

INKRUSZTÁLT RÉGÉSZETI KERÁMIÁK VIZSGÁLATA MIKRO-IONNYALÁBOS MÓDSZEREKKEL

Sziki Gusztáv Áron
MTA ATOMKI

A Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézetében található Van de Graaff típusú részecskegyorsítón 1996 óta üzemelő nukleáris mikroszondával számos interdiszciplináris tudományterületen végzünk kutatásokat. A berendezés telepítése óta eltelt tíz évben geológiai [1], biológiai [2], anyagtudományi [3], régészeti [4] és aeroszolkutatási [5] témákban folytak vizsgálatok.

A nukleáris mikroszonda – amely elvi működése alapján ionmikroszkópnak tekinthető – néhány mikrométer átmérőjűre fókuszált töltött részecske-nyalábbal pásztázza a céltárgy felületét. A töltött részecskék és a minta atommagjai vagy az azokat körülvevő atomi elektronok között létrejövő kölcsönhatások során töltött részecskék, gamma- és röntgensugárzás hagyják el a mintát. Az említett részecskéket vagy sugárzásokat detektálva lehetőség nyílik a céltárgy elemi (magreakciók esetén esetlegesen izotópos) összetételének meghatározására. A pásztázás segítségével további információt nyerünk a vizsgált elemek laterális eloszlására vonatkozóan. A különböző analitikai technikákat általában a bombázó részecske és a detektált sugárzás/részecske fajtája szerint csoportosítják. Az alábbiakban ismertetett vizsgálatoknál a széles rendszám-tartomány ($6 \leq Z \leq 92$) analízisére alkalmas protonindukált röntgenemissziós (PIXE) és a könnyű elemekre igen érzékeny deutronindukált gamma-emissziós (DIGE) módszereket alkalmaztuk.

A továbbiakban a nukleáris mikroszonda széleskörű alkalmazásainak egy szeletként a Magyar Nemzeti Múzeummal közös régészeti tárgyú vizsgálatok kerülnek ismertetésre, melyek tárgyát Magyarország területén feltárt inkrusztált kerámiák képezik.

Az inkrusztáció mint díszítési eljárás

Az inkrusztáció olyan speciális eljárás, amelynek segítségével finoman díszített kerámiaedények készíthetők. A folyamat során az agyagedény felületéből finom mintákat metszenek ki, amelyekbe valamilyen fehér vagy színezett anyagot préselnek. Az agyagedény kiégetése után az így elkészített díszítések szilárdak, tartósak és igen dekoratívak lesznek (1. ábra).

Ezt a díszítési módot az őskor különböző időszakaiban, Magyarországon számos eltérő területen alkalmazták. Bizonyos kultúrákban, mint például a középső neolitikus Bükk-kultúra [6], vagy a középső bronzkori Mészbetétes edények népe [7] (amely nevét is az eljárás után kapta), a technikát nagyon széles körben használták, de használata ritkábban más kultúrákban is megjelenik [8, 9].

inkrusztáció lat 1. nemes anyagból készült berakásos díszítés (bútor, falborítás, ajtó stb.) felületén 2. tud kéregképződés, vmire ráakódott kéreg (Bakos Ferenc: *Idegen szavak és kifejezések szótára* – Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983., 371. oldal)

A nukleáris mikroszondán elvégzett vizsgálatok közvetlen célja a díszítések összetételének meghatározása volt. Emellett a felvett elemeloszlási térképek további, a díszítések szerkezetére vonatkozó információval szolgáltak. Az adatokból a különböző kultúrákban a díszítések elkészítéséhez használt anyagokra, eljárásokra következtethetünk.

Az inkrusztáció vizsgálata mikro-PIXE módszerrel

Az együttműködés keretében 20 darab régészeti kerámián végeztünk mikro-PIXE mérések. A 2. ábra a kerámiák magyarországi lelőhelyeit mutatja. Az 1. táblázatban látható a kerámiák lelőhelye és kora.

