

NEUTRONOKKAL ÉS RÖNTGENSUGÁRZÁSSAL

A BUDAPESTI NEUTRON CENTRUMBAN

Szentmiklósi László, Kis Zoltán, Belgya Tamás, Maróti Boglárka, Horváth László Zoltán, Papp Mariann
MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Nukleáris Analitikai és Radiográfiai Laboratórium

A radiográfia („rajzolj a sugárzással”) direkt és roncsolásmentes képalkotási technika, ahol a tárgyon átbocsátott sugárnyaláb módosulásának érzékelésével a tárgy egy vetületi képét kapjuk, így a láthatatlan sugárzás és az anyag kölcsönhatása egy megfelelő detektor segítségével az emberi szem számára is megjeleníthető képpé alakul. Több irányú vetület és matematikai algoritmusok segítségével előállíthatjuk a tárgy háromdimenziós képét, a tomogramot [1].

A vizsgált objektumok belső szerkezetének minél informatívabb roncsolásmentes ábrázolásához esetenként többféle, az anyag mélyébe hatoló, azonban azzal egymáshoz képest eltérő módon kölcsönható sugárzástípusot (termikus, gyors vagy hideg neutron, gamma, röntgen, THz) érdemes használni (multi-modality imaging).

Az MTA Energiatudományi Kutatóközpont és az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont konzorciuma, a Budapesti Neutron Centrum (BNC) koordinálja a Kutatóreaktornál folyó tudományos és szolgáltató tevékenységet. A Kutatóreaktor, a köré szerveződött mérőhelyekkel együtt, az egyik legjelentősebb kutatási infrastruktúrának számít hazánkban, sőt Közép-Európában is. A BNC ad otthont két neutronos képalkotó mérőállomásnak (RAD és NORMA néven), amely a hazai és nemzetközi tudományos közösség, valamint az ipari K+F projektek számára is elérhető nyílt kutatási infrastruktúra (1. ábra).

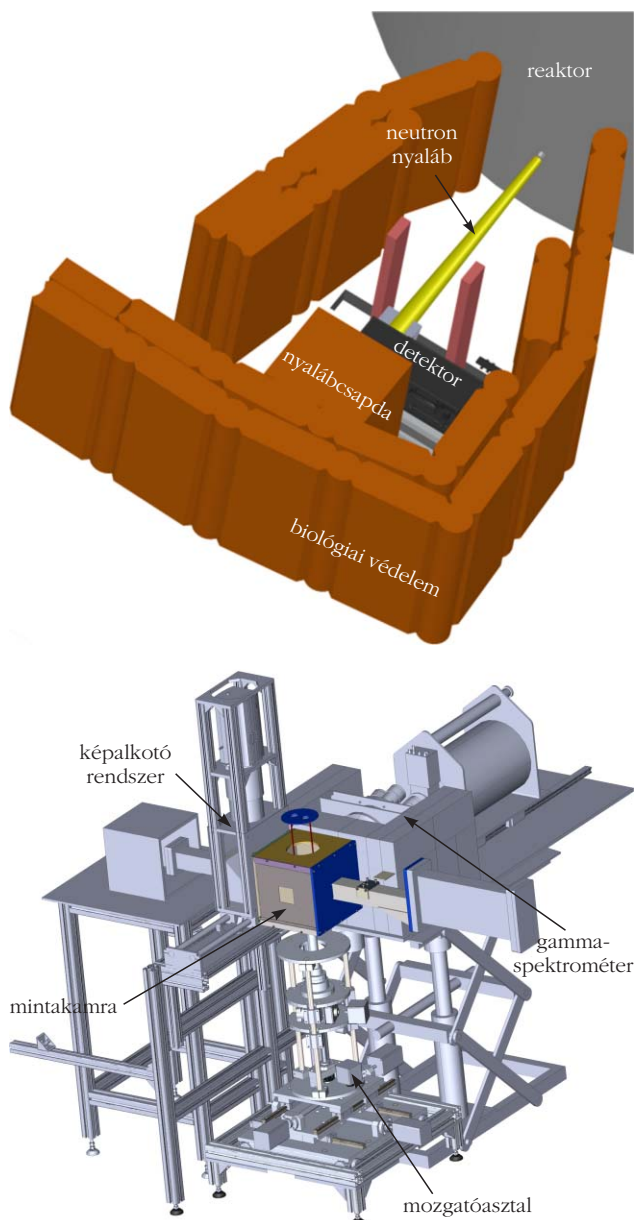
A 2. számú radiális nyalábra telepített RAD berendezésen statikus vagy dinamikus képalkotás végezhető neutron- és röntgensugárzással, akár 20 cm-es látómező és masszív mintamanipulátor segítségével. A mérőhely a közelmúltban a digitális képrögzítés és a tomográfia képességeivel bővült [2].

