

# Hidegneutronok alkalmazása elemanalitikai és magfizikai kutatásokban

*Belgya Tamás, Kasztovszky Zsolt, Kis Zoltán és Szentmiklósi László*

MTA Energiatudományi Kutatóközpont IKI, Nukleáris Analitikai és Radiográfiai Laboratórium  
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós u. 29-33, +36-1-392-2539

*Az MTA Energiatudományi Kutatóközpont üzemelteti a Budapesti Kutatóreaktort és a hidegneutron nyalábján létrehozott PGAA-NIPS mérőberendezést. E cikkünkben bemutatjuk a berendezést és néhány példát mutatunk be a berendezésen elért legfrissebb kutatási eredményeinkből. Az alábbi példákban a világon egyedülként megvalósított méréseket ismertetünk, amelyek során berendezésünkkel kiemelkedő kutatási eredményeket értünk el, így versenyképessé váltunk a nagyobb fluxusú hasonló mérőhelyekkel.*

## Bevezetés

1932-ben a Rutherford-vezette Cavendish laboratórium két nagyszerű magfizikai felfedezéssel lepte meg a világot. Ekkor hozta létre Cockroft és Walton az első magátalakítást mesterségesen gyorsított részecskével és fedezte fel Chadwick a neutron [1]. Két évvel később 1934-ben Fermi neutronbesugárással is létrehozta a mesterséges radioaktivitást. Hevesy 1936-ban végezte első neutronaktivációs analitikai méréseit [2]. Három év elteltével Hahn és Strassmann felfedezték az urán hasadását, amelynek felhasználásával 1942. december 2-án Fermi vezetésével beindították az első szabályozott láncreakcióval működő atomreaktort.

Hamarosan üzembe helyezték az első kutatóreaktorokat, az általuk szolgáltatott neutronokat az aktivációs analízisben, anyagszerkezet-vizsgálatokban, gyógyászati termékek előállításában és egyéb ipari besugárzás során hasznosítanak a leggyakrabban. A reaktorban keletkező nagyszámú hasadási neutron termikus energiára lelassítva tartják fenn a láncreakciót. Ezek egy részét – neutronnyaláb formájában – a reaktorból kivezelve anyagszerkezet kutatásra hasznosítanak.

A termikus neutronok a nyalábba helyezett minta anyagával kölcsönhatva rugalmasan szóródnak vagy sugárzásos neutronbefogási reakcióban vesznek részt. Ez utóbbi reakcióban az anyag atommagja erősen gerjesztett állapotba kerül, amelytől igen rövid idő alatt, leggyakrabban az ún. prompt (azonnali) gamma-sugárzás kibocsátásával szabadul meg. A kibocsátott gamma-sugárzást manapság nagyfelbontású germánium (HPGe) detektorral észleljük. A germánium detektor jeleit nukleáris elektronikával feldolgozva gamma-spektrumhoz jutunk. A spektrumban nagyszámú csúcs jelentkezik, amelyek energiája jellemző a mintában lévő elemekre, sőt azok izotópjaira is, a csúcsok nagysága pedig a mintában besugárzott atomok számával arányos. Ezzel a mérési módszerrel jellemezhetjük a minta

elemi- vagy izotópösszetételét, illetve vizsgálhatjuk az atommagok bomlási tulajdonságait. A módszerrel elvileg minden elem egyszerre mérhető (panoráma analízis), azonban elemenként jelentősen különböző kimutatási határok mellett.

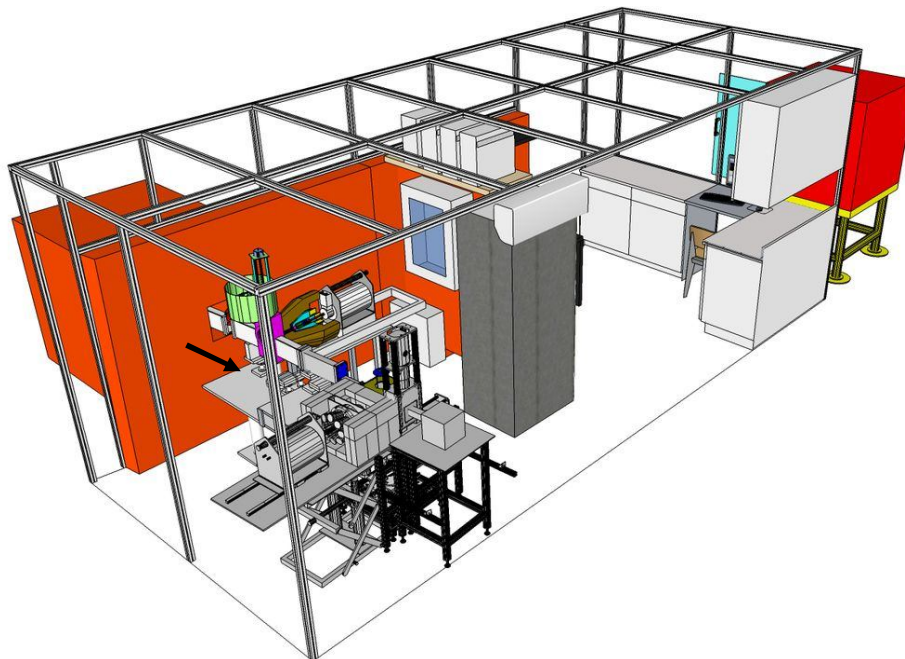
Az MTA Energiatudományi Kutatóközpont működteti a Budapesti Kutatóreaktort, amelynek hidegneutron nyalábján létrehozott Prompt Gamma Aktivációs Analitikai és Neutron Indukált Prompt-gamma Spektroszkópiai (PGAA-NIPS) mérőhelyén végezzük kutatásainkat. E cikk keretében bemutatjuk a kísérleti berendezésünket, kutatási területeinket és beszámolunk a legújabb eredményeinkről.