Méréseket végeztünk a kerámiák díszítéseiben, valamint az előlapok nem díszített részén és a hátlapokon. A különböző tartományokon mért elemkoncentrációkat összevetve eldönthető, hogy a díszítésekben kimutatott valamely elem a talajból felvett szennyező-e, vagy ténylegesen jelen van-e az inkrusztáció anyagában. Az inkrusztáció anyaga, és bizonyos esetekben a kerámiák alapanyaga is erősen heterogén, így egy-egy tartományon több mérést is végeztünk. A nyert elemi koncentrációkból számolható az elemek oxidos koncentrációja; az adatokat ebben a formában közlöm.

A 3. ábra az egyes mintaszámokhoz (1. táblázat) tartozó, a kerámiaminták előlapjain (nem díszített rész), hátlapjain és a díszítéseiben mért oxidos koncentrációkat mutatja néhány, a vizsgálatok szempontjából érdekes elemre. Az elemek kiválasztása a következő szempontok szerint történt:

- Ezen elemek mennyisége a díszítésekben szoros kapcsolatban van a kerámia lelőhelyével (így az ottani korabeli kultúrával), míg a többi elemnél a kerámia lelőhelye és az elemnek vagy oxidjának díszítésekben mért koncentrációja között nem volt kapcsolat.
- Régészeti feltételezés szerint bizonyos kerámiák díszítései csontot tartalmaznak. Ezt a feltevést igazolandó

1. ábra. Óskori mészbetétes kerámiaedény reprodukciója





2. ábra. A vizsgált kerámiák magyarországi lelőhelyei

vagy cáfolandó vizsgáltuk kalcium- és foszfortartalmukat. (A friss, nyers csont alapvetően egy ásványi (70–80 súly%) és egy szerves (20–30 súly%) összetevőből áll. Az ásványi összetevő túlnyomó része karbonát-hidroxi-apatit ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3)(\text{OH})_{2+x}$), míg a szerves összetevő kollagén.

• A szilícium és alumínium – szilícium-dioxid (SiO_2) és alumínium-oxid (Al_2O_3) formájában – a kerámiákban fő-összetevők, így e két elem mennyisége és eloszlása alapvetően jól tükrözi a kerámiák és díszítéseik szerkezetét.

A 4. ábra elemtérképeket mutat különböző lelőhelyeken feltárt kerámiákra.

Az ábrákon feltüntetett elemek oxidjainak díszítésekben mért koncentrációja és a kerámiák lelőhelye között szoros kapcsolat van, így az eredményeket lelőhely szerint csoportosítva ismertetem.

Kup és Vörs-Máriaasszonysziget: A 9–11., 15., 16. minták díszítéseinek magas kalcium-oxid- és foszfát-tartalma van (15–60 súly% és 10–30 súly%), amíg ugyanezen összetevők a minták elő- és hátlapjaiban csak elhanyagolható mennyiségben mutathatók ki (3. ábra). A 4. ábrán, a 16. mintához tartozó kalcium és foszfor elemtérképeken jól látható, hogy ezen elemek a díszítések ugyanazon részein összpontosulnak apró csomókat formázva. A 9–11., 15. minták díszítéseinek mindegyikét a 16.-hoz hasonló kalcium- és foszforeloszlás jellemzi, így megállapíthatjuk, hogy a Vörs-Máriaasszonyszigetről származó