A NORMA berendezés pedig világszinten is egyedülálló eszköz, amelyben a neutronos képalkotási és a sugárzásos neutronbefogáson alapuló elemanalitikai technika egy készülékbe van integrálva annak érdekében, hogy láthatóvá tegyük a heterogén tárgyak

belső szerkezetét és a kiválasztott pontokban meghatározzuk ezen részek lokális elemösszetételét [3].

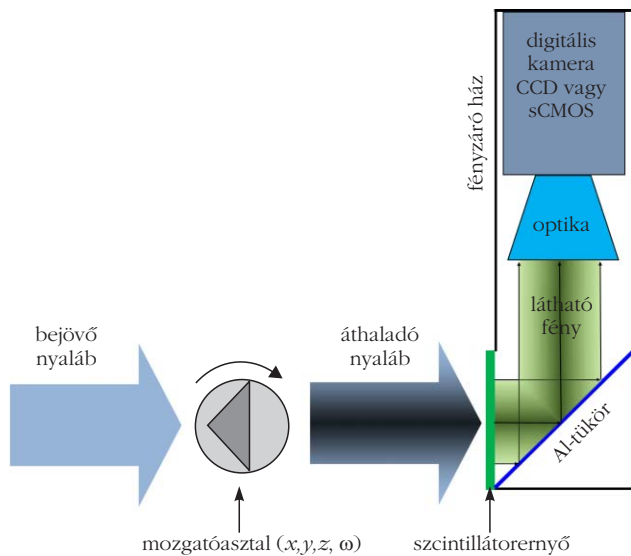
A következőkben áttekintést adunk a BNC fenti két képalkotó nagyberendezésének főbb jellemzőiről, és bemutatjuk alkalmazásait a mérnöki és anyagtudományok területéről.

1. ábra. A Budapesti Neutron Centrum RAD (föül), illetve NIPS-NORMA (alul) mérőhelyének rajza.



A szerzők köszönetüket fejezik ki az OTKA K124068 számú projekt és a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj anyagi támogatásáért.

A szerzők az MTA EK Nukleáris Analitikai és Radiográfiai Laboratórium munkatársai, interdiszciplináris alap- és alkalmazott kutatásokat folytatnak neutronos elemanalitikai és roncsolásmentes anyagvizsgáló technikák felhasználásával az anyagtudomány, az archaeometria, a geológia és a magfizika területén, valamint fejlesztik és üzemeltetik az ezekhez szükséges, a Budapesti Neutron Centrum részeként működő mérőállomásokat. Ezek közül több unikális berendezés, így máshol nem megvalósítható kísérleteket is lehetővé tesznek, jellemzően nemzetközi együttműködések és EU-projektek formájában.

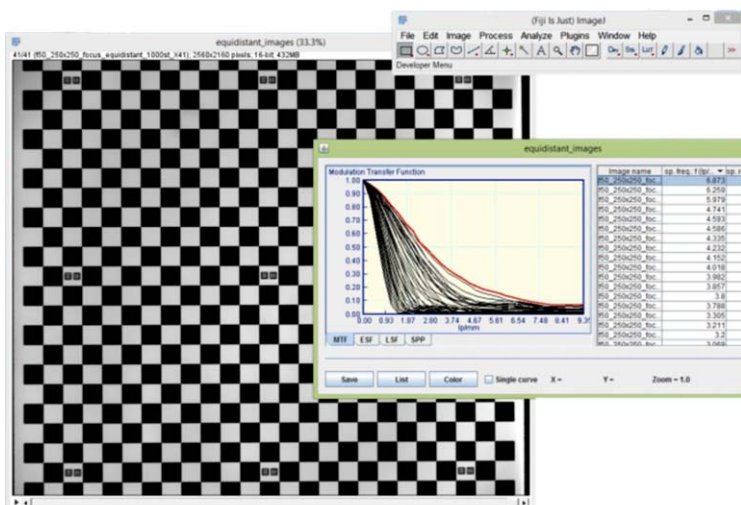


2. ábra. A digitális képdetektálás főbb részegységei.