## A PGAA-NIPS berendezés

A PGAA-NIPS berendezés a 10 MW-os Budapesti Kutatóreaktor neutronvezető csarnokában található. 2000-ben a reaktor 10-es számú tangenciális csatornájában egy hidegneutron forrást helyeztek el [3], amely az 1993-ban rendszerbe állított három neutronvezetőhöz csatlakoztatva jelentősen megnövelte azok transzmisszióját.

A berendezéseknél tapasztalható reakciógyakorosság több mint tízszeresére nőtt, ez nagyobb részben az átvitel növekedésének, kisebb részben az anyagok hatáskeresztmetszet növekedéséből adódik [4]. A későbbi évek során a természetes-Ni-bevonatú neutronvezetőt szupertükrös neutronvezetőre cseréltük le az OMFb NAP VENEUS projektünk keretében. A neutronvezető görbített, ami nagyban hozzájárul a reaktor felől érkező sugárzás csökkentéséhez. A PGAA-NIPS mérőhely az 1-es számú neutronvezető végén, a reaktortól mintegy 35 m távolságban helyezkedik el. A mérőhelyet betonfalak és egy légkondicionálható fülke határolja körül a csarnokon belül.

A betonfalak a spektroszkópiai háttér és a személyzet sugárterhelésének csökkentését szolgálják (ld. 1. ábra).

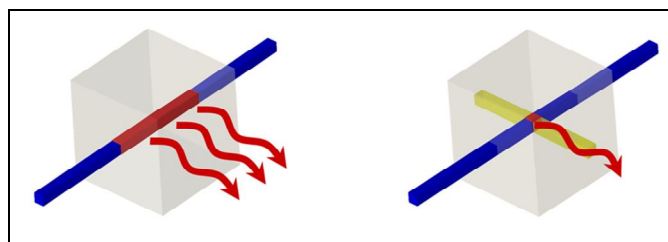


1. ábra: A PGAA-NIPS mérőhely rajza. A neutronok a betonfalon keresztül a jobb oldalon látható nyalábcspadáig balról jobbra haladnak (ld. nyíl).

A neutronvezetőhöz kettős nyalábzárát és egy fluxus monitort követően moduláris, alumínium falú repülési cső csatlakozik, amely a neutronokat a berendezéshez továbbítja. A fő nyalábzár ólomvédelemmel ellátott, dúsított  $^{10}\text{B}$ -ral töltött alumínium tokból áll, amelyet pneumatikus mozgatással lehet a nyaláb útjába helyezni, ezzel a nyalábot megállítani. Rögtön a zár után a nyalábot egy diafragmával két részre, alsó és felső részre osztjuk. Ezt kettős nyalábzár követi, amely a két műszer független működését biztosítja. E másodlagos nyalábzár számítógép segítségével programozható, így megvalósítható a nyalábok periodikus szaggatása, lehetővé téve a rövid felezési idejű (néhány szekundum) atommagok ciklikus aktiválását és bomlásuk mérését. A kettős nyalábzár és a repülési cső között egy ORDELA gyártmányú neutron monitor méri az áthaladó neutronok számát, amelyet a teljes reaktorciklus (10 nap) alatt akár másodperc pontosan monitorozhatunk és az adatokat számítógépen tárolhatjuk. A nyaláb egy vákuumozható repülési csőben a betonvédelemben lévő lyukon át jut be a mérőhelyre. A cső végén nyalábszaggató tárcsa helyezkedik el, amely néhány milliszekundumos ciklikus aktiválást és repülési időmérést tesz lehetővé.

A nyalábszaggatót a felső nyalábon egy újonnan felszerelt, programozható kollimátorváltó követi. Ezzel szabályozható a PGAA mérőhelyen a mintát érő neutronok mennyisége és a nyaláb geometriai mérete. Ezt újabb vákuumozható repülési cső követi, amely a beton védelemtől kb. 58 cm-re lévő PGAA mintakamrát is magában foglalja. Ezt a régi mintakamrát lecserélhetjük egy automata mintaváltóra sorozatminták esetén, mely teljesen különválasztja az alsó és a felső nyaláb vákuum terét is. A PGAA vagy magfizikai méréseket ezzel a kamrával, a felső nyaláb felhasználásával végezzük. A mérésekhez 27% hatásfokú HPGe detektoros, anti-Compton védelemmel és 10 cm-es ólom árnyékolással ellátott spektrométert használunk.

