

Régészeti leletek nyersanyagainak azonosítása kémiai összetételük alapján prompt-gamma aktivációs analízis segítségével

KASZTOVSZKY Zsolt* és SZILÁGYI Veronika

MTA Izotópkutató Intézet Nukleáris Kutatások Osztály, Konkoly-Thege M. út 29-33., 1121, Budapest, Magyarország

1. Bevezetés

A régészeti leletanyagok természettudományos (archeometriai) vizsgálatának egyik alapvető problémaköre a felhasznált nyersanyagok – azaz a tárgyak eredetének – azonosítása, az ún. proveniencia vizsgálat. A nyersanyag lelőhelyek megtalálása nemcsak azért fontos, mert a kézműves hagyományok részletesebb megismerését teszi lehetővé, hanem azért is, mert segít megértenünk egy adott korszakban élő népcsoportok és kultúrák vándorlásainak és egymással való kereskedelmi-kulturális kapcsolatainak rendszerét. Az elmúlt évtizedekben a klasszikusnak nevezhető régészeti tipológiai vizsgálatokat egyre nagyobb számban egészítik ki a különféle fizikai jelenségeken alapuló, más-más tulajdonságot vizsgáló és eltérő érzékenységgű műszeres elemzési módszerek. Ezen elemáanalitikai, molekulaspektroszkópiai vagy diffrakciós eljárások a tárgyak ásványos- és szöveti szerkezetéről, kémiai- és izotóposztételéről szolgáltatnak információt. A régészeti kutatás sajátos igénye, hogy a nagy eszmei értékkel rendelkező leletekről minél kisebb roncsolással – sőt, ha lehetséges, roncsolás nélkül – szerezzük meg a fenti információkat.

A prompt-gamma aktivációs analízis (PGAA), amely az anyag néhány cm^3 -nyi térfogatról ad átlagos kémiai összetételi információt, megfelelően bizonyult a régészeti tárgyak vizsgálatára, mivel teljesen roncsolásmentes. A régészeti kutatások tárgyát képező különféle anyagtipusok (kőzetek, kerámiák, fémek, üvegek) esetében a PGAA nagy biztonsággal határozza meg az összes főelem (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K és H) és az előfordulás függvényében bizonyos nyomelem (B, Cl, Sc, V, Nd, Sm és Gd) összetevőt. Az IKI Nukleáris Kutatások Osztályán 1997 óta használjuk ki a termikus, illetve hidegneutronos PGAA nyújtotta lehetőségeket archeometriai vizsgálatokra. Kutatásaink során megmutattuk, hogy a mérőrendszer jól alkalmazható többek között a kerámiák, a fémek, a pattintott és csiszolt kőeszközök, valamint az üvegek anyagvizsgálatára.^{1,2,3,4}

Jelen cikk keretében ennek a kutatómunkának a fő eredményeit foglaljuk össze. Először ismertetjük a PGAA módszer azon jellemzőit, amelyeket figyelembe kell venni a régészeti tárgyak anyagvizsgálatakor. A továbbiakban a módszer megbízhatóságának tesztelését (standard referencia minták, IAEA összemérés) és más analitikai eljárásokkal (XRF, INAA, EMPA) való összehasonlíthatóságát mutatjuk be. Végül az elmúlt évek kutatási eredményeiből kiválasztott esettanulmányokkal példázuk az IKI archeometriai kutatásainak sikerét.

2. Analitikai megfontolások a PGAA módszer archeometriai alkalmazásában

Az atommagok neutronok befogását követő prompt-gamma sugárzásának detektálásán alapuló PGAA módszer⁵ sajátossága a viszonylag kis intenzitású neutronnyalábbal történő besugárzás, amely a roncsolásmentességet biztosítja. 2006-ig a termikus ekvivalens neutron fluxus $5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ volt, amely a neutronvezető csatornák többlépcsős felújítását követően 2007-re $1,2 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ értékre növekedett. Ez az adottság – a neutronbefogási hatáskeresztmetszet $1/v$ függése miatt – a módszer érzékenységét jelentősen (a termikus neutronokkal történő gerjesztéshez képest 50-szeresre) növelte⁶.

A budapesti PGAA berendezés Compton-elnyomós HPGe detektorral működik.^{7,8,9} A spektrumok kiértékelése a Hypermet-PC programmal történik.^{10,11,12,13} A mennyiségi kiértékelés az ún. k_0 -módszerrel végezzük¹⁴. Az alkalmazott spektroszkópiai adatokat összesítő könyvtár osztályunk saját standardizáló mérésein alapul.^{15,16,17,18,19} A pontos kémiai összetételek meghatározása a Révay²⁰ által közöltek szerint történik. A koncentráció adatok mérési hibáit a publikált eljárások^{21,22} szerint határozzuk meg.

Arégészeti tárgyak vizsgálata esetében – az oxigén kivételével – minden fő alkotóelem jól detektálható. Az oxigéntartalom a főelemek átlagos oxidációs állapota alapján számítható ki. A budapesti PGAA rendszer különböző kémiai elemekre vonatkozó érzékenysége, illetve az annak megfelelő kimutatási határok széles tartományban változnak, és elsősorban a neutronbefogási hatáskeresztmetszetek szabják meg az értéküket. Legjobban mérhető elemek a B, Nd, Sm, Gd, míg a legrosszabbul mérhetőek a C, O, F, Pb, Bi.

A PGAA eljárás egyik fontos előnye a régészeti leletek kémiai vizsgálatakor, hogy semmiféle mintaelőkészítést nem igényel. A tárgyak eredeti állapotukban helyezhetők a nyalábra, a mérési pozícióba. A besugárzási idő a legtöbb esetben 1 és 3 óra közötti, amelynek megválasztásához tekintettel kell lenni a kimutatandó összetevőkre, azaz a jól illeszthető, megfelelő statisztikájú csúcsok összegyűjtésére. A precíz mennyiségi analízishez szükség van a detektor határfok és non-linearitás függvényeinek meghatározására, valamint a háttér korrekciók figyelembe vételére. Vastag minták esetén szükséges a neutron önabszorpció és a gamma önárnyékolás hatásának számítása is.