A digitális képkészítés

A neutron- és röntgenradiográfia alapja tehát a sugárnyaláb gyengülésének megfigyelése, miközben az áthalad az útjába helyezett anyagon. A mintán kölcsönhatás nélkül áthaladó nyaláb intenzitását évtizedeken keresztül filmmel, vagy úgynevezett image plate technikával tették láthatóvá. Ezeket a minta mögé helyezve exponálták, majd a mérőfülkéből kihozva, külön lépésben előhívták. A képek kiértékelhetőségét és archiválhatóságát, továbbá a módszer termelékenységét, időfelbontását drasztikusan növelte a digitális képkészítés elterjedése a 2000-es évek elején. A digitális technika minősége (térbeli felbontás, kontraszt) manapság már megközelíti és esetenként meg is haladja a korábbi filmes technika képminőségét.

3. ábra. Az optika élesre állítása egy sakktablamintázat fekete-fehér életmeneteinek segítségével. A kis ábrán a fókuszálás során felvett képek modulációs átviteli függvényei (MTF) látszanak. A legjobb felbontást a pirossal jelölt görbéhez tartozó pozícióban kapjuk.



A tárgyon áthaladó sugárzás először egy neutron- vagy röntgenérzékeny, látható fényt kibocsátó (legtöbbször ZnS alapú) szcintillátorenyőbe ütközik. Az itt keletkező zöld ($\lambda = 520 \text{ nm}$) színű fényt egy 45° -ban elhelyezett tükör, majd egy objektív juttatja el a digitális kamera (esetünkben egy 1 Mpx-es CCD, illetve egy 5,5 Mpx-es sCMOS) fényérzékeny chipjére (2. ábra). A kiolvasott kép eredendően digitális formában kerül a számítógépre a valós idejű megjelenítésre, vagy a merevlemezen történő tárolásra. Ha a képkészítést a mintát tartó tárgyasztal forgatásával szinkronizáljuk, a tomográfiához szükséges több száz vagy akár ezer vetületi kép felvétele automatizálható.

Amennyiben a nyaláb képét minta nélkül (*open beam image*), valamint a kamera sötétáramának képét (*dark beam image*) nyaláb nélkül felvesszük és ezekkel korrigáljuk a mérést, akkor a tárgy képeiből kvantitatív nyalábgyöngülési adatokat kaphatunk.

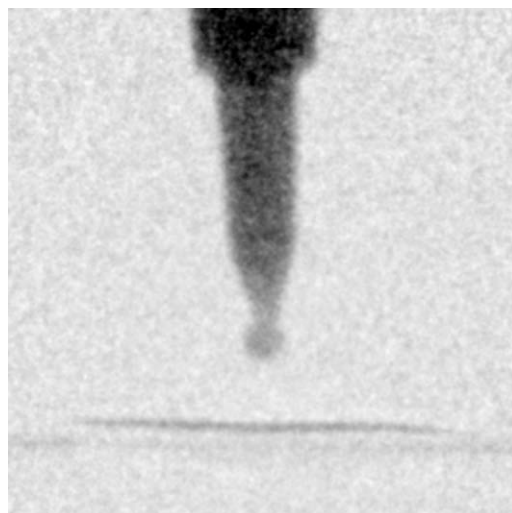
$$\frac{I}{I_0} = \frac{I_{\text{transmitted}} - I_{\text{darkbeam}}}{I_{\text{openbeam}} - I_{\text{darkbeam}}} = e^{-\mu_m \rho d},$$