Az alsó nyaláb tovább folytatja útját az új NIPS mérőhelyig (170 cm-re a betonfaltól), amely az elmúlt év óta magában foglalja a Baross Gábor pályázaton elnyert NORMA elnevezésű neutron tomográfot. Az új mintakamrát úgy alakítottuk ki, hogy kb.  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  méretű tárgyakon ún. neutrontomográfiával kapcsolt PGAI (Prompt-Gamma Activation Imaging) méréseket is meg lehessen valósítani. Ez a kombináció, amely egyedülálló a világon, képessé tesz bennünket arra, hogy a tomográfiával a tárgy belsejében érdekesnek talált helyeken lokális elemvizést tudjunk végezni. A nyaláb, elhagyva a mintakamrát vagy a tomográfot, vagy egy repülési csőn át a nyalábcspadába jut. A tomográf tartozéka egy xyzω mintamozgató asztal, amellyel a tomográf képeket készíthetjük vagy a tárgyat olyan pozícióba juttathatjuk, amelyet egy radiográf vagy tomográf kép alapján érdekesnek vélünk. Leszűkítve a neutronnyalábot és a gamma-detektor kollimátor nyílását a tárgy egy kis térfogatának (ún. izotérfgat) elemi összetételét határozhatjuk meg, azaz PGAI mérést végezhetünk (2. ábra). Ez a térfogat a neutronnyaláb intenzitását figyelembe véve minimum  $2 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$  lehet. A gamma fotonok detektálását egy 23% hatásfokú HPGe detektoros, szintén Compton-elnyomós és ólomvédelemmel ellátott spektrométerrel végezzük.



2. ábra: A PGAI mérőrendszer elvi felépítési lehetőségei: húrgeometria (balra) ill. izotérfgat (jobbra).

## Kutatási területek

A PGAA-NIPS mérőrendszert úgy alakítottuk ki, hogy a legváltozatosabb mérési igényeket is kielégíthessük. Ez bizonyos esetekben a mérőhely teljes átalakítását jelenti. Jelenleg három fő területen végzünk kutatásokat:

- PGAA analízis
- Neutron radiográfia, tomográfia és a PGAI
- Magszerkezet és nukleáris adatok

A továbbiakban ezeket mutatjuk be a legújabb kutatási eredményeinken keresztül.

### PGAA analízis

Az alkalmazások egy jelentős részében kihasználjuk a módszer roncsolásmentes jellegét, azaz azt, hogy a neutronok nem okoznak károsodást az anyagban, továbbá mérés után a mintákat pár napig pihentetve indukált aktivitásuk dozimetriai szempontból biztonságos szintre csökken, így korlátozás nélkül tovább használhatók. Értékes anyagtudományi minták, nehezen oldatba vihető kőzetek, nagy eszmei értékű műkincsek esetén mintaelőkészítés és a minta károsításával járó mintavétel nélkül határozhatjuk meg így az összetételt. A minta méretének alsó korlátot szab a kimutathatóság, felső korlátja pedig az, hogy a vizsgálandó tárgy elférjen a mintatartó kamrában és ne nyelje el a neutronokat teljesen.

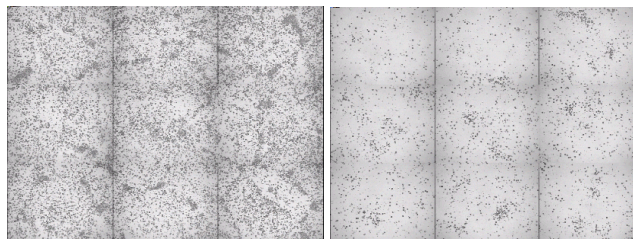
Az anyagtudományi alkalmazások között említhetjük grafének tisztaságvizsgálatát, reaktorgrafit minták szennyezőinek azonosítását, Pd- és Ti-alapú hidrogéntároló anyagokban a hidrogén mennyiségi mérését, a nukleáris iparban is használt cirkónium ötvözetek összetétel-meghatározását és hordozós katalizátorok analízisét. A geológiai minták közül talajok, vulkanikus kőzetek, mészkövek, ásványok vizsgálhatók.

Más esetekben a neutronnyaláb és a nagyenergiájú gamma fotonok nagy áthatolóképességét kihasználva információt nyerhetünk egy minta vagy egy nyalábbba helyezett eszköz belsejéből, akár működés közben. Ennek egyik példája csempészt hasadóanyag azonosítása és mennyiségi becslése, az azt tartalmazó árnyékoló tok felnyitása nélkül, amely akár a hatóságok által hasadóanyag-tartalom gyanújával esetlegesen lefoglalt mintákra is alkalmazható.

A PGAA egyik legsikeresebb alkalmazása a katalitikus reaktor belsejében lezajló kémiai reakció in situ követése, a Fritz Haber Intézet és a kutatóközpontunk (korábban Izotópkutató Intézet) együttműködésében valósult meg. Két iparilag fontos kémiai reakció mechanizmusát és preferált reakciókörülményeit sikerült így feltárni: szénhidrogének parciális hidrogénezési reakcióját (pentin penténné (és nem pl. pentánná) alakítása) [5,6] és az ipari melléktermékként keletkező sósav klórgázzá történő visszaalakítását (Deacon-reakció) [7]. Előbbi a műanyaggyártásban jelentős, utóbbi pedig a környezettudatos és energiatakarékos gyártástechnológiában jelenthet előrelépést.