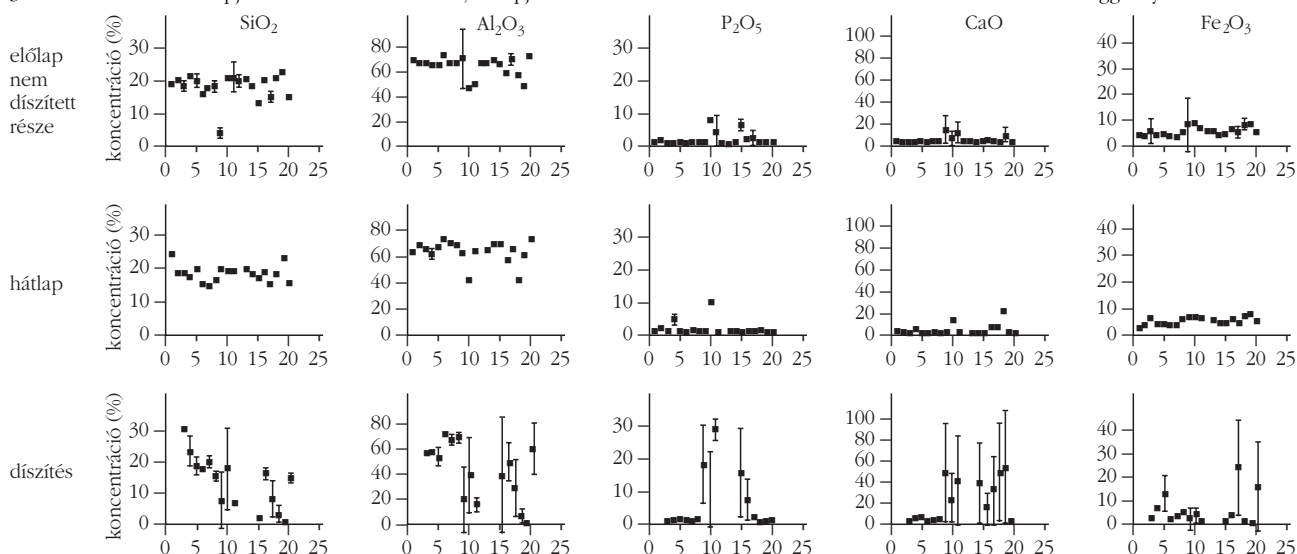
1. táblázat		
A vizsgált kerámiák lelőhelye és kora		
mintaszám	lelőhely	kor
1–8., 17., 20.	Baradla-barlang	középső neolitikum (ie. 5500–4500, Bükk-i kultúra)
9.	Kup	korai vaskor (ie. 800–600)
10–16.	Vörs-Máriaasszonysziget	késő rézkor (ie. 3500 – 3. évezred eleje, Kostolaci kultúra) és korai bronzkor (ie. 3. évezred eleje – ie. 2000, Kisapostag-kultúra)
18., 19.	Balatonfűzfő és Papkeszi	középső bronzkor (ie. 2000–1500, Mészbetétes edények kultúrája)

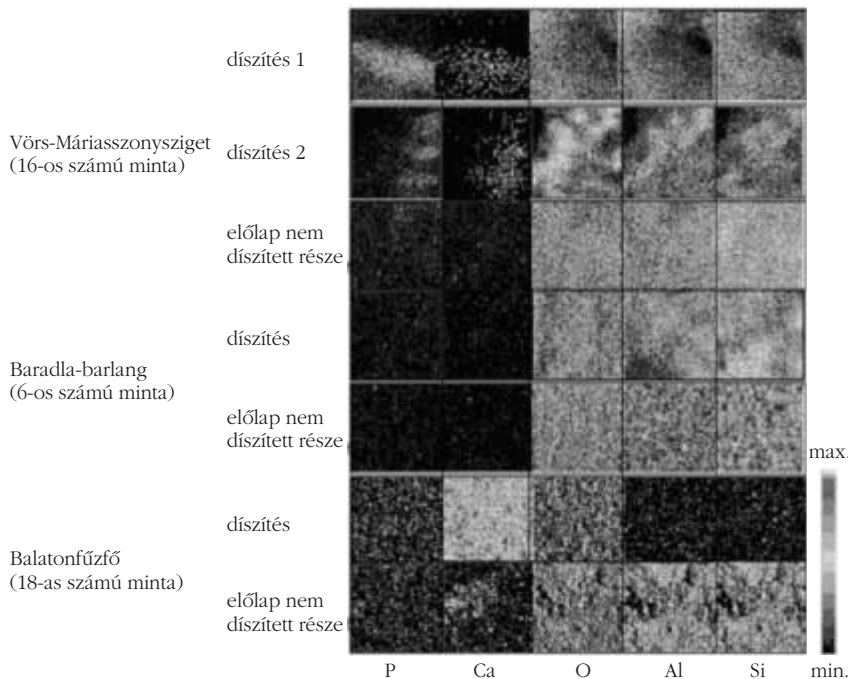
minták díszítéseinek belsejében apró (10–100 μm méretű), magas kalcium- és foszfortartalmú szemcsék találhatók. Ez a tapasztalat megerősíti azon részéti feltevést, miszerint a Vörs-Máriaasszonyszigetről származó kerámiák díszítései csontörlemény tartalmaznak.