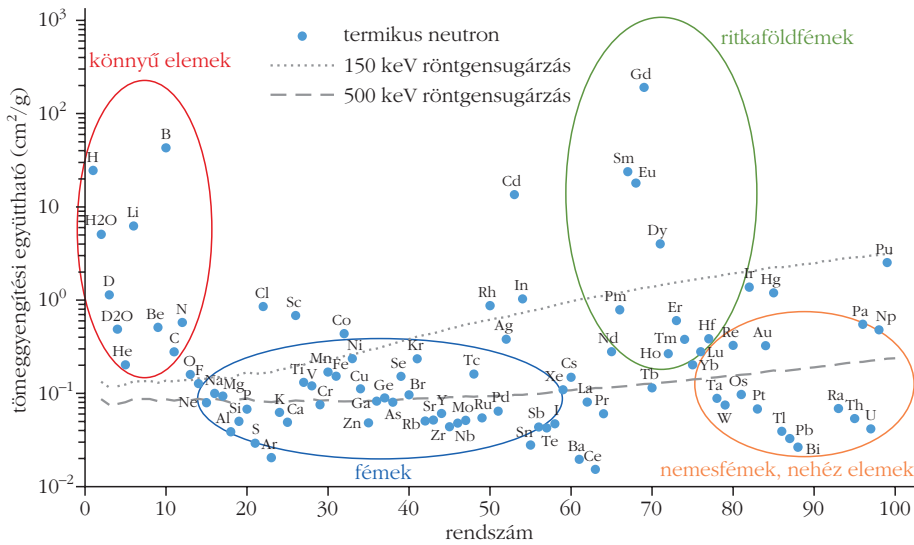
ahol μ_m ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) az anyagi minőségtől és a sugárzás minőségétől függő tömeggyengítési együttható, ρ (g cm^{-3}) a sűrűség és d (cm) az anyagvastagság.

A mérési feladatnak megfelelően többféle, cserélhető szcintillátorenyő áll rendelkezésünkre, amelyekkel a látómező és az expozíciós idő függvényében körülbelül 75–200 μm között változik az elérhető legjobb térbeli felbontás. A látómező változtatása az optikai leképező rendszer állításával lehetséges; az 50 mm, 105 mm és 300 mm fix gyújtótávolságú objektívek cseréje és élesre állítása a fényzáró optikai házon belül szintén jórészt automatizált (3. ábra).

Egy másik, ezzel csereszabatos videokamerával pedig 640×480 képpont felbontású, 25 Hz frekvenciájú (40 ms ciklusidejű) mozgóképet is készíthetünk, ezt nevezzük dinamikus radiográfiának (4. ábra).

4. ábra. A néhány száz mikron vastag szén nanocsőréteg nedvesedése egy fecskendőből lecseppenő vízcsepplal. (A kísérlethez a mintát Kukovecz Ákos – Szegedi Egyetem „Lendület” Pórusos Nanokompozitok kutatócsoport – biztosította.)





5. ábra. A tömeggyengítési együttható a rendszám függvényében termikus neutronok, illetve 150 és 500 keV-es röntgenfotonok esetén.

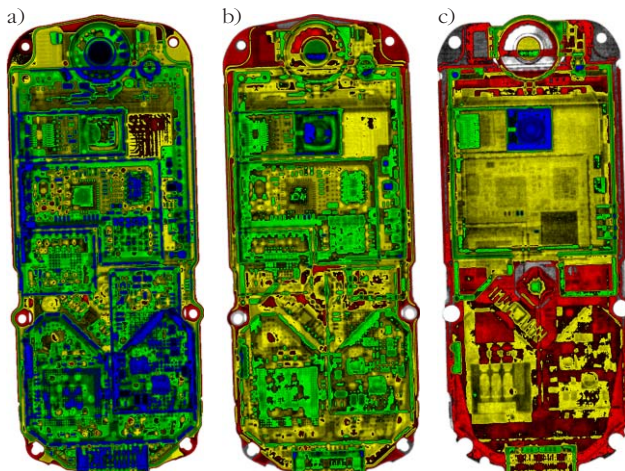
Többmodalitású leképezés

Míg a röntgensugárzás az elektronokkal lép kölcsönhatásba, a neutronok az atommagokkal. Ebből következik, hogy a gyengítési együttható röntgensugárzás esetén viszonylag sima görbe szerint növekszik a rendszámmal.

A tömeggyengítési együttható neutronok esetén, akár még adott elem izotópjai (például hidrogén és deutérium) között is nagymértékben változik (5. ábra). A röntgen- és a neutronsugárzásra vonatkozó tömeggyengítési együtthatók alapján a könnyű elemek, a fémek, a ritkaföldfémek és a nehéz elemek jól elkülöníthető csoportokat képeznek. Megfigyelhető továbbá, hogy a kétféle röntgenenergia esetén a rendszámától való függés mértéke jelentősen különbözik.