* Kasztovszky Zsolt. Tel.: 06 1 392 2222 / 3143; fax: 06 1 392 2584; e-mail: kzsolt@iki.kfki.hu

3. A PGAA módszer összehasonlíthatósága más módszerekkel

A PGAA mérőrendszerünkkel részt vettünk egy IAEA CRP keretében szervezett összemérésben („proficiency test”), ahol több külföldi, különféle nukleáris analitikai laboratóriummal együtt egy standard referenciaminta (kínai porcelán) kémiai összetételét határoztuk meg. Az összemérések eredményeit az Ügynökség szakemberei összesítették és értékelték. Az általunk mért és közölt koncentráció értékek megfeleltek az Ügynökség által megadott referencia értékeknek.²³

A fenti összemérésen kívül az archeometriai kutatások során több alkalommal végeztünk méréseket különböző nemzetközi geológiai, üveg, stb. standardokon. A mérések reprodukálhatóságát több esetben más analitikai módszerrel végzett párhuzamos mérésekkel is ellenőriztük, melyek ugyanakkor kiegészítő információt is adtak a PGAA-val nem mérhető összetevőkről. A kutatási együttműködéseink folyamán elsősorban a hagyományos neutronaktivációs (INAA), a röntgenfluoreszcens (XRF) és a mikroszondás (EMPA) analízis voltak a kiegészítő mérési technikák.

Az összehasonlítás szerint a PGAA – bár bizonyos elemeknél szisztematikus eltérések tapasztalhatók – jó egyezést mutatott a legtöbb kimutatható elemre.^{23,24}

4. Az archeometriai kutatás története az IKI-ben

Az Izotópkutató Intézet munkatársai először az 1980-as években végeztek archeometriai témájú kutatásokat. Benkő Lázár és munkatársai kerámia leletek, illetve vasolvasztó kemencék építőanyagának termolumineszcens kormeghatározását végezték el.^{25,26} Bíró Tamás és munkatársai röntgenfluoreszcens analízissel vizsgáltak különböző műtárgyakat.^{27,28} A Nukleáris Kutatások Osztályán 1997-ben kezdtük el régészeti tárgyak elemösszetételét vizsgálni prompt-gamma aktivációs analízissel. Kezdetben az MTA Régészeti Intézet, később a Magyar Nemzeti Múzeum kutatóival alakítottunk ki tartós munkakapcsolatot. Néhány esetben a Szépművészeti Múzeum és a Néprajzi Múzeum számára végeztünk méréseket. Azóta folyamatosan fenntartjuk és bővítjük együttműködéseinket hazai és külföldi múzeumokkal, kutatóintézetekkel, egyetemekkel. Az eltelt 12 évben sikeresen alkalmaztuk a PGAA módszert köeszközök, kerámiatárgyak, fémleletek és régészeti üveganyagok, féldrágakövek eredetmeghatározására, amely munkáinkkal nemzetközi elismertséget vívtunk ki.²⁹

5. A régészeti leletek vizsgálatának eredményei

5.1. Köeszközök

A Kárpát-medence őskorának régészeti kutatása jelentős mértékben támaszkodhat az olyan tartósan megőrződő tárgyak, mint a köeszközök vizsgálatára. Mind a pattintott, mind a csiszolt köeszközök nyersanyagai eredeti állapotukban analízálhatók a régészeti tárgyakban, mivel az eszközkészítés során alkalmazott fizikai módosító folyamatok (törés, csiszolás, polírozás) a kémiai és ásványos összetételre nincsenek hatással. Ez azt jelenti, hogy a leletek összetétele alapján a nyersanyag lelőhelyek jó eséllyel

meghatározhatók. Az elemzés legfőbb korlátja, hogy az ép formában fennmaradt köeszközök és a különlegesen ritka, távoli eredetű nyersanyagok esetében a roncsolással járó vizsgálat megengedhetetlen. A PGAA méréseknek ebben az esetben igen nagy jelentősége van.

A leggyakoribb köeszköz nyersanyagok (vulkáni és metamorf, valamint magas SiO₂-tartalmú üledékes vagy vulkáni eredetű kőzetek) besugárzása után a fő alkotók (Si, Ti, Al, Mg, Mn, Fe, Ca, K, Na, H) és néhány nyomelem (a mobilis B, Cl, S, a kevésbé mobilis Sm, Eu, Nd, Gd és Sc, V, Cr, Ni) mutatható ki.

