rajza látható. A mérésekhez 2,0 MeV energiájú protonnyalábot használtunk, amely egy résen, szórófólián és egy cserélhető blendés kollimátoron halad keresztül. Így alakul ki a megfelelő nyalábméret, s ezáltal biztosítható a teljes nyalábkeresztmetszet feletti egyenletes intenzitáseloszlás.



1. ábra: Az ATOMKI 5 MeV-os Van de Graaff gyorsítójának egyik mérőcsatornáján elhelyezett PIXE mérőrendszer

A minta a nyaláb irányával 45° -os szöget zár be. A mintából kilépő röntgensugarakat a nyalábirányhoz képest 90° -ban elhelyezett Si(Li) röntgendetektor regisztrálja. Annak érdekében, hogy a bombázó protonok intenzitását vékony és vastag mintánál is pontosan tudjuk mérni, a mérőkamra szigetelten került felszerelésre. A szigetelő anyagú minták feltöltődésének és ezzel a feltöltődést követő háttérnövekedés megelőzésére a kamrában elhelyezett elektronforrás szolgál.

A detektor jelei erősítés és formálás után sokcsatornás analizátorba kerülnek. A spektrumok tárolása és feldolgozása VARITER-XT számítógépen történik.

A céltárgy és a detektor közé, cserélhetően, abszorbens fóliák helyezhetők el abban az esetben, ha a magasabb rendszámú elemek érzékeny detektálása érdekében a viszonylag kis energiájú, intenzív röntgenvonalakat nem akarjuk detektálni.

A mérendő minták szabvány méretű, félautomata diatáras adagolóval juttathatók a mérési helyzetbe. Vékony minta esetén – ha a vastagság nem haladja meg a $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ érté-

ket – nagy gondot kell fordítani a hordozófólia megválasztására. A fóliának – a módszer nagy érzékenysége miatt megkövetelt fokozott tisztaság mellett – jó mechanikai szilárdsággal és hőállósággal is rendelkeznie kell. Ezeknek a követelményeknek pl. a Nuclepore, Kapton, Mylar, Hostaphan néven ismert, főleg polimer műanyag fóliák tesznek eleget.

Sok esetben kényelmesebb vastag mintát készíteni. Porokból, légszárav vagy liofilizált anyagokból homogenizálás után tableta préselhető. Megemlítendő, hogy a minták előkészítésére nem alakult ki egységes módszer. Világszerte nagyon sok mintaelőkészítési eljárást dolgoztak ki, és ezekről számos cikk – pl. (16) (17) – jelent meg.

A 2. ábrán az AA-ben standard referencia anyagként használatos minta – különböző gyümölcsfák leveléből készült szárított, őrölt por – PIXE spektruma látható, kétféle abszorbens használatával. Látható, hogy egyrészt a spektrumból számos elem egyidejűleg mérhető (azaz a PIXE multicemes technika), másrészt az abszorbens jellege a spektrumot is erősen módosítja a háttér befolyásolása révén.

Már említettük, hogy a környezetvédelmi kutatások egyik, ma már igen elterjedten használt módszere a PIXE. Az aeroszok ezzel a módszerrel történő vizsgálatáról nagyon sok közlemény – pl. (10) (11) (12) (18) (19) – jelent meg. Egy részük a légkör vizsgálatát célozza, másik részük inkább munkavédelmi jelentőségű, azaz a munkahelyek levegőjének tisztaságát méri az ott dolgozók egészségének védelme céljából. A PIXE módszerrel lényegében valamennyi olyan elem mérhető, amely a levegőben 1 ng/m^3 -t meghaladó koncentrációban van.

Dániában pl. – egységes hálózatként – 1982 óta végzik rendszeresen 34 ellenőrző állomáson a levegő szennyezettségének vizsgálatát (20). Az automata mintavételezéssel nyert minták elemi összetételének vizsgálatát PIXE eljárással végzik. Az 1. táblázatban megadjuk 19 mikroelemre vonatkozóan 3 különböző mintavételi helyre jellemző átlagos koncentrációkat (21). A táblázat adatai alapján megállapítható, hogy a levegőszennyezettségi értékek lényegesen nagyobbak a nagy autóforgalmú fővárosi utcán, mint a sokkal kisebb forgalmú külvárosi úton, vagy a vidéki város zöldövezetében. Egyébként hasonló a helyzet a mért, de itt a táblázatban nem feltüntetett makrokomponensekre is. A legtöbb elemre az (1) mintavételi helyre jellemző szennyezettség néhányszorosa a (2) és (3) mérőhely ill. azok környezete légszennyezettségének. Egyedül a szelén a kivétel, itt a különböző helyek között statisztikailag nem mutatható ki különbség. Két elem esetében (Br és Pb) a különbség viszont még markánsabb, mind a bróm, mind az ólom esetében a koncentrációk között egy nagyságrend a különbség.