Balatonfűzfő és Papkeszi: A 18. és 19. minták esetében a díszítések színe hófehér, és igen magas (50%) kalcium-oxid-tartalmuk van. Foszfor ezekben nem mutatható ki, így összetételük eltér a Vörs-Máriaasszonyszigetről származó kerámiák díszítéseinek összetételétől. A 3. ábra példaként a 18-as számú mintán felvett elemtérképeket mutat.

Baradla-barlang: A 3–8., 17., 20. kerámiák díszítései alacsony foszfor- és kalciumtartalmúak (kivéve a 17-es számú mintát, amelynek viszonylag magas kalciumtartalma van). Ezen díszítések szilícium-dioxid- és alumínium-oxid-tartalma jó közelítéssel megegyezik a kerámiák alapanyagáéval, ahogy a 3. ábrán látható. A magas alumínium-oxid- (60–70%) és szilícium-dioxid- (15–30%) tartalom azt mutatja, hogy ezen díszítések alapanyaga túlnyomó részben kaolin (alumínium-szilikát) és kvarc. A 17-es és 20-as számú minták díszítései – eltérően a többi

3. ábra. A kerámiák előlapjainak nem díszített részein, hátlapjaikon és díszítéseiken mért oxidos koncentrációk a mintaszámok függvényében ábrázolva.





4. ábra. Kerámiaminták díszítésein és előlapjaik nem díszített részén felvett elemterképek (pász-
tázott terület nagysága díszítéseken $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, nem díszített részeken $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$)

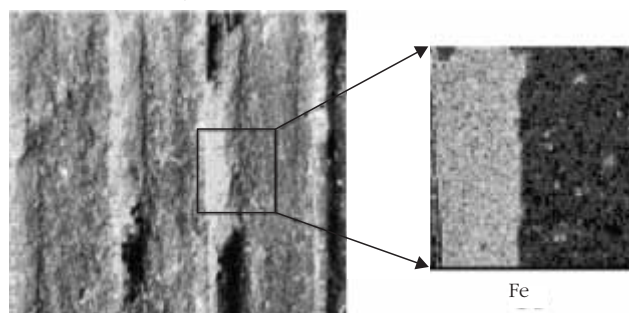
mintától – vörös színűek és magas vas-oxid- (hematit) tartalmuk van (~20%). A vörös szín oka feltételezésünk szerint a hematit. Az 5. ábrán egy, a 20-as számú minta felületéről készített optikai felvétel és a minta felületén felvett vas elemterkép látható.

Kiegészítő mérések a díszítéseken μ -DIGE módszerrel

Egy Vörs-Máriasszonyiszigetről származó kerámia esetében (16. minta), a μ -PIXE mérések kiegészítéseként, a kerámia díszítésein μ -DIGE mérések is történtek. A mérések célja annak a régészeti feltevésnek a megerősítése volt, hogy a Vörs-Máriasszonyiszigetről származó kerámiák díszítései csontörleményt tartalmaznak.

Mint fentebb szerepelt, a friss, nyers csont ~30 súly%-át egy speciális fehérje, a kollagén alkotja. A csont e szerves alkotója szén, nitrogén és oxigént főösszetevőként tartalmaz. Habár ennek a szerves alkotórésznek az aránya a csontokban az élőlény halála után idővel csökken, bizonyos mennyiség akár több ezer év elteltével is jelen lehet

5. ábra. A 20-as számú kerámia felületéről készített optikai felvétel és a minta felületén, a kijelölt négyzetben felvett vas elemterkép.



