

Az 1. táblázatban közöljük a két mérési sorozat eredményeképpen kapott neutrondózisokat. Összehasonlításként vegyük figyelembe, hogy földi körülmények között a környezeti sugárzásból naponta átlagosan 2,5 μSv dózist kapunk.² A dózisokat a rekonstruált spektrumból számítottuk. Az értékek összbizonytalansága körülbelül 30%. Néhány, a spektrumra jellemző fluxus (Φ) adat 2003-ban:

$$\Phi (>1 \text{ keV}) = 2,42 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$\Phi (200 \text{ keV} - 20 \text{ MeV}) = 1,24 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$\Phi (>5 \text{ MeV}) = 0,32 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Galaktikus eredetű részecskék dózisa

A képanalizátor által elkülönített, a másodlagos neutronoknak tulajdonított nyomoktól eltérő nyomokat a *Kalibrálások* szakaszban részletezett módszerek felhasználásával vizsgáltuk, és a (3) képlettel meghatároztuk a galaktikus eredetű részecskéktől eredő dózist. Az összes mérési pozícióra nyert átlagérték: 2001-ben 138,8 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$, míg 2003-ban 122,1 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$. A becsült bizonytalanság körülbelül 35%. Ez három okra vezethető vissza:

- egyes nyomparaméterek (mélység, hossz) mérése sekély nyomokra, illetve közel merőleges részecskebeesés esetén nagy hibával jár,
- nagy a kalibrációs függvény bizonytalansága a magasabb LET-tartományban,
- a nyomok osztályozása során a képfelbontásból, illetve a digitalizálásból bekövetkező hiba.

Következtetések

Modellszámítások alapján azt mondhatjuk, hogy mérőeszközünk a teljes neutrondózis ~60%-át adja meg. Ennek alapján a 2. táblázatban összesítettük a $LET > 6 \text{ keV}/\mu\text{m}$ -nél nagyobb energialeadású részecskék okozta átlagdózisokat. A kis LET-ű sugárzások (főleg elektron és

² Ezt nevezzük háttérsugárzásnak.

2. táblázat

A 6 keV/ μm -nél nagyobb energialeadású részecskék által okozott dózisteljesítmény az ISS-en $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ egységben

vizsgált év	mért neutron-átlagdózis (60%)	teljes neutron-átlagdózis (100%)	galaktikus részecske eredetű átlagdózis	teljes átlagdózis $LET > 6 \text{ keV}/\mu\text{m}$
2001	56,6	94	139	233
2003	35,3	59	122	181

gamma) mérésére ez az eszköz nem alkalmas. Az ISS-en TL-technikával, a magyar PILLE készülékkel, 2001-ben végzett mérések szerint a kis LET-ű sugárzások okozta átlagdózis 290 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ volt. Vagyis az asztronauták teljes dózisterhelése mintegy 523 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ volt 2001-ben, sokkal magasabb, mint a sugárveszélyes munkahelyekre vonatkozó dóziskorlát.

Az átlagdózisok csökkentek 2003-ban. Ennek okát egyrészt azzal magyarázzuk, hogy a 11 éves napciklus azon fázisába értünk, amikor a naptevékenység csökken. Más részről pedig az űrállomás alacsonyabb pályára került, és pozíciója is stabilizálódott, miután egy 2001-ben meghibásodott giroszkópját megjavították.

Irodalom

1. J. PÁLFALVI, I. EÖRDÖGH, K. SZÁSZ, L. SAJÓ-BOHUS: *New Generation Image Analyzer for Evaluating SSNTDs* – Radiat. Meas. 28 (1997) 849–852
2. *Fluence-based and Microdosimetric Event-based Methods for Radiation Protection in Space* – NCRP Report No. 137 (2001)
3. S.A. DURRANI, R.K. BULL: *Solid State Nuclear Track Detection* – International Series in Natural Philosophy, ed. D. Haar, Pergamon Press, U.K. 111 (1987) 80–83
4. J.K. PÁLFALVI, YU. AKATOV, J. SZABÓ, L. SAJÓ-BOHUS, I. EÖRDÖGH: *Evaluation of SSNTD Stacks exposed on the ISS* – Rad. Prot. Dos. 110 (1–4) (2004) 393–397