Megemlítjük, hogy az egyes elemek koncentrációi közötti összefüggéseket tanulmányozva – az ún. korrelációs mátrix alapján – nagyon szoros kapcsolat mutatható ki a levegőben mérhető ólom és bróm koncentrációja között. Ez annak bizonyítéka, hogy a városi levegőbe jutó ólom és bróm döntő többsége a közlekedés (főleg gépkocsiforgalom) számlájára írható, s a járművek jelentős mérvű ólom és bróm emisszióját – a benzinben ólomtetraetil s etilbromid van – bizonyítja. Itt említjük meg, hogy az elmúlt években Kecskemét közelében gyűjtött aeroszol-mintákat is analizáltunk, s a kapott adatokat meteorológiai szempontból értékeltük (22) (23).

A környezeti vizsgálatok nem kevésbé fontos területe a folyók, a tavak, a tengerek élővilágra káros szennyezőinek kimutatása. Ennek megfelelően a különböző vízminták analízise jelenti a PIXE módszer alkalmazásának másik, igen aktív területét (24) (25).

1. táblázat: Dániában (Kopenhágában 2 különböző helyen és Esbjergben) 1982-ben végzett levegőszennyezettségi vizsgálatok eredményei (Jensen, 1983).

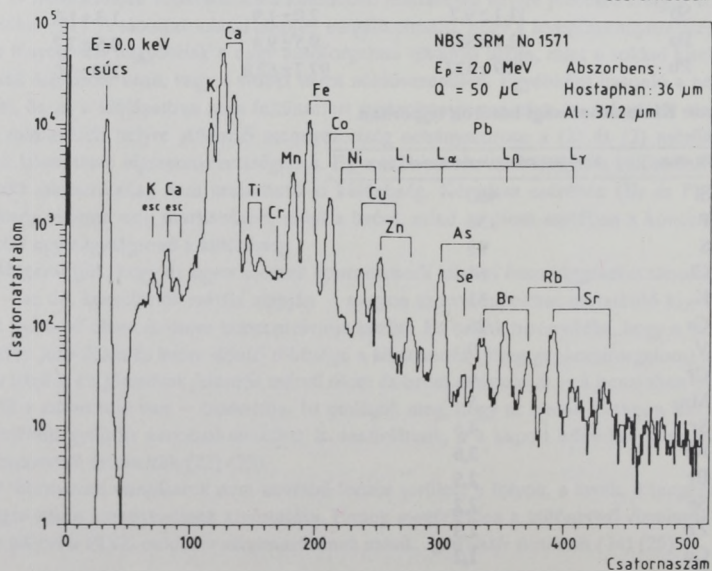
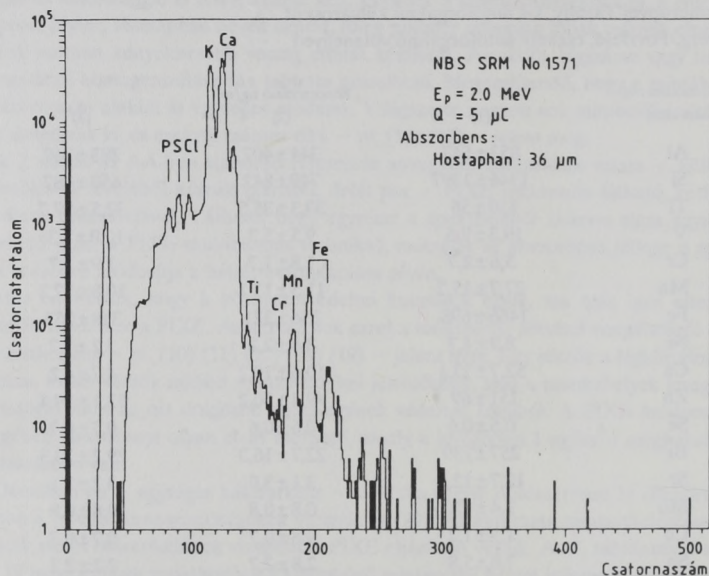
- (1) H. C. Andersen út, nagy autóforgalmú belvárosi sugárút
 (2) Tommerupvej Tarnby, kis autóforgalmú külvárosi út
 (3) Esbjerg, Fovrfeld, csekély autóforgalmú villanegyed