A PGAA módszer csaknem egyedülálló előnyökkel bír a bór meghatározásában, a  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  magreakció nagy hatáskeresztmetszete révén képes a bór detektálására már néhány ppm esetén is. A Braunschweigi Műszaki Egyetemmel együttműködésben szélsőséges körülmények között is használható Co-Re ötvözetek (ún. superalloy)

összetételét és bórtartalmát határoztuk meg [8]. Ezen polikristályos ötvözetek erősítésére és a hajlékonyságának növelésére bórt adagolnak az alapötvözethez, amelyről Ni mátrixban kimutatták, hogy a szemcsehatárokon dúsul fel. Hasonló effektust kerestünk a Co-Re ötvözeteknél is. Egy mintasorozat készült 50-1000 ppm közötti bórtartalommal a hozzáadott bór hatásának szisztematikus vizsgálatára. Mivel a bór illékony, a feltételezések szerint a bemért mennyiségnél kevesebb épül be az anyagba. A kvantitatív analízishez a PGAA módszert használtuk, míg a bóreloszlás feltérképezésére az öntvényből metszeteket készítettek és azokat szilárdtest nyomdetektorokkal együtt sugároztuk be. A nyomdetektorokat besugárzás után forró NaOH-al marattuk, majd optikai mikroszkóppal fényképeztük le. Ebben a mintában az alfa-részecskék egyetlen forrása a  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  magreakció, azaz a kapott nyomok a bór felszínközeli eloszlását mutatják. Az eredmények igazolták az inhomogén bór eloszlást és annak koncentrációfüggését is.



3. ábra: Hozzáadott bórt tartalmazó (bal oldali ábra) és nem tartalmazó (jobb oldali ábra) ötvözetek bórtartalmának leképezése. A baloldalon látható hosszúkács struktúrák jelzik a szemcsehatárokon feldúsuló bórt.

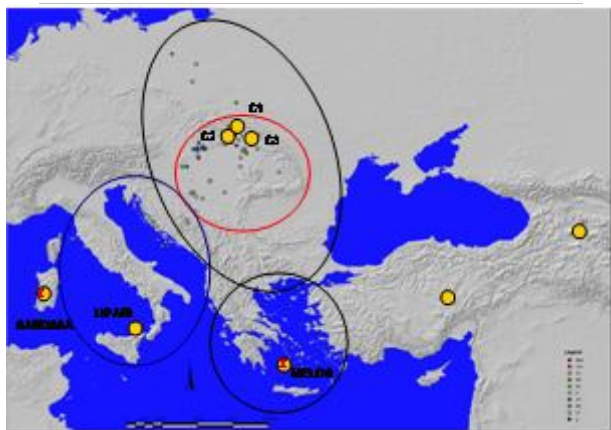
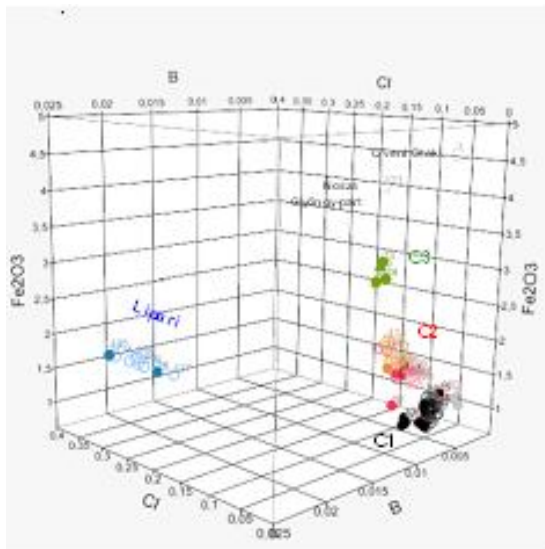
A roncsolásmentesség kritériuma kiemelkedő jelentőséggel bír az archeometriai kutatások mindennapos gyakorlatában, amikor kulturális örökségünk tárgyi emlékeit (szobrok, festményeket, kő-, fém-, kerámia-, üveg régészeti leleteket, történelmi kéziratokat) vizsgáljuk természettudományos módszerekkel. Ezt a tényt felismerve kezdtük kidolgozni a PGAA alkalmazhatóságát különböző anyagú műtárgyak elemzésére mintegy 15 évvel ezelőtt.

Az archeometriában felvetett kérdések a következő fő témakörökbe sorolhatók: kormeghatározás; leletek eredetének meghatározása (idegen szóval proveniencia vizsgálat, ide tartozik a nyersanyag eredetének meghatározása, vagy a készítés helyének, a műhelyeknek az azonosítása); készítési technológiákra, ill. a tárgyak használatára vonatkozó vizsgálatok. Tágabb értelemben az archeometriához tartozik a műtárgyak eredetiségének megállapítása, valamint az állagmegóvást célzó kutatások. A kérdéseket általában a humán tudományok művelői, régészek, múzeológusok, restaurátorok, műgyűjtők teszik fel a természettudósoknak. A következőkben egy esettanulmányt mutatunk be újabb eredményeink közül. Ebben az őskorban pattintott kőeszközök nyersanyagaként kedvelt obszidián elterjedését vizsgáltuk a közép-európai és mediterrán térségben. Az obszidián eredetére jellemző „ujjlenyomat”-szerű fő- és nyomelemeket határozzuk meg. Mivel az obszidián homogénnek tekinthető vulkáni üveg, a besugárzott térfogat átlagos összetételét adó „bulk” PGAA a célnak megfelelő módszer [9, 10].