Munkánkról részletesebb, magyar nyelvű beszámolók olvashatók a KFKI AEKI honlapján: <http://www.kfki.hu/~aekihp/>, valamint angol nyelven a következő web-oldalon: <http://plasma.oma.be/wrmiss/>

A TRITEL HÁROMTENGELYŰ SZILÍCIUMDETEKTOROS TELESZKÓP FEJLESZTÉSE

Hirn Attila, Apáthy István, Bodnár László, Csőke Antal, Deme Sándor, Pázmándi Tamás
KFKI Atomenergia Kutatóintézet

Az űrhajósokat érő kozmikus sugárzás tulajdonságainak vizsgálatára a KFKI Atomenergia Kutatóintézetben jelenleg egy háromtengelyű, űrdozimetriai célú szilíciumdetektoros teleszkóp (TRITEL) fejlesztése folyik. A közeljövőben a Nemzetközi Űrállomás platformján helyet foglaló detektorrendszer feladata többek között a LET-spektrum

meghatározása, irányfüggésének vizsgálata, valamint az egyenértékű dózis meghatározása lesz. Jelen cikkben a rendszer logikai blokkvázlatát ismertetve bemutatjuk a TRITEL működési elvét, ezen belül kitérünk a részegység szerepére és elrendezésére. Röviden összegezzük a detektorrendszer fizikai méreteit és üzemi paramétereit (műszaki specifikáció), valamint kitérünk a jelenleg folyó, a TRITEL részegységeivel (detektorok, előerősítők, analizátorok stb.) kapcsolatos mérésekre is.

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján

Űrhajózás és kozmikus sugárzás

„A Föld az emberiség bölcsője, de nem tölthetjük egész életünket a bölcsőben.” *Konsztantyin Ciolkovszkij*nak, az űrhajózás atyjának szavai beigazolódni látszanak. Napjainkra az ember űrbéli jelenléte mindennapos, megszo-kottá vált, a Nemzetközi Űrállomáson a kétfős amerikai–oroszmisziók félévente váltják egymást.

Az elmúlt években a jelentősebb űrnagyhatalmak különböző, embert szállító Mars-expedíciók terveivel rukkoltak elő. Egy ilyen vállalkozást szükségszerűen több, huzamosabb ideig – akár 1–2 évig is – tartó Föld körüli emberes küldetésnek kell megelőznie, hogy az űrhajósokra gyakorolt hatásokat és a várható nehézségeket alaposabban megvizsgálhassuk.

Az űrhajósoknak számos kihívásnak kell megfelelniük a hosszú időtartamú emberes űrrepülések során. Ezek közül csak néhányat sorolunk fel:

- a súlytalanság biológiai hatásai (az izomrendszer fokozott sorvadása, csonttrikulás);
- a pszichés hatások (bezártság, monotonitás);
- a Föld körüli pályán tapasztalt „nappalok és éjszakák” gyors váltakozása stb.

Az űrhajósokat érő kozmikus sugárzás az egyik legjelentősebb kockázati tényező, hiszen az őket egy év alatt érő dózisterhelés a földi munkahelyek éves dóziskorlátjának tízszeresét is elérheti! Az űrhajósokra nem éves, hanem élettartamdózist határoznak meg, ezért lényegében a dózisterhelés korlátozza azt az időt, amelyet az űrhajósok az életük során összesen űrrepüléssel tölthetnek.

Bolygónk felszínén a nagy intenzitású kozmikus sugárzást a Föld mágneses tere és a mintegy 10 méter mély vízoszlopnak megfelelő árnyékoló hatású légkör több nagyságrenddel csökkenti. A tengerszint feletti magasság növekedésével a kozmikus sugárzás intenzitása nő, az űrállomások magasságában a növekedés a két nagyságrendet is meghaladja [1]. Adott pályamagasságon is jelentős eltérések jelentkezhetnek. Legjobb példa erre a délatlanti anomália (*South Atlantic Anomaly*, SAA). A délatlanti térség felett történő áthaladás során ugyanis a megnövekedett dózisteljesítmény miatt az űrhajósok dózisterhelése közel akkora, mint a Föld körüli pálya többi részén együttvéve.

A pályamagasságon, a földrajzi szélességen és az SAA-n való áthaladáson túl a sugárzási tér jellemzői nagyban függenek az űrállomás orientációjától is. Az űrhajósok által elszenvedett dózisértékek jelentősen eltérhetnek az űrállomás különböző helyein.