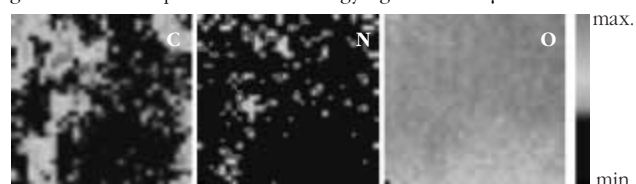
[10]. Reich és munkatársai [10] Párizs keleti részén feltárt körülbelül 6000 éves állati csontokat tanulmányoztak. Vizsgálataikból kitűnik, hogy a csontok talajjal érintkező részei kevesebb, míg belső, épen maradt részük több kollagént tartalmaz. Emellett a kollagéntartalom erősen függ a csontot a talajban körülvevő kémiai és biológiai környezettől. A fenti tényezőktől függően a csontleletek kollagéntartalma változik. Reichék a kollagéntartalommal szoros összefüggésben lévő nitrogéntartalomról szólnak, amelynek értéke az általuk vizsgált körülbelül 6000 éves őskori csontokban 0,2 és 3,5 súly% között változott. Természetesen oxigént és szenet – a karbonát-hidroxil-apatit elemi összetételéből adódóan – nemcsak a fenti szerves alkotórész, hanem a csont ásványi összetevője is tartalmaz. Az elmondottak alapján feltételezhető, hogy a szén, nitrogén és oxigén elemek felhasználhatók a csontörlemény kimutatására őskori kerámiákban. Valójában – mivel a díszítések egyéb összetevői (SiO_2 , Al_2O_3) szintén nagy mennyiségben tartalmaznak oxigént – erre a célra csak a szén és a nitrogén használható. A 6. ábra szén, nitrogén és oxigén elemterképeket mutat, a 16-os minta egyik díszítésében.

Az ábrán látható, hogy a díszítésekben a szén és nitrogén ugyanazon helyekre összpontosul, apró csomókat formázva. Ez nagyon hasonló a kalcium és foszfor esetében ugyanennek a mintának mikro-PIXE-vizsgálatánál tapasztaltakhoz.

Méréstechnikai okok miatt egy díszítés ugyanazon tartományáról nem tudunk egyszerre szén, nitrogén, kalcium és foszfor elemterképet felvenni (mivel nem tudunk egy időben PIXE- és DIGE-méréseket végezni). Így nem jelenthető ki egyértelműen, hogy ezek az elemek a díszítések ugyanazon részein összpontosulnak. Mindazonáltal a szén-nitrogén és foszfor-kalcium csomók együttes észlelése a díszítésekben tovább erősíti a feltevést, hogy a Vörs-Máriasszonyiszigetről származó kerámiák díszítései csontörleményt tartalmaznak.

Összefoglalva elmondhatjuk, hogy a μ -PIXE és μ -DIGE módszerek hatékony analitikai eszközök a kerámiadíszítések összetétel- és szerkezetvizsgálatához. A vizsgált kerámiák díszítései összetétele alapján három csoportba sorolhatók, mely csoportok jellemzőek a helyi őskori kultúrára.

6. ábra. A 16-os minta egyik díszítésén felvett szén-, nitrogén- és oxigéneloszlások. A pászta-
zított terület nagysága $100 \times 100 \mu\text{m}^2$.



Végezetül remélem, hogy e példa betekintést nyújt a mikro-ionnyalábos analitikai módszerek sokrétű felhasználásába, napjainkban szemléltetve azok szerepét.

Irodalom

1. I. UZONYI, GY. SZÖÖR, B. VEKEMANS, L. VINCZE, P. RÓZSA, GY. SZABÓ, A. SOMOGYI, F. ADAMS, Á.Z. KISS – Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy 59/10–11 (2004) 1717–1723
2. ZS. KERTÉSZ, Z. SZIKSZAI, E. GONTIER, P. MORETTO, J.-E. SURLÈVE-BAZELLE, B. KISS, I. JUHÁSZ, J. HUNYADI, Á.Z. KISS: Nuclear microprobe study of TiO₂-penetration in the epidermis of human skin xenografts – Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 231/1–4 (2005) 280–285
3. A. SIMON, G. KALINKA: Investigation of charge collection in a silicon PIN photodiode – Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 231 (2005) 507
4. I. UZONYI, R. BUGOI, A. SASIANU, Á.Z. KISS, B. CONSTANTINESCU, M. TORBÁGYI – Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 161–163 (2000) 748–752
5. ZS. KERTÉSZ, I. BORBÉLY-KISS, I. RAJTA, I. UZONYI, Á.Z. KISS – Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 161–163 (2000) 808–813
6. J. KOREK, P.A. PATAY: Bükki kultúra elterjedése Magyarországon (Die Verbreitung der Bükker Kultur in Ungarn) – Rég. Füz. Ser. II (1958) 2
7. G. BÁNDI: Adatok a mészbetétes edények népe É-dunántúli csoportjának történetéhez – A Janus Pannonius Múzeum Évkönyve, 1967.
8. M. WOSINSKY: Az őskor mészbetétes díszítésű agyagművészete – Budapest, 1904.
9. N. KALICZ, J. MAKKAY: Die Linenbandkeramik in der groben Ungarischen Tiefebene – Budapest, 1977.
10. I. REICHE, L. FAVRE-QUATTROPANI, C. VIGNAUD, H. BOCHERENS, L. CHARLET, M. MENU – Meas. Sci. Technol. 14 (2003) 1608