A neutronos és röntgenes kép összevetésével tehát az anyag jellege már behatárolható (6. ábra). Ha mind neutron-, mind röntgensugárzásra jó kontrasztot ka-

6. ábra. Egy mobiltelefon 150 keV-es röntgen (a), termikus neutron (c) és kompozit képe (b). A bal oldali ábra kiemeli a fémes részeket, míg a jobb oldalon a kijelző, a nyomtatott áramkör és a műanyag készülékház válik jobban láthatóvá [5].



punk, az egy fémes anyagot (például bronz, ezüst) jelezhet, az ólom nagy röntgenkontrasztot ad, de a neutronos képen jóval gyengébben jelenik meg, míg szerves anyagok csak a neutronos képen válnak láthatóvá [4]. Fontos kiemelni, hogy a kontraszt megadható az anyagi minőség ismeretében, azonban visszafelé a kapcsolat nem egyértelmű: több különféle anyag okozhat egyforma nyálábgyengítést.

Kontrasztkülönbség figyelhető meg továbbá egy tárgy termikus és a hideg neutronos képei között is.

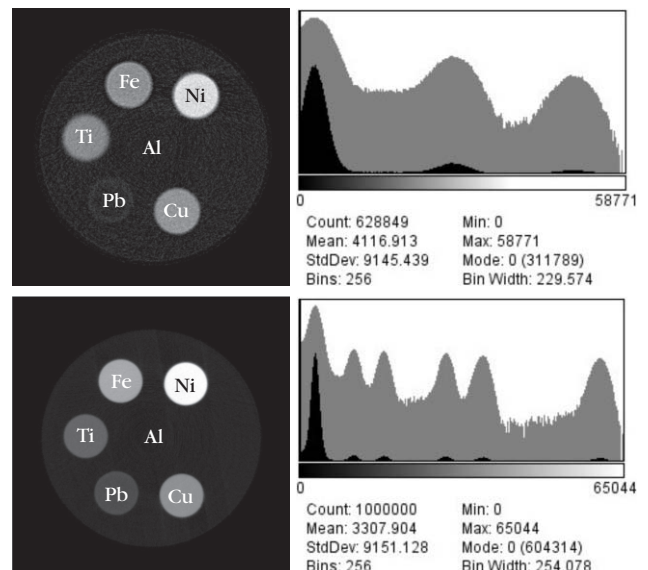
A 7. ábrán látható, hogy a hideg neutronok ugyan általában nagyobb kontrasztot adnak, mint a termikus neutronok, azonban kevésbé képesek az anyagfajta-

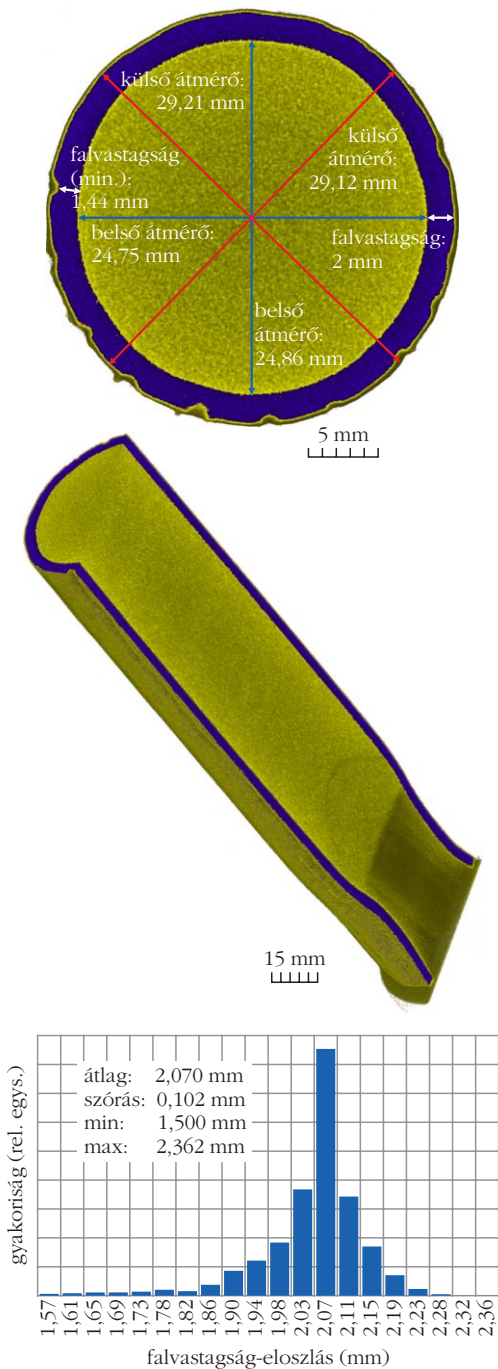
szelektív megkülönböztetésére.