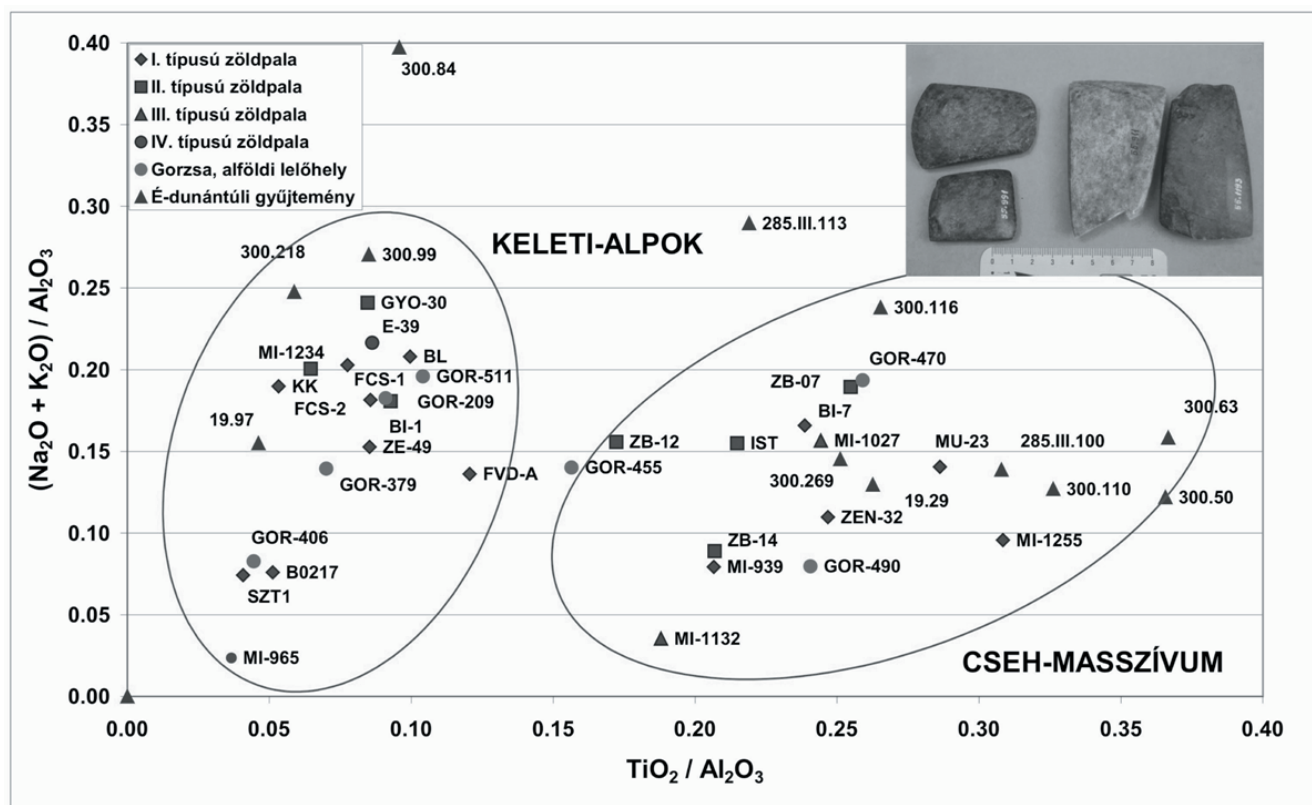
Az archeometriai kutatások fő feladatai közé tartozik az alapadat gyűjtés, az adatbázis építés és az adatok statisztikai elemzése. Ilyen jellegű projekteket indítottunk a 1990-es évek végétől kezdődően a magyarországi pattintott és csiszolt köeszközök témájában. Legtöbb eredményünk a zöld- és kékpala (metamorf) kőzetanyagú köeszközökkel kapcsolatban született. Értelmezéseink szerint ezen köeszköz leleteknek több lehetséges nyersanyag forrása is lehet a régióban (az Alpok keleti peremén vagy a Cseh-masszívumban). Vizsgálataink rámutattak, hogy a fő zöldpala lelőhelyek anyagai jól elkülönülnek egymástól kémiai összetételük alapján (1. ábra). Így lehetővé vált akár teljesen ép zöldpala köeszközök eredetének meghatározása roncsolásmentes módszerrel. Eredményeink révén akár az Alföld közepén található – nyersanyag lelőhelyektől nagy távolságra fekvő – régészeti lelőhelyek esetében is sikerült a felhasznált kőzettípusok eredetét meghatározni és hosszú távú kereskedelmi kapcsolatokat kimutatni.^{30,31}

Hasonló jellegű eredetvizsgálatot végeztünk és végzünk kárpát-medencei bazalt és szaruszirt csiszolt köeszközökön, továbbá obszidián, tűzkő, radiolarit, kvarcporfir, stb. anyagú pattintott köeszközökön.^{32,33,34,35,36}