MÁGNESES INGÁK KÍSÉRLETI TANULMÁNYOZÁSA

Kaotikussá váló mechanikai síkmozgás egy példája

Bíró István

Bolyai Farkas Elméleti Líceum, Marosvásárhely
Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár

A kaotikus mozgás lehetőségét először *Henri Poincaré* fogalmazta meg, míg a sűrűlódásos rendszerbeli kaotikus attraktorhoz kapcsolódó viselkedést először *Edward N. Lorenz* meteorológus írta le [1, 2]. Arra a kérdésre, hogy mi is a káosz, a következő választ adhatjuk: a káosz nem rendetlenség, hanem egy mozgástípus, egyszerű rendszerek bonyolult időbeli viselkedése [3]. Míg a szabályos mozgást a periodikusság vagy ismétlődő jelleg, előrejelezhetőség (hosszú távon) jellemzi, a kaotikus mozgásra a szabálytalanság, előrejelezhetetlenség jellemző [4].

Ennek kimutatására vizsgáltam lézerdíóda és fotópapír segítségével egy erősen nemlineáris rendszert, a mágneses kaotikus ingát. Kísérletileg megvizsgáltam az inga kváziperiodikus és kaotikus viselkedését is, majd eredményeimet számítógépes szimulációval ellenőriztem.

A rendszer leírása

Közismert a matematikai ingát megközelítő fonálinga periodikus mozgása, amelynek periódusa csak a szál hosszától és a gravitációs gyorsulástól függ. Készítsünk most egy vastesttel rendelkező, hosszú szálú fonálingát, és tegyünk alá két mágneset úgy, hogy ezek közel legyenek a vasdarabhoz, de ne érhessenek hozzá [5], és középpontjaik egymástól d távolságra legyenek, valamint az inga nyugalmi helyzetben éppen a d távolság felénél legyen, a két mágnes között (1. ábra)!

A mágnesek hatása miatt ingánk szabad lengései annál inkább el fognak térni a fonálinga mozgásától [6] minél közelebb van a két mágnes a vastesthez. Meglepő azonban az a tény, hogy ha a kis testet egy kritikus távolságnál közelebb helyezzük a mágnesek síkjához, azonos kezdeti feltételek ellenére a rezgések időbeli lefolyása

különböző, sőt a távolságot tovább csökkentve végül teljesen össze-vissza fog lengeni a test. Azonos kezdeti feltételek alatt természetesen csak közel azonosakat értünk, mivel egy indítás feltételeit sosem lehet teljesen pontosan megismételni a berendezés pontatlansága miatt. (A jelen esetben két azonosnak mondott, egymás utáni indítás koordinátáinak egymástól legfeljebb ± 1 mm-rel való eltérését jelentheti.) A jelenség magyarázata a következő. A mágnesek annál erősebben vonzzák a vastestet, minél közelebb találhatók hozzá. A fellépő vonzóerők a vas és mágnes közti távolságtól nemlineárisan függenek. Az ilyen rendszereket adott kezdeti állapottól indítva, azonos időintervallumok eltelte után, erősen eltérő végállapotokban találjuk, ugyanis a parányi kezdeti feltételkülönbségek a mozgás során hamar és nagymértékben elhatalmasodnak.

Megjegyzem, hogy míg a hárommágneses inga ismert, tanulmányozott modell [7], a kétmágneses ingát még nem

1. ábra. Mágneses kaotikus inga mérési elrendezése: $l = 2$ m, $d = 0,14$ m, a mágnesek sugara 2,5 cm.