PIXE-módszerrel mért elem	koncentráció ng/m ³		
	(1)	(2)	(3)
Al	853 ± 547	344 ± 407	283 ± 369
Si	1946 ± 1397	749 ± 842	650 ± 787
Ti	110 ± 56	33,3 ± 35,5	32,5 ± 37,7
V	19,3 ± 9,6	9,5 ± 5,3	10,0 ± 7,3
Cr	5,6 ± 2,7	1,8 ± 1,7	1,9 ± 1,7
Mn	27,7 ± 15,7	11,5 ± 13,1	10,8 ± 12,2
Fe	1466 ± 698	336 ± 321	318 ± 353
Ni	8,9 ± 4,7	3,6 ± 2,2	3,2 ± 2,7
Cu	52,7 ± 23,1	10,6 ± 10,2	4,7 ± 4,2
Zn	151 ± 69	49,4 ± 50,2	53,1 ± 59,4
Se	0,6 ± 0,6	0,6 ± 0,6	0,7 ± 0,7
Br	257 ± 139	22,7 ± 16,3	29,2 ± 23,3
Sr	12,7 ± 12,3	3,1 ± 3,0	3,2 ± 3,1
Mo	1,4 ± 1,4	0,8 ± 0,8	0,8 ± 0,8
Cd	1,3 ± 1,2	0,8 ± 0,7	0,7 ± 0,7
Sn	7,0 ± 5,8	2,8 ± 2,7	2,2 ± 2,2
Sb	11,1 ± 9,7	2,0 ± 1,9	1,3 ± 1,3
Ba	62,1 ± 35,9	9,5 ± 9,4	8,5 ± 7,7
Pb	909 ± 437	97,7 ± 62,8	105 ± 90

2. táblázat: Kimutathatósági határok tejporban

Vizsgált elem	kimutathatósági koncentráció ppm
Si	460
P	150
S	93
Cl	64
K	31
Ca	26
V	9
Cr	6
Mn	5
Sr	4,6
Rb	3,6
Br	2,5
Se	2,2
Zn	1,3
Cu	1,2
Ni	1,2
Co	1,2
Fe	1,2

2. ábra: Az 1571 számú NBS SRM minta (gyümölcsfák levele) PIXE spektruma



A biológiában, orvostudományban, élelmiszertudományban is előtérbe kerültek a nyomelemkutatások a különféle mikroelemek biológiai szerepének tisztázására. Ismert, hogy a létfontosságú nyomelemek hiánya, vagy éppen károsan magas koncentrációja számos betegség okozója lehet (2) (27) (28). Mivel a nyomelemek nagy része a táplálkozással jut a szervezetbe, ezért szükséges ismerni élelmiszereink nyomelem-tartalmát is, hogy – adott esetben – mesterséges adagolással pótolhassuk a hiányt.

Egyik ilyen tipikusan „problémás” mikroelem a szelén, melynél egyes országokban a hiány, másokban a toxikus koncentráció miatt (szelenózis) a többlet jelenti a gondot. Berti és mtsai (29) a vér Se-tartalmának meghatározására dolgoztak ki PIXE eljárást. A mérésekhez 1,8–4,0 MeV-es protonnyalábot (Van de Graaff gyorsító) s Si(Li) detektort használtak. A 3. ábrán egy tipikus, szérumra jellemző spektrum látható (belső standardként a Se-méréshez Pd-ot használtak), a 4. ábra pedig a háttér alakulását mutatja a protonenergia függvényében. Látható, hogy a 4 MeV protonenergiánál a fékezési sugárzásból eredő háttér a Se K vonala tartományában már jelentősen nő. A vérszérum Se-koncentrációja egyébként általában 20 és 100 ppb közötti érték.