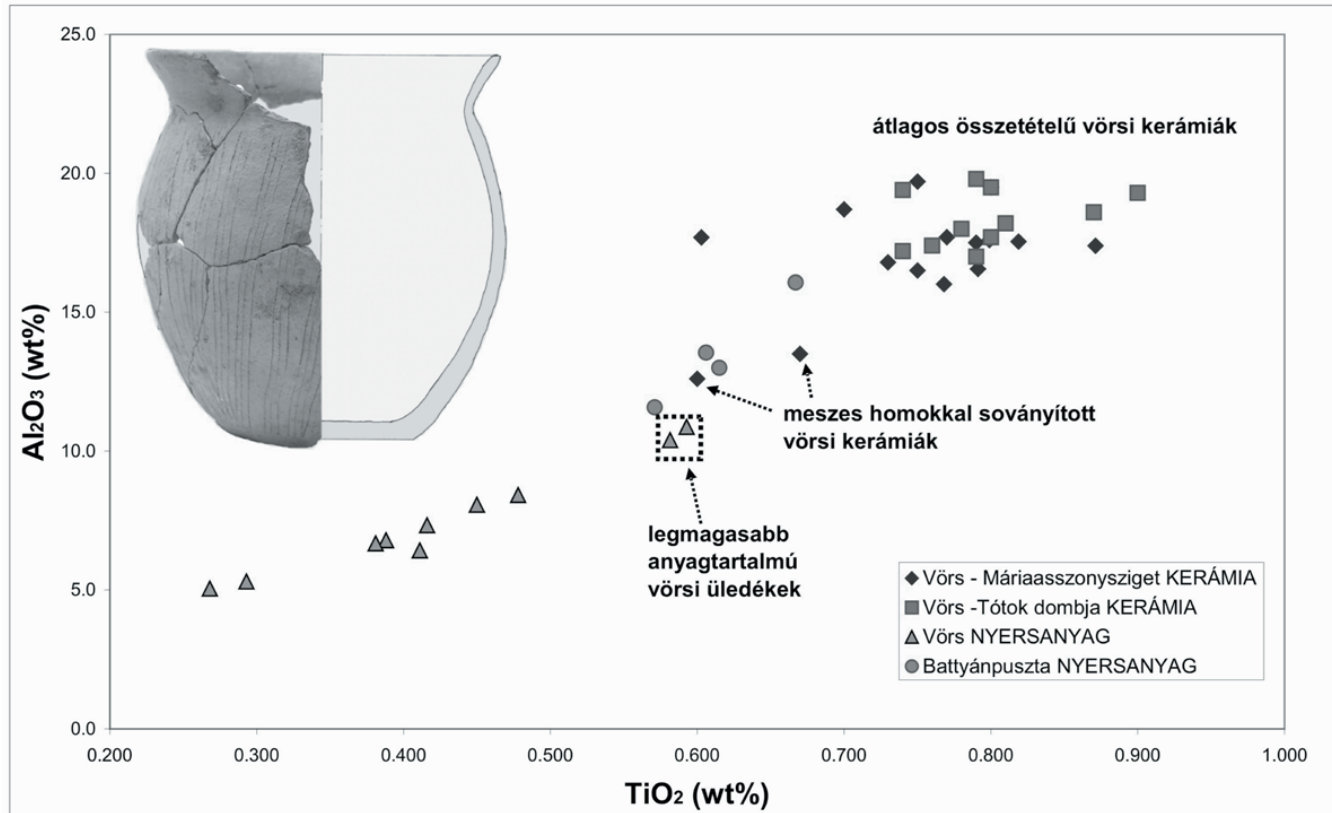
5.2. Kerámiák

A kerámia – amely az egyik leggyakoribb lelet a régészeti ásatásokon – számos információt rejt magában, nemcsak a stílári jegyei, hanem a készítéséhez használt nyersanyagok változatossága miatt is. Anyagvizsgálati szempontból problémát jelent, hogy általában több alapanyag (agyag és durvább szemcsék, pl. homok, zúzott kőzet, pelyva, stb.) keverésével állítják elő, ezért a teljes minta kémiai összetétele a keverék átlagát mutatja. A kompozit jelleg mellett a kerámiakészítési technika (pl. kiégetés) és a kész edény „előéletének” egyéb folyamatai (pl. használat, betemetődés) is befolyásolják a kiinduló kémiai összetételt. Ezen módosító tényezők ismeretében kell értékelní a PGAA-val nyert adatokat, és kell kiválasztani a nyersanyag eredetének meghatározására érdemben hasznosítható elemkoncentrációkat.

Az eredet azonosításában szerepet játszó kémiai elemek geokémiai szempontból tágabb értelemben immobilis (azaz mind az elsődleges, mind a másodlagos elemmobilizációs folyamatoknak, pl. olvadákképződésnek, oldódásnak ellenálló) viselkedésűek, amelyek a kiinduló nyersanyag képződését követően a kerámiakészítés, -használat és betemetődés során mennyiségileg már nem változnak. Ilyen főelemek a Si, Ti és Al, illetve a nyomelemek közül a V, Sc,



1. Ábra. A PGAA-val megvizsgált, magyarországi régészeti lelőhelyekről származó zöldpala csiszolt köeszközök csoportosítási és eredeztetési lehetőségei.



2. Ábra. Vörsei-Máriaasszonysziget és Vörsei-Tótok dombja lelőhelyek bronzkori kerámiáinak TiO_2 - Al_2O_3 összetételi diagramja a kerámia leletek anyagának csoportosítását és a lehetséges nyersanyag lelőhelyekhez való viszonyukat mutatja.

Co, Cr, Ni, Zn, Zr, Y, Hf és a ritkaföldfémek. Ezekkel az eredetre utaló elemekkel szemben a kémiai alkotók másik nagy csoportját azok a fő- (Fe, Ca, részben Mg, Mn, K, Na, P) és nyomelemek (B, Cl, Ba, Sr, Rb) alkotják, amelyek geokémiai szempontból tágabb értelemben mobilisak (azaz mind az elsődleges, mind a másodlagos elemmobilizációs folyamatokban részt vehetnek). Ezeknek az elemeknek a koncentrációja változik a nyersanyag természetes állapotához képest az edénykészítés, pl. agyagtisztítás, szárítás, kiegészítés során, vagy a használatba vétel és betemetődés folyamán. A kerámia „élettörténetének” folyamataira való érzékenyséjük miatt ezek az alkotók csak kivételes esetben tükrözik a kiinduló anyagok összetételét, sokkal inkább az edényhasználatról és az egykori életszintér eltemetődésének körülményeiről adnak információt.

Egy doktori kutatáshoz kapcsolódóan³⁷ a Kis-Balaton térségében fekvő sokperiódusú őskori lelőhely, Vörs bronzkori kerámia leletanyagának vizsgálatába kapcsolódtunk be. Vörs-Máriaasszonysziget és Vörs-Tótok dombja lelőhelyek bronzkori kerámia leletanyagából származó töredékek esetében a mikroszkópos közettani és műszeres ásványtani vizsgálatok nem mutattak ki lelőhely-specifikus különbséget. Kérdéses maradt azonban, hogy a két település kerámiakészítési (elsősorban nyersanyag használati) szokásaiban van-e különbség. Emellett arra vonatkozóan is kerestük a bizonyítékot, hogy a helyi, edénykészítésre kevésbé alkalmas nyersanyagokat vagy a legközelebbi, ma is ismert agyaggyerő hely (Battyánpusztá) anyagát használták-e kerámiakészítéshez.