Háromdimenziós képalkotás (tomográfia)

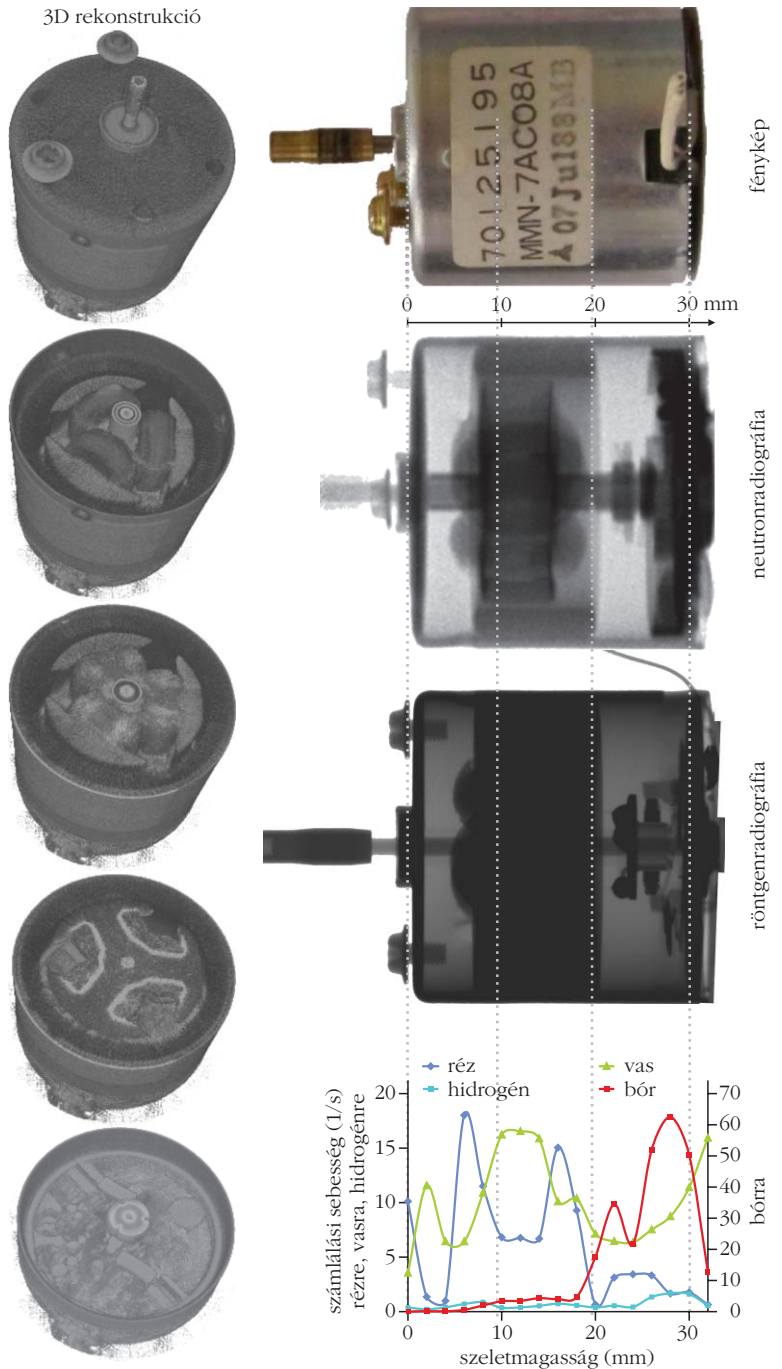
A háromdimenziós kép előállítás a vetületi képekből számítógépes rekonstrukcióval történik. Ilyenkor a vetületi képekből az úgynevezett Radon-transzformáció és a szűrt visszavetítéses algoritmus [1] segítségével, a vetületi kép sorainak megfelelően, vízszintes metszetenként állítjuk elő a tárgy keresztmetszeti képeit, majd ezeket 3D adatmátrixba töltve meg is jelenítjük. Ekkor lehetőség van a tárgy részeit átlátszóvá tenni, vagy a tömeggyengítési együttható alapján hamisszínes képet készíteni (renderelés),

7. ábra. A hideg neutronos (felső sor) és termikus neutronos leképezés (alsó sor) összehasonlítása egy hatféle anyagból álló IAEA-PSI kontraszt fantom esetén. Figyeljük meg a két hisztogramban lévő csúcsok számának eltérését.