Az obszidián az őskorban különböző őskori eszközök (nyílhegyek, pengék, stb.) kedvelt nyersanyaga volt. Fő európai nyersanyagforrásait már régóta ismerik a kutatók [11]. A mediterrán források (Szardínia, Lipar, Melosz) mellett

az ún. Kárpáti obszidián, és ennek C1, C2 és C3 változata a legelterjedtebb a térségben. A C1 és C2 típus a Tokaj-hegység szlovák, ill. magyar oldalán, a C3 típus Kárpátalja területén található meg mind a mai napig. Számos korábbi sikeres tanulmány foglalkozott az obszidián műtárgyak eredetvizsgálatával az elemösszetételük alapján. Elsősorban INAA és XRF módszereket alkalmaztak, amelyek valamilyen mértékben roncsolták a tárgyakat.

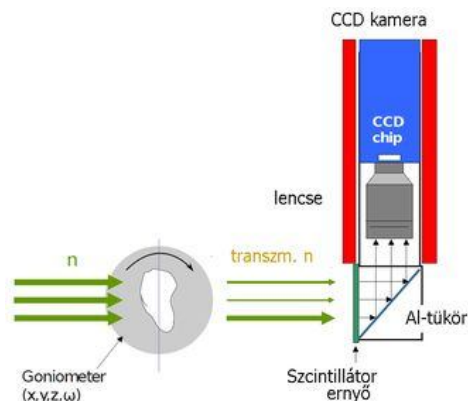
A Magyar Nemzeti Múzeummal és külföldi régészekkel együttműködve több, mint 140 régészeti leletet és geológiai referencia mintát vizsgáltunk meg PGAA-val, Magyarország, Románia, Szerbia, Horvátország, Bosznia-Hercegovina, Lengyelország, Ukrajna, Olaszország, Görögország, Törökország területéről. Azt találtuk, hogy a PGAA-val mérhető fő (H, Na, K, Mn, Fe, Si, Al, Ti, Ca)- és nyomelemek (B, Cl, Sm, Gd, Nd) közül az alkáliák (Na és K), a Fe, ill. a más módszerrel nem, vagy rosszul mérhető B és Cl jól használható a minták eredet szerinti csoportosítására. PGAA-val jól el tudtuk különíteni a Kárpáti obszidiánok három csoportját, valamint a különböző mediterrán lelőhelyekről származó mintákat, ezáltal igazolni tudtuk a magyar, horvát, szerb, bosnyák, román és lengyel lelőhelyeken talált régészeti anyag eredetét. A horvát és bosnyák régészeti leletek között egyértelműen meg tudtuk különböztetni a Tokaj-hegységből, ill. a Lipari szigetéről származó nyersanyagból készültet. A lehetséges mediterrán nyersanyagforrások közül ugyanakkor ki tudtuk zárni Sardiniát és Melost.



4. ábra: A vizsgált obszidián minták háromdimenziós elemeloszlás szerinti csoportosulása (felső ábra), a PGAA vizsgálatok szerinti lelet eloszlása a térképen (alsó ábra).

## Neutron radiográfia, tomográfia és a PGAI

A mintán áthaladó neutronnyaláb gyengülésén alapuló neutronradiográfia/tomográfia a tárgyak valódi 2D/3D-s képkalkotására alkalmas módszer. A mérőrendszer működésének alapelve az 5. ábrán követhető. A neutronnyaláb útjába helyezett tárgyon áthaladó neutronokat ún. szcintillációs ernyővel látható fénné konvertáljuk (vetületi kép), amelyet egy igen érzékeny CCD chipet alkalmazó kamerával digitalizálunk (1024×1024 pixel, 16-bites szürkeárnyalati skála). A transzmissziós kép előnyös pl. a hasonló rendszámú elemekből felépülő részek elkülönítésére (amelyek röntgenradiográfiával nem adnak megfelelő kontrasztot), ill. sok esetben a szerves anyagot tartalmazó tárgyak megjelenítésére (a nyalábgyengülés a hidrogéntartalom miatt számottevő). A kép kémiai elemek azonosítására azonban csak korlátozottan alkalmas.