A nyersanyagok azonosítására elsősorban a főelem összetevők adatait alkalmaztuk. A 2. ábra diagramjában olyan immobilis főelemeket – Al_2O_3 és TiO_2 – választottunk ki bemutatásra, amelyek megbízhatóan jellemzik a kiinduló kerámia nyersanyagok összetételét. Amint azt a 2. ábra is mutatja, a két település kerámia leleteinek összetételében nem lehet különbséget találni. A Vörs-Máriaasszonysziget lelőhelyről származó minták közül azonban két töredék is kitűnik, amelyeknek nemcsak ezen a diagramon, hanem szinte minden immobilis elem tekintetében is eltérő az összetétele. A leleteket mikroszkóp alatt megvizsgálva bebizonyosodott, hogy összetételük az alapanyaghoz szándékosan adagolt segédanyag (meszes homok) miatt eltérő.³⁷

A lehetséges nyersanyag forráshelyek közül az immobilis fő- és (a részben XRF mérésekből származó) nyomelem adatok tekintetében a battyánpusztai – azaz a fizikai tulajdonságai alapján alkalmasabb, bár távolabb található – a valószínűbb. Különösen igaz ez a meszes homokkal soványított edények esetében. A 2. ábra azt is megmutatja, hogy a közvetlenül Vörsről gyűjtött felszín közeli üledékek között is előfordul olyan, amelynek kémiai összetétele közeli a kerámiákéhoz, a vörsi nyersanyag átlagos összetétele azonban távolabb esik a kerámiákétól. A mintákon végzett makroszkópos megfigyelések is azt igazolták, hogy fizikai tulajdonságai (elsősorban gyenge plaszticitása) kevésbé teszik alkalmassá ezt a nyersanyag típust kerámia készítésére. Eredményeinkkel alátámasztottuk, hogy a bronzkori Vörs-Máriaasszonysziget és Vörs-Tótok dombja településeken a fazekasok – felismerve a helyi, könnyen hozzáférhető nyersanyagok alkalmatlanságát – egy távolabbi helyről származó nyersanyagot használtak.

5.3. Fémek

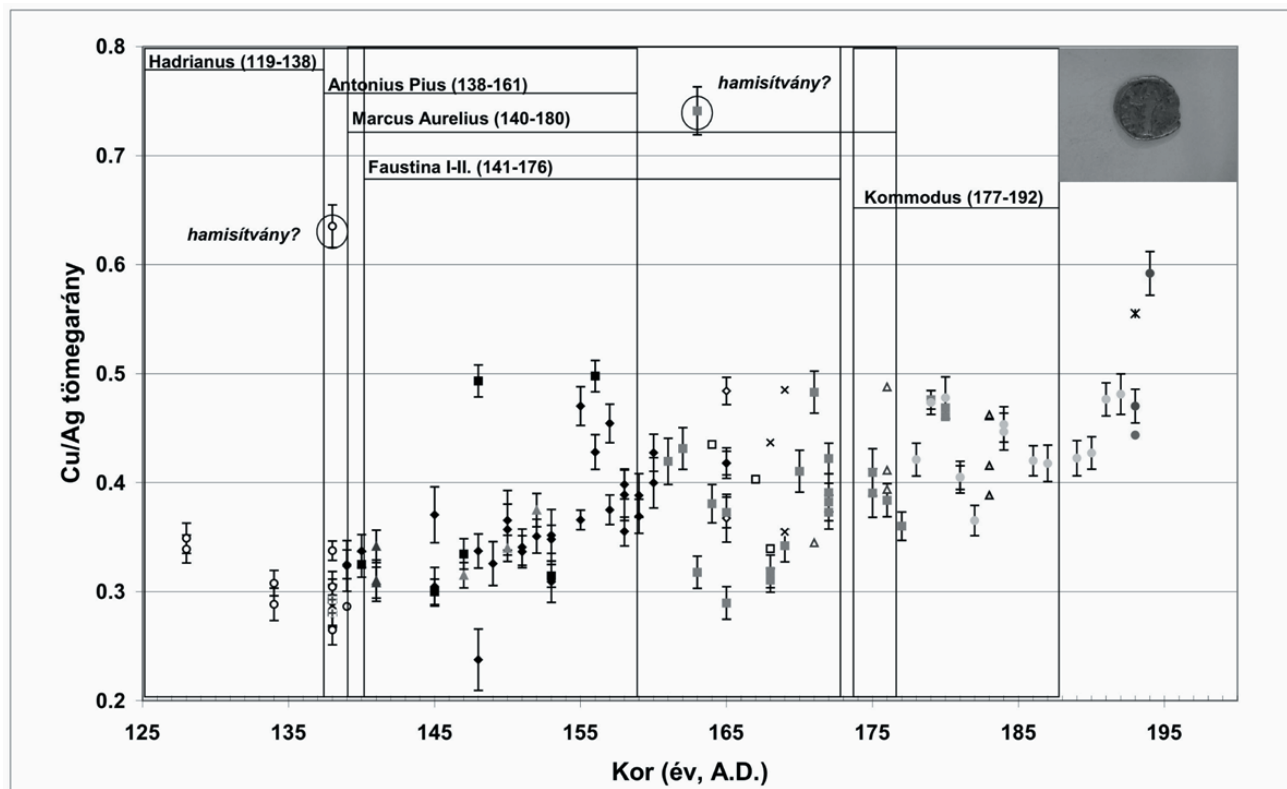
A régészeti lelőhelyeken – korszakoktól és kultúráktól függően – különféle fémekből és ötvözetekből készült tárgyak is előkerülhetnek (pl. vas, bronz, ezüst, arany). Az egyes korokban elterjedt ismeretek alapján nevezték el pl. a vaskort, a bronzkort, és Magyarországon a rézkort. A tárgyak készítése során alkalmazott nyersanyagok (érc) és azok megmunkálásának megismerése a nyersanyagok lelőhelyeinek azonosítását és a vizsgált kultúra fémműves technikájának megismerését teheti lehetővé.