A különböző élelmiszerek és mezőgazdasági termékek elemi összetételének meghatározására is nagyon széleskörűen használatos a PIXE technika. PIXE módszerrel vizsgálták pl. hüvelyes növények magjának (30), tealeveleknek (31), cigarettának (32), tejpornak (33) és számos más növényi vagy állati eredetű élelmi anyag elemösszetételét. Ilyen irányú saját vizsgálatokat végeztünk a Kertészeti és Élelmiszeripari Egyetem Zöldségtermesztési Intézetével együttműködve. Növényvédő szer dóziskísérletek során vizsgáltuk a sárgadinnye elemösszetételét a dózis függvényében (34).

Röviden említést kívánunk tenni a Kertészeti és Élelmiszeripari Egyetem Élelmiszeripari Főiskolai Karán, Szegeden folyó tejpor és fűszerpaprika vizsgálatokról is, amelyek a gamma-sugárzás hatásának megismerése irányulnak. Ezeket a vizsgálatokat a tejpor és a fűszerpaprika elemi összetételének PIXE meghatározásával bővítettük (35).

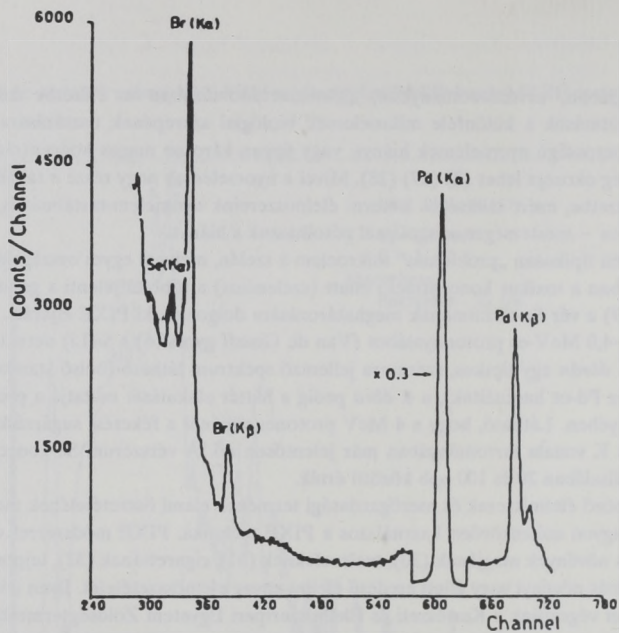
A tejpor makro- és mikroelemösszetételét egy éven keresztül, havonta vett mintákon vizsgáltuk PIXE módszerrel. A tejporból 1 mm vastag, 10 mm átmérőjű tablettákat préseltünk, amelyeket 2,0 MeV-es protonokkal sugároztunk be. A tejpor mátrixában a vizsgált elemekre a 15 μ C begyűjtött töltés mellett a 2. táblázatban feltüntetett kimutathatósági határokat kaptuk.

A koncentrációk időfüggésére nyert eredmények az 5. ábrán láthatók. Lényegében változást a tejpor elemi összetételében nem észleltünk.

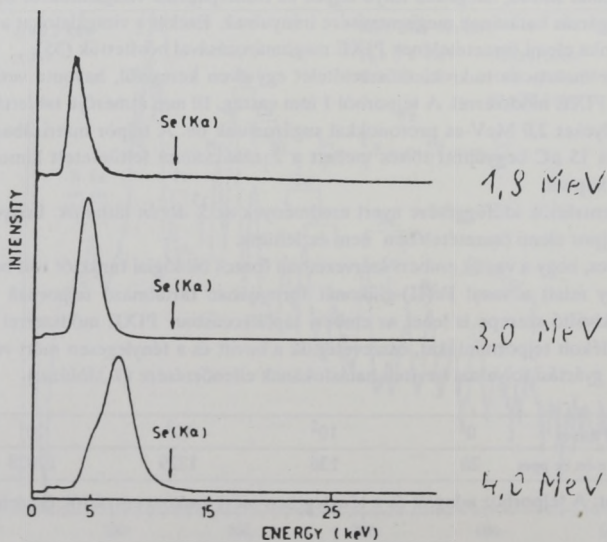
Ismeretes, hogy a vas az emberi szervezetben fontos biológiai funkciót tölt be. A gyakori vashiány miatt a vasat Fe(II)-glükonát formájában tartalmazó tejporok így esetleg gyógyszerkiváltó szerepe is lehet az emberi táplálkozásban. PIXE módszerrel vizsgálva a vassal adalékolt tejpormintákat, összevetettük a bevitt és a ténylegesen mért vas koncentrációkat a gyártási folyamat bevitt határfokának ellenőrzésére (3. táblázat).