8. ábra. Egy porral egyenletesen megtöltött fémcső falvastagságának roncsolásmentes ellenőrzése röntgentomográfiával (föül kereszt-, középen hosszmetset). A hisztogram a falvastagság-ingadozást mutatja.



9. ábra. Egy léptetőmotor fotója, neutronos és röntgenképe, valamint alul a vas, réz, hidrogén és bőr elemek eloszlása a hossz tengely mentén. A bal oldali oszlopban a 3D rekonstrukció különböző magasságoknál készített metszeit ábrázoltuk, ezzel segítve az elemösszetétel-profil értelmezését.

illetve a CAD tervrajzokhoz képesti eltéréseket megjeleníteni (8. ábra, *nominal-actual comparison*).

A képi és elemösszetétel-információ együttes értelmezése

Ha a lokális anyagi összetétel közvetlen, de mégis roncsolásmentes meghatározására van szükség, a NIPS-NORMA mérőhely kínál megoldást [2]. Itt egy elemössz-

zetétel mérésére alkalmas neutronindukált prompt-gamma spektroszkópiai eszközt, egy számítógép-vezérelt mozgatóasztalt és egy képkötő rendszert építettünk egybe. A kapott 2D vagy 3D képi információt felhasználva a tárgy kiválasztott részeit a nyaláb és a gammadetektor látóterének egymást átfedő részébe, az izotér fogatba mozgatjuk, és az itt neutronbefogás során keletkező gamma-fotonok elemzésével 2-3 mm térbeli felbontású elemösszetétel-mérést végezhetünk. Ezt hívjuk radiográfiával vezérelt prompt-gamma aktivációs

leképezésnek, PGAI-NT módszernek [6]. Ez a világon egyedülálló berendezés jelenleg kizárólag a BNC-ben üzemel, egy alkalmazását mutatja a 9. ábra.

Összefoglalás

A neutronos és röntgenképalkotással mélységi, akár időfelbontott szerkezeti információt kaphatunk két és három dimenzióban megjelenítve, roncsolásmentesen. A Budapesti Neutron Centrumban a közelmúltban végzett technikai fejlesztéseknek köszönhetően nemzetközileg is jegyzett mérőhelyek állnak rendelkezésünkre, amely a felhasználói programok, illetve kétoldalú megállapodások révén hozzáférhető a magyar és a nemzetközi kutatói közösség (CERIC-ERIC, IPERION CH), valamint az ipar számára (SINE 2020).

Irodalom

1. I. S. Anderson, R. L. McGreevy, H. Z. Bilheux (szerk.): *Neutron imaging and applications*. Springer, New York, 2009.
2. Z. Kis, L. Szentmiklósi, T. Belgya, M. Balaskó, L. Z. Horváth, B. Maróti: Neutron based imaging and element-mapping at the Budapest Neutron Centre. *Physics Procedia* 69 (2015) 40–47. doi: 10.1016/j.phpro. 2015.07.005
3. Z. Kis, L. Szentmiklósi, T. Belgya: NIPS-NORMA station – a combined facility for nondestructive element analysis and neutron imaging at the Budapest Neutron Centre. *Nucl. Instr. Meth. A* 779 (2015) 116–123. DOI: 10.1016/j.nima. 2015.01.047
4. J. Banhard et al: X-ray and neutron imaging – Complementary techniques for materials science and engineering. *International Journal of Materials Research* 101/9 (2010) 1069–1079.
5. Papp M.: M.Sc. disszertáció, ELTE TTK Kémia Intézet, 2016.
6. Kis Z., Belgya T., Szentmiklósi L., Kasztovszky Zs. és az Ancient Charm Együttműködés: Műtárgyak roncsolásmentes vizsgálata neutronokkal – az EU ANCIENT CHARM projekt. *Fizikai Szemle* 61/7–8 (2011) 235–239.