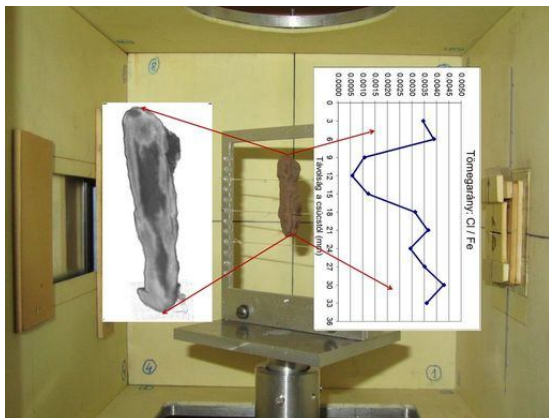


5. ábra: A neutronradiográf/tomográf elvi felépítése

Speciális berendezéssel a jelenleg elérhető legjobb térbeli felbontás kb. 25  $\mu\text{m}$  [12], míg a NORMA esetén ez az érték 220 - 500  $\mu\text{m}$  között változik a tárgy és a szcintillátor ernyő közötti távolság függvényében. A vetületi képeken a belső felépítés tehát nagy pontossággal jeleníthető meg, ezáltal láthatóvá válnak a kutató szempontjából érdekes részletek, és azok kijelölhetők a további vizsgálatokhoz [13]. Amennyiben a kijelölt részekhez hozzákapsoljuk a pontos térbeli koordinátáikat, a későbbiekben e részek a minta mozgatásával a kollimált neutronnyaládba vihetők és elemi összetételük meghatározható. A neutronos leképezés nyújtotta előnyöket kihasználva a PGAI vizsgálat a teljes minta pásztázása helyett csak a kijelölt területekre koncentrálható, így ezeken a területeken a rendelkezésre álló korlátozott mérési idő alatt pontosabb elemi összetétel határozható meg.

A PGAI vizsgálat sikerrel alkalmazható az archeometriai kutatásokban is. Egy jó példa az archeometriai alkalmazásokra római kori vasszegek korróziós állapotának felmérése. A vizsgálatok során, a tömbi analízisen túlmenően meghatároztuk a korrózióért felelős klór vashoz viszonyított tömegarányának változását a szegek hossz tengelye mentén. Ennek egy példája a 6. ábrán látható, amely bemutatja a CPF08\_62 kódjelű szegről (Cardiffi Egyetem) készült tomográfias felvétel egy metszetét, magát a mintakamrában elhelyezett szeg, ill. a vízszintes (2×20 mm nyílású) neutron kollimátorral felvett PGAI eredményeket. Ezen roncsolásmentes vizsgálatok megmutatták, hogy a szeg a csúcsától számítva 9-15 mm között, ill. 24-27 mm között a kevésbé korrodált. Az eredmény összhangban van a tomográfias kép metszetén látható információval. Itt ugyanis most a sötétebb terület felel meg a neutronokat kevésbé

elynelő közegnek, vagyis ebben az esetben a nagyobb vastartalmú, kevésbé korrodált közegnek. Eredményeink alapján a konzervátorok kiválaszthatják a leletek számára legmegfelelőbb állagmegóvási technikát.



6. ábra: A CPF08\_62 szeg NORMA mintakamrában készült tomográfiai képének egy metszete és PGAI mérésének eredményei.

Mint korábban említettük egy minta teljes pásztázása általában nem célszerű, sőt sok esetben nem is valósítható meg. Vannak azonban esetek, amelyek indokoltá tehetnek ilyen jellegű vizsgálatokat. Ide tartoznak az ún. homogenitásvizsgálatok, melynek során pl. egy felület befedettségének egyenletességét ellenőrizhetjük.

Az EU-JRC IRMM (Geel, Belgium) intézete referenciaanyagok előállításával, jellemzésével foglalkozik. Innen származik az az 50 mm átmérőjű rozsdamentes acél hátlapon 38 mm átmérőjű bórreteggel bevont minta, amelynek  $^{10}\text{B}$  névleges felületi sűrűsége  $30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  volt. A mérések során a minta síkja  $30^\circ$ -os szöget zárt be a nyalábhoz képest, ezért a  $2,5 \times 5 \text{ mm}^2$  neutronkollimáció projekciója  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  vetületet képezett a bórral bevont felületen.

A gyártási folyamatot ismerve feltételezhető, hogy a rétegvastagság inhomogenitása radiális irányban változik. Ezért a középvonal mentén egymással közvetlen szomszédságban végeztünk pásztázásos méréseket 7 pontban. A 0,25%-os statisztikai pontosság elérése megkövetelte, hogy a mérések hossza 18000 sec legyen. A 7. ábrán látható eredmények szerint a bórreteg vastagsága a középponttól radiális irányban csökken. A széleken mintegy 1,5 %-kal kevesebb bór található. A mérés fontosságát az adja, hogy a  $^3\text{He}$  készletek kimerülése folytán a neutronok érzékelésére szánt detektorokban a jövőben egyre inkább bórreteggel bevont felületeket kívánnak alkalmazni.



7. ábra: Az EU-JRC IRMM Bo920626\_H4 minta PGAI mérésének eredményei. A  $^{10}\text{B}$  névleges felületi sűrűsége  $30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ .

## Magszerkezet és nukleáris adatok

A magszerkezeti, nukleáris és metrológiai adatok mérésének a PGAA kutatásokat megelőző hagyományai vannak a csoportunknál. Valójában erre alapozva indultak meg Molnár Gábor vezetésével az analitikai kutatások, lehetővé téve annak szakszerű fejlesztését. A kutatások egyik alapja a PGAA analízishez nélkülözhetetlen  $(n,\gamma)$  adatbázis és a spektrumkönyvtár, amely tartalmazza csaknem az összes stabil elem parciális gamma-kibocsátási hatáskeresztmetszetét. Az adatbázis adatainak a mérését a PGAA mérőhelyünkön végeztük. Az adatbázis - Richard B. Firestone-nal közösen végzett - analízisével sikerült az adatokat az elemek izotópjaihoz is hozzárendelni. Az adatokat először egy könyvben [14], később a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség által koordinált munka eredményeként egy újabb kiadványban hoztuk nyilvánosságra [15], amely új néven: „Evaluated Gamma-ray Activation File” (EGAF) szerepel a szakirodalomban [16]. Ezeket az adatokat megjelenése óta a magfizika, nukleáris asztrofizika és energetika, orvosi és sugárvédelmi feladatok esetében használják. Így pl. külön programot indított a Lawrence Livermore National Laboratory az adatok Monte Carlo programokba történő átvételére [17].