Osztályunkon az elmúlt évtizedben nemesfémek és ötvözeiteinek (pl. római kori ezüst pénzek)³⁸, vastárgyak (pl. középkori kardok), illetve réz és ötvözeiteinek (pl. római kori fibulák, középkori angol sárgaréz sírfeliratok és domborművek)³⁹ analízisével foglalkoztunk. Analitikai szempontból nehéz feladat a jelentős százalékból egyetlen, közepes vagy nagy neutronbefogási hatáskeresztmetszetű nehezelemet (pl. Ag, Cu) tartalmazó mátrixban a kulcsfontosságú, de csak mellék- vagy nyomelemnyi mennyiségben előforduló, illetve a nagyobb mennyiségű, de kis befogási hatáskeresztmetszetű egyéb kémiai alkotók (pl. Sn, Pb) kimutatása. A bronzban például a réz, mint fő alkotó mellett az ólom, ón, cink jelenlétét csak megközelítőleg 1 súly% felett lehet kimutatni. Hasonlóan, más nyomelemekre is sokszor csak egy felső becslést (kimutatási határt) tudunk megadni.

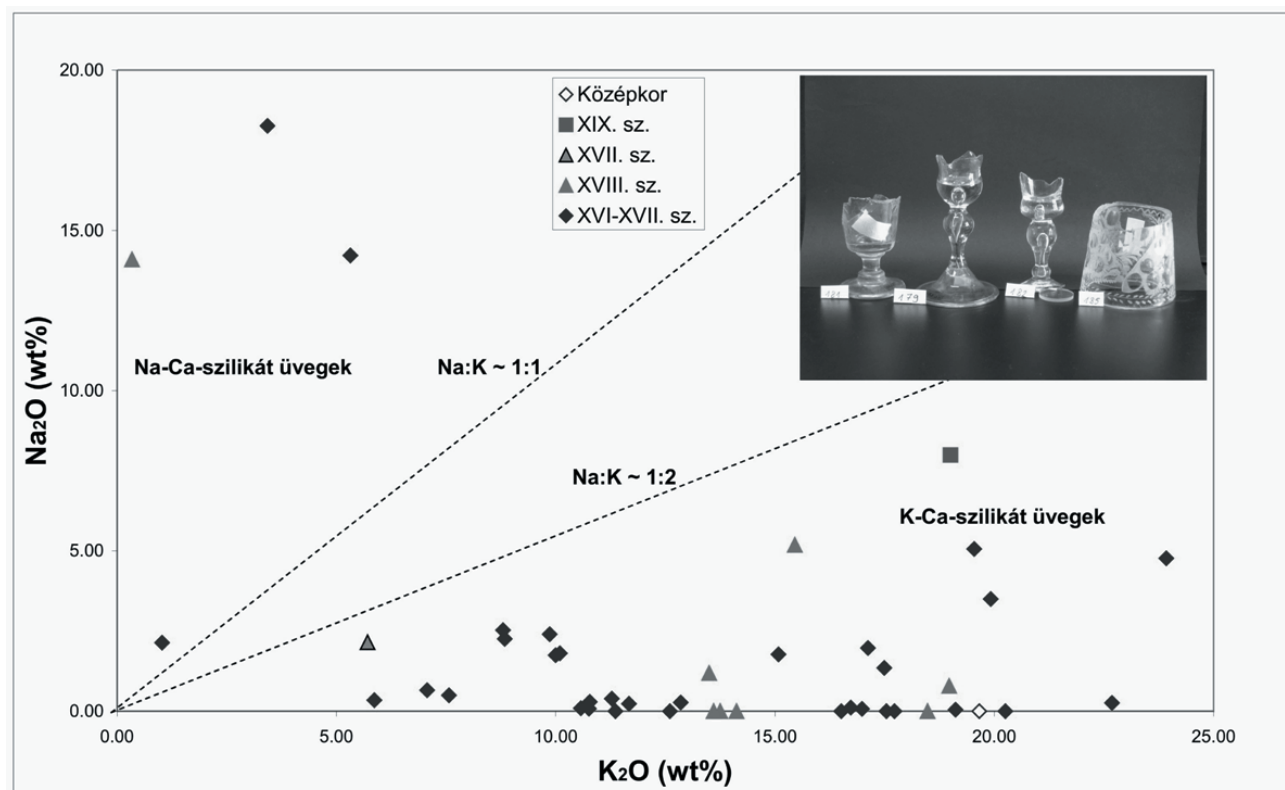
Egy vizsgálat sorozat keretében Lengyelország területén feltárt római kori lelőhelyek ezüstpénzeinek összetételét határoztuk meg³⁸. A PGAA-mérések során az jelentette az egyik fő nehézséget, hogy a nagy neutronbefogási hatáskeresztmetszetű ezüst prompt gamma spektruma igen összetett, nagyszámú kis-közepes intenzitású csúccsal jellemezhető a teljes energiatartományban, így az ezüst csúcsai interferálnak más elemek csúcsaival. Másrészt az ezüst felaktiválódásának veszélye miatt (az ^{110}Ag felezési ideje 250 nap) a besugárzási időt korlátozni kellett. Ennek ellenére a római kori ezüstpénzek esetében sikerült meghatároznunk a Cu/Ag arányt (az eredményeket közvetve SEM-EDS mérések is igazolták). A mért réztartalom, azaz a Cu/Ag tömegarány (3. ábra) a Római Birodalom egymást követő uralkodói periódusaiban egyre magasabb értékeket ért el, vagyis a pénzek ezüsttartalma fokozatosan csökkent, anélkül, hogy ez a tárgy külső megjelenésében megmutatkozott volna. A jelenség kézenfekvő magyarázata, hogy a császárok – a kül- és belviszályok miatti gazdasági nehézségekre reagálva – mesterségesen devalválták a fizetőeszközt. A régészeti módszerektől teljes egészében független PGAA vizsgálatokkal egyértelműen igazolni lehetett a római kori pénzverés körülményeinek változását.

5.4. Üvegek

A történelmi üvegek műszeres anyagvizsgálatára már évtizedekkel ezelőtt felmerült az igény a régészek és a történészek részéről, mivel a tipológiai jegyek alapján a legtöbb esetben nem azonosíthatóak egyértelműen az üvegyártó műhelyek. Ebben nagy segítséget nyújtanak a roncsolásmentes elemanalitikai módszerek, különösen pedig a PGAA. Az üveg alkotói nagy mennyiségben (>50%) tartalmaznak SiO_2 -ot, ami mellett az olyan mellék- és nyomelemek kimutatásának van jelentősége, mint a



3. Ábra. Az ezüst dénár kémiai összetételbeli (Cu/Ag aránybeli) változásának nyomon követése a Római Birodalom egymást követő uralkodási periódusaiban.