bevitt Fe ppm	0	10 ²	10 ³	10 ⁴
ténylegesen mért Fe ppm	26	136	1229	12028

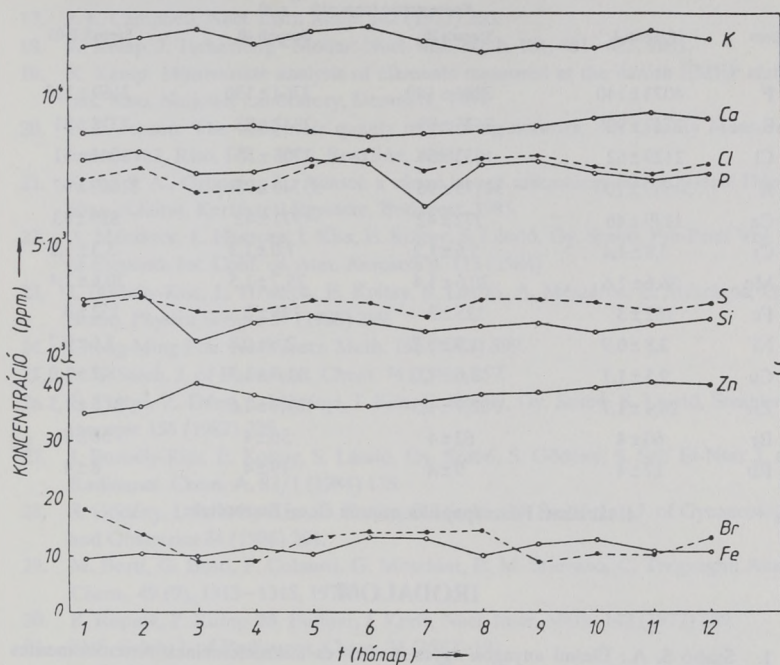
3. táblázat: A tejporhoz adagolt és a ténylegesen mért vaskoncentrációk összehasonlítása



3. ábra: Belső standardként Pd-ot tartalmazó vérszérum minta PIXE spektruma 1,8 MeV proton energiánál



4. ábra: A fékezési sugárzásból eredő háttér spektrum 1,8 MeV, 3,0 MeV és 4,0 MeV proton energia esetén



5. ábra: A tejpor elemi összetételének alakulása a naptári hónapok függvényében

A 4. táblázat a fűszerpaprika mintákkal végzett PIXE analízis eredményeit tartalmazza. A minták a tejporhoz hasonlóan, préseléssel készültek. Összehasonlítva a Szegedi 1, 20, 40 és F-03 minták elemösszetételét, látható, hogy egyes elemek koncentrációi között szignifikáns eltérés van, ami részben termőhelyi-, részben fajtakülönbséggel magyarázható.

Az ismertetett alkalmazások mellett a PIXE módszer számos más területen is használható. Így pl. nyomelemek kimutatására a geológiában, fémek mikroszennyezőinek vizsgálatánál, sőt az eljárás lehetővé teszi pl. archeológiai minták roncsolásmentes analízisét is.

Az eddig bemutatott alkalmazási példákban a preparált minta minden esetben a protonnyalábot előállító gyorsító vákuumkamrájában volt elhelyezve. Megemlítjük azonban, hogy arra is van lehetőség, hogy vékony fém vagy műanyag fólián keresztül a nyalábot kihozzuk a kamrából. Ez az ún. külsőnyalábos (kihozott nyalábos) PIXE technika, amely bizonyos hátrányok (árammérési, monitorozási problémák) mellett, számottevő előnyökkel is rendelkezik. Így a minta előkészítése egyszerűsödik vagy szükségtelenné válik, s a folyadékok is analízálhatók közvetlenül. Továbbá természetesen nagyobb méretű minta is elhelyezhető a nyaláb útjában, mint amilyen a kamrába befér.