Az adatok megjelenése óta az adatbázis fejlesztésén és pontosításán, a nukleáris hulladékkezelésben fontos instabil atommagok adataival való bővítésén, ill. az adatok felhasználásával magfizikai problémák megoldásán dolgozunk. A továbbiakban ezek eredményei közül mutatunk be egy területet. Az atommagok radiatív (gamma-sugárzásos) neutronbefogási hatáskeresztmetszetének (NBHK) minél pontosabb meghatározása fontos kérdés a nukleáris energetika számára, amely megoldásokat keres a nukleáris hulladékkezelés problémájára. A tervek között szerepelnek a IV. generációs reaktorok és szubkritikus gyorsító berendezések, amelyek kevesebb és kisebb radiotoxicitású hulladéktermelés mellett termelnek energiát, miközben a hagyományos reaktorokban keletkező hulladékot kevésbé ártalmas hulladékká alakítják át. A tervezéshez rendszerint sokkal pontosabb NBHK értéket kívánnak, mint ami az irodalomban megtalálható. A NBHK mérésre számos módszer ismert, de mindegyiknek megvan a maga Achilles-sarka (olyan szisztematikus hibalehetőség, amelyet nehéz kiküszöbölni). Az elmúlt néhány évben módszereket dolgoztunk ki NBHK meghatározására az általunk alkalmazott PGA vagy  $(n,\gamma)$  módszerre [18-20]. A módszereket alkalmazva és azok korlátait megismerve pontosabb, vagy a korábbiaktól független NBHK-eket határoztunk meg számos atommagra ( $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{235,238}\text{U}$ , Te-izotópok, Pd-izotópok,  $^{209}\text{Bi}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{77}\text{Se}$ ), melyek bibliográfiája a legújabb összefoglaló cikkünkben található meg [21]. A nukleáris modellszámítások fontos alapeleme az ún. gamma erősségfüggvény, amely az átlagos gamma-átmeneti valószínűséget határozza meg. Régóta fennálló kérdés, hogy mi a kapcsolat az óriás rezonanciák és az alacsony energiás átlagos átmeneti valószínűségek között, továbbá hogy a rezonancia fluoreszcenciából nyert átlagos átmeneti valószínűségi adatok milyen kapcsolatban állnak a neutronbefogásos adatokkal. Egyik legfrissebb cikkünkben megállapítottuk, hogy a két mérés eredményei leírhatók ugyanazzal az erősségfüggvénnyel [22]. Legújabb statisztikus modellszámításaink, amelyek a gamma erősségfüggvényen alapulnak, lehetővé teszik a NBHK pontosabb megadását szimulálva azokat a gamma-átmeneteket, amelyek a kvázi-

kontinuumba esnek és ezért a hagyományos csúcshillesztési eljárással nem kiértékelhetők. Ezek a számítások néhány esetben az alacsonyenergiás nívóséma korrekciójára is lehetőséget adnak [23]. Legújabb terveink között a gamma-spektrumok teljes dekonvolúciója szerepel, amely lehetővé teszi a NBHK meghatározását a súlyozott parciális hatáskeresztmetszetekből, figyelembe véve a kvázi-kontinuumot is. Az így kapott spektrumok közvetlenül beépíthetők a Monte Carlo programokba is.

## Összefoglalás

A cikkben bemutatjuk az MTA Energiatudományi Kutatóközpontban működő PGAA-NIPS mérőberendezést és válogatást adtuk a legfrissebb kutatási eredményeinkből a PGAA analízis, a neutron radiográfia, tomográfia, a PGAI, magszerkezet és nukleáris adatok területéről.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondunk a munkánkat támogató, EU FP6 ANCIENT CHARM No. 15311, EU FP6 EFNUDAT No. 036434, EU FP7 ERINDA No. 269499, EU FP6 és FP7 NMI3 No. 283883, EU FP7 CHARISMA No. 228330 projektnek, továbbá a hazai NAP VENEUS OMF 00184/2006, a Baross Gábor REG-KM-09-1-2009-0007 és az OTKA K-100385 projekteknek.