A TRITEL detektorrendszer

A sugárzási tér jellemzői helyről helyre és időről időre is változhatnak mind az űrállomáson belül, mind pedig annak közvetlen környezetében. Ez utóbbinak a szerepe elsősorban az űrséták (*Extra-Vehicular Activity*, EVA) során fontos.

A KFKI Atomenergia Kutatóintézetben fejlesztés alatt álló TRITEL háromtengelyű szilíciumdetektoros teleszkóp elsődleges feladata a kozmikus sugárzás LET-spektrumának

meghatározása, valamint irányfüggésének vizsgálata lesz. A detektorokban leadott energia mérésével (fizikai dózis), valamint a LET-spektrumból meghatározott minőségi tényező segítségével az egyenértékűdózis is meghatározható.

A TRITEL a Nemzetközi Űrállomáson (ISS)

A nemzetközi együttműködés keretében épülő második generációs – vagyis moduláris – űrállomás építése 1998-ban a Zarja orosz modul Föld körüli pályára állításával kezdődött meg. Azóta a folyamat – főként anyagi okok miatt – sajnos jelentősen lelassult. Az ISS-en a Columbia űrrepülőgép 2003. év eleji katasztrófája miatt napjainkban mindössze kétfős amerikai–oroszmisziós legénység dolgozik.

Az űrállomáson folyó dozimetriai mérések egyrészt a dózistérkép elkészítését – azaz a dózisteljesítmény helyfüggésének meghatározását – és a dózisteljesítmény időbeli változásának nyomon követését szolgálják, másrészt biztosítják az űrhajósok személyi dozimetriáját.

A KFKI AEKI-ben fejlesztett Pille hordozható TL (termolumineszcens) doziméter az űrállomáson folyó személyi dozimetriai rendszer szerves részévé vált. A közeljövőben ezt egészítheti ki a TRITEL háromtengelyű szilíciumdetektoros teleszkóp. A rendszer az űrállomás külső platformján, a korábbi Matroska-kísérlet helyén foglal majd helyet. A felbocsátásra 2–3 éven belül sor kerül.

A teleszkópos elrendezés

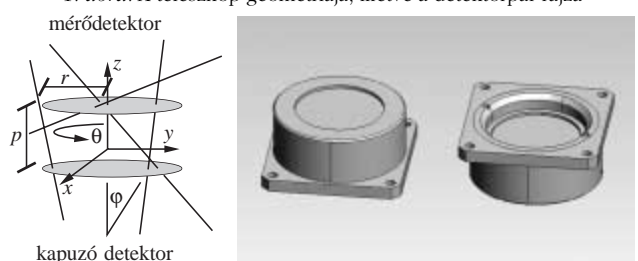
A három tengely teleszkópjait két-két, egymással párhuzamosan elhelyezkedő, Canberra gyártmányú, közel 300 μm vastagságú és 450 mm^2 aktív felületű, teljesen kiürített rétegű szilícium félvezető detektor alkotja (1. ábra).

A két detektor közül csak az egyik – a mérődetektor – szolgál a leadott energia mérésére, a másik – a kapuzó detektor – a geometriának köszönhetően biztosítja egyrészt a beérkező részecske irányának kijelölését, másrészt az adott energiájú, de különböző szögben beérkező részecskék által leadott energia kis szórását. Az optimális geometriai elrendezés meghatározásánál a rendszer érzékenységének maximuma, illetve izotróp sugárzási térben való egyenletessége voltak a fő követelmények [1]. Ennek megfelelően, ideális esetben a detektorok r sugarának meg kell egyeznie az egymástól mért p távolsággal.

A kozmikus sugárzási teret nagyoobb részét protonok, α -részecskék és kisebb tömegszámú (főként C-, N- és O-) ionok alkotják.