4. Ábra. Lengyelországi középkori és barokk üvegtárgyak összetételének megoszlása az alapüveg típusok között.

folyósítók hozzáadásából származó Na_2O , K_2O , B_2O_3 és P_2O_5 , az egyéb adalékanyagokból eredő As_2O_3 , BaO vagy a színezőként alkalmazott PbO , SnO_2 vagy CoO (CuO). Ezen

elemek közül a Si, Na, K és különösképpen a B, valamint az egyéb fő alkotók megbízhatóan kimutatható a PGAA módszerrel. Számos, az üvegek archeometriájában jelentős

nyomelem (Sb, Sr, Rb, Y, Zr, Zn) a berendezés kimutatási határai alatti mennyiségben fordul elő a mintákban. Ezek analizésére más módszerekkel történő párhuzamos vizsgálat szükséges. A PGAA – a H_2O -tartalom mérésén keresztül – ígéretes lehetőséget nyújt a történelmi üvegek mállottsági állapotának vizsgálatára is.

A fent ismertetett elemek közül a bór kimutatásának azért van nagy jelentősége, mert ismereteink szerint a XVII. századtól kezdve mesterségesen adagoltak bóraxot luxus üvegtermékek alapanyagiként. Így a bór mennyiségének mérésével közvetve a tárgyak készítésének ideje is meghatározható. Másrészt a PGAA szinte az egyetlen roncsolásmentes módszer, mellyel nyomnyi mennyiségű (min. 0,3 $\mu\text{g/g}$) bór kimutatható az üveghez hasonló mátrixokban. Ezáltal egyedülállóan alkalmas a nagy kulturális értékű, általában igen alacsony B-tartalmú történelmi üvegletek vizsgálatára.

Munkánk során középkori és barokk (XVI-XIX. sz.), elsősorban Lengyelországból származó üvegek vizsgálatát végeztük el^{24,40}. A műtárgyak nagyobb része (75%-a) a közkedvelt velencei (muránói) üveg stílusában (façon de Venise) készült (XVI-XVII. század). A Na_2O és K_2O koncentrációk meghatározásával a főbb történelmi alapüveg típusok (káli- és nátronüvegek) jól elkülönültek egymástól (4. ábra). Érdekes azonban, hogy a külső megjelenés ellenére az általunk vizsgált üvegtárgyak túlnyomó többsége nem nátronüveg (mint a velencei üveg), hanem káliüveg. A CaO mennyisége minden esetben meghaladta a 3 súlyszázalék

koncentrációt, ami alapján Ca-tartalmú adalékanyag – általában mészkő – hozzáadása feltételezhető. A nyomnyi (0,01–0,06 tömegszázaléknyi) B_2O_3 -tartalom mérésével beigazolódt, hogy a vizsgált leletegyüttes barokk tárgyai esetében nem azonosítható a XVII. századtól megjelent új technika, a bórax használata. Ezzel szemben a szintén ebben a korban bevezetett arzén tartalmú (>0,2 súly% As_2O_3) luxusüvegek a vizsgált tárgyak között is előfordultak.

6. Összefoglalás

Az intézetünkben folyó prompt-gamma aktivációs analízis 1997-ben indult új alkalmazása, az archeometriai, azaz a régészeti tárgyak kémiai vizsgálatára irányuló kutatás, egy időszaki és eredményes kutatási területnek bizonyult. Munkánkhoz köszönhetően bebizonyosodott, hogy a PGAA jól alkalmazható a különféle (kőzet, kerámia, fém, üveg) anyagú leletek kémiai vizsgálatában. Mindemellett alapvetően fontos, hogy alkalmazása más elemek kimutatására érzékeny műszeres analitikai módszerekkel együtt történjen. A módszer roncsolásmentes jellegét hasznosítva a prompt-gamma aktivációs analízist a nemzetközi archeometriai kutatásban is ismertté tettük.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Budapesti Neutron Központnak a kutatási együttműködések támogatásáért.