## Irodalomjegyzék

- [1] Simonyi K.: *A fizika kultúrtörténete*, Gondolat kiadó, 2. kiadás, 1981.
- [2] Vértes A.: *Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből*, szerk. Vértes A., Akadémiai Kiadó, 2009.
- [3] L. Rosta, T. Grósz, T. Hargitai: *Liquid hydrogen cold neutron source in operation at the Budapest Research Reactor Appl. Phys. A-Mater. Sci. Process.* 2002, 74, S240–S242
- [4] Rosta, L., L. Cser, Zs. Révay.: *Gain Factors with the New Supermirror Guide System at the Budapest Neutron Centre. Appl. Phys. A-Mater. Sci. Process.* 2002, 74, S292–S294
- [5] Teschner, D., J. Borsodi, et al.: *The roles of subsurface carbon and hydrogen in palladium-catalyzed alkyne hydrogenation*, *Science* 2008, 320, 5872, 86–89.
- [6] M. Armbrüster, K. Kohnir, M. Friedrich, D. Teschner, G. Wowsnick, M. Hahne, P. Gille, L. Szentmiklósi, M. Feuerbacher, M. Heggen, F. Girgsdies, D. Rosenthal, R. Schlögl, Yu. Grin.: *Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub> as a low-cost alternative for palladium in heterogeneous hydrogenation*, *Nature Materials*, 10 June 2012, 3347 (doi:10.1038/nmat3347)
- [7] D. Teschner, R. Farra, L. Yao, R. Schlögl, H. Soerijanto, R. Schomäcker, T. Schmidt, L. Szentmiklósi, A.P. Amrute, C. Mondelli, J. Pérez-Ramírez, G. Novell-Leruth, N. López: *Journal of Catalysis*, (2012) 285 273–284
- [8] D. Mukherji, J. Rösler, M. Krueger, M. Heilmaier, M.-C. Böhlitz, R. Völkl, U. Glatzel and L. Szentmiklósi: *Scripta Materialia* 2012, 66 60–63
- [9] Zs. Kasztovszky, K.T. Biró: *Fingerprinting Carpathian obsidians by PGAA: first results on geological and archaeological specimens*, in *Proceedings of 34th International Symposium on Archaeometry*, Zaragoza, 2006, pp. 301-308.
- [10] Zs. Kasztovszky, K. T. Biró, A. Markó, V. Dobosi, *Cold neutron prompt gamma activation analysis – a non-destructive method for characterization of high silica content chipped stone tools and raw materials*, *Archaeometry*, 2008, 50, 1, 12-29.
- [11] O. Williams-Thorpe: *Obsidian in the Mediterranean and the Near East: A provenancing success story*, *Archaeometry* (1995), 37, 2, 217-248
- [12] Lehmann, E.H. et al.: *The micro-setup for neutron imaging: A major step forward to improve the spatial resolution*, *Nucl. Instr. and Meth.* 2007, A576, 389–396.
- [13] Kis Z., Belgya T., Szentmiklósi L., Kasztovszky Zs.: *Műtárgyak roncsolásmentes vizsgálata neutronokkal – az EU Ancient Charm Projekt.*, *Fizikai Szemle*. 2011 LXI 235–239.
- [14] Molnár, G.L., ed.: *Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams.*, Kluwer Academic Publisher Dordrecht, Boston, London: Budapest, 2004, pp. 1-423
- [15] Choi, H.D., R.B. Firestone, R.M. Lindstrom, G.L. Molnár, S.F. Mughabghab, R. Paviotti-Corcuera, Z. Révay, A. Trkov, V. Zerkin, and C. Zhou: *Database of prompt gamma rays from slow neutron capture for elemental analysis: International Atomic Energy Agency*, Vienna, 2007, 1-251
- [16] Firestone, R.B., G.L. Molnár, Z. Révay, T. Belgya, D.P. McNabb, and B.W. Sleaford: *The Evaluated Gamma-ray Activation File (EGAF)*, 10th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. September 26 - October 1, 2004, Santa Fe, New Mexico, API (2005), pp. 219-224
- [17] Sleaford, B., N. Summers, J. Escher, R. Firestone, S. Basunia, A. Hurst, M. Krticka, G. Molnar, T. Belgya, Z. Revay, and H. Choi: *Capture Gamma-ray Libraries for Nuclear Applications*, *J. of Korean Phys. Soc.*, 2011, 59, (2), 1473-1478
- [18] Belgya, T., P. Schillebeecx, and A. Plompen: *Neutron Measurements, Evaluations and Applications*. 2008. Prague, Czech Republic, 16-18 October 2007, JRC Scientific and Technical Reports, EUR 23235 EN: European Communities, 2008 p. 31-34
- [19] Belgya, T.: *New gamma-ray intensities for the N-14( $n,\gamma$ )N-15 high energy standard and its influence on PGAA and on nuclear quantities*, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2008, 276, (3), 609-614
- [20] Belgya, T.: *EFNUDAT Slow and Resonance Neutrons, a Scientific Workshop on Nuclear Data Measurements, Theory and Applications*, 23-25 September 2009 Budapest, Hungary: II-HAS 2010, pp. 115-120
- [21] Belgya, T.: *Prompt Gamma Activation Analysis at the Budapest Research Reactor Physics Procedia*, 2012 31, 99-109
- [22] Schramm, G., R. Massarczyk, A.R. Junghans, T. Belgya, R. Beyer, E. Birgersson, E. Grosse, M. Kempe, Z. Kis, K. Kosev, M. Krticka, A. Matic, K.D. Schilling, R. Schwenger, L. Szentmiklósi, A. Wagner, and J.L. Weil: *Dipole strength in  $^{77}\text{Se}(n,\gamma)$  and  $^{78}\text{Se}(\gamma,\gamma')$  experiments*, *Physical Review C*, 2012, 85, 014311
- [23] Krticka, M., R.B. Firestone, D.P. McNabb, B. Sleaford, U. Agvaanluosan, T. Belgya, and Zs. Revay: *Thermal neutron capture cross sections of the palladium isotopes*, *Physical Review C*, 2008, 77, (5), 054615