Az ismertett geometria mellett, az ICRU49 adatbázis alapján történt számítások szerint az említett részecskék ál-

1. ábra. A teleszkóp geometriája, illetve a detektorpár rajza



1. táblázat

A napi telemetriaigény				
	db	csatorna	méret/csat. (byte)	méret (byte)
energiaspektrum	6	32	2	384
időspektrum	1	1440	2	2880
dózis	6		2	12
egyéb				512
összesen max.				4096

tal a detektorban leadott energia 100 keV (a detektor felületére merőlegesen beérkező relativisztikus proton) és 100 MeV között változhat [1]. Az ennél nagyobb energiát leadó – jóval kisebb gyakoriságú, ugyanakkor nagy LET-értékű – nehézionok járuléka egy csatornába kerül. A LET-spektrumot a koincidencia amplitúdóspektrumból, valamint a detektorban megtett átlagos útból határozzuk meg az energiakalibrációt követően. Az elnyelt dózist a detektor tömegében leadott – elnyelt – energiából kaphatjuk meg.

A jelfeldolgozó rendszer felépítése

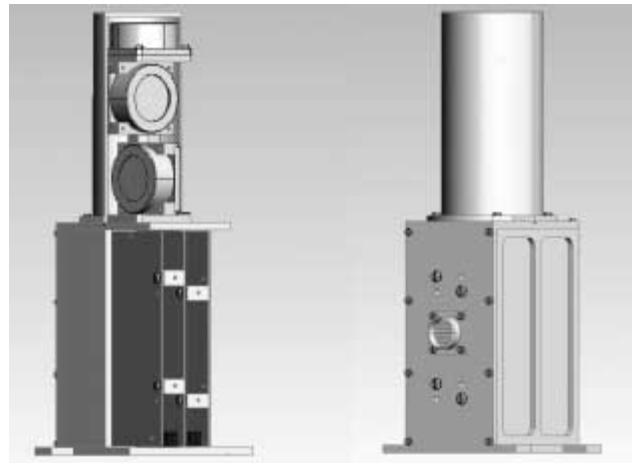
A TRITEL x , y és z tengelyei a jelfeldolgozást tekintve teljesen megegyeznek. Detektorpáronként a mérő- és kapuzó detektorok kimenetei töltésérzékelő előerősítőkön keresztül, valamint jelformálás és erősítés után koincidenciakörre kerülnek. A három koincidenciakör jeléből a TRITEL még egy digitális jelet állít elő, a dél-atlanti anomálijeleket (ld. később). Minden csatorna mérődetektorának analóg jele (csúcsdetektáló és tartó áramkörön keresztül) flash típusú amplitúdóanalizátorra kerül, de csak abban az esetben, ha a hozzá tartozó koincidenciakör is megszólalt (azaz mindkét detektorba érkezett jel). Az amplitúdóanalizátor az amplitúdónak megfelelő csatorna címét a koincidencia és a dél-atlanti anomálijellel együtt egy digitális multiplexerre küldi, valamint alapállapotba hozza a csúcsdetektort.

A dél-atlanti anomália (SAA) azonosítása időanalizátor segítségével történik. Egy számláló 10 másodperces mérésekben méri a három koincidenciakörből jövő jelek gyakoriságát, és amennyiben ez az érték meghalad egy bizonyos λ értéket, az azt követő beütések az SAA-spektrumokhoz és -dózisértékekhez járulnak hozzá egészen addig, amíg a gyakoriság ismét λ alá nem csökken. A 10 másodperces mérések miatt az SAA-tartomány kezdetének és végének meghatározásában jelentkező több másodperces csúszást az adatok kiértékelésénél figyelembe kell venni.

A számláló másodpercenként 1000 jelet képes fogadni, ezért a lehetséges nagyobb impulzusgyakoriságok miatt a számláló elé egy osztót (χ) iktatunk be. A λ és χ paraméterek értéke a Földről, a telemetrián keresztül korábbi időspektrum-mérések alapján változtatható. Az időspektrum egyes csatornáiban a 60 s (hat egymást követő 10 s-os mérés) alatt beérkező koincidenciaimpulzusok számát regisztráljuk.

Az amplitúdóanalizátorok – a három tengelynek (x , y , z) és az SAA-n belüli, illetve az SAA-n kívüli megkülönböztetésnek megfelelően – naponta hat (koincidencia) spektrumot és hat dózisértéket szolgáltatnak. A lineáris energiaspektrumokat – adatméret-csökkentés céljából – a kiolvasás után 32 csatornás kvázilogaritmikus spektrumokká alakítjuk. A csatornakiosztást úgy célszerű megválasztani, hogy a kapott minőségi tényező pontatlansága minimális legyen [1]. Ehhez viszont a spektrum előzetes ismerete szükséges. A mérődetektorokban elnyelt energiából a detektorban elnyelt fizikai dózist számítjuk.