Hivatkozások

1. Kasztovszky, Zs.; Antczak, M.M.; Antczak, A.; Millan, B.; Bermúdez, J.; Sajo-Bohus, L. *Nukleonika* **2004**, 49, Nr. 3, 107-113.
2. Sajo-Bohus, L.; Antczak, M.M.; Greaves, E.D.; Antczak, A.; Bermúdez, J.; Kasztovszky, Zs.; Poirier, T.; Simonits, A. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **2005**, 265, No. 2, 247-256.
3. Sándor, Zs.; Tölgyesi, S.; Gresits, I.; Kasztovszky, Zs. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **2002**, 254, No. 2, 283-288.
4. Kasztovszky, Zs.; T. Biró, K. In *Proceedings of 34th International Symposium on Archaeometry* Institución „Fernando el Católico”, Zaragoza, **2006**, 301-308.
5. Révay, Zs.; Belgia, T. In *Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams*, Molnár, G.L., Ed.; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht/Boston/New York, **2004**, pp 1-30.
6. Révay, Zs.; Belgia, T.; Kasztovszky, Zs.; Weil, J.L.; Molnár, G.L. *Nucl. Instr. Meth. B* **2004**, 213, 385-388.
7. Belgia, T.; Révay, Zs. In *Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams*, Molnár, G.L., Ed.; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht/Boston/New York, **2004**, pp 71-111.
8. Fazekas, B.; Révay, Zs.; Östör, J.; Belgia, T.; Molnár, G.; Simonits, A. *Nucl. Instr. Meth. A* **1999**, 422, 469-473.
9. Molnár, G.L.; Révay, Zs.; Belgia, T. *Nucl. Instr. Meth. A* **2002**, 489, 140-159.
10. Phillips, G.W.; Marlow, K.W. *Nucl. Instr. Meth.* **1976**, 137, 525.
11. Fazekas, B.; Östör, J.; Kis, Z.; Molnár, G.; Simonits, A. In *Proceedings of 9th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics*, Molnár et al., Eds.; **1997**, p 774.
12. Révay, Zs.; Belgia, T.; Ember, P.P.; Molnár, G.L. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **2001**, 248, 401-405.
13. Révay, Zs.; Belgia, T.; Molnár, G.L. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **2005**, 265, 261-265.
14. Molnár, G.L.; Révay, Zs.; Paul, R.L.; Lindstrom, R.M. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **1998**, 234, 21-26.
15. Révay, Zs.; Molnár, G.L. *Radiochim. Acta* **2003**, 91, 361-369.
16. Révay, Zs.; Molnár, G.L.; Belgia, T.; Kasztovszky, Zs.; Firestone, R.B. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **2000**, 244, 383-389.
17. Révay, Zs.; Molnár, G.L.; Belgia, T.; Kasztovszky, Zs.; Firestone, R.B. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **2001**, 248 (2), 395-399.
18. Choi, H.D.; Firestone, R.B.; Lindstrom, R.M.; Molnár, G.L.; Mughabghab, S.F.; Paviotti-Corcuera, R.; Révay, Zs.; Trkov, A.; Zerkín, V.; Chunmei, Z. *IAEA* **2007**.
19. Révay, Zs.; Firestone, R.B.; Belgia, T.; Molnár, G.L. In *Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams*, Molnár, G.L., Ed.; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht/Boston/New York, **2004**, pp 173-364.
20. Révay, Zs. *Anal. Chem.* **In print**, DOI:10.1021/ac9011705.
21. „GUM”: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements, ISO, Geneva, **1993**.
22. Révay, Zs. *Nucl. Instr. Meth. A* **2006**, 564, 688-697.
23. Kasztovszky, Zs. *Archeometriai Műhely* **2007**, 2007/2, 49-54.
24. Kasztovszky, Zs.; Kunicki-Goldfinger, J.J.; Dzierzanowski, P.; Nawrońska, G.; Wawrzyniak, P. *Archeometriai Műhely* **2005**, 2005/1, 48-57.
25. Benkő, L. *Iparrégészeti/Industrial Archaeology II.* **1984**, 263-272.
26. Benkő, L. *Archaeometrical Research in Hungary I.* **1988**, 71-81.
27. Biró, T.; Pátkai, Gy. In: *Abstract Volume of the International Symposium on Archaeometry, Naples* **1983**, 14.

28. Biró, T. In: Studien zur Machtsymbolik des mittelalterl Ungarn, Insignia Regni Hungaria I, Hung. Nat. Mus.; **1983**, 161-172.
29. Kasztovszky, Zs.; Révay, Zs.; Belgya, T.; Szilágyi, V.; T. Biró, K.; Szakmány, Gy.; Gherdán, K. In Nuclear Techniques for Cultural Heritage Research, IAEA Publication, **in print**, pp. 133-143.
30. Friedel, O. MSc Thesis, Eötvös Loránd University, Budapest, 2008.
31. Szakmány, Gy.; Kasztovszky, Zs. *European Journal of Mineralogy* **2004**, *16*, 285-295.
32. Fűri, J.; Szakmány, Gy.; Kasztovszky, Zs.; T. Biró, K. In *Proceedings of 5th Workshop of the IGCP/UNESCO Project No. 442, Slovak Geol. Mag.*, Bratislava, 10, 1-2, **2004**, 97-104.
33. Szakmány, Gy.; Starnini, E.; Horváth, F.; Szilágyi, V.; Kasztovszky, Zs. *Őskoros Kutatók 6. Összejövetele* Kőszeg
34. Kasztovszky, Zs.; T. Biró, K. *Archeometria Műhely* **2004**, *1/1*, 9-15.
35. Markó, A.; T. Biró, K.; Kasztovszky, Zs. *Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hung.* **2003**, *54*, 297-314.
36. Kasztovszky, Zs.; T. Biró, K.; Markó, A.; Dobosi, V. *Archeometry* **2008**, *50*, 1, 12-29.
37. Gherdán, K.; Szakmány, Gy.; Tóth, M.; T. Biró, K. *Archeometriai Műhely* **2007**, *2007/2*, 21-32.
38. Kasztovszky, Zs.; Panczyk, E.; Fedorowicz, W.; Révay, Zs.; Sartowska, B. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **2005**, *265*, (2), 193-199.
39. Kasztovszky, Zs.; Visser, D.; Kockelmann, W.; Pantos, E.; Brown, A.; Blaauw, M.; Hallebeek, P.; Veerkamp, J.; Krook, W.; Stuchfield, H.M. *Il Nuovo Cimento C* **2006**, *30* (1), 67-78.
40. Kasztovszky, Zs.; Kunicki-Goldfinger, J. *Archeometriai Műhely* **2008**, *2008/V/3*, 51-58.

Provenance study of archaeological objects with Prompt Gamma Activation Analysis based on chemical properties

Prompt Gamma Activation Analysis (PGAA) has been applied for archaeometric studies since 1997 at the Institute of Isotope, HAS. Since then, it has developed to be a well established method for analyzing several types of archaeological objects (stone, ceramic, metal, glass) with relevant certainty. The main advantage of PGAA is that while it is suitable for multielemental (panorama) analysis, it can be regarded absolutely non-destructive because

of the relatively low intensity of the neutron beam. PGAA was tested from methodological point of view. The reliability of the method has been occasionally checked through proficiency tests and parallel measurements of archaeological samples with other methods (INAA, XRF and EMPA) as well. This paper reviews the main results of the archaeometric research by PGAA at the Department of Nuclear Research.