Elem	Koncentráció (ppm = 10^{-6} g/g)			
	Szegedi 1	Szegedi 20	Szegedi 40	Szegedi F-03
P	4073 ± 140	3886 ± 140	3764 ± 130	3169 ± 120
S	2747 ± 90	2635 ± 89	2842 ± 83	2318 ± 81
Cl	2129 ± 62	1033 ± 54	1705 ± 55	1041 ± 51
K	34589 ± 100	31175 ± 96	35740 ± 95	31662 ± 97
Ca	1179 ± 46	772 ± 42	971 ± 42	829 ± 43
Cr	7,8 ± 1,4	5,6 ± 1,2	7,0 ± 1,3	5,3 ± 1,2
Mn	26,6 ± 1,6	20,6 ± 1,4	25,7 ± 1,5	20,6 ± 1,4
Fe	162 ± 3	125 ± 3	148 ± 3	152 ± 3
Ni	3,8 ± 0,9	1,9 ± 0,7	2,6 ± 0,8	2,6 ± 0,7
Cu	9,5 ± 1,1	8,6 ± 1,0	11,7 ± 1,2	8,2 ± 1,0
Zn	26,4 ± 1,7	22,7 ± 1,5	23,7 ± 1,6	24,6 ± 1,5
Br	60 ± 4	62 ± 4	56 ± 4	50 ± 4
Rb	17 ± 4	9 ± 4	19 ± 4	8 ± 4

4. táblázat: Fűszerpaprika-minták elemi összetétele

IRODALOM

1. Szabó S. A.: Élelmi anyagok egyes makro- és mikroelemeinek roncsolásmentes aktivációs meghatározása. MTA - MÉM - MÉTE - KÉKI tud. kol. előadása, Budapest, 1981. márc. 27.
2. Szabó S. A.: Aktivációs analízis az élelmiszer-kémiában. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 1986.
3. Szabó A., Bogács J., Gundorin A. N., Kovács Z.: Aktivációs analízis az élelmiszer-analitikában. Élelmiszervizsg. Közl., 23 (5-6), 224-229, 1977.
4. Szabó A., Bogács J., Mihályi É.: Élelmiszervizsg. Közl., 25 (3-4), 61-64, 1979.
5. Szabó S. A., Gundorin A. N.: Élelmiszervizsg. Közl., 28 (4), 183-186, 1982.
6. Szabó S. A., Szasin L. I.: Élelmiszervizsg. Közl., 28 (5), 227-233, 1982.
7. Szabó S. A., Kiss B., Liszonyiné Gacsályi M., Török G.: Élelmiszervizsg. Közl., 32 (4), 204-214, 1986.
8. Szabó S. A., Szasin L. I.: Élelmiszervizsg. Közl. 34 (4), 229-233, 1988.
9. Szabó S. A., Heydorn K., Damsgaard E.: Élelmiszervizsg. Közl., 35 (1), 25-29, 1989.
10. K. Kemp: Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B3, 470-474, 1984.
11. S. A. E. Johansson, T. B. Johansson, Nucl. Instr. Meth. 137 (1976) 473.
12. T. A. Cahill, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 30 (1980) 211.
13. J. D. Garcia, R. J. Fortner, T. H. Kavanagh, Rev. Mod. Phys. 45 (1973) 111.
14. L. Zolnai, Gy. Szabó, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B. Nyomtatásban.
15. Gy. Szabó, L. Zolnai, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B Közlés alatt.
16. G. Deconnick, G. Demortier, F. Bodart, Atomic Energy Rev 13 (1975) 367.

17. J. L. Campbell, Nucl. Instr. Meth. 142 (1977) 263.
18. K. Kemp, J. Tscherning - Moller: Nucl. Inst. Meth. 181, 481 - 485, 1981.
19. K. Kemp: Multivariate analysis of elements measured at the danish EMEP stations. Riso, National Laboratory, Denmark, 1984.
20. F. P. Jensen: The danish air quality monitoring network. Air Quality Measurement, 1982, Riso, DK - 4000, Roskilde, 1983.
21. Szabó S. A., Grønning L.: Adatok a városi levegő mikroelem-összetételéről Dániában. Kézirat, Kertészeti Egyetem, Budapest, 1985.
22. A. Mészáros, L. Haszpra, I. Kiss, E. Koltay, S. László, Gy. Szabó, Pre-Print Vol. I. of Eleventh Int. Conf. on Atm. Aerosols p. 113 (1984)
23. I. Borbély-Kiss, L. Hraszpa, E. Koltay, S. László, A. Mészáros, E. Mészáros, Gy. Szabó, Physica Scripta 37 (1988) 299.
24. Cheng-Ming Fou, Nucl. Instr. Meth. 186 (1981) 599.
25. N. S. Saleh, J. of Radioanal. Chem. 74 (1982) 257.
26. É. Pintye, Z. Dézsi, I. Miltényi, I. Kiss, E. Koltay, Gy. Szabó, S. László, Strahlentherapie 158 (1982) 739.
27. I. Borbély-Kiss, E. Koltay, S. László, Gy. Szabó, S. Gödény, S. Seif El-Nasr J. of Radioanal. Chem. A. 83/1 (1984) 175.
28. S. Gödény, I. Borbély-Kiss, E. Koltay, S. László, Gy. Szabó, Int. J. of Gynaecology and Obstetrics 24 (1986) 201.
29. M. Berti, G. Buso, P. Colautti, G. Moschini, B. M. Stievano, C. Tregnagli: Anal. Chem., 49 (9), 1313 - 1315, 1977.
30. P. Rupnik, P. Kump, M. Budnar, I. Kreft, Nucl. Instr. Meth. 142 (1977) 209.
31. N. S. Saleh, J. of Radioanal. Chem. 74 (1982) 191.
32. A. B. Hallak, J. of Radioanal. Chem. 67 (1981) 459.
33. A. Gharib, H. Rahimi, H. Pyrovan, N. J. Raorfi, H. Taherpoor, J. of Radioanal. Chem. A 89/1 (1985) 31.
34. Pankotai M., Borbély-Kiss I., Koltay E., Szabó Gy., Hajtatás, Korai Termesztés ISSN 0139 - 0945.
35. J. Kispéter, J. Beczner, I. Borbély-Kiss, L. Horváth, L. Kiss, Z. Rózsa: The effect of ionizing radiation on some physical properties of lactalbumin. Proc. XIXth ES-NA meeting, 29-Aug.-2. Sept. 1988, Vienna.

AKTIVÁCIÓS ANALÍZIS AZ ÉLELMISZER-ANALITIKÁBAN VIII. RÉSZECSCKE (PROTON) INDUKÁLT RÖNTGENEMISSZIÓS ANALÍZIS (PIXE)

Szabó S. András – Borbély-Kiss Ildikó – Kispéter József – Koltay Ede

A szerzők a cikksorozat VIII. részében a PIXE (particle induced X-ray emission) módszer élelmiszervizsgálatokra történő alkalmazhatóságát ismertetik. Tárgyalják a módszer elvi alapjait, majd több példán – pl. tejpor és fűszerpaprika elemi összetételének analízise – bemutatják a nukleáris mérés technika élelmiszeranalitikai felhasználhatóságát.

ACTIVATION ANALYSIS IN FOOD ANALYTICS VIII. PARTICLE (PROTON) INDUCED X-RAY EMISSION ANALYSIS (PIXE)

Szabó, S. A. and collaborators.

The applicability of PIXE (particle induced X-ray emission) method in food examinations is discussed in the 8th part of the series. The fundamental principals of the method are dealt with and then the usability of the nuclear technique is presented in several examples, e. g.: elementary composition of milk powder and paprika.

АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ В АНАЛИТИКЕ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ VIII. РЕНТГЕНОВСКИЙ АНАЛИЗ /PIXE/ ИНДУКТИВНЫХ ЧАСТИЦ /ПРОТОНОВ/

III. Сабо и сотрудники

Авторы в VIII части серии статей знакомят с возможностью применения в исследовании пищевых продуктов метода PIXE /Particle induced X-ray emission/.

В статье авторы обсуждают принципиальные основы метода, затем на многочисленных примерах – например анализ элементарного состава сухого молока и пряного перца паприки – демонстрируют возможность применения ядерной измерительной техники в аналитике пищевых продуктов.

AKTIVIERUNGSANALYSE IN DER LEBENSMITTEL-ANALYTIK VI- II. TEILCHEN – (PROTON-) INDUZIERTE RÖNTGENEMISSIONSANALYSE (PIXE)

Szabó, S. A. und Mitarb.

Im VIII. Teil der Artikelserie wird die Anwendbarkeit der PIXE-Methode (particle induced X-ray emission) für Zwecke der Lebensmitteluntersuchung dargelegt. Die prinzipielle Grundlagen der Methode werden erläutert. Außerdem wird die lebensmittelanalytische Anwendung dieser nuklearen Meßtechnik anhand der Analyse der elementaren Zusammensetzung von Milchpulver und Gewürzpaprika aufgezeigt.