A hat amplitúdóspektrum, az időspektrum és a hat dózisérték az egyéb adatokkal – például dátum, hőmérséklet, paraméterek stb. – együtt napi 4 kB adatmennyiséget tesz ki (1. táblázat), ami egy 64 kB-os átmeneti



2. ábra. A TRITEL felépítése. A részegységek 0,5–1 g/cm² vastagságú (felületi sűrűségű) alumíniumházban foglalnak helyet, ennek árnyékoló hatása az EVA-n, azaz űrsétán résztvevő űrhajósok esetében az űruha nyújtotta védelemnek felel meg. A rendszer teljes térfogata 840 cm³, tömege nem haladja meg az 1 kg-ot.

memóriába kerül. Bár az adatok letöltésére várhatóan naponta sor kerül, a memória mérete a biztonság kedvéért 16 nap adatainak tárolására elegendő.

A rendszer telemetriaigényét úgy terveztük, hogy az még egy esetleges későbbi Mars-szondán elhelyezett egységként is kielégíthető legyen.

A TRITEL elrendezése és a műszaki adatok

A TRITEL detektorrendszerének felépítése a 2. ábrán látható. A műszert a detektorpárokat (1. ábra) függőlegesen elrendezésben tartalmazó henger, valamint az elektronikát magában foglaló doboz alkotja. Ez utóbbit rögzítik az űrállomás platformjához.

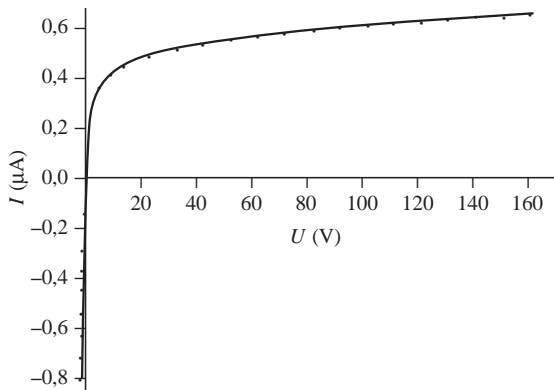
A műszer az űrállomáshoz rögzített, így maga az űrállomás az egyik irányból mindig leárnyékolja a TRITEL-t. Mivel az űrhajósok által elszenvedett egyenértékűdózisra vagyunk kíváncsiak, ez nem okoz gondot. Az űrhajósok űrsétáik (pl. szerelési munkálatok) során ugyanis mindig az űrállomás falához közel tevékenykednek, így reális képet csak akkor kaphatunk, ha az űrállomás falának árnyékoló hatását is figyelembe vesszük.

A detektorok működésének hőmérséklet-tartománya –40 °C-tól 20 °C-ig, az elektronikus egységeké –20 °C-tól 40 °C-ig terjed. Ennek biztosítása a világűr zord körülményei között a hőszabályozó-rendszer feladata lesz. A fűtést jobban igénylő elektronikus egységek ezért is helyezkednek el az űrállomás falához közelebb.

A detektorrendszerrel kapcsolatos mérések, tesztek

A rendszer logikai blokkvázlatának megvalósításával párhuzamosan elkezdődött a TRITEL detektorainak, valamint elektronikájának bemérése.

A jelnyugtáknak a detektorfeszültségtől való függését α -sugárforrással történő elő-, illetve hátoldali besugárzással vizsgáljuk teljesen kiűrtett rétegtű detektornál. A fel-

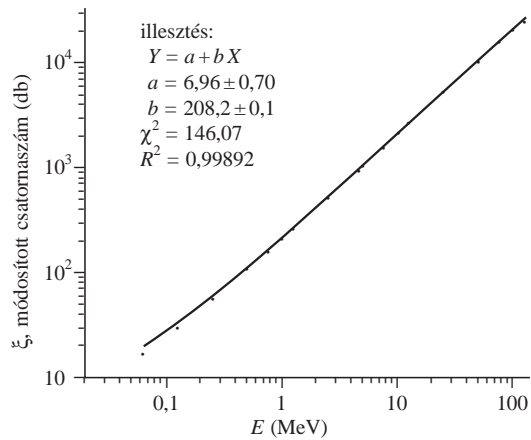


3. ábra. Az RFT-MKD TYP70336 2018 Si-detektor feszültség-visszaram karakterisztikája

bontóképesség-változás nyomon követése pedig a detektor feszültség-visszaram karakterisztikáját kiegészítve segíti az optimális munkapont pontos kijelölését [2]. A 3. ábrán egy RFT-MKD szilícium félvezető detektor karakterisztikáját vettük fel. Jól látható, hogy a visszaram nagysága a működési tartományban alacsony és közel állandó (0,5–0,6 mA). A letérési feszültséget 170 V-ig nem értük el.

Mivel a detektorokban leadott energia három nagyságrenden belül változhat, így az egyes elektronikus eszközöknek (pl. előerősítő, analizátor) 1:1000-es dinamikatartománnyal kell rendelkezniük. Ennek ellenőrzésére impulzusgenerátoros beméréseket végzünk.

A Canberra 2003BT előerősítő és az InSpector analizátor bemérése folyamán többször is meg kellett változtatni az erősítést, így a leolvasott csatornaszámokat is módosítani kellett az erősítések arányában (pl. fele akkora erősítés esetén kétszer akkora csatornaszám-értéket kell vennünk). Az 4. ábrán ez a „módosított csatornaszám” (ξ) szerepel a bejövő energia függvényében (log-log). A mérés azt mutatta, hogy a kívánt jelegyenérték-tartományban (100 keV – 100 MeV) a zajszint felett a rendszer linearitása a mérés hibahatárán belül biztosítható. A cél az, hogy a TRITEL-be kerülő, fejlesztés alatt álló elektronikus egységek részére referencia álljon rendelkezésre.



4. ábra. A Canberra 2003BT előerősítő + InSpector amplitúdóanalizátor linearitásának vizsgálata

A koincidenciakör tesztelése úgyszintén impulzusgenerátorral történik. Ennek a vizsgálatára irányuló mérések még hátravannak.

Összefoglalás

Az űrhajósokat érő sugárhatás (egyenérték dózis) közvetlen mérésére szolgáló LET-spektrométer kifejlesztése mind az AEKI, mind a magyar űrkutatás egésze szempontjából minőségileg új lehetőséget jelent. Két-három éven belül az orosz űrkutatók (az Orvosbiológiai Problémák Intézete, az Orosz Űrkutatói Iroda, ill. az Enyergija cég) [1] repülési lehetőséget biztosítanak a TRITEL számára a Nemzetközi Űrállomás külső platformján, valamint a későbbiekben egy Mars-szonda fedélzetén is.

Irodalom

- PÁZMÁNDI T.: *Űrdozimetria báromtengelyű szilíciumdetektoros teleszkóp és a Pille bordonozható TLD rendszer alkalmazásával* – PhD értekezés, BME NTI, 2003.
- SÁGI L., DEME S.: *A teljesen kiűrtített rétegű szilíciumdetektor vizsgálata* – *Izotóptechnika* 28/1 (1985) 21–27

RÖNTGENSPEKTROSKÓPIAI MÓDSZEREK AZ AKTINIDÁK KÖRNYEZETI HATÁSÁNAK VIZSGÁLATÁBAN

Alsecz Anita, Osán János, Török Szabina

KFKI Atomenergia Kutatóintézet, Sugárvédelmi és Környezetfizikai Laboratórium

Atomfegyver-kísérletekből, a nukleáris üzemanyagciklus baleseteiből, illetve tűzzel és robbanással járó balesetekből nagy aktivitáskoncentrációjú – úgynevezett „forró” – részecskék kerülhetnek ki a környezetbe. A kikerült forró részecskék radiotoxicitásának felméréséhez nemcsak radioaktivitásuk, hanem fizikai és kémiai jellemzésük is nagyon fontos. Környezeti eredetű és

reaktorvízből szűrt forró részecskéket vizsgáltunk szilárd fázisú urán és plutónium oxidációs állapotának meghatározása céljából.

A forró részecskék detektálása autoradiográfiával és pásztázó elektronmikroszkóppal történt. Az aktinidák kémiai állapotának meghatározásához kutatócsoportunk roncsolásmentes módszert alkalmazott, a röntgenabszorpciós spektrum élközeli finomszerkezetén alapuló (XANES) spektrometriát, amely a vizsgált elem oxidációs állapotán kívül a lokális környezetről is információt nyújt.

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján