ŐSZI RADIOKÉMIAI NAPOK 2026

Balatonszárszó, 2026. október 12 - 14.

A konferencia
programja és előadás-kivonatai

Őszi Radiokémiai Napok 2026

Balatonszárszó, 2026. október 12 - 14.

A konferencia szervezői:

az MTA Radiokémiai Tudományos Bizottsága és munkabizottságai
(URL: https://mta.hu/vii-osztaly/tudomanyos-bizottsagok-105559#radiokemiai_tudomanyos_bizottsag)

és

a Magyar Kémikusok Egyesülete Radioanalitikai Szakcsoportja
(URL: http://www.mke.org.hu)

A kiadványt szerkesztette és tördelte:

Jószai István

ISBN 978-615-6018-44-1

TARTALOMJEGYZÉK

	Oldal
Regisztráció, szállás és étkezés	4
A konferencia programja	7
A konferencia előadás kivonatai – hétfő	13
„Vértes Attila Ifjúsági Nívódíj” – pályázatok	27
A konferencia előadás kivonatai – kedd	75
A konferencia előadás kivonatai – szerda	81
Résztvevők listája	96

Regisztráció

SDG Családi Hotel és Konferencia Központ
(8624 Balatonszárszó, Csárda utca 39-41.)

2026. október 12., hétfő, 11:30 –

Szállás és étkezés

SDG Családi Hotel és Konferencia Központ
(8624 Balatonszárszó, Csárda utca 39-41.)

2026. október 12., hétfő

Ebéd:	12:30 – 13:30
Vacsora:	18:30 – 19:30

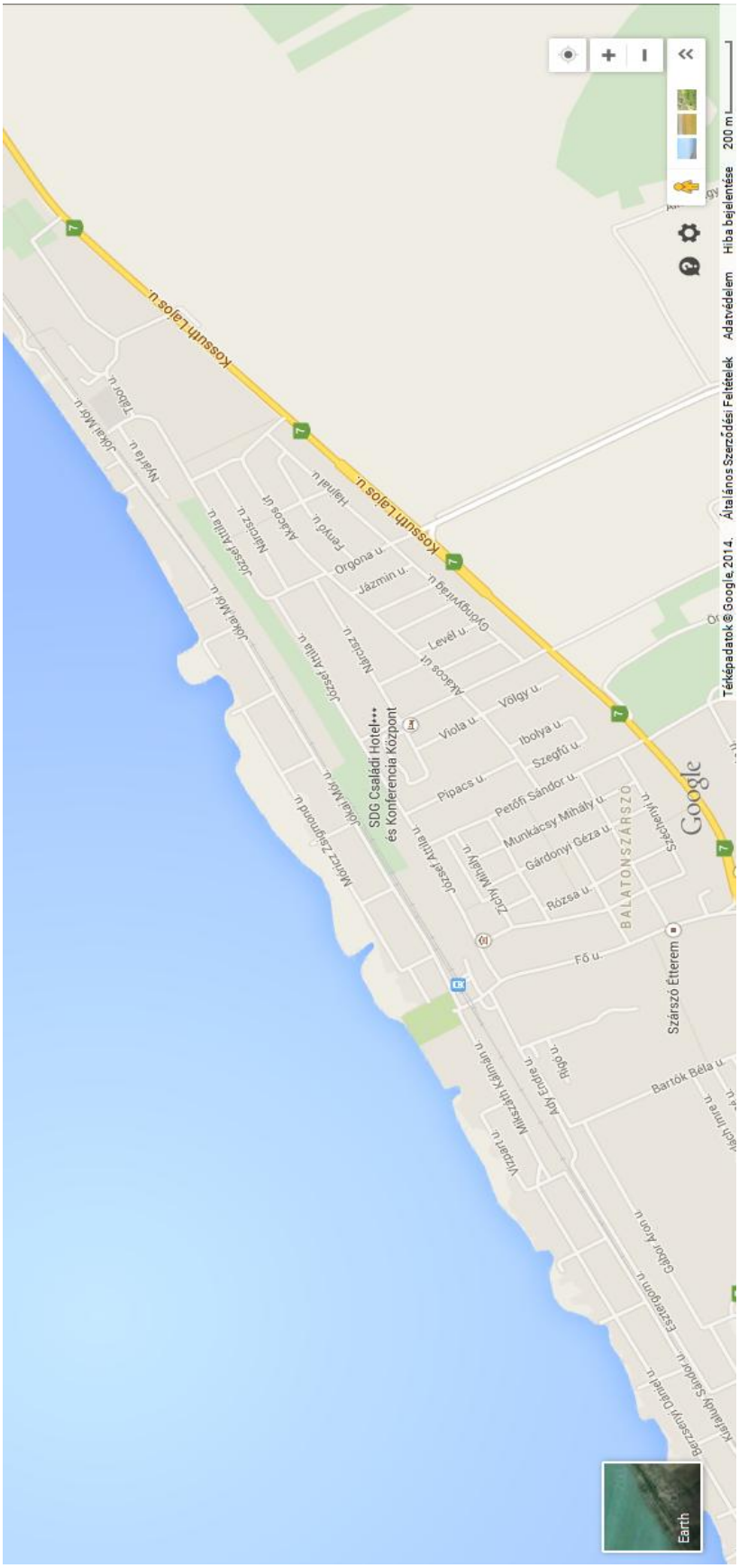
2026. október 13., kedd

Reggeli:	08:00 – 09:00
Ebéd:	13:00 – 14:00
Bankett:	19:00 – 22:00

2026. október 14., szerda

Reggeli:	08:00 – 09:00
Ebéd:	13:00 – 14:00

Térkép


Kossuth Lajos u.
Kossuth Lajos u.
SDG Családi Hotel•••
és Konferencia Központ
Szárszó Étterem
BALATONSZÁRSZÓ
Google
Térképadatok © Google, 2014.
Általános Szerződési Feltételek
Adatvédelem
Hiba bejelentése
200 m
Earth

A rendezvény támogatói:

CANBERRA PACKARD

IZOTOP IZOTÓP INTÉZET KFT.

Isotoptech Zrt.

LynXes

RADANAL Kft.

MTA MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA

A konferencia

PROGRAMJA

OKTÓBER 12. HÉTFŐ

11:30		**Regisztráció**
12:30	**13:30**	**Ebéd**
13:30	**13:40**	Az Őszi Radiokémiai Napok 2026 megnyitója: Nagy Noémi (MTA RKTB) Stéfánné Dénes Noémi (MKE)
I. szekció		Elnök: Nagy Noémi
13:40	**14:00**	Süvegh Károly, Homonnay Zoltán, Kovács Krisztina, Kudor Mátyás: RADIOAKTÍV HULLADÉKOK MINŐSÍTÉSÉT CÉLZÓ LABORATÓRIUMI TESZTKÍSÉRLETEK
14:00	**14:20**	Nényei Árpád, Feil Ferenc, Menyhei Dávid, Meczker András: NAGYMÉRETŰ RADIOAKTÍV HULLADÉK IZOTÓP-ÖSSZETÉTELÉNEK MEGHATÁROZÁSA
14:20	**14:40**	Rátkai Ákos Tamás: A BUDAPESTI KUTATÓREAKTOR SUGÁRVÉDELMI RENDSZERÉNEK ÉRTÉKELÉSE MUNKAVÉDELMI SZEMPONTBÓL
14:40	**15:00**	Taba Gabriella, Kári Béla, Szűcs László, Ritvay Dorottya Mária, Vizbel Ákos, Petrányi János: VIZUALIZÁLT H3D® H400 MÉRÉSTECHNIKAI ESZKÖZ KIPRÓBÁLÁSA ORVOSI ALKALMAZÁSBAN
15:00	**15:30**	**Kávészünet**
II. szekció		Elnök: Németh Zoltán
15:30	**15:50**	Papp István, Felföldi Réka: TECHNÉCIUM-99 ÉS RÁDIUM-226 ICP-MS MÓDSZERREL
15:50	**16:10**	Vajda Nóra, Molnár Zsuzsa, Bokori Edit, Papp István: ÚJ KROMATOGRÁFIÁS GYANTÁK α-BOMLÓ IZOTÓPOK ANALITIKÁJÁBAN
16:10	**16:30**	Rékasi Zsófia, Korodi-Pántya Annamária, Pázmándi Tamás, Elek Richárd, Homoki Zsolt, Zagyvai Péter: VÉLETLEN INJEKTÁLÁSSAL FELVETT RADIOSTRONCIUM ÁLTAL OKOZOTT SUGÁRTERHELÉS ELŐZETES ÉRTÉKELÉSE
16:30	**16:50**	Molnár Mihály, Bán Sándor, Nagy Dominik, Baráth Balázs Áron, Kertész Zsófia: KITERJEDT KÖRNYEZETI RADIOKARBON MONITORING DEBRECENBEN, A ZÖLD ŐRSZEM KERETÉBEN

16:50	**17:10**	Osváth Szabolcs, Homoki Zsolt, Kövendiné Kónyi Júlia, Szigeti Ágnes, Rell Péter: A MOHI ATOMERŐMŰ MAGYARORSZÁGI KÖRNYEZETI HATÁSAINAK VIZSGÁLATA
17:20	**18:20**	AZ MTA RADIOKÉMIAI TUDOMÁNYOS BIZOTTSÁG NYÍLT ÜLÉSE
18:30	**19:30**	**Vacsora**

OKTÓBER 13. KEDD

8:00	**9:00**	**Reggeli**
III. szekció		Elnök: Jószai István
Megjegyzés:		Meghívott előadó
9:00	**9:45**	Christer Halldin: PET RADIOLIGANDS IN NEUROSCIENCE AND DRUG DEVELOPMENT
9:45	**9:50**	**Szünet**
9:50	**10:00**	A Vértes Attila Ifjúsági Nívódíjért folyó verseny megnyitása: Homonnay Zoltán, Kovács Krisztina (Vértes Attila Alapítvány)
IV. szekció		Elnök: Homonnay Zoltán
Megjegyzés:		Vértes Attila Ifjúsági Nívódíjért versenyezők
10:00	**10:20**	Hegyes Hanga Panna, Trencsényi György, Kertész István, Képes Zita, Jószai István: A [^{18}F]FLT KÉSZÍTMÉNY SZTAVUDIN ÉS FLUOROTIMIDIN TARTALMÁNAK MEGHATÁROZÁSA UPLC ELJÁRÁSSAL
10:20	**10:40**	Fűrész Kristóf, Mikeházi Antal János, Németh Zoltán, Vankó György: KOMPAKT ROWLAND-KÖRÖS SPEKTROMÉTER TERVEZÉSE ÉS VIZSGÁLATA KIS ENERGIÁJÚ RÖNTGENEMISSZIÓS MÉRÉSEKHEZ
10:40	**11:00**	Csizmadia Lilla Kinga, Mihucz Viktor Gábor, Kovács Krisztina: VAS-BISZGLICINÁT TARTALMÚ ÉTRENDKIEGÉSZÍTŐK VIZSGÁLATA MÖSSBAUER-SPEKTROSZKÓPIÁVAL
11:00	**11:30**	**Kávészünet**

V. szekció		Elnök: Kuzmann Ernő
Megjegyzés:		Vértes Attila Ifjúsági Nívódíjért versenyezők
11:30	**11:50**	Abir Dhib: CHALLENGES OF PARTICLE IDENTIFICATION IN LASER ACCELERATION EXPERIMENTS
11:50	**12:10**	Baricsán Fruzsina, Balla Viktória, Jószai István: A [^{18}F]FET KÉSZÍTMÉNY TISZTASÁGÁNAK VIZSGÁLATA FOLYADÉKKROMATOGRÁFIÁS MÓDSZERREL
12:10	**12:30**	Ákos Vizbel, Milán Nacsa, Zoltán Varga, László Forgách, Ralf Bergmann, Krisztián Szigeti, Noémi Kovács, Ildikó Horváth, Polett Hajdrik, Sangram Nag, Prodip Datta, Domokos Máthé, Christer Halldin: AUTOMATED SYNTHESIS OF [^{18}F]DPA-714 TO BE USED FOR PET STUDIES OF TSPO IN NEUROINFLAMMATION
12:30	**12:50**	Kudor Mátyás, Béres Kende, Homonnay Zoltán, Shiro Kubuki, Krehula Stjepko, Kuzmann Ernő: KÜLÖNBÖZŐ Eu-TARTALMÚ PREKURZOROKBÓL ELŐÁLLÍTOTT Eu-ADALÉKOLT GOETHIT NANOKOMPOZITOK VIZSGÁLATA ^{57}Fe- ÉS ^{151}Eu MÖSSBAUER-SPEKTROSZKÓPIÁVAL, VALAMINT RÖNTGEN-DIFFRAKTOMETRIÁVAL
12:50	**13:00**	**Szavazás**
13:00	**14:00**	**Ebéd**
VI. szekció		Elnök: Kertész István
14:00	**14:20**	Szemenyei Erzsébet, Környei József: NYOMJELZŐ RADIONUKLIDOK A BIOSZERVETLEN KÉMIA SZEMSZÖGÉBŐL
14:20	**14:40**	Szemenyei Erzsébet, Keresztes Szilvia, Környei József: ^{177}Lu ÉS ^{161}Tb: A „TRÓNON ÜLŐ” ÉS A „TRÓNKÖVETELŐ”
14:40	**15:00**	Petrányi János, Zsitnyányi Attila, Jónás Jácint, Garai Zoltán, Veres Gábor: RADIOAKTÍV HULLADÉKOKAT MINŐSÍTŐ MOBIL KONTÉNER FEJLESZTÉSE
15:00	**15:20**	Kovács Eszter Mária, Kónya József, Nagy Noémi: La^{3+} MEGKÖTÉSE Ca-MONTMORILLONITON: KINETIKAI SZAKASZOK, NEM SZTÖCHIOMETRIKUS IONCSERE ÉS KÉSLELTETETT Fe-MOBILIZÁCIÓ
15:20	**15:50**	**Kávészünet**

VII. szekció		Elnök: Homlok Renáta
16:00	**17:00**	Homlok Renáta: TUDOMÁNYOS KVÍZ
17:00		A Vértes Attila Ifjúsági Nívódíj szavazatok összeszámolása, a bírálóbizottság ülése
19:00	**22:00**	Bankett és a konferencia Előadói Nívódíjának kihirdetése

OKTÓBER 14. SZERDA

8:00	**9:00**	**Reggeli**
VIII. szekció		Elnök: Lázár Károly
09:10	**09:30**	Miroslav Taranda, Zoltán Kassai, Zuzana Čepeľová, Patrik Mrmus, Andrej Tibenský, Peter Mikuš, Marek Leporis: FROM TARGET TO TRACER: [^{64}Cu]$CuCl_2$ PRODUCTION AND ROBUST RADIOLABELING OF THE HYPOXIA PET AGENT [^{64}Cu][Cu(ATSM)]
09:30	**09:50**	Béres Kende Attila, Tulik Bálint István, Novodárszki Gyula, Solt Hanna, Barthos Róbert, Libor Kvitek, Shiro Kubuki, Homonnay Zoltán, Kótai László: SZABÁLYOZHATÓ SZERKEZETŰ NANOMÉRETŰ VEGYES ÁTMENETIFÉM OXID KATALIZÁTOROK ELŐÁLLÍTÁSA SZILÁRD-FÁZISÚ KVÁZI-INTRAMOLEKULÁRIS REDOXIREAKCIÓ SEGÍTSÉGÉVEL
09:50	**10:10**	Gméling Katalin, Szilágyi Veronika, Maróti Boglárka, Kovács János Aurél, Tóth Zita, Murillo-Rincon Jairo Alberto: ELEMENTAL FINGERPRINTS AND ORIGIN IDENTIFICATION OF FOOD POWDERS USING NAA, PGAA AND XRF
10:10	**10:30**	Kasztovszky Zsolt, Szilágyi Veronika, Gméling Katalin, Harsányi Ildikó, Maróti Boglárka, Roxana Bugoi, Alexandra Ţârlea, Laurenţiu Cliante: RÉGÉSZETI ÜVEGLELETEK EREDETMEGHATÁROZÁSA NEUTRONAKTIVÁCIÓS TECHNIKÁKKAL
10:30	**10:50**	Mikeházi Antal János, Németh Zoltán, Vankó György: FUNKCIONÁLIS MOLEKULÁK VIZSGÁLATA PUMPA-SZONDA SZÓRÁSI KÍSÉRLETEKKEL ULTRAGYORS IDŐSKÁLÁN
10:50	**11:20**	**Kávészünet**

IX. szekció		Elnök: Kasztovszky Zsolt
11:20	**11:40**	Kovács Krisztina, Pfeil Anna, Wojnárovits László: SZULFADIAZIN ÉS A SZULFAMETAZIN HIDROXILGYÖK-REAKCIÓINAK KINETIKÁJA ÉS TRANZIENS KÖZTITERMÉKEI
11:40	**12:00**	Homlok Renáta, Tegze Anna, Pavel Monica, Takács Erzsébet, Wojnárovits László, Kovács Krisztina: ÓZONOZÁSI RENDSZER FEJLESZTÉSE ÉS ALKALMAZÁSA SZERVES MIKROSZENNYEZŐK KEZELÉSÉRE: ÖSSZEHASON-LÍTÁS ELEKTRONSUGARAS BESUGÁRZÁSSAL
12:00	**12:20**	Kiss Lóránt, Homlok Renáta, Tóth Petra, Tegze Anna, Mészáros László: HULLADÉK GUMIABRONCS-ŐRLET ALAPÚ ADSZORBENSEK FEJLESZTÉSE SUGÁRZÁSSAL INICIÁLT OJTÁSI TECHNOLÓGIÁVAL SZENNYVÍZ-TISZTÍTÁSI ALKALMAZÁSOKHOZ
12:20	**12:40**	Gonter Katalin, Lőrincz Hajnalka: RADIOAKTÍV ANYAGOK HELYI NYILVÁNTARTÁSÁVAL KAPCSOLATOS TAPASZTALATOK
12:40	**12:50**	A konferencia zárszava – Kónya József
13:00	**14:00**	**Ebéd, hazautazás**

A konferencia

ELŐADÁS-KIVONATAI

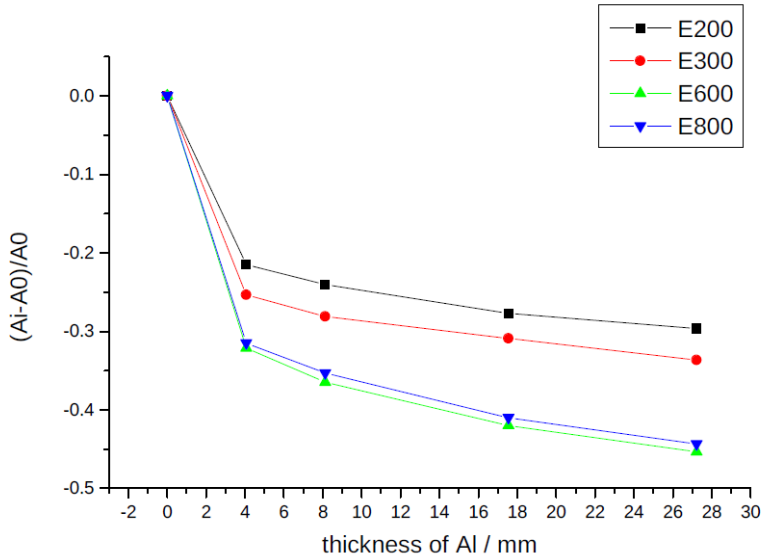
2026. október 12.
hétfő

RADIOAKTÍV HULLADÉKOK MINŐSÍTÉSÉT CÉLZÓ LABORATÓRIUMI TESZTKÍSÉRLETEK

Süvegh Károly, Homonnay Zoltán, Kovács Krisztina, Kudor Mátyás

ELTE Kémiai Intézet, Magkémiai Laboratórium

A radioaktív hulladékok elhelyezése általános problémája a nukleáris ágazatnak, de ez nem csak a – jóval közismertebb – kiégett fűtőelemek sorsával kapcsolatos probléma, hanem érinti azokat a hulladékokat (nem feltétlen nukleáris anyagokat, hanem általában radioaktív izotópokat) amelyek radioaktivitása azon a határon van, ami a szabad szintű aktivitáshoz közeli. Annak eldöntése, hogy egy adott, radioaktív hulladékot tartalmazó hordóban lévő aktivitás olyan csekély, hogy az felszabadítható, nem csak szakmai, hanem komoly anyagi konzekvenciákkal járó kérdés is. Ezért kritikusan fontos olyan egyszerű és lehetőleg olcsó módszer megtalálása, ami a hulladék minősítését megbízhatóan garantálja. A Gamma Zrt. által kezdeményezett projekten belül, egy ilyen módszer kidolgozásához szükséges néhány laboratóriumi tesztkísérlet eredményéről számolunk be.



1. ábra. Adott energiájú (Exxx in keV) fotonok relatív intenzitáscsökkenése NaI(Tl) szcintillációs detektorral mérve Al-abszorber esetén. Az eltérő viselkedés a mérési geometria függvénye.

Köszönetnyilvánítás:
A bemutatott munka a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott, 2024-1.1.1-KKV_FÓKUSZ-2024-00076 számú projekt részeként valósult meg.

LABORATORY TEST EXPERIMENTS AIMED AT THE CHARACTERIZATION OF RADIOACTIVE WASTE

Süvegh Károly, Homonnay Zoltán, Kovács Krisztina, Kudor Mátyás

ELTE Institute of Chemistry, Laboratory of Nuclear Chemistry

The disposal of radioactive waste is a general challenge for the nuclear sector; however, the issue extends beyond the fate of spent fuel—which is far more widely known—to include waste materials (not necessarily nuclear fuel, but generally radioactive isotopes) with activity levels approaching the threshold for clearance. Determining whether the radioactivity within a specific drum of waste is low enough to allow for its clearance is a matter with significant financial implications, in addition to technical ones. Consequently, it is critically important to identify a simple and—ideally—cost-effective method that reliably ensures the proper classification of the waste. In this paper, we report on the results of laboratory tests conducted as part of a project initiated by Gamma Zrt. to develop such a method.

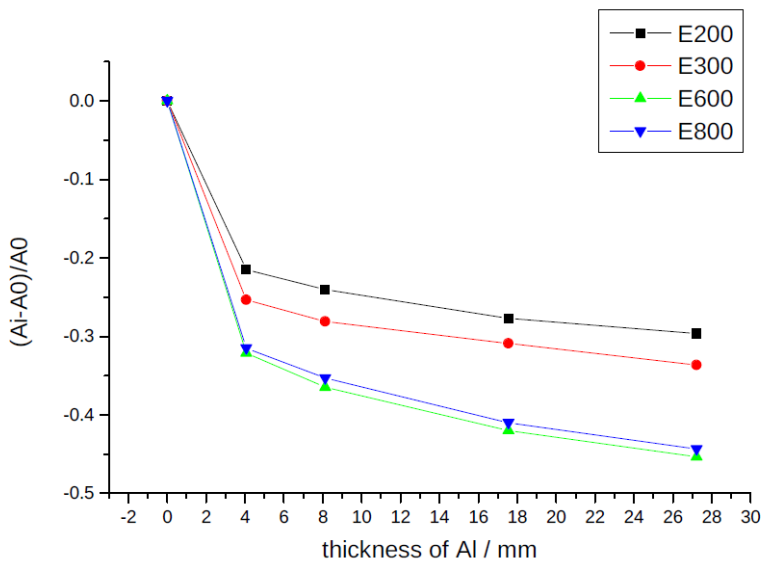


Figure 1. Relative intensity attenuation of photons of a given energy (Exxx in keV) measured with an NaI(Tl) scintillation detector using an Al absorber. The differing behavior is a function of the measurement geometry.

Acknowledgements:
The work presented was carried out with funding from the National Research, Development and Innovation Fund of the Ministry of Culture and Innovation, as part of project no. 2024-1.1.1-KKV_FÓKUSZ-2024-00076, supported by the National Research, Development and Innovation Office.

NAGYMÉRETŰ RADIOAKTÍV HULLADÉK IZOTÓPÖSSZETÉTELÉNEK MEGHATÁROZÁSA

Nényei Árpád, Feil Ferenc, Menyhei Dávid, Meczker András

MVM Paksi Atomerőmű Zrt., 7031 Paks, Pf. 71

A Paksi Atomerőműben a 2003-ban történt üzemzavar felszámolása során több egyedi berendezést és eszközt használtak. Ezek közül a legnagyobb az ún. munkaplatform, amit hulladékként nem lehetett kezelni a normál üzemi technológiákkal, a tárolása szintén körülményes volt, mert csak a reaktorcsarnokban fért el és útban volt az üzemviteli és karbantartási munkák során. A lehetséges kezelési és ártalmatlanítási lehetőségek kidolgozásához és végrehajtásához szükséges volt a radioaktív szennyező izotópok összetételnek meghatározása.

A platformot nagy aktivitású radioaktív törmelék eltávolítása során használták, ami nukleáris üzemanyagból keletkezett, a szennyezői között elméletileg a periódusos rendszer mindegyik izotópja megtalálható volt. Ezért először azt a koncepciót kellett kidolgozni, hogy mik azok a radionuklidok, amiket szükséges megmérni.

különböző módszerekkel többször is dekontaminálták, ezért a fém felületén már csak fixált formában jelenlévő radioaktív szennyezők mintázására a klasszikus dörzsmintavétel nem megfelelő. Továbbá mivel a berendezés felszíne nagy (~160 m^2) amin a szennyeződés eloszlása sem ismert, így az azonos térbeli eloszlású mintavétel így nem adna valós eredményt, ezért olyan módszert használunk, amivel a rendelkezésre álló lehetőségek alapján is igazolni tudjuk, hogy a mért értékek jellemzőek a teljes hulladék mennyiségre. Ezt egyrészt maga mintavételi program biztosította: az elsődlegesen alkalmazott elektrokémiai mintavételt kéziműszeres mérésekkel és dörzsmintavételekkel egészítettünk ki, és felhasználtuk az üzemeltetés során képződött kontamincáiós tapasztalatokat is. Továbbá ennek megfelelően dolgoztuk ki az eredmények kiértékelésének módszertanát is, így a minták gammaspektrometriai adatainak előzetes értékelése és megfelelő statisztikai feldolgozása alapján kerültek kiválasztásra a komplex izotópösszetétel meghatározására szolgáló minták. Ezek az ún. nehezen mérhető izotópok (alfa-, lágy béta-sugárzó és röntgen sugárzó nuklidok) mérésére az atomerőmű üzemellenőrző laboratóriuma nincs felkészülve, ezért azok meghatározását külső intézetben végeztettük el.

Az eredmények ismeretében megvizsgáltuk az alternatív hasznosítási, kezelési és elhelyezési lehetőségeket. Ami alapján a sugárvédelmi és műszaki szempontból a legbiztonságosabb megoldás, a platformot, egyedi sugárhatósági felszabadítási eljárást követően, darabolás nélkül kiszállítani, és veszélyes hulladéklerakón ártalmatlanítani. A részletes radiológiai vizsgálatok eredményei alapján definiáltuk a felszabadítási folyamat tervezési alapját, definiáltuk azokat a besugárzási útvonalakat, amelyek ismeretében a lakosság többlet sugárterhelése is kiszámítható volt. Végül az így megalapozott engedélyezési folyamatot követően a platformot ki lehetett szállítani az atomerőmű ellenőrzött zónájából.

DETERMINATION OF THE ISOTOPIC COMPOSITION OF LARGE-SCALE RADIOACTIVE WASTE

Árpád Nényei, Ferenc Feil, Dávid Menyhei, András Meczker

MVM Paks Nuclear Power Plant Ltd., H-7031 Paks, P.O. Box 71, Hungary

During the recovery operations following the 2003 incident at the Paks Nuclear Power Plant, several unique items of equipment and tools were utilized. The largest among these was the work platform, which could not be processed as waste using standard operational technologies. Its storage was similarly problematic, as it fitted only within the reactor hall and posed an obstruction during operation and maintenance activities. To develop and execute viable management and disposal options, determining the radioactive isotopic composition became essential.

The platform was employed during the removal of high-activity radioactive debris derived from nuclear fuel; thus, theoretically, isotopes of every element in the periodic table could be present among the contaminants. Consequently, the initial objective was to establish a framework defining which specific radionuclides required measurement.

A complex sampling strategy also had to be formulated. Given that the platform had previously undergone multiple decontamination cycles using various methods, classical smear sampling was inadequate for characterizing the radioactive contaminants remaining fixed on the metal surface. Furthermore, owing to the large surface area of the equipment (~160 m²) and the unknown distribution of contamination, uniform spatial sampling would not have yielded representative results. Therefore, a method was selected to demonstrate, within the available capabilities, that the measured values were representative of the entire waste volume.

This was ensured primarily through the sampling program itself: the primary technique of electrochemical sampling was supplemented by hand-held instrument measurements and smear samples, alongside operational experience regarding contamination patterns. Accordingly, a methodology for data evaluation was devised: samples designated for comprehensive isotopic characterization were selected based on preliminary evaluation and statistical processing of gamma spectrometry data. Because the power plant's operational monitoring laboratory is not equipped to measure difficult-to-measure isotopes (alpha-, soft beta-, and X-ray-emitting nuclides), their determination was contracted to an external specialized institute.

Based on the analytical results, alternative recycling, treatment, and disposal options were evaluated. From radiation protection and technical safety perspectives, the optimal solution was determined to be the off-site transport of the platform without dismantling, following an individual regulatory clearance procedure, for final disposal at a hazardous waste landfill. The results of the detailed radiological evaluations established the design basis for the clearance process and defined the exposure pathways required to calculate potential public dose increments. Ultimately, following this well-substantiated licensing process, the platform was successfully removed from the controlled area.

A BUDAPESTI KUTATÓREAKTOR SUGÁRVÉDELMI RENDSZERÉNEK ÉRTÉKELÉSE MUNKAVÉDELMI SZEMPONTBÓL

Rátkai Ákos Tamás

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest 1121 Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

A nukleáris létesítmények biztonságos működtetése olyan komplex megközelítést igényel, amelyben a technológiai és sugárvédelmi követelmények mellett a munkavédelem szempontjai is hangsúlyosan érvényesülnek. Sugárveszélyes munkakörnyezetben a hagyományos munkahelyi veszélyforrások mellett az ionizáló sugárzásból eredő kockázatok kezelése is szükséges, ezért a munkavédelem és a sugárvédelem számos területen szorosan kapcsolódik egymáshoz. A kutatás célja a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont által üzemeltetett Budapesti Kutatóreaktor munkavédelmi és sugárvédelmi rendszerének együttes vizsgálata, a két szakterület kapcsolódási pontjainak feltárása, valamint a továbbfejlesztés lehetséges irányainak meghatározása volt.

A vizsgálat dokumentumelemzésre, helyszíni bejárásokra és kvalitatív adatgyűjtésre épült. A kutatás során a vonatkozó jogszabályi és intézményi szabályozás mellett a reaktor területén alkalmazott munkavédelmi és sugárvédelmi intézkedések gyakorlati megvalósulása is értékelésre került. A helyszíni tapasztalatokat szakmai interjúk egészítették ki, amelyek segítségével lehetőség nyílt a jelenlegi rendszer működésének, erősségeinek és továbbfejleszthető területeinek gyakorlati szempontú feltárására.

A vizsgálat alapján a Budapesti Kutatóreaktorban a munkavédelmi és sugárvédelmi feladatok szorosan összekapcsolódnak, ugyanakkor a két szakterület sajátos kompetenciái és felelősségi körei továbbra is jól elkülöníthetők. A kutatás nem azonosított olyan rendszerszintű hiányosságot, amely a jelenlegi biztonsági rendszer alapvető átalakítását indokolná, ugyanakkor több olyan fejlesztési lehetőség került meghatározásra, amelyek a meglévő struktúrákra építve tovább növelhetik a biztonsági működés hatékonyságát. A fejlesztési irányok között megjelenik többek között a munkavédelmi és sugárvédelmi ismeretek célzott fejlesztése, a reaktorépületbe történő belépést megelőző alapismeretek egységesítése, az innovatív gyakorlati képzési lehetőségek szélesebb körű alkalmazása, a biztonsági információk hozzáférhetőségének javítása, valamint a meglévő digitális rendszerek továbbfejlesztésének lehetősége.

Az eredmények alapján a munkavédelem és a sugárvédelem nem egymást helyettesítő, hanem egymást kiegészítő biztonsági területek. A két szakterület közötti kapcsolatok tudatos erősítése – saját szakmai kompetenciáik és felelősségi rendszerük megtartása mellett – hozzájárulhat a kutatóreaktori munkakörnyezet biztonságának és a szervezeti biztonsági kultúrának további fejlesztéséhez.

Kulcsszavak: Budapesti Kutatóreaktor, munkavédelem, sugárvédelem, nukleáris biztonság, biztonsági kultúra

VIZUALIZÁLT H3D® H400 MÉRÉSTECHNIKAI ESZKÖZ KIPRÓBÁLÁSA ORVOSI ALKALMAZÁSBAN

Taba Gabriella[1], Kári Béla[1], Szűcs László[1], Ritvay Dorottya Mária[1], Vizbel Ákos[1], Petrányi János[2]

1. Semmelweis Egyetem, Sugárvédelmi Szolgála
2. Gamma Műszaki Zrt.

A Semmelweis Egyetemen több helyszínen lehetőség nyílt a Gamma Műszaki Zrt. együttműködésével egy új sugárzást mérő és vizualizáló eszköz (H3D® H400) kipróbálásra. Az eszköz képes 4π (360°) forrás beazonosítására és egy képi felvételre történő fúzióval láthatóvá tenni a sugárzási tért. Méréstartománya 50keV-3000keV között van, detektor >19 cm^3 CZT (CdZnTe) készült így az orvosi területen használt izotópok esetén alkalmazható. Az eszköz rendelkezik izotóp könyvtárral így sikerült tesztelnünk orvosi területen az izotóp azonosítási képességeit. A leghasznosabb alkalmazás a hulladékok azonosításánál és minősítésénél bizonyult. De nagyon hasznos a képi vizualizáció röntgen dózis terek, vagy a sugárterápiás eszköz esetén is. Oktatási célokra immáron 2 éve használjuk a hulladék merésekor felvett képanyagot. Radiokémiai alkalmazásnál elsősorban a hulladékok kezelésénél lágy béták és alfa sugárzók kivételével használható. A gyártó eszközei között találhatóak compton-szórást mérő modellek is.

TECHNÉCIUM-99 ÉS RÁDIUM-226 ICP-MS MÓDSZERREL

Papp István[1], Felföldi Réka[2]

[1]*Isotoptech Zrt*
[2]*Debreceni Egyetem Természettudományi és Technológiai Kar Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék*

Az Isotoptch Zrt. laboratóriumaiban több, mint két évtizede foglalkozunk nehezen mérhető radionuklidok meghatározásával. A radiometrikus módszerek mellett a hosszú életű nehezen mérhető izotópok meghatározására induktív csatolású plazma - tömegspektrometriás módszereket is fejlesztünk. A tömegspektrometriás módszerek előnye a rövidebb mérési idő, esetenként az egyszerűbb kémiai elválasztás. Előadásunkban a rádium-226 és a technécium-99 nuklidok elválasztására és meghatározására fejlesztett módszerek eredményeit mutatjuk be. A Ra-226 nuklidot közvetlenül határoztuk meg vízmintából. A módszer alsó méréshatára kb. 1 Bq/l, ami előkoncentrálással tovább csökkenthető.

A technéciumot atomerőművi folyékony radioaktív hulladék mintából határoztuk meg savas roncsolást és extrakciós kromatográfiás elválasztás után. Az elválasztást tercier amin hatóanyagú, gyengén bázisos kromatográfiás gyantán végeztük. Az alsó méréshatár a feldolgozott minta mennyiségétől függően 0,05-0,2 Bq/l.

DETERMINATION OF TECHNETIUM-99 AND RA-226 WITH ICP-MS METHOD

István Papp[1], Réka Felföldi[2]

[1]Isotoptech Zrt., Bem tér 18/C 4026 Debrecen, Hungary
[2]University of Debrecen Faculty of Science and Technology, Department of Inorganic and Analytical Chemistry, Egyetem tér 1., 4032 Debrecen, Hungary

Difficult-to-measure radionuclides are determined in the laboratories of Isotoptech Zrt for more than two decades. In addition to radiometric methods, we are also developing inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) techniques for the determination of long-lived, DTM isotopes. The advantages of mass spectrometry methods include shorter measurement times and, in some cases, simpler chemical separation. We present the results of methods developed for the separation and determination of radium-226 and technetium-99 nuclides. The Ra-226 nuclide was determined directly from water samples. The lower limit of quantification (LOQ) of the method is approximately 1 Bq/L. The LoQ can be improved by pre-concentration.
Technetium was determined from nuclear power plant liquid waste samples following acid digestion and extraction chromatographic separation. The separation was performed on a weak basic chromatographic resin containing a tertiary amine extractant. The lower limit of quantification ranges from 0.05 to 0.2 Bq/L, depending on the volume of the processed sample.

ÚJ KROMATOGRÁFIÁS GYANTÁK α-BOMLÓ IZOTÓPOK ANALITIKÁJÁBAN

Vajda Nóra[1], Molnár Zsuzsa[1], Bokori Edit[1], Papp István[2]

[1] RADANAL Kft., Konkoly-Thege M. út 29-33, 1121 Budapest
[2] ISOTOPTECH Zrt., Bem tér 18/C, 4026 Debrecen

Az α-bomló nuklidok családját természetben előforduló bomlási sorok anyaelemeinek (U, Th), bomlási soraik tagjainak (Ra, Po), mesterséges eredetű aktinidáknak (Np, Pu, Am, Cm), valamint egyéb aktiválási termékeknek (Ac, Lu) a radioizotópjai alkotják. Szerepük a nukleáris iparban, a környezetben és az utóbbi időben egyre növekvő mértékben a nukleáris medicinában kiemelkedő. Elemzésük α-spektrometriával és napjainkban egyre elterjedtebben tömegspektrometriával történik. Mindkét módszer esetében a műszeres analitikát megelőzi az elemspecifikus kémiai elválasztás. A 90-es évektől terjedt el az extrakciós kromatográfiás (EK) gyanták használata az analitikában a csapadékos, ioncserés, oldószeres extrakciós módszerek kiváltására nagyobb hatékonyságuk. gazdaságosságuk, gyors kinetikájuk miatt. Horwitz és munkatársai fejlesztették és állították elő a ma már általánosan elterjedt szelektív EK gyantákat, a TEVA, TBP, UTEVA, TRU, LN, DGA gyantákat az aktinidák, a SR gyantát a radiostroncium elválasztására. Ezekben a gyantákban kémiailag különböző extrahálószereket (kvaterner aminokat, szerves foszfátot, foszfonátot, foszfin-oxidot, kelátképzőt, glikol-amidot, ill. koronaétert – a nukleáris technológiából ismert extrahálószereket - kötöttek meg inert hordozón. Ezeket a gyantákat az EiChrom (USA) és a TRISKEM (Fr) cégek fejlesztik, gyártják, forgalmazzák szerte a világon. A RADANAL a TRISKEM céggel két évtizeden át együttműködve vett részt az új termékek minősítésében, új módszerek fejlesztésében.

Az utóbbi évek új fejlesztési iránya a hibrid gyanták előállítása, melyben a TRISKEM élen jár. A ***TK221 gyanta*** a DGA és a TRU gyanták hatóanyagát kombinálja kiküszöbölve az eredeti gyanták hátrányait, nevezetesen a DGA elégtelen U, és a TRU elégtelen Am, Cm megkötő képességét. A TK221 gyantának kiváló mind a megoszlási hányadosa, mind a szelektivitása az összes aktinidára. A TK221 gyantán megköthető és szelektíven elválasztható az Ac az U-tól, Th-tól, La-tól, így jelenleg a legjobb EK anyag az ^{225}Ac előállítására theranosztikus alkalmazáshoz. A ***TK103 gyanta*** az LN és az SR gyanták hatóanyagát kombinálja és ezáltal a Ra elválasztására válik alkalmassá. A kelátképző komponens révén híg savakból jól kötődik a Ra és töményebb salétromsavból a koronaéteren marad, míg más alkáli és alkáliföldfémek mellőle eluálhatók. Ezzel a módszer a ^{226}Ra választható el és elemezhető környezeti mintákban vagy a ^{223}Ra tisztítható orvosi alkalmazásokhoz.

Az előadásban áttekintést kívánunk nyújtani az EK gyanták főbb csoportjairól és bemutatjuk saját vizsgálataink alapján a hibrid gyanták három alkalmazási területét: aktinidák elválasztása vízmintából TK221 gyantával, ^{225}Ac elválasztása ^{229}Th-től TK221 gyantával, ^{226}Ra elválasztása TK103 gyantával.

NOVEL CHROMATOGRAPHIC RESINS FOR THE ANALYSIS OF α DECAYING RADIONUCLIDES

Nóra Vajda[1], Zsuzsa Molnár[1], Edit Bokori[1], István Papp[2]

[1] RADANAL Kft., Konkoly-Thege M. út 29-33, 1121 Budapest
[2] ISOTOPTECH Zrt., Bem tér 18/C, 4026 Debrecen

The family of alpha-decaying nuclides comprises radioisotopes of the parent elements of naturally occurring decay series (U, Th) and their progeny (Ra, Po), as well as anthropogenic actinides (Np, Pu, Am, Cm) and other activation products (Ac, Lu). They play a prominent role in the nuclear industry, the environment, and— in recent times—in nuclear medicine. Their analysis is performed using alpha spectrometry and, increasingly, mass spectrometry. In both cases, instrumental analysis is preceded by element-specific chemical separation. Since the 1990s, the use of extraction chromatography (EC) resins in analytical chemistry has become widespread, replacing precipitation, ion exchange, and solvent extraction methods due to their superior efficiency, cost-effectiveness, and rapid kinetics. Horwitz E.P. and his colleagues developed and produced the now widely used selective EC resins—such as TEVA, TBP, UTEVA, TRU, LN, and DGA for actinide separation, and SR resin for radiostrontium separation—by immobilizing chemically distinct extractants (quaternary amines, organic phosphates, phosphonates, phosphine oxides, chelating agents, glycolamides, or crown ethers—extractants known from nuclear technology) onto an inert support. These resins have been developed, produced and world-wide commercialized by EiChrom (US) (www.eichrom.com) and TRISKEM (Fr) companies (www.triskem-international.com). RADANAL Ltd has participated in the quality control of the resins and development of new procedures in course of the last 20 years co-operating with TRISKEM.

recent trend in development is the production of hybrid resins, a field in which TRISKEM is a leader. TK221 resin combines the active components of DGA and TRU resins, thereby overcoming the drawbacks of the original resins—specifically, the insufficient binding strength of DGA for U and that of TRU for Am and Cm. TK221 resin exhibits excellent distribution coefficients and selectivity for all actinides. It allows for the binding and selective separation of Ac from U, Th, and La, making it currently the best extraction chromatography (EC) material for producing ^{225}Ac for theranostic application. TK103 resin combines the active components of LN and SR resins, making it suitable for separating Ra. Thanks to its chelating component, Ra binds effectively from dilute acids and is retained on the crown ether in more concentrated nitric acid, while other alkali and alkaline earth metals can be eluted. This method enables the separation and analysis of ^{226}Ra in environmental samples or the purification of ^{223}Ra for medical applications.

In this presentation, we aim to provide an overview of the main groups of extraction chromatographic (EC) resins and, based on our own studies, present three application areas for hybrid resins: the separation of actinides from water samples using TK221 resin, the separation of ^{225}Ac from ^{229}Th using TK221 resin, and the separation of ^{226}Ra using TK103 resin.

VÉLETLEN INJEKTÁLÁSSAL FELVETT RADIOSTRONCIUM ÁLTAL OKOZOTT SUGÁRTERHELÉS ELŐZETES ÉRTÉKELÉSE

Rékasi Zsófia, Korodi-Pántya Annamária, Pázmándi Tamás, Elek Richárd, Homoki Zsolt, Zagyvai Péter

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont

Sugárveszélyes munka során egy személy véletlenül megszúrta a kezét egy fecskendővel, amiben $^{82}Sr/^{82}Rb$-t és ^{85}Sr-t tartalmazó oldat maradéka volt. A felvételtől származó lekötött effektív dózis becsléséhez egésztestszámlálóval és vizeletmintákkal végeztünk gamma-spektrometriás méréseket. Bár ezek látszólag rutinfeladatok, több elemük (mérési geometria, detektorparaméter-kalibrációk, spektrumok kiértékelése, következtetés a felvett aktivitásra) is sajátos, az eredmények pontosságát jelentősen befolyásoló optimálást igényel. A baleseti szintet meg sem közelítő, de jól vizsgálható sugárterheléssel kapcsolatban még csak az előzetes értékelésről tudunk beszámolni. Reméljük, hogy a tapasztalatokból más, nem gamma-sugárzó stronciumizotópoktól (^{89}Sr, $^{90}Sr/^{90}Y$) származó potenciális sugárterhelés vizsgálatánál is felhasználható következtetések szűrhetők le.

PRELIMINARY EVALUATION OF INTERNAL EXPOSURE CAUSED BY INCIDENTAL INJECTION

Zsófia Rékasi, Annamária Korodi-Pántya, Tamás Pázmándi, Richárd Elek, Zsolt Homoki, Péter Zagyvai

HUN-REN Centre for Energy Research

A radiation worker incidentally stung his finger with a syringe containing traces of a solution of $^{82}Sr/^{82}Rb$ and ^{85}Sr. The dose consequence of this uptake was estimated on the basis of gamma spectrometric measurement of the whole body of the person and respective urine samples. Although these methods are routinely performed, their relevant elements (setting the measurement geometry, detector parameter calibrations, spectrum evaluations, deduction of the amount of the initial uptake) require special optimisation in order to obtain accurate and precise results. Only a preliminary account will be presented on this exposure that did not even approach the compulsory reporting level but constitutes a feasible example for scientific investigations. Hopefully the experiences with this event will be applicable to improve the assessment of potential internal exposures from important non-gamma radiating radiostrontium isotopes ^{89}Sr and $^{90}Sr/^{90}Y$.

KITERJEDT KÖRNYEZETI RADIOKARBON MONITORING DEBRECENBEN, A ZÖLD ŐRSZEM KERETÉBEN

Molnár Mihály[1], Bán Sándor[1], Nagy Dominik[1], Baráth Balázs Áron[1,2,3], Kertész Zsófia[1]

[1] HUN-REN Atommagkutató Intézet,
4026 Debrecen, Bem tér 18/c, E-mail: mmol@atomki.hu
[2] Környezettudományi Doktori Iskola, ELTE, 1117 Budapest, Hungary
[3] Isotoptech Zrt., 4026 Debrecen, Hungary

A légköri széndioxid, mit üvegházhatású gáz az ipari és lakossági környezeti terhelés egy jelentős szereplője. Izotópösszetétele, radiokarbon tartalma alapján meg lehet állapítani, hogy mekkora az inaktív, fosszilis hányad ebben, mely a fotoszintézisen keresztül a növényekbe és a táplálékláncunkba is belekerül. Ennek érdekében városunkban a levegő és a növényzet monitorozása is elindult, rendszeres formában.

Ugyanígy, a légköri aeroszol tömegének legalább a negyede, de gyakran akár a fele is szén, így az alkotóelemek sorában mindenképpen az egyik meghatározó, fő összetevő. A szén többféle forrásból érkezhet: szerves, elemi vagy szervetlen formában is jelen lehet a szállóporban. A forrásai egyaránt lehetnek természetesek és emberi hatások is, a lakosság, a közlekedés vagy az ipar oldaláról. Az emberi hatások egy jó része lehet mai, biogén szén alapú (például tűzifa égetés) vagy fosszilis alapú (kőszén, olaj vagy földgáz elégetése).

A szén-dioxidban, növényekben és az aeroszolban is lehetséges sokféle szénforrások részvételi arányának azonosítása egyik igen hatékony eszköze a radioaktívszén-izotópos, azaz radiokarbonos (C-14) elemzés, ami nulla (0,0) értéket ad tisztán fosszilis források esetén (mert a geológiai tartózkodási idők alatt teljesen elbomlott) és 1,0 „modern” értékhez közelit a tisztán recens, biogén szénforrások esetén (mai természetes, kozmogén egyensúlyi szint a légkörben).

Ebben a tanulmányban a Debrecenben vizsgát szén-dioxid, növények és széntartalmú aeroszol izotópos megfigyeléseinek többéves tapasztalatait mutatjuk be.

Köszönetnyilvánítás
Az itt bemutatott kutatás a Zöld Őrszem Debreceni Környezeti Ellenőrző Rendszer keretében valósult meg.

A MOHI ATOMERŐMŰ MAGYARORSZÁGI KÖRNYEZETI HATÁSAINAK VIZSGÁLATA

Osváth Szabolcs, Homoki Zsolt, Kövendiné Kónyi Júlia, Szigeti Ágnes, Rell Péter

Nemzeti Népegészségügyi és Gyógyszerészeti Központ jogutódja
Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Főosztály
Lakossági és Környezeti Sugáregészségügyi Osztály

A Mohi Atomerőmű mintegy 40 km-re fekszik Magyarország határától, így hatásterülete átnyúlik hazánk (elsősorban a Pilis és a Börzsöny) területére. Ezért több hazai szervezet is kiemelt figyelmet fordít az említett régió nukleáris környezeti monitorozására. Ebben az előadásban az NNGYK által koordinált ERMAH (Egészségügyi Radiológiai Mérő és Adatszolgáltató Hálózat) program Mohi alprogramjának 2014 és 2025 közötti eredményeit tárgyaljuk.

Kihullási (fallout) mintát minden évben 8 hónapon át (március elejétől október végéig) gyűjtünk. Évente kétszer (márciusban és októberben) 3 napos expedíció keretében veszünk további mintákat (talaj, iszap, fű, felszíni víz, ivóvíz), és végzünk in-situ gamma-spektrometriás vizsgálatokat. A méréseket – a megfelelő mintaelőkészítéseket követően – általában összes-béta számlálással és HPGe detektoros gamma-spektrometriával végezzük, a vízminták esetében LSC és AAS vizsgálatokkal kiegészítve.

A **felszíni vizek**ben jellemzően (1,7 ± 1,2) Bq/l ^{3}H-ot, (119 ± 65) mBq/l ^{40}K-ot és (155 ± 71) mBq/l összes-béta aktivitáskoncentrációt mértünk. Az **ivóvizek**ben ugyanezek a mennyiségek: jellemzően (2,6 ± 1,7) Bq/l ^{3}H, (84 ± 18) mBq/l ^{40}K és (110 ± 25) mBq/l összes-béta aktivitáskoncentráció. Az előadásban diszkutáljuk, hogy a ^{40}K és az összes-béta aktivitáskoncentrációk egymáshoz való viszonya mely esetben támasztják alá egymás érvényességét, és mely esetben ébresztenek kételyt eziránt.

A **talaj**mintákban az összes-béta aktivitáskoncentráció jellemző értéke (608 ± 90) Bq/kg, a ^{40}K-é (472 ± 65) Bq/kg, a ^{137}Cs-é (13,1 ± 8,4) Bq/kg. Az **iszap**mintákban ugyanezek: (596 ± 63) Bq/kg összes-béta, (444 ± 76) Bq/kg ^{40}K és (6,1 ± 3,4) Bq/kg ^{137}Cs. A **fű**mintákban hasonlóképpen: (772 ± 311) Bq/kg összes-béta, (845 ± 373) Bq/kg ^{40}K és (0,8 ± 0,6) Bq/kg ^{137}Cs. (A ^{137}Cs a fűmintáknak csak a minták felében volt kimutatható, a többi esetben a kimutatási határt vettük figyelembe, ami enyhén fölfelé torzítja az eredményt.) Az előadásban megkíséreljük megválaszolni, miért lehet a fűmintákban a ^{40}K aktivitáskoncentrációja nagyobb az összes-bétáénál (nemcsak az aggregált adatok, hanem az individuális minták esetében is), míg a talaj és az iszap esetében csak az ellentétes reláció figyelhető meg.

A **fallout** minták mérési eredményei szerint a ^{7}Be jellemző mennyisége (86 ± 60) Bq/m^{2}/30 nap, az összes-bétáé (15 ± 9) Bq/m^{2}/30 nap, a ^{40}K-é (17 ± 28) Bq/m^{2}/30 nap, a ^{137}Cs-é (0,19 ± 0,09) Bq/m^{2}/30 nap, a ^{210}Pb-é (27 ± 58) Bq/m^{2}/30 nap. (A ^{137}Cs csak a minták töredékében volt kimutatható, a többi esetben a kimutatási határt vettük figyelembe, ami enyhén fölfelé torzítja az eredményt.) Az előadásban választ keresünk a ^{40}K és a ^{210}Pb szokatlan eredményeire.

A „Mohi alprogram” mintáiban mért aktivitáskoncentrációk megfelelnek a szokásos hazai értékeknek. Megállapíthatjuk tehát, hogy a Mohi Atomerőmű magyarországi környezeti hatásai elhanyagolhatóak. Tanulság ugyanakkor, hogy a vizsgálati eredmények elemzése során tisztában kell lennünk az adathalmaz eredetével (pl. az alkalmazott minta-előkészítési eljárás vagy mérési technika mibenlétével), különben téves következtetésekre juthatunk.

ENVIRONMENTAL EFFECTS OF THE MOCHOVCE NUCLEAR POWER PLANT IN HUNGARY

Szabolcs Osváth, Zsolt Homoki, Júlia Kövendiné Kónyi, Ágnes Szigeti, Péter Rell

National Center for Public Health and Pharmacy
Department of Radiobiology and Radiohygiene
Division of Residential and Environmental Radiohygiene

The Mochovce Nuclear Plant is about 40 km from the border of Hungary, therefore its radioactive emission can affect the Pilis and Börzsöny regions. Many Hungarian organizations operate environmental monitoring programs in that area. In this presentation the results of the RAMDAN (Radiological Monitoring and Data Acquisition Network, coordinated by the NCPHP) between 2014 and 2025 are discussed.

Fallout samples are collected from Marc until October; other samples (soil, sediment, grass, surface water, drinking water) are collected twice a year, when in-situ gamma-spectra are also acquired. Samples are prepared, then analyzed using total beta counting and gamma-spectrometry by HPGe detector. Water samples are also analyzed using LSC and AAS.

In **surface water**, typical activity concentrations are (1,7 ± 1,2) Bq/L ^{3}H, (119 ± 65) mBq/L ^{40}K and (155 ± 71) mBq/L total beta. In **drinking water**, typical activity concentrations are (2,6 ± 1,7) Bq/L ^{3}H, (84 ± 18) mBq/L ^{40}K and (110 ± 25) mBq/l total beta. In the presentation it is discussed, how the relation between ^{40}K and total beta activity concentration can be used to support or to call into question each other.

In **soil** samples (608 ± 90) Bq/kg total beta, (472 ± 65) Bq/kg ^{40}K, (13,1 ± 8,4) Bq/kg ^{137}Cs are typical. In **sediment**s, the corresponding values are: (596 ± 63) Bq/kg total beta, (444 ± 76) Bq/kg ^{40}K and (6,1 ± 3,4) Bq/kg ^{137}Cs. In **grass**, similarly: (772 ± 311) Bq/kg total beta, (845 ± 373) Bq/kg ^{40}K, (0,8 ± 0,6) Bq/kg ^{137}Cs. (In half of the grass samples, activity concentration of ^{137}Cs was below the detection level. In these cases, detection levels were considered.) In the presentation an answer is searched, how activity concentration of ^{40}K in grass can be greater than that of total beta, while in soil and sediment the reverse relation is exclusively to observe.

Analyzing **fallout** samples the following typical quantities were found: (86 ± 60) Bq/m^{2}/30 day ^{7}Be, (15 ± 9) Bq/m^{2}/30 day total beta, (17 ± 28) Bq/m^{2}/30 day ^{40}K, (0,19 ± 0,09) Bq/m^{2}/30 day ^{137}Cs, (27 ± 58) Bq/m^{2}/30 day ^{210}Pb. (In majority of samples, activity of ^{137}Cs was below the detection level. In these cases, detection levels were considered.) In the presentation the unusual results of ^{40}K and ^{210}Pb are hopefully explained.

Activity concentrations of the "Mohi" samples are in acceptable agreement with the usual Hungarian results. Conclusively, environmental effects of the Mochovce Nuclear Power Plant are negligible in Hungary. However, it has also to be noted that origin of measurement results (for example preparation and measurement techniques) must be considered, when discussing these data. Otherwise, false conclusions can be drawn.

2026. október 13.
kedd

a

„Vértes Attila Ifjúsági Nívódíj”

elnyerésére benyújtott

közlemények

PÁLYÁZATI FELHÍVÁS

A „Vértes Attila Alapítvány” nevű közhasznú szervezet (a továbbiakban: Alapítvány), együttműködésben az MTA Radiokémiai Tudományos Bizottságával, (a továbbiakban: MTA RKTB) és a Magyar Kémikusok Egyesületével (a továbbiakban: MKE), a 35 évnél fiatalabb kutatók kiemelkedő kutatási eredményeinek elismerésére ösztöndíjat alapított

„Vértes Attila Ifjúsági Nívódíj”

elnevezéssel.
A Vértes Attila Ifjúsági Nívódíj (a továbbiakban: Nívódíj) 2026-ben azoknak a 35 évnél fiatalabb kutatóknak adományozható, akik a radiokémia tudományok területén végzett kutatási témájuk kidolgozásában az utolsó két évben kimagasló eredményt értek el.
Az eredményeket saját kutatási munkájából írt, minimum 4, maximum 6 oldal terjedelmű dolgozat, valamint az MKE közös szervezésében évente zajló "Őszi Radiokémiai Napok" konferencián tartott előadás alapján a szakértői kuratórium ítéli oda. A dolgozat alapját képezheti egy, referált folyóiratban már megjelent vagy megjelenésre elfogadott cikk, de a 4-6 oldalas dolgozatot minden pályázónak meg kell írni. Ebben az esetben az eredeti cikket is mellékelni kell, és fel kell sorolni a dolgozat irodalomjegyzékében. (A dolgozat megírásához alkalmazandó sablon a felhíváshoz csatolva.)

A dolgozatot angol vagy magyar nyelven kell megírni, és tartalmazzon egy 100-400 szavas angol- és magyar nyelvű kivonatot. Amennyiben a dolgozat alapja már megjelent cikk, ügyelni kell rá, hogy ábrák, táblázatok változtatás nélküli átvételéhez meg kell kérni a cikk kiadójának engedélyét. A dolgozatban a pályázónak első szerzőnek kell lenni.

A Nívódíj két kategóriában ítélhető oda:

I. kategória: Vértes Attila Ifjúsági Nívódíj
Ezt a díjat nem kaphatja olyan személy, aki azt korábban már legalább két alkalommal elnyerte.

II. kategória: Vértes Attila Ifjúsági Nívódíj, Különdíj

Az I. kategória nyertese nettó 150.000 Ft, azaz százötvenezer forint összegű Vértes Attila Ösztöndíjban részesül. A II. kategória nyertese nettó 100.000 Ft, azaz százezer forint összegű Vértes Attila Ösztöndíjban részesül. A Különdíj azoknak a sikeres pályázóknak adományozható, akik második, vagy további helyezést értek el.

Oklevél illeti meg a díjazott fiatal kutatót és témavezetőjét. Az okleveleket az MKE készítteti el, és azt a MTA RKTB elnöke, az MKE képviselője és az Alapítvány képviselője írja alá. Az elismerő okleveleket az Őszi Radiokémiai Napokon az MTA RKTB elnöke vagy delegáltja, a Szakértői Kuratórium elnöke vagy delegáltja és a Vértes Attila Alapítvány képviselője adja át ünnepélyes keretek között.

Az ösztöndíjat a nyertesek részére az Alapítvány biztosítja és utalja át a díjazottaknak a Szakértői Kuratórium jegyzőkönyve, és a díjazottak által kitöltött személyi adatlap alapján.

A díjazott az ösztöndíjat oktatási intézményekben folytatott tanulmányokra, kutatásra vagy külföldi tanulmányútra köteles fordítani.

Az ösztöndíj odaítéléséről az Alapítvány által felkért, 5 főből álló Szakértői Kuratórium dönt:

- Az Alapítvány alapítója, vagy annak delegáltja, aki egyben a Szakértői Kuratórium elnöke,
- Az MTA RKTB elnöke,

továbbá a beérkező közleményeket bíráló szakértők:

- Kónya József, a kémiai tudomány doktora,
- Wojnárovits László, a kémiai tudomány doktora,
- Zagyvai Péter, a kémiai tudomány kandidátusa.

A bíráló szakértők helyébe azok bármilyen okból történő visszalépése esetén az Alapítvány kuratóriuma jogosult más személyt felkérni.

Tanácskozási jogú tagok:
• az MTA RKTB titkára (egyben a Szakértői Kuratórium titkára) és
• az MTA RKTB Munkabizottságok elnökei vagy delegáltjaik.

Állandó meghívottak:
• Az Alapítvány kuratóriuma.

A Szakértői Kuratórium a Nívódíjra vonatkozó tudnivalókat, továbbá ezt a pályázati felhívást a "Őszi Radiokémia Napok" konferencia felhívással együtt teszi közzé az MKE honlapján.

Az írásos pályázati munkát a konferencia honlapján lévő on-line jelentkezési rendszeren keresztül kell benyújtani, DOC vagy RTF fájlba szerkesztve. A pályázathoz tartozó további anyagokat (pályázati űrlap, társszerzői nyilatkozat, hallgatói státusz igazolása, beszkennelve (PDF vagy JPEG, esetlegesen a folyóiratcikk DOI számot is tartalmazó PDF verziója) pedig egy tömörített ZIP fájl formájában e-mail-en kérjük beküldeni (Jószai István, e-mail: joszai.istvan@med.unideb.hu). Az adminisztratív mellékletek egy eredeti, aláírt példányát az Őszi Radiokémiai Napok regisztrációs pultjánál kérjük a konferencia kezdetén leadni. A pályázattal kapcsolatban további felvilágosítás a konferencia szakmai szervezőjétől (Jószai István, e-mail: joszai.istvan@med.unideb.hu) kérhető.

A pályázat benyújtási határideje 2026. szeptember 25. A szükséges formanyomtatványok és sablonok letölthetők a konferencia honlapjáról.

Budapest, 2026. május 27.

Dr. Szabó János Zoltán
az MKE ügyvezető igazgatója

Dr. Homonnay Zoltán
a Vértes Attila Alapítvány Kuratóriumának elnöke

A [^{18}F]FLT KÉSZÍTMÉNY SZTAVUDIN ÉS FLUOROTIMIDIN TARTALMÁNAK MEGHATÁROZÁSA UPLC ELJÁRÁSSAL

Hegyes Hanga Panna, Trencsényi György, Kertész István, Képes Zita, Jószai István

Debreceni Egyetem Általános Orvostudományi Kar Orvosi Képalkotó Intézet Nukleáris Medicina Tanszék, 4032 Debrecen, Nagyerdei krt. 98.

Absztrakt

A vizsgálat célja a sztavudin és az FLT meghatározására alkalmas folyadékkromatográfiás módszer fejlesztése volt a [^{18}F]FLT készítményben. A módszerfejlesztés során vizsgáltuk a gradiensidő, az áramlási sebesség, a detektálási hullámhossz, a kolonnahőmérséklet és az injektálási térfogat hatását a kromatográfiás paraméterekre. Az optimalizált körülmények között 5 perces lineáris gradiens, 0,4 ml/perc áramlási sebesség, 266 nm-es detektálás, 40°C-os kolonnahőmérséklet és 10 µl-es injektálási térfogat bizonyult megfelelőnek. A módszer kiváló linearitást mutatott ($R^2 > 0,999$). A vizsgált [^{18}F]FLT mintákban a sztavudin koncentrációja 0,6-3,6 µg/ml, míg az FLT koncentrációja 0,3-0,7 µg/ml között változott.

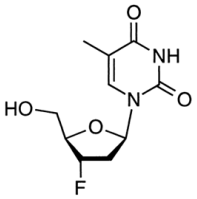
Abstract

The aim of this study was to develop a liquid chromatographic method for the determination of stavudine and FLT in [^{18}F]FLT preparations. During method development, the effects of gradient time, flow rate, detection wavelength, column temperature, and injection volume on chromatographic performance were investigated. Under the optimized conditions, a 5-minute linear gradient, a flow rate of 0.4 mL/min, detection at 266 nm, a column temperature of 40 °C, and an injection volume of 10 µL were found to be suitable. The method demonstrated excellent linearity ($R^2 > 0.999$). In the analyzed [^{18}F]FLT samples, stavudine concentrations ranged from 0.6 to 3.6 µg/mL, while FLT concentrations ranged from 0.3 to 0.7 µg/ml.

1. BEVEZETÉS

A pozitronemissziós tomográfia (PET) egy nukleáris medicina képalkotó eljárás, amely lehetővé teszi az élő szervezetben zajló biológiai és metabolikus folyamatok *in vivo* vizsgálatát. A vizsgálat során rövid felezési idejű, pozitronemittáló radionukliddal jelölt molekulákat, úgynevezett radiofarmakonokat juttatnak a szervezetbe. A radiofarmakonokban található pozitronemittáló radionuklidok bomlása során keletkező pozitronok a környező elektronokkal annihilációs kölcsönhatásba lépnek, amelynek eredményeként két, egymással közel 180°-os szöget bezáró, 511 keV energiájú gamma-foton keletkezik. E fotonok detektálásával és térbeli eloszlásuk rekonstrukciójával információ nyerhető az adott szövetek metabolikus és funkcionális aktivitásáról [1,2].

A 3′-deoxi-3′-[^{18}F]fluorotimidin ([^{18}F]FLT) egy timidinanalóg, amely molekulájában a 3′-hidroxilcsoport helyén radioaktív ^{18}F-izotóp található (1. ábra). A [^{18}F]FLT a sejtekbe elsősorban a nukleozid transzportereken keresztül jut be, majd a sejten belül a timidin-kináz-1 (TK1) által foszforileződik. Ennek következtében a sejten belül megkötődik, és felhalmozódása összefüggésben áll a sejtek proliferációs aktivitásával. A [^{18}F]FLT ezért a sejtek proliferációjának non-invazív, *in vivo* képalkotására alkalmazható radiotrészer, amelyet elsősorban onkológiai PET-vizsgálatokban használnak. Alkalmazása lehetőséget biztosít a daganatok proliferációs aktivitásának jellemzésére, valamint a betegség lefolyásának és a terápiás válasz változásainak nyomon követésére [3,4].



1. ábra: A [^{18}F]FLT szerkezeti képlete

A [^{18}F]FLT előállítása során – különösen a szilárd fázisú extrakciós (SPE) lépésében – kiemelt figyelmet kell fordítani egy potenciálisan keletkező melléktermékre, a 2′,3′-didehidro-2′,3′-didezoxitimidinre, közismert nevén sztavudinra. A sztavudint korábban széles körben alkalmazták a HIV-fertőzés kezelésében, azonban a jelentős mellékhatások miatt alkalmazása fokozatosan visszaszorult, és a WHO 2009-ben a sztavudin tartós alkalmazásának megszüntetését javasolta. Ezt követően világszerte fokozatosan kivonták a terápiás alkalmazásból [5]. A sztavudin toxikológiai szempontból releváns szennyezőanyag, ezért a [^{18}F]FLT kimutatása és mennyiségi meghatározása is indokolt [6].

A [^{18}F]FLT minőségellenőrzésére többek között nagy teljesítményű folyadékkromatográfiát (high-performance liquid chromatography, HPLC) alkalmaznak. A módszer során a vizsgálandó mintát egy, állófázist tartalmazó kromatográfiás oszlopba juttatják, amelyen a mozgó fázist nagy nyomás alatt áramoltatják keresztül. A minta komponensei az álló- és a mozgó fázis közötti eltérő kölcsönhatásaik, illetve fizikai-kémiai tulajdonságaik következtében eltérő mértékben lépnek kölcsönhatásba az állófázissal. Ennek eredményeként a komponensek különböző retenciós idővel eluálódnak az oszlopból, lehetővé téve azok kromatográfiás elválasztását, azonosítását és – megfelelő kalibráció mellett – mennyiségi meghatározását [7].

Munkánk célja egy folyadékkromatográfiás módszer kidolgozása volt, amely segítségével megállapítható a radiokémiai csoport által gyártott [^{18}F]FLT minták sztavudin és FLT tartalma.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A kromatográfiás módszer kidolgozásához Waters *I*-Class UPLC rendszert alkalmaztunk, amely egységei: eluenskeverő rendszer, pumpa, automata mintaadagoló, oszlopváltó, UV detektor. A sztavudin és FLT elválasztásához a Waters BEH C18 50 x 2,1 mm, 1,7 mm állófázist alkalmaztuk. A kromatogramok kiértékeléséhez Empower szoftvert használtunk. A mérésekhez mozgófázisként 0,1% foszforsav oldatot és acetonitrilt alkalmaztuk. Referencia anyagként a sztavudin és FLT 10 µg/ml oldatait alkalmaztuk. A linearitás vizsgálatnál a törzsoldat hígításával kaptuk a megfelelő koncentrációjú oldatokat. Az [^{18}F]FLT mintákat a radiokémai munkacsoport biztosította. A megnevezett anyagok a Sigma termékei voltak.

3. EREDMÉNYEK

3.1. A gradiens idő növelésének tanulmányozása a komponensek elválasztására

A kromatográfiás módszer kifejlesztéséhez Fedorova és munkatársai módszerét vettük alapul [6]. Állófázisként Waters BEH C18 50 x 2,1 mm, 1,7 mm fordított fázisú kolonnát, míg mozgófázisként 0,1%-os foszforsavoldatot és acetonitrilt alkalmaztunk 0,6 ml/perc áramlással. A kromatográfiás módszer kidolgozásának első lépése az elúciós profil meghatározása volt. Ennek során a mérés kezdetén a vizes fázis arányát 100%-ra állítottuk be. A minta injektálását követően az acetonitril arányát 10%-ig növeltük. Első lépésben vizsgáltuk a gradiensidő hatását az FLT és a sztavudin elválasztására, amit 0, 2, 5 és 10 percre állítottunk be. A detektálási

hullámhossz 254 nm, az injektált térfogat pedig 2 µl volt. Az állófázis szobahőmérsékleten használtuk. A mérések során a sztavudin és FLT 10 µg/ml oldatait alkalmaztuk. A kromatográfiás módszer teljesítményének jellemzésére több paramétert határoztunk meg, többek között a visszanyerést (k), a csúcsfelbontást (R_s), a csúcsszimmetriát (A_s), az elméleti tányérszámot (N), a szelektivitást (α), a jel/zaj arányt (S/N), valamint a retenciós időt (T_r). A kapott eredményeket az 1. táblázatban foglaltuk össze.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a gradiensidő növelésével a komponensek retenciós idői 1 percről 6,4 percig növekedtek. Ezzel együtt a visszatartási faktor is nőtt 1 és 11 között. A szelektivitás valamennyi vizsgált gradiensidő esetén meghaladta a 1,05 értéket, ami megfelelő elválasztásra utal. A gradiensidő növelésével az elméleti tányérszám is növekedett, míg a csúcsfelbontás 3 és 8 közötti értéket mutatott, amely alapvonalon való kromatográfiás elválasztást jelent. A csúcsszimmetria az 5 és 10 perces gradiensidő alkalmazása mellett közelítette meg az elfogadható 1,5-es értéket. Mindezek alapján a további módszerfejlesztési vizsgálatokhoz az 5 perces gradiensidőt választottuk. Bár ebben az esetben nem kaptuk a legnagyobb jel/zaj arányt, ugyanakkor ezt a paramétert a továbbiakban optimalizálni fogjuk.

1. táblázat: A gradiensidő hatása a sztavudin és az FLT elválasztására

Gradiens idő, min	Komponens	T_r, min	k	A_s	Tányér szám	Rs	α	s/n
0	**Stavudin**	1,268	1,3	1,7	1677	3,3	1,6	425
	FLT	1,693	2,1	1,4	2538			258
2	**Stavudin**	2,483	3,6	1,7	5925	3,8	1,3	411
	FLT	2,979	4,5	1,6	7787			264
5	**Stavudin**	3,641	5,7	1,5	10474	6,4	1,3	334
	FLT	4,597	7,5	1,4	13389			209
10	**Stavudin**	4,935	8,1	1,3	13365	8,2	1,3	265
	FLT	6,456	11,0	1,3	16594			158

3.2. Az áramlási sebesség hatása a kromatográfiás paraméterekre

A továbbiakban a mozgófázis áramlási sebességének a komponensek elválasztására gyakorolt hatását vizsgáltuk. A 0,6 ml/perc áramlási sebesség további növelését a kromatográfiás rendszeren tapasztalt jelentős nyomásesés miatt nem tartottuk megvalósíthatónak. Ezért 0,5 és 0,4 ml/perc áramlási sebesség mellett vizsgáltuk a mintákat.

Az eredmények alapján a komponensek retenciós ideje 3 és 5 perc között, míg a visszatartási tényező 6 és 8,5 között változott (2. táblázat). Ezen értékeket megfelelőnek ítéltük. A csúcsszimmetria, a szelektivitás és a felbontás értékei szintén valamennyi vizsgált áramlási sebesség mellett elfogadhatónak bizonyultak. A legnagyobb jel/zaj arányt, 300 és 500 közötti értékekkel, 0,4 ml/perc áramlási sebesség alkalmazása mellett kaptuk. Mindezek alapján a további módszerfejlesztési vizsgálatok során a 0,4 ml/perc áramlási sebességet alkalmaztuk.

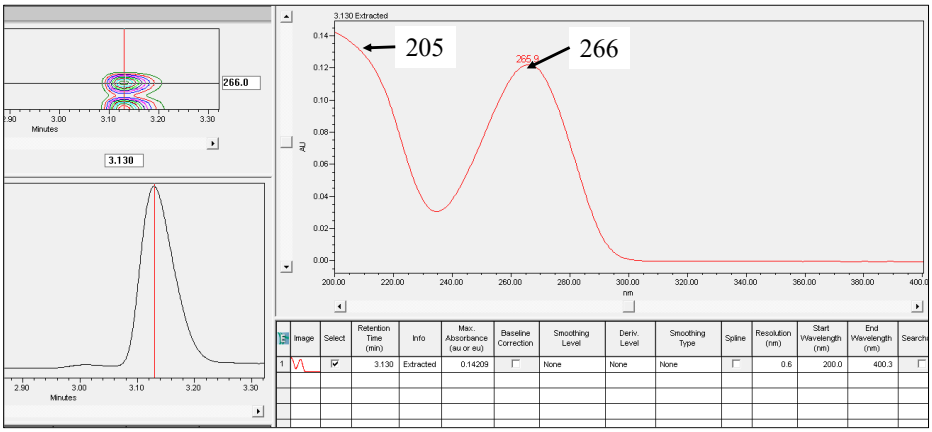
2. táblázat: Az áramlási sebesség hatása a sztavudin és az FLT elválasztására

Áramlás, ml/min	Komponens	T_r, min	k	A_s	Tányér szám	Rs	α	s/n
0,4	**Stavudin**	4,108	6,6	1,5	9867	5,9	1,3	554
	FLT	5,122	8,5	1,4	8933			345
0,5	**Stavudin**	3,796	6,0	1,5	9962	6,2	1,3	393
	FLT	4,778	7,9	1,5	12957			245
0,6	**Stavudin**	3,641	5,7	1,5	10474	6,4	1,3	334
	FLT	4,597	7,5	1,4	13389			209

3.3. A detektálási hullámhossz optimalizálása

A továbbiakban a jel/zaj arány növelése érdekében optimalizáltuk a detektálási hullámhosszt. Ennek során felvettük a vizsgált komponensek UV-spektrumát. Az 1. ábrán bemutatott spektrumok alapján megállapítható, hogy a 205 és 266 nm-es hullámhossz az FLT és a sztavudin esetében is az abszorpciós maximum közelében helyezkedik el.

Az ezen a hullámhosszokon rögzített kromatogramok alapján jelentős növekedés volt megfigyelhető a jel/zaj arányban a 254 nm-hez képest mind az FLT, mind a sztavudin esetében. Figyelembe véve továbbá, hogy 205 nm-en a háttérzaj jelentősen nagyobb lehet a [^{18}F]FLT minták vizsgálata során, a további módszerfejlesztési vizsgálatokhoz a 266 nm-es detektálási hullámhosszt választottuk.



1. ábra: A komponensek detektálási hullámhosszainak optimalizálása

3.4. A kolonna hőmérséklet hatásának vizsgálata

A továbbiakban a kolonnahőmérséklet hatását vizsgáltuk. A hőmérsékletet 30 és 40°C-ra állítottuk be, és meghatároztuk a kapott kromatográfiás paramétereket. Az eredmények alapján valamennyi vizsgált paraméter megfelelt az előzetesen meghatározott elfogadási kritériumoknak. Ugyanakkor egyértelműen megfigyelhető volt, hogy a hőmérséklet emelésével az elméleti tányérszám, valamint emellett a jel/zaj arány is jelentősen növekedett. A jelenség az anyagátadási ellenállás hőmérséklet-emelkedéssel bekövetkező csökkenésével magyarázható. 40°C-os kolonnahőmérséklet alkalmazása mellett a vizsgált komponensek esetében a jel/zaj arány akár háromszorosára is növekedett a szobahőmérsékleten végzett mérésekhez képest. A jel/zaj arány ilyen mértékű növekedése kedvezően befolyásolja a módszer érzékenységét. Ennek alapján a további módszerfejlesztési vizsgálatok során a 40°C-os kolonnahőmérsékletet alkalmaztuk.

3. táblázat: A kolonnahőmérséklet hatása a sztavudin és az FLT elválasztására

Kolonna hőmérséklet	Komponens	T_r, min	k	A_s	Tányér szám	Rs	α	s/n
szobahő	Stavudin	4,108	6,6	1,5	9867	5,9	1,3	554
	FLT	5,122	8,5	1,4	8933			345
30°C	Stavudin	3,793	6,0	1,4	11868	6,3	1,3	940
	FLT	4,703	7,7	1,4	15225			622
40°C	Stavudin	3,389	5,2	1,3	12686	6,0	1,3	1417
	FLT	4,126	6,6	1,3	16174			941

3.4. Az injektálási térfogat hatása az érzékenységre

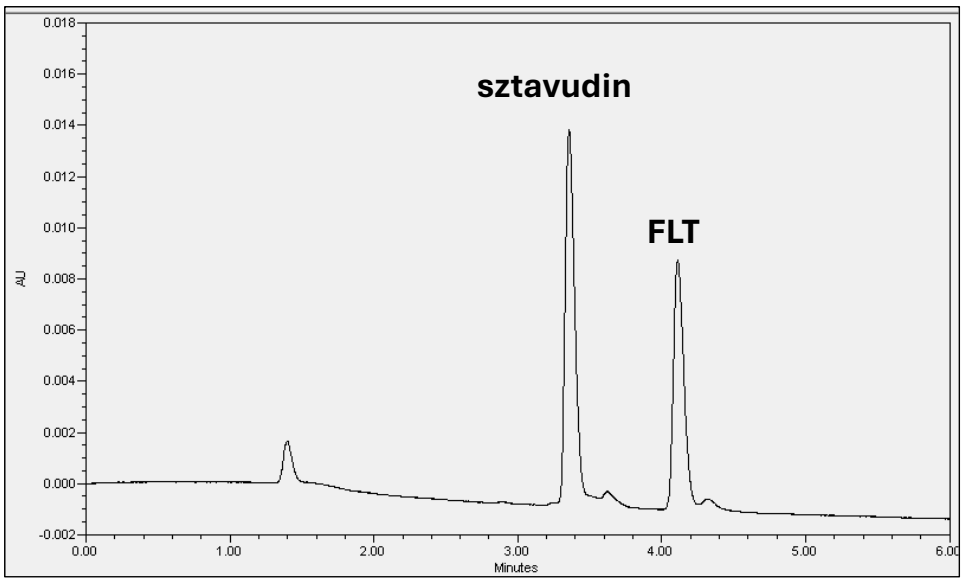
A módszer érzékenységének növelése érdekében vizsgáltuk az injektált mintatérfogat hatását. A 4. táblázatban összefoglalt eredmények alapján megállapítható, hogy 5 és 10 µL-es injektálási térfogat alkalmazása mellett a jel/zaj arány jelentősen növekedett, amelynek mértéke egy nagyságrendbeli emelkedést jelent. Mindemellett a vizsgált egyéb kromatográfiás paraméterek valamennyi injektálási térfogat esetén megfeleltek az előzetesen meghatározott elfogadási kritériumoknak.

4. táblázat: Az injektálási térfogat hatása az érzékenységre

Injektálási térfogat, µl	Komponens	T_r, min	k	A_s	Tányér szám	Rs	α	s/n
2	**Stavudin**	3,389	5,2	1,3	12686	5,966667	1,3	1417
	FLT	4,126	6,6	1,3	16174			941
5	**Stavudin**	4,183	6,9	1,3	13979	7,2	1,3	3843
	FLT	5,275	8,8	1,3	16875			2489
10	**Stavudin**	3,409	5,3	1,3	12834	6,2	1,3	9769
	FLT	4,413	6,7	1,3	15599			6686

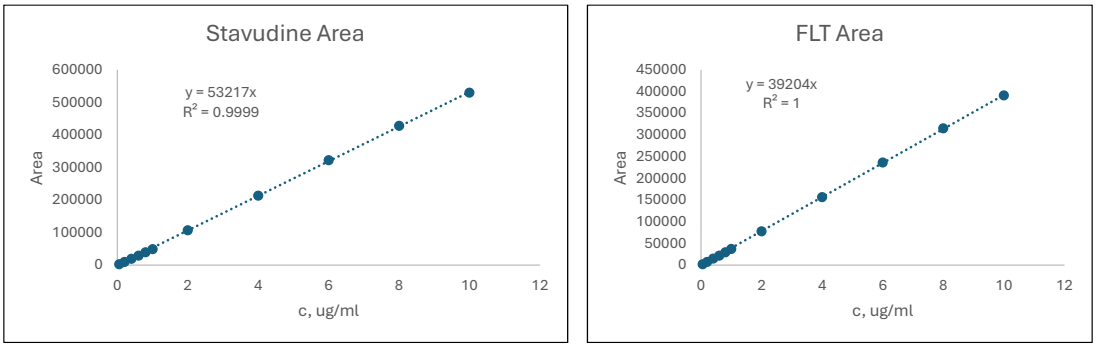
3.5. Véglegesített módszer

A módszerfejlesztés befejezését követően meghatároztuk az optimális kromatográfiás paramétereket. Ennek megfelelően az injektálást követően az acetonitril arányát lineáris gradiens alkalmazásával 0%-ról 10%-ra növeltük 5 perc alatt. Az áramlási sebességet 0,4 ml/perc értékre, az injektálási térfogatot 10 µL-re, a detektálási hullámhosszt 266 nm-re, míg a kolonnahőmérsékletet 40°C-ra állítottuk be. Az optimális kromatográfiás paraméterek mellett kapott kromatogramot a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: A sztavudin és az FLT elválasztása a végleges kromatográfiás módszerrel

A véglegesített kromatográfiás módszer alkalmazásával az FLT és a sztavudin mennyiségi meghatározásához sztett lineáris regressziós egyenesek determinációs együtthatója (R^2) valamennyi esetben meghaladta a 0,999 értéket, ami a vizsgált koncentráció tartományban kiváló linearitást jelez (3. ábra).



3. ábra: A sztavudin és az FLT kalibrációs görbéi

3.6. A [^{18}F]FLT minták sztavudin és FLT tartalmának meghatározása

A vizsgált négy [^{18}F]FLT minták sztavudin koncentrációja 0,6 és 3,6 µg/mL között változott, míg az FLT koncentrációja 0,3 és 0,7 µg/mL közötti tartományban alakult (5. táblázat).

5. táblázat: A [^{18}F]FLT minták sztavudin és FLT tartalma

Minta ID	Koncentráció, ug/ml	
	Sztavudin	FLT
2025.11.24	0,69	0,28
2025.12.02	3,64	0,35
2025.12.08	1,49	0,68
2025.12.12	0,91	0,51

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Vizsgálatunk során sikeresen kifejlesztettük és optimalizáltuk a sztavudin és az FLT egyidejű meghatározására alkalmas folyadékkromatográfiás módszert [^{18}F]FLT készítmények vizsgálatához. A főbb kromatográfiás paraméterek szisztematikus vizsgálata alapján a gradiensidő, az áramlási sebesség, a detektálási hullámhossz, a kolonnahőmérséklet és az injektálási térfogat egyaránt befolyásolta a módszer teljesítményét. Az optimalizált módszer 5 perces lineáris gradienst, 0,4 ml/perc áramlási sebességet, 266 nm-es detektálási hullámhosszt, 40 °C-os kolonnahőmérsékletet és 10 µl-es injektálási térfogatot alkalmazott. Az optimalizált körülmények között a módszer megfelelő kromatográfiás elválasztást és kiváló linearitást biztosított ($R^2 > 0,999$). A vizsgált [^{18}F]FLT mintákban a sztavudin koncentrációja 0,6–3,6 µg/ml, míg az FLT koncentrációja 0,3–0,7 µg/ml között változott. Következésképpen a kifejlesztett HPLC-módszer gyors, érzékeny és megbízható eljárást biztosít a sztavudin és az FLT [^{18}F]FLT készítményekben történő meghatározására, ezáltal alkalmas lehet a készítmény rutinszerű minőségellenőrzésére és analitikai jellemzésére.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] Van de Bittner GC, et al. *Acc Chem Res.* 2014;47(10):3127-3134.
[2] Tavares AAS, et al. *Nucl Med Biol.* 2012;39(1):127-135.
[3] Been LB, et al. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2004;31:1659-1672.
[4] Grierson JR, et al.. *Nucl Med Biol.* 2000;27(2):143-156.
[5] Brennan AT, et al. *AIDS.* 2017;31(1):147-157.
[6] Fedorova OS, et al. *Molecules.* 2022;27(23):8323.
[7] Amine M, et al. *Int J Adv Chem.* 2020;8:160-169.

KOMPAKT ROWLAND-KÖRÖS SPEKTROMÉTER TERVEZÉSE ÉS VIZSGÁLATA KIS ENERGIÁJÚ RÖNTGENEMISSZIÓS MÉRÉSEKHEZ

Fűrész Kristóf [a,b], Mikeházi Antal János [a,c], Németh Zoltán [a], Vankó György [a]

[a] *Wigner Fizikai Kutatóközpont, Femtoszekundumos Spektroszkópia és Röntgenspektroszkópia "Lendület" Kutatócsoport, 1121 Budapest Konkoly-Thege M. 29-33.*
[b] *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3*
[c] *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar, Fizika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3*

Absztrakt
A korszerű anyagtudományi feladatok megkövetelik a nagy érzékenységű, gyors és roncsolásmentes elemanalitikai eljárások folyamatos fejlesztését. Kutatómunkám témája egy DRR (dispersive refocusing Rowland) nagy energiafelbontású tender röntgenspektrométer[1,2,3,4,5] (1.5-4 keV) tervezése és kivitelezése, mely eszköz minimális minta-előkészítés mellett biztosít gyors, költséghatékony információt a vizsgált elem lokális kémiai környezetéről. A jelenlegi spektrométer prototípus Rowland-körös elrendezésben működik, és egy hengeresre hajlított Si(111) analizátorkristályt, MiniPI X Advacam pixeldetektort, valamint egy Cu-anódos XOS röntgencsövet alkalmaz. A műszer optikai kialakítását röntgensugár-követéses (ray tracing) szimulációkkal terveztük meg az XRT programcsomag[6] segítségével. A szimulációk során meghatároztuk a geometriai elrendezést, valamint az analizátorkristály és a detektor pozíciójának együttes hatását a várható spektrális felbontásra. A számítások alapján kialakított kísérleti elrendezéssel sikeresen detektáltuk kobalt Kα emissziós vonalait ($K\alpha_2$=6915 eV, $K\alpha_1$=6930 eV) laboratóriumi körülmények között, levegő atmoszférában. A mérési eredmények igazolták a kompakt Rowland-körös elrendezés működőképességét. A fejlesztés következő célja a rendszer alkalmazhatóságának kiterjesztése az alacsonyabb energiájú röntgenemissziós tartományra, A készülék kompakt elrendezése, s geometriája lehetővé teszi annak vákuumkamrába/He atmoszférába való integrálását, így olyan alacsonyabb rendszámú elemek is mérhetővé válhatnak, mint például a kén (Kα=2310 eV, Kβ=2465 eV), illetve a foszfor (Kα=2014 eV, Kβ=2013 eV). A bemutatott eredmények alapján a fejlesztett spektrométer ígéretes platformot jelenthet kis energiájú röntgenemissziós mérésekhez, és alapot teremthet egy kompakt, mobilizálható laboratóriumi röntgenspektrométer továbbfejlesztéséhez.

Abstract
Modern materials science tasks require the continuous development of highly sensitive, fast, and non-destructive elemental analysis techniques. The subject of my research is the design and construction of a DRR (Dispersive Refocusing Rowland) high energy-resolution tender X-ray spectrometer[1,2,3,4,5] (1.5-4 keV), which provides fast, cost-effective information on the local chemical environment of the investigated element with minimal sample preparation. The current spectrometer prototype operates in a Rowland circle geometry and utilizes cylindrically bent Si(111) analyzer crystal, a MiniPIX Advacam pixel detector, and an XOS X-ray tube with a Cu anode. The optical design of the instrument was investigated through X-ray ray-tracing simulations using the XRT software package[6]. During the simulations, we determined the

geometric arrangement, as well as the combined effect of the analyzer crystal and the detector positions on the expected spectral resolution. Using the experimental setup designed based on these calculations, we successfully detected the cobalt Kα emission lines ($K\alpha_2$=6915 eV, $K\alpha_1$=6930 eV) under laboratory conditions in an air atmosphere. The measurement results verified the functionality of the compact Rowland circle arrangement. The next goal of the development is to extend the system's applicability to the lower energy X-ray emission range. The compact layout and geometry of the device allow for its integration into a vacuum chamber or He atmosphere, thus enabling the measurement of lower atomic number elements such as sulfur (Kα = 2310 eV, Kβ=2465 eV) and phosphorus
(Kα=2014 eV, Kβ=2013 eV). Based on the presented results, the developed spectrometer represents a promising platform for low-energy X-ray emission measurements and can establish a foundation for the further development of a compact, mobile laboratory X-ray spectrometer.

I. BEVEZETÉS

A modern anyagtudományi kutatásokban egyre növekvő igény mutatkozik olyan analitikai módszerek iránt, amelyek képesek az atomi környezet, és a vegyértékelektron-szerkezet finom részleteinek roncsolásmentes vizsgálatára. A röntgenabszorpciós spektroszkópia (XAS) mellett az utóbbi két évtizedben a nagy felbontású röntgenemissziós spektroszkópia (X-ray Emission Spectroscopy, XES) is a szerkezetvizsgálat sokoldalú eszközévé vált. Az XES módszer a fotoionizációt követő relaxációs folyamatok során kilépő karakterisztikus röntgenfotonok spektrális analízisén alapul. Míg a belső héjak közötti átmenetek energiája és finomszerkezete az effektív magtöltésen és a spin-pálya csatolásokon keresztül érzékenyen reagál az oxidációs állapot megváltozására, addig a vtc (valence to core) XES jelei a betöltött legalacsonyabb ligandum, vagy kevert ligandum + ion pályákat mutatják. A nagy felbontású XES mérések döntő hányadát máig harmadik generációs szinkrotron vagy röntgen-szabadelektronlézer (XFEL) fényforrásnál végzik. Bár a szinkrotronok kiemelkedő fotonfluxusa egyedülálló kísérleti lehetőségeket teremt, a mérési idő korlátozott elérhetősége megnehezíti a rutinszerű, nagy mintaszámú analitikát és a folyamatos módszerfejlesztést. Különösen igaz ez az úgynevezett „tender" röntgentartományra (kb. 1,5-4keV), amely magában foglalja számos kiemelt környezetvédelmi, energiatárolási (pl. lítium-kén, kobalt akkumulátorok) és biológiai jelentőségű könnyű elem, mint a foszfor (Kα=2014 eV, Kβ=2013 eV) és a kén
(Kα=2310 eV Kβ=2465 eV) emissziós vonalait. Ebben az energiatartományban a mérések megvalósítása komoly műszeres kihívást jelent: a légköri komponensek általi abszorpció olyannyira drasztikus, hogy a vizsgálatok kizárólag vákuumban vagy hélium atmoszférában végezhetők el. Ehhez kompakt, kis térigényű berendezés szükségeltetik, mely kellően kis hajlítási sugarú analizátorkristállyal Rowland-körös elrendezéssel megvalósítható.
Klasszikus Rowland-körös geometriában a pontszerű forrás, a hajlított analizátorkristály és a detektor egy képzeletbeli, a kristály görbületi sugarának (2R) felével (R) megegyező sugarú kör kerületén helyezkedik el, energiafelbontás a Bragg-szög módosításával, szkennelésével érhető el. A diszperzív DRR (Dispersive Refocusing Rowland) elrendezésben a minta nem a Rowland-kör kerületén, hanem azon belül, a körívtől eltolva (emiatt a DRR elrendezést off-Rowland elrendezésnek is szokás nevezni, a dolgozatban mindkét elnevezést használom) helyezkedik el, az analizátorkristályról diffraktált sugárzást pedig egy pozícióérzékeny detektor fogja fel. Ennek az optikai felépítésnek az a meghatározó sajátossága, hogy a felbontás nagymértékben független a gerjesztett mintafelület nagyságától, a minta egyes pontjai virtuális pontforrásokként képeződnek le a Rowland-körre. Így válik lehetővé egy kompakt, kevés és kis

elemből álló hatékony, nagy energiafelbontású laboratóriumi spektrométer. A kutatómunkám célja egy ilyen, moduláris laboratóriumi DRR röntgenspektrométer tervezése, sugárkövetéses szimulációja, kivitelezése és kísérleti validálása először levegő atmoszférában kobalt emissziós csúcsok detektálásával, majd He atmoszférában/vákuumban kén emissziós csúcsok detektálása.

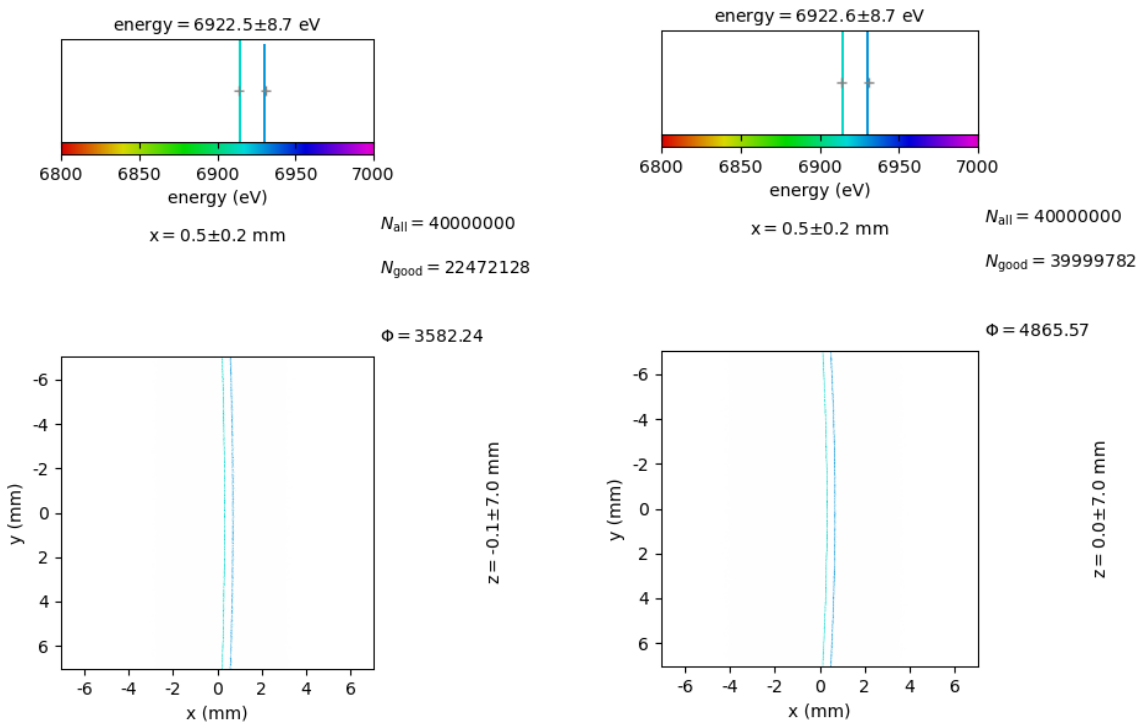
I. SZIMULÁCIÓ

Az off-Rowland elrendezésben a minta nem a Rowland körön helyezkedik el, hanem a hagyományos Rowland geometria szerinti mintapozíció és az analizátor kristály között húzódó egyenesen, azon eltolva a körön kívülre vagy belülre. Az eltolás mértékét az alábbi egyenlettel[Hiba! A könyvjelző nem létezik.] számítottuk.

$$L = 2R_{Rowl} \sin\theta_B \frac{W_{det} + W_s}{W_{cr} \sin\theta_B + W_{det}}$$

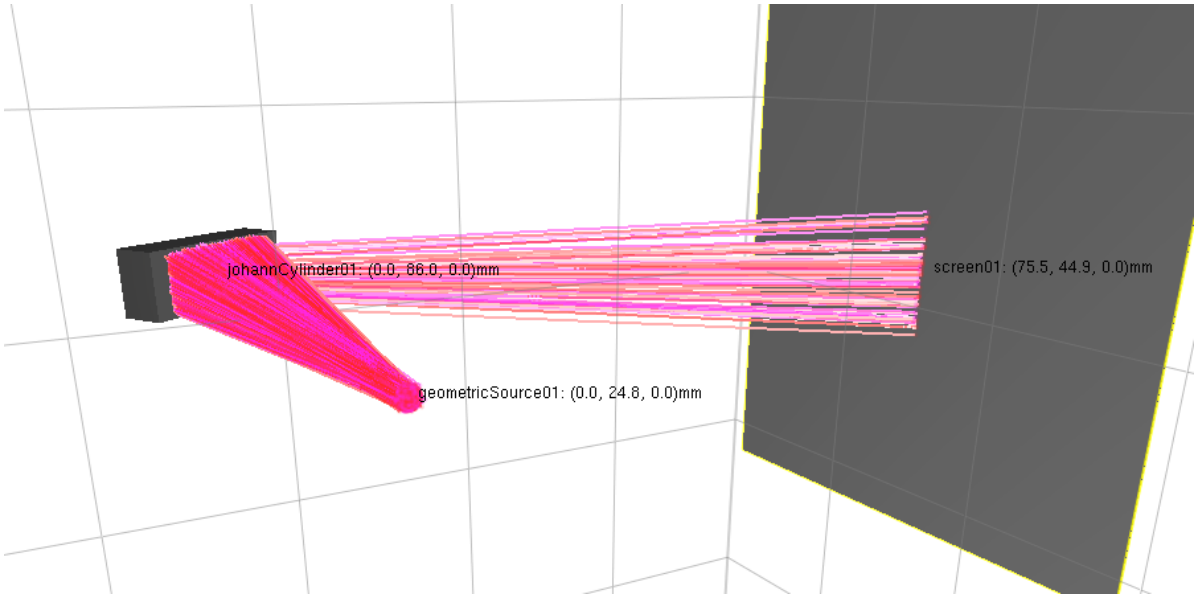
Ahol L az eltolás mértéke, R_{Rowl} a Rowland-kör sugara, θ_B a Bragg-szög (~59,3°), W_{det}, W_{cr}, és W_s a detektor, az analizátor kristály és a minta szélességei.

Az eltolás mértéke az egyenlet alapján 24,8 mm. Azt, hogy a minta a Rowland körön belül, vagy kívül helyezkedjen el xrtQook[Hiba! A könyvjelző nem létezik.] ray-tracing program segítségével szimuláltuk, ezen eredmények alapján döntöttünk. A detektorképen a vízszintes (x) tengely a Rowland-kör síkjába eső diszperziós irányt jelöli, míg a függőleges (y) tengely a diszperzióra merőleges térbeli kiterjedést mutatja. Mivel a spektrométerben alkalmazott Si(111) Johann-kristály hengeres felületű (azaz kizárólag a Rowland-kör síkjában hajlított), a diffraktált nyalábot csak horizontálisan fókuszálja, így a diszkrét energiájú fotonok a pontszerű leképezés helyett függőleges fókuszvonalakként jelennek meg a szenzoron. A két elkülönülő vonal a kobalt a $K\alpha_1$ (6930 eV) és $K\alpha_2$ (6915 eV) emissziós csúcsai. 15 eV-os energiakülönbségük eltérő Bragg-szögeket eredményez, ami horizontális térbeli szeparációt idéz elő a diszperziós tengely mentén. A fókuszcsíkok jellegzetes íveltsége a hengeres Johann-optika geometriai sajátossága: a Rowland-síkból vertikálisan kilépő sugarak effektív beesési szöge némileg eltér a fősíkban haladókétól, ami a síktól távolodva kismértékű térbeli eltolódást és a csíkok peremein megfigyelhető enyhe görbületet hoz létre.
A szimulációk alapján a két elhelyezkedés között nincs számottevő különbség, viszont annak érdekében, hogy a berendezés minél kompaktabb legyen, a körön belülre eltolt mintás opciót választottuk. Emellett eme elrendezés mellett szól még, hogy a minta által emittált karakterisztikus röntgensugárzás nagyobb hányada esik az analizátorra, mint a kívül elhelyezett minta esetében (Jobb N_{good}/N_{all} arány).



1. ábra: Szimulált detektor jel a körön belülre tolt (bal) és a körön kívülre tolt (jobb) minta esetén *(xrtQook)*

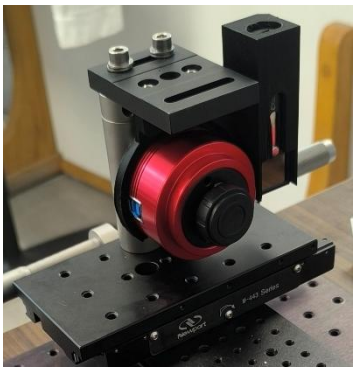
A szimulációban a valóságnak kellőképp megfelelő elemek szerepelnek. A minta helyén tartózkodik a sugárforrás, melynek kiterjedése megegyezik a valós gerjesztett mintafelülettel (d=2mm), és amelyből
6915 eV és 6930 eV energiájú röntgenfotonok útját szimuláljuk.
Az analizátor kristály egy 8×20 mm-es, 100 mm névleges sugarú körre hajlított Si(111) Johann-kristály.
A jelen szimuláción, illetve a későbbiekben mutatott valós mérésen a két jel a detektor méretéhez képest nagyon közel van egymáshoz, nincs kihasználva a rendelkezésre álló érzékelési felület. Ennek oka, hogy a eltolás mértékének számításakor a detektor szélességének nem a MiniPIX (14,08×14,08 mm), hanem egy kisebb, CMOS szenzort tartalmazó ZWO ASI 290M csillagászati kamera dimenzióit (5,61×3,18 mm) adtuk meg, mely képes kén, illetve foszfor élek mérését megvalósítani, hosszútávú célunk az ezzel a detektorral való mérések lebonyolítása.
A szimuláció célja a kiszámolt geometria működőképességének tesztelése volt. Segítségével megbizonyosodtunk róla, hogy a berendezés képes a kobalt $K\alpha_1$, $K\alpha_2$ és a kén $K\beta$ csúcsait elválasztani, megjeleníteni. Képet kaptunk róla, milyen fizikai kiterjedéssel várhatjuk a jelet.



2. ábra: xrtQook szimuláció 3D vizualizációja. A forrás középen (geometricSource), az analizátor kristály bal oldalon (johannCylinder01), a detektor pedig jobb oldalon található (screen01)

II. KÍSÉRLETI LEÍRÁS

Az első lépés az elrendezés megvalósításában a detektorokkal kezdődött. A ZWO ASI 290M bolygókamera egy csillagászati fényképek készítéséhez kiváló eszköz, de számunkra is van egy igen hasznos tulajdonsága. A kamera szenzorja nem csupán a látható fény tartományára érzékeny, hanem röntgenfotonok, ezen belül a számunkra fontos alacsony energiájú röntgen detektálására is képes. Említésre méltó a kamera szenzorjának felbontása (2.1 Mega Pixel [1936×1096]) is, mely sokkal jobb az átlagos 2D röntgen detektorokénál. A kamerában található monokróm CMOS szenzor jó felbontású, sok pixel található rajta, viszont egészen kis felületű (5,61 mm×3,18 mm). A spektrométerben a fókusz beállítása, és annak elérése, hogy az analizátor kristályról visszaverődő röntgennyaláb erre a felületre érkezzen kifejezetten nehéz és körülményes. Ennek megkönnyítésére a bolygókamera műszaki rajza alapján terveztünk egy 3D nyomtatott detektor tartót, mely a ZWO ASI detektort és egy nagyobb felületű (14,08 mm×14,08 mm) MiniPIX detektort tart egy síkban, egymástól 50 mm-re. A MiniPIX detektor amellett, hogy keményröntgen mérésére alkalmas, amivel jóval megnöveli a készülék által mérhető energiatartományt, ha a fókuszt beállítjuk annak közepére, akkor a berendezés 50 mm-el való elmozgatásával a fókusz pontosan a kisebb ZWO ASI detektor közepére esik.



3. ábra: 3D nyomtatott detektor tartó

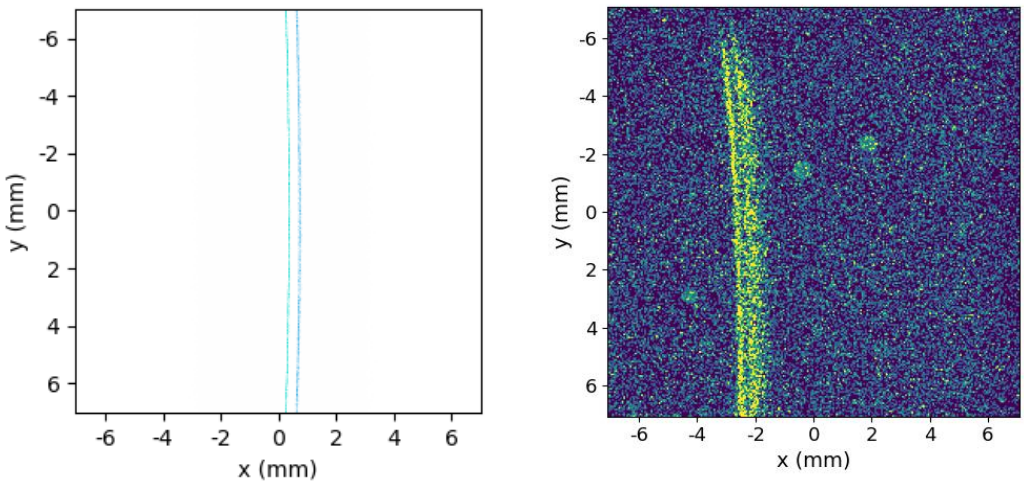
Egy DRR röntgenspektrométer elrendezés lelke a megfelelő Bragg-szög. Korábbi prototípusok tesztelésénél az analizátor kristály szögbeállítása jelentette számunkra a legnagyobb kihívást. Az, hogy a detektoron semmit nem látunk, vagy felbukkan a jel, mindössze tizedfokos eltéréseken múlik. Ezt manuálisan állítható forgatókkal nem tudtuk megbízhatóan beállítani,

illetve a mérések reprodukálhatóságát is nagyban befolyásolta ez a beállítási bizonytalanság. Ennek kiküszöbölésére egy motoros forgató integrálása mellett döntöttünk, melynek forgástengelyén helyezkedik el a kristály, aminek a mintához, és detektorhoz viszonyított szögét így számítógépes vezérléssel 0,01°-os pontossággal tudjuk változtatni. Az analizátortartóra egy kézzel állítható mozgatót is elhelyeztünk, mellyel annak vertikális dőlésszöge szabályozható.
Ahhoz, hogy a pontos számított és szimulált geometriát megvalósítsuk, 3D nyomtatott tartót terveztünk, melyre pontosan felhelyezhető a minta, a motorikus forgató és a rajta elhelyezkedő analizátor kristály, valamint a detektorok.
A detektorokat a Rowland-körre érintőleges pozícióban helyeztük el. A detektorra érkező, az analizátor által diffraktált röntgennyaláb fókuszáltsága nagyban függ az analizátor-detektor távolságtól. Ennek finomhangolására a készülékbe egy lineáris mozgatót szereltünk a Rowland-kör középpontja és a detektor névleges pozíciója közti egyenesre, valamint egy érintő síkban mozgó lineáris mozgatót, mely a két detektor gyors és pontos cseréjét, pozíciójuk optimalizálását érhetjük el. A minta pozíciója fix, így a minta-analizátor távolság is.

A mérések során Cu-anódos XOS röntgenforrást használtunk. Ennek a forrásnak előnye, hogy nagy teljesítményű, fókuszcsővel felszerelt. A fókuszált sugárzás kizárólag a mintára irányítódik, kevés a szóródó röntgenfoton, mely kedvező jel/zaj arányt biztosít. A forrással egészen szép méréseket sikerült végeznünk, viszont nagy mérete miatt vákuumkamrába integrálása nem megvalósítható, azon kívül kell elhelyezni, ha a fejlesztés későbbi szakaszában is ragaszkodunk ehhez a típusú röntgenforráshoz.
Az XOS forrással végrehajtott mérések során szilárd kobalt(II)-tiocianát [$Co(SCN)_2$] pasztillát 50kV/1mA teljesítményű röntgennel sugároztunk, a mikrofókusz cső végének és a mintának távolságával szabályoztuk a gerjesztett mintafelületet, nagyjából 2 mm átmérőjűre. A keletkező karakterisztikus röntgenemissziós sugárzást MiniPIX detektorral detektáltuk, 40 darab konszekutív 3 másodperces méréssel (2 percig). Már az egyedüli 3 másodperces képkockán is fellelhetőek voltak a karakterisztikus csúcsok. A rövid adatrögzítési időintervallum a kétfoton események kizárása érdekében elengedhetetlen, ha egy darab 2 perces mérést végeznénk, akkor a detektor pixelei telítődnének. A 40 egymás utáni mérést összegeztük, majd ezeket egyben ábrázoltuk.

III. AZ EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE

A spektrométeren végzett első mérések alapján elmondható, hogy a 6915 eV-os és 6930 eV-os csúcsok már rövid mérési idővel felismerhetőek, egymáshoz viszonyított távolságuk, görbületük a szimuláció által előjelzett eredménnyel láthatóan egyezést mutat.
A továbbiakban kobalt emissziós él mérések folyamán finomhangolások szükségesek, hogy beállítsuk a megfelelő fókuszt, detektorpozíciót, illetve jobb árnyékolást kell biztosítanunk a jel/zaj arány javítására.



4. ábra: A szimulált (bal) és a valós mérés (jobb)

A két ábra méretarányosan megegyezik. A valós mérés jele a szimulációhoz képest más pozícióban jelenik meg, ami a detektor eltérő, korrigálandó pozíciójából adódik, nem jelent fizikai eltérést.

IV. KONKLÚZIÓ & KITEKINTÉS

Munkánk során sikeresen megterveztünk és megépítettünk egy laboratóriumi, DRR (Dispersive Refocusing Rowland) geometriájú röntgenspektrométert. A berendezés a ray-tracing szimulációknak megfelelően, nagy felbontással képes a kobalt emissziós Kα dublettjének detektálására levegő atmoszférában, igazolva a kompakt, off-Rowland optikai elrendezés és az 3D nyomtatott alkatrészek működőképességét.

A kutatás következő lépése a berendezés kobalt mérések folyamán való finomhangolása, majd vákuumkamrába integrálása, amely kiküszöböli a levegő röntgenabszorpcióját. Ez a fejlesztés kiterjeszti a spektrométer mérési tartományát az 1,5-4 keV-es "tender" röntgentartományra, ezáltal lehetővé téve olyan kis rendszámú, anyagtudományi és környezetkémiai szempontból is kulcsfontosságú elemek roncsolásmentes, lokális kémiai vizsgálatát, mint a kén és a foszfor.

RÖVIDÍTÉSEK

XES: X-ray Emission Spectroscopy - Röntgensugár-emissziós spektroszkópia
XAS: X-ray Absorption Spectroscopy - Röntgensugár-abszorpciós spektroszkópia
DRR: Dispersive Refocusing Rowland - Diszperzív refókuszáló Rowland-geometria
XFEL: X-ray Free-Electron Laser - Röntgen szabadelektronlézer

IRODALOMJEGYZÉK

[1] David B Wittry, Nicholas C Barbi, X-ray Crystal Spectrometers and Monochromators in Microanalysis, *Microscopy and Microanalysis*, Volume 7, Issue 2, 1 March 2001, Pages 124–141, https://doi.org/10.1007/S100050010080

[2] M. Kavčič, M. Budnar, A. Mühleisen, F. Gasser, M. Žitnik, K. Bučar, R. Bohinc; Design and performance of a versatile curved-crystal spectrometer for high-resolution spectroscopy in the tender x-ray range. *Rev. Sci. Instrum.* 1 March 2012; 83 (3): 033113. https://doi.org/10.1063/1.3697862

[3] William M. Holden, Oliver R. Hoidn, Alexander S. Ditter, Gerald T. Seidler, Joshua Kas, Jennifer L. Stein, Brandi M. Cossairt, Stosh A. Kozimor, Jinghua Guo, Yifan Ye, Matthew A. Marcus, Sirine Fakra; A compact dispersive refocusing Rowland circle X-ray emission spectrometer for laboratory, synchrotron, and XFEL applications. *Rev. Sci. Instrum.* 1 July 2017; 88 (7): 073904. https://doi.org/10.1063/1.4994739

[4] Welter E, Machek P, Dräger G, Brüggmann U, Fröba M. A new X-ray spectrometer with large focusing crystal analyzer. J Synchrotron Radiat. 2005 Jul;12(Pt 4):448-54. https://doi.org/10.1107/S0909049505007843

[5] Rovezzi M, Harris A, Detlefs B, Bohdan T, Svyazhin A, Santambrogio A, Degler D, Baran R, Reynier B, Noguera Crespo P, Heyman C, Van Der Kleij HP, Van Vaerenbergh P, Marion P, Vitoux H, Lapras C, Verbeni R, Kocsis MM, Manceau A, Glatzel P. TEXS: in-vacuum tender X-ray emission spectrometer with 11 Johansson crystal analyzers. J Synchrotron Radiat. 2020 May 1;27(Pt 3):813-826. https://doi.org/10.1107/S160057752000243X.

[6] K. Klementiev and R. Chernikov, "Powerful scriptable ray tracing package xrt", *Proc. SPIE* 9209, Advances in Computational Methods for X-Ray Optics III, 92090A (2014); https://doi.org/10.1117/12.2061400.

[7] Bergmann U, Glatzel P. X-ray emission spectroscopy. Photosynth Res. 2009 Nov-Dec;102(2-3):255-66. doi: 10.1007/s11120-009-9483-6. PMID: 19705296.

VAS-BISZGLICINÁT TARTALMÚ ÉTRENDKIEGÉSZÍTŐK VIZSGÁLATA MÖSSBAUER-SPEKTROSZKÓPIÁVAL

Csizmadia Lilla Kinga[1], Mihucz Viktor Gábor[1], Kovács Krisztina[1]

[1]*ELTE TTK Kémiai Intézet, Magkémiai Laboratórium, 1117 Budapest, Pázmány Péter s. 1/A*

Absztrakt

A vashiány globális népegészségügyi probléma, melynek kezelésére a jó felszívódású kétértékű vas-biszglicinát népszerű étrendkiegészítő. A jelen kutatás célja hét különböző, kereskedelmi forgalomban kapható vas-biszglicinát tartalmú készítmény szerkezeti vizsgálata, valamint a vas-biszglicinát laboratóriumi oldatbeli előállítása volt. A szerkezeti elemzést fagyasztott mintákon (folyékony nitrogén hőmérsékletén) végeztük Mössbauer-spektroszkópia segítségével. A ^{57}Fe izotóppal dúsított vas(II)-szulfátból és glicinből történő szintézis során vizsgáltuk a pH, az aszkorbinsav (ASC), a hőkezelés és az inert N_2 atmoszféra hatását a komplexképződésre. A spektrumok kiértékelése rámutatott, hogy a vizsgált étrendkiegészítők jelentős részében a Fe(II) komponensek mellett megjelent nagyspinű, oxidált Fe(III) is. A preparált oldatokban tényleges komplexképződés kizárólag a N_2 atmoszférában történő, 60°C-os inkubáció esetén alakult ki. Ez utóbbi komponens Mössbauer paraméterei egyezést mutattak mind a szakirodalmi adatokkal, mind az egyes vizsgált készítményekben (pl. Nordvital, NOW) mért értékekkel. Bár a modelloldatokban az ASC hatékonyan csökkentette az oxidációt, ez a hatás az étrendkiegészítők esetében nem volt egyértelműen azonosítható

Abstract

Iron deficiency is a global public health issue, and the highly absorbable divalent iron bisglycinate is a popular dietary supplement used for its treatment. The aim of this research was the structural investigation of seven different commercially available iron bisglycinate containing dietary supplements, as well as the laboratory synthesis of the complex in an aqueous medium. Structural analysis was performed on frozen samples (at liquid nitrogen temperature) using Mössbauer spectroscopy. During the synthesis from ^{57}Fe-enriched iron(II) sulfate and glycine, the effects of pH, ascorbic acid (ASC), heat treatment, and an inert (N_2) atmosphere on complex formation were investigated. Evaluation of the spectra revealed that alongside Fe(II), high-spin oxidized Fe(III) components were also present in a significant amount of the analysed supplements. In the aqueous model solutions, the formation of the chelate complex was only successfull by applying N_2 incubation at elevated temperature. The measured parameters of the latter component showed good agreement with both literature data and the values determined in certain commercial products (e.g., Nordvital, NOW). Although ASC effectively reduced oxidation in the model solutions, this effect was not clearly identifiable in the commercial dietary supplements.

1. BEVEZETÉS

A vasnak a szervezetben számos funkciója van. Testünk vastartalmát nagy részben a vérben található hemoglobin és mioglobin tartalmazza, amely fehérjék oxigént szállítanak a testünk szöveteihez. [1] Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) szerint a vashiány az egyik legelterjedtebb tápanyaghiány a világon, világszerte több, mint egymilliárd embert érint, főként óvodáskorú gyermekek és nők körében összpontosul. [2] Tehát a vashiány globális népegészségügyi problémát jelent, így a vastartalmú étrendkiegészítők fejlesztése továbbra is fontos kutatási irány a jó felszívódású készítmények előállítása érdekében.

A vastartalmú étrendkiegészítőket a benne levő vas oxidációs állapota szerint három kategóriába tudjuk sorolni: vas(II)-sók (mint pl. vas-szulfát, -fumarát, -glükonát, -biszglicinát), vas(III) vegyületek (pl. komplexek: vas(III)-poliszacharid, -polimaltóz, -polidextróz, -citrát, szervetlen só formájában a vas(III)-pirofoszfát, vas-fehérje-szukcinilát), illetve egyéb (ide tartozik pl. a hem vas, ill. a fém vas). A vas(III) tartalmú készítmények általában költségesebbek, és alacsonyabb hatékonyságúak, az „egyéb" kategóriába tartozó vaskészítményeknél pedig kevés a rendelkezésre álló klinikai adat, és kevésbé hatékonyak a szervezet vastartalékainak tartós feltöltésében. A kétértékű sók hatásosabbak, olcsóbbak, széles körben elérhetők [3] de általában gyengébben tolerálhatóak a szervezet számára (bélgyulladás is kialakulhat). A kétértékű vasat tartalmazó vegyületek közül a legelterjedtebbek a vas-biszglicinát tartalmú étrendkiegészítők, amelyekből előzetes méréseink alapján a gyomorban és bélben több vas oldható ki, mint az egyszerű szervetlen sókból (pl. vas-szulfát, vas(III)-pirofoszfát). Mivel a vas-biszglicinát irodalmi adatok alapján is igen hatékony [3,4], munkánk során ezen készítmények vizsgálatát és összehasonlítását tűztük ki célul. A vas-biszglicinát előállításáról kevés szakirodalom található [5], ezért különböző körülmények között (enyhén savas pH, inert atmoszféra, aszkorbinsav jelenléte, melegítés) próbáltuk meg előállítani, majd a kapott oldatokban a komplexképződést Mössbauer-spektroszkópiával ellenőrizni.

2. KÍSÉRLETI ELJÁRÁSOK

2.1 Alkalmazott anyagok és berendezések

7 különböző vas-biszglicinát tartalmú étrendkiegészítőt vizsgáltunk; a NOW (ASC), H&B, NordVital (ASC), GymBeam, Solgar, Jamieson (ASC) és Natur Tanya készítményeit. A készítményeket, az izotóppal dúsított vas-szulfát törzsoldatot és az elkészített mintákat Mössbauer-spektroszkópiával analizáltuk. A méréseket fagyasztott oldatokon végeztük folyékony nitrogén hőmérsékletén (80 K), egy állandó gyorsulási üzemmódban működő, ^{57}Co sugárforrással felszerelt, hagyományos Mössbauer-spektrométerrel. A spektrumokat Lorentz-féle vonalalakot feltételezve, standard számítógépes statisztikai módszerekkel értékeltük ki, amelyek magukban foglalták a kísérleti adatok legkisebb négyzetek elvén alapuló illesztését a MossWinn program segítségével. A vas izomereltolódásait az α-vashoz képest adtuk meg.

2.2 Oldatkészítés

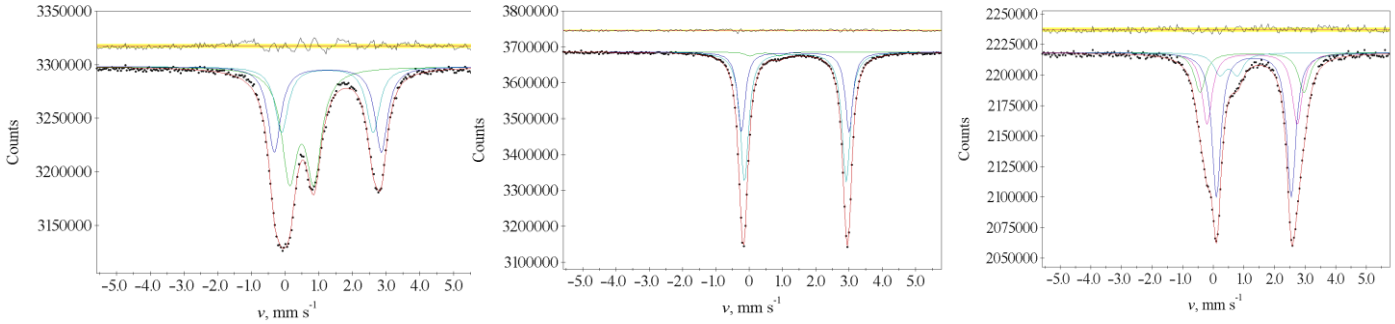
Az 5 cm^3 $^{57}FeSO_4$ oldatot 31 mg 96%-ban dúsított ^{57}Fe-t 500 µl 2 mol/dm^3-es kénsavban oldva készítettük el (így $c \approx 0{,}109$ mol/dm^3). A vas-biszglicinát előállítását a következő körülmények között végeztük:

1. $^{57}FeSO_4$, glicin (0,05 mol/dm^3) elegyet 1:2, 1:3 és 1:10 arányban elegyítve,pH=5,4 (1M és 0,1M KOH oldat segítségével beállítva)
2. $^{57}FeSO_4$, glicin (0,05 mol/dm^3) elegyet 1:2 arányban elegyítve, pH=4,8, aszkorbinsav jelenlétében
3. $^{57}FeSO_4$, glicin (0,05 mol/dm^3) elegyet 1:2 arányban elegyítve, pH=4,8, aszkorbinsav jelenlétében, 1,5h és 4h inkubáció inert atmoszférában

A kapott oldatokat 15 perc elteltével gyorsfagyasztásos technikával folyékony nitrogén hőmérsékletre hűtöttük, majd a fagyasztott oldatok Mössbauer-spektrumát mértük.

3. EREDMÉNYEK

3.1 Étrendkiegészítők Mössbauer spektrumainak értékelése



Minta	Dublett 1 (Fe^{2+})				Dublett 2 (Fe^{2+})				Dublett 3 (Fe^{3+})				Dublett 4 (Fe^{2+})			
	δ	Δ	Γ	%	δ	Δ	Γ	%	δ	Δ	Γ	%	δ	Δ	Γ	%
NOW/ iron complex	1.27	3.18	0.45	30	1.25	2.72	0.47	25	0.49	0.72	0.55	45	-	-	-	-
H&B "Vas bisz-glicinát"	1.38	3.23	0.27	35	1.37	3.06	0.30	63	0.46	0.90	0.38	2	-	-	-	-
Nordvital	1.26	3.4	0.44	17	1.27	2.95	0.39	26	0.5*	0.57	0.47	9	1.33	2.45	0.35	48

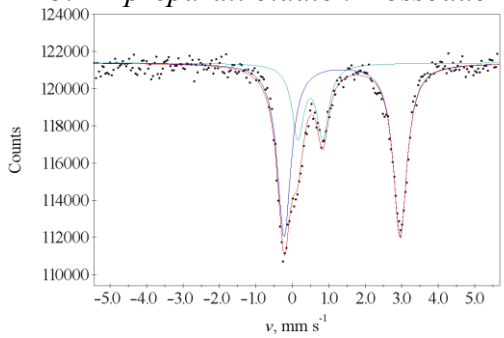
1. ábra NOW Iron complex, H&B „vas-biszglicinát", Nordvital készítmények Mössbauer spektrumai

1. táblázat Az étrendkiegészítők mért paraméterei

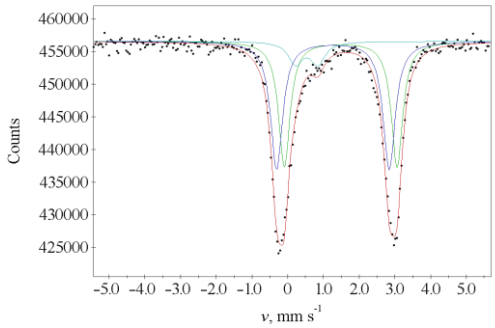
A vas-biszglicinát tartalmú vegyületek tipikus Mössbauer-spektrumai és a kapott paraméterek az 1. ábrán és 1. táblázatban láthatók. A spektrumok Fe(II) és Fe(III) komponensek feltételezésével értékelhetők ki, annak ellenére, hogy a leírás szerint kizárólag vas(II)-biszglicinát komplexet tartalmaznak. A Fe(II) komponensek vonalszélessége viszonylag nagy, ami azt jelzi, hogy minden esetben egynél több Fe(II) speciesz van jelen, hasonló koordinációban. A Mössbauer-paraméterek alapján 3 dublett nagyspinű Fe^{2+} állapotú vasat, egy dublett pedig nagyspinű Fe^{3+} állapotú vasat reprezentál. A Fe(III) komponensek a Fe(II) oxidációjára utalnak, amely valószínűleg a mintaelőkészítés és/vagy a tárolás során következett be. A Fe(III)-at jelző dublett torzult oktaéderes O_6 környezethez rendelhető, amely vagy az aminosavval képez komplexet, vagy különálló Fe(III)-oxid/hidroxid formájában van jelen.

Egynél több Fe(II) kvadrupólus dublett jelenléte egyértelműen jelzi, hogy a tiszta Fe(II)-biszglicinát kelát nem alakult ki teljesen. A meglehetősen nagy kvadrupólus-felhasadással rendelkező dublettek valószínűleg a hexaakva koordinációjú Fe^{2+}-höz rendelhetők (mint például a $FeSO_4 \cdot 7H_2O$-ban), amely az előállítás során a kiindulási vegyület lehetett. A $\delta \approx 1{,}2$-$1{,}3$ mm/s és $\Delta \approx 2{,}4$-$2{,}7$ mm/s paraméterekkel rendelkező dublettek eltérnek a fent említett vegyületektől, és valószínűleg a tényleges komplexképződést mutatják. Ezeket a paramétereket a szakirodalmi adatokkal összehasonlítva megállapítható, hogy más vas(II)-biszglicinát tartalmú étrendkiegészítőkben is megtalálhatók, így valószínűleg a kelátszerkezetű komponenshez rendelhetők [6]. A nem komplexált Fe(II) magas aránya befolyásolhatja a vas speciációját és hasznosulását az emésztés során.

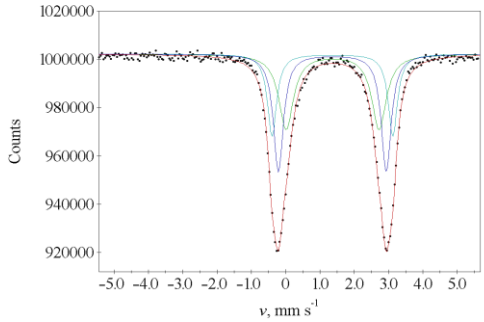
3.2 A preparált oldatok Mössbauer spektrumainak értékelése



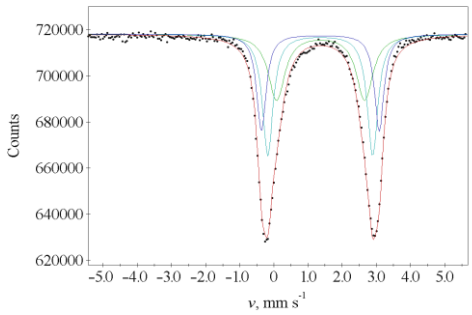
4. ábra vas(II)-szulfát: glicin = 1:2 arány, pH=5,4, ASC nélkül



5. ábra vas(II)-szulfát: glicin 1:2 arány, pH=6,1, ASC-val



6. ábra vas(II)-szulfát: glicin 1:2 arány, pH=4,9, ASC-val, N_2 gázban inkubálva, 1,5 óra



7. ábra vas(II)-szulfát: glicin 1:2 arány, pH=4,9, ASC-val, N_2 gázban inkubálva, 4 óra

A $^{57}FeSO_4$ segítségével különböző Fe(II):glicin arányban, különböző körülmények között készített oldatok Mössbauer-spektrumai a 4-7 ábrákon láthatók.

A spektrumok kiértékelése során mind Fe(II) ($\delta \approx$ 1,2-1,3 mm/s; $\Delta \approx$2,4-3,4 mm/s), mind Fe(III) komponensek ($\delta \approx$ 0,5 mm/s és $\Delta \approx$0,7 mm/s) jelenléte kimutatható volt. Az aszkorbinsav (ASC) hozzáadása láthatóan gátolta a vas(II) oxidációját, csökkentve a Fe(III) arányát. A nitrogénatmoszférában végzett inkubációt és vízfürdőn történő hőkezelést követően szerkezeti átalakulás volt megfigyelhető: a megjelenő, megközelítőleg Δ=2,6 mm/s értékű kvadrupólus-felhasadású dublett arra utal, hogy a vas(II) feltehetően a glicinát karboxilátcsoportjához koordinálódott. Az oldatokban több különálló Fe(II) komponens jelenléte is azonosítható volt. A magasabb kvadrupólus-felhasadással rendelkező dublett ($\Delta \approx$3,2 mm/s) a nem komplexált hexaakva-vas(II)-höz rendelhető, míg a kisebb értékeknél a komponensek a tényleges kelátképződésben és koordinációban részt vevő centrumokat képviselik. A jelen kísérletben mért Δ= 2.58 mm/s érték igen jó egyezést mutat a fentiekben leírt Nordvital és NOW étrendkiegészítőben azonosított vas(II)-biszglicinát paraméterével, továbbá az eredmények jó összhangban vannak a szakirodalmi adatokkal is: Ostrakh és munkatársai a vas-biszglicinát komplexre Δ=2,4-2,7 mm/s közötti kvadrupólus-felhasadási tartományt írtak le, megjegyezve, hogy a minta-előkészítés és a tárolás során náluk is tapasztalható volt az oxidált Fe(III) jelenléte [6]. Az oldatmintákban nagy mennyiségben megjelenő hexaakva-vas(II) komponens jelenléte azonban azt jelzi, hogy a vas(II)-biszglicinát vizes oldatban történő előállítása csak részlegesen lehetséges; valószínű, ez okozza a vizsgált étrendkiegészítőkben a többféle vas(II) környezet jelenlétét, ill. magyarázza az oxidációra való érzékenységet.

4. KONKLÚZIÓ

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a vas(II)-biszglicinát tartalmú rendszerekben jelentős mértékű oxidáció játszódik le, amit a spektrumokban megjelenő magas Fe(III) arány igazol. Vizes közegben, $^{57}FeSO_4$ és glicin kiindulási anyagokból a komplex oldatfázisú előállítása kizárólag inert N_2 gázos 4h-ás inkubáció alkalmazásával volt részlegesen sikeres. Az általunk preparált oldatokban az aszkorbinsav (ASC) jelenléte hatékonyan csökkentette a vas(II) oxidációját, ugyanakkor az étrendkiegészítő készítmények vizsgálatakor ez a reduktív hatás nem volt egyértelműen kimutatható. A kutatás folytatásaként a készítmények gyomor- és vékonybélbeli mobilizációjának, valamint speciációjának nyomon követését tervezzük szintetikus gyomor- és bélnedvekkel végzett emésztés következtében.

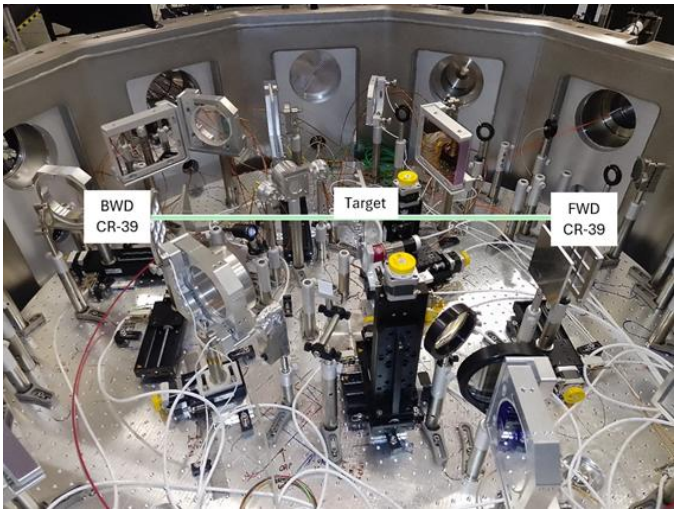
[1] F Faria, N.; Winship, P.D.; Weiss, D.J.; Coles, B.J.; Schoenberg, R.; Hutchinson, C.; Pereira, D.I.A.; Powell, J.J. *J. Anal. At. Spectrom.* **2011**, *26*, 1648.
[2] Benoist *et al.*, Worldwide prevalence on anaemia 1993–2005, WHO, 2008
[3] Pantopoulos K. Haematologica. 2024, 109, 2793
[4] Mahmoud A. El- Hawy et al, *Clinical Nutrition ESPEN* 46 (2021) 367-371
[5] Ghasemi S. et al., J Plant Growth Regul (2012) 31:498–508
[6] I.V. Alenkina, M.I. Oshtrakh, *J Pharm. Sci.* **2024** *113*, 1426.

CHALLENGES OF PARTICLE IDENTIFICATION IN LASER ACCELERATION EXPERIMENTS

Abir Dhib[1,2]

[1] *HUN-REN Wigner Research Centre for Physics, Konkoly-Thege Miklós street 29-33, H-1121 Budapest, Hungary*
[2] *Eötvös Loránd University, H-1053 Budapest, Egyetem square 1-3, Hungary*

Abstract



In recent decades, the importance of laser acceleration experiments in nucler reaserch has increased. Moder laser can generate pulses in femtosecond range, enabiling the study of nuclear processes under extreme and transient conditions. In this study laser, matter and plasma interactions were investigated using nanostructured targets to examine how plasmonic effects can increase energy absorption and concentration during the mater-light interaction, therefore increasing the efficiency of ion acceleration. According to our theory, this can initiate such core reaction that can produce alpha particles. Due to various practical reasons, it can be particularly difficult to detect these particles in these experiments. To study the theory 1-8 µm thick, single or multi-layered; pure or doped UDMA based targets were shot by a high energy femtosecond laser. We noticed that in some cases, the NaOH etched CR-39 plates showed surprisingly heavy irradiation damage regardless of the applied aluminum shielding. The reason for this is that, surpassing previous experiments, protons with energies above 1 MeV were produced in these cases, which was also confirmed by the Thompson parabolas. These particles could easily penetrate the shielding and leave traces on the corresponding CR-39 plates; therefore, the separation of different particle traces was challenging task for the researchers. Even with a short NaOH etching the plates were overexposed making the precise measurement of the traces impossible, however with PEW 25 based etching the visible proton traces did not become visible and with the calculated stopping power of the shielding (it stops heavier ions) it became possible to identify the alpha particles traces. The results demonstrate that with careful planning, solid state trace detectors can be effectively used for the quantitative and qualitative determination of reaction products of laser acceleration experiments.

Keywords: Laser-Acceleration, Thin layers, CR-39, Solid-State Nuclear Track Detectors

1. Introduction

Laser acceleration has attracted interest in fusion research as a potential method of achieving the ignition with relatively small equipment. During these experiments, energetic electrons, protons and other ions can be produced and accelerated which then may initiate nuclear reactions. The driving force for particle acceleration in high-intensity laser experiments is the

enormous electromagnetic fields created when an ultra-intense laser interacts with matter. According to our theory plasmonic effects can increase energy absorption and concentration during these experiments, thereby enhancing ion acceleration and thus lowering the laser energy threshold of certain nuclear reactions. The three main criteria for laser targets for acceleration measurements are layer thickness, uniformity and surface roughness. The target also must freestanding. To meet these parameters, we developed a spin-coating based method which can produce high quality targets for the laser experiments. UDMA-TEGDMA was chosen as matrix material and proton source as it has excellent mechanical properties and effectively can be used to create multilayered structures. Later these targets were shot by femtosecond laser pulses.
One of the main challenges during these experiments, when they are performed in small target chambers, is the proper detection of the reaction products. These difficulties are related to small interaction volumes, short particle bursts, and other experimental limitations related to geometry. In addition, the most widely used scintillation detectors may have further issues too, due to the laser light itself being able to generate signals in them. Therefore, compact solid state nuclear track detectors are often used for particle detection in these experiments. Although these plates can record individual particles and don't have deadtime between individual detections, the identification of different particle types can be a challenging task with them.
The CR-39, a special type of molded resin, is one of these detectors that can record various traces when hit by energetic particles. These tracks are not visible immediately, so the plates need to be chemically etched after the exposure. The etching makes the tracks larger and allows them to be easily observed using a microscopy, but identifying the exact particle type and energy from the tracks can be difficult when multiple unknown particles may be produced during the experiment. This issue can be overcome by using shielding on the plates during the laser experiments limiting which particles can reach the CR-39 plates. Furthermore, different etching conditions can also affect which traces became visible [1].
During this study various nanoparticle doped polymer targets were fabricated then shot by femtosecond long laser bursts. The produced particles were detected and analyzed by Thompson parabolas and CR-39 solid-state nuclear track detectors to search for evidence that nuclear reactions had occurred.

2. Sample preparation

The samples were prepared in HUN-REN Wigner Research Centre for Physics (Wigner RCP) The dopant nanoparticles were purchased from NanoPartz in particles size that resonant to the wavelength of the available laser. The first doped UDMA layer was deposited using a CY-SPC8-AFH Spin-Coater at 2000 rpm on a pre-roughened substrate. The oxygen inhibition of the UDMA polymerization [2] was avoided by using an in-house developed expansion of the spin-coater. After the deposition of the last layer the substrate was removed, and the layer was washed three times by distilled water and once by isopropyl alcohol. For reference similarly made target were used without the nanoparticle doping. The details of the target preparation will be described elsewhere (under publication).

3. Experimental

The laser experiments were performed using S3 (SYLOS3) laser of ELI-ALPS Research Institute (ELI); operated in single-shot mode delivering 8-250 fs pulses at a central wavelength of 825 nm with a maximum pulse energy of 90mJ. The beam is focused by an off-axis parabolic (OAP) mirror onto the target surface at 15- and 45-degree angles of incidence separately. The peak intensity at the focal point is up to 1018 W/cm^2. The diagnostics included Thomson

parabola ion spectrometers, scintillation and CR-39 nuclear track detectors. These methods were used to investigate the particle flux, spatial distribution, ion species, and energy of the emitted particles.
For CR-39, two identical frames, each containing nine plates and an approximately 2 or 5mm diameter central hole, were positioned along the normal direction to the target surface, one in the forward direction and the other in the backward direction to allow the particles to reach the ion spectrometer. All plates were covered with 4 µm-thick aluminum shielding that touched the CR-39 and faced the target in every case. The plate holders were positioned at a distance of 26 cm from the target surface. The etching of the irradiated CR-39 plates was done with either 6M NaOH for 70 minutes at 70°C (recommendation of the manufacturer) or for 30 minutes at 60°C with PEW-25 [**Hiba! A könyvjelző nem létezik.**] solution (17% KOH + 25%C_2H_5OH + 5 8%H_2O). For analyzing the traces TASLIMAGE Radon and Neutron dosimetry system were used. To produce reference traces, an ^{241}Am radiation source were used.
For high resolution imaging Thermo Fischer (Waltham, MA, USA) electron microscope was used.

4. Results and Discussion

The scanning electron microscopy (SEM) image confirms that the novel spin-coating method was able to produce the intended thin layer structure. **Fig. 1** (left) shows a delaminated area of the target, where the multilayer structure and the typical layer thickness can be observed as well as the individual thickness of the layers.
The novel scintillation detector's light shielding was penetrated by the laser flash producing false singals, therefore it couldnt give realiable results. The Thompson parabola ion spectrometer have an entrance pupil only about 0.2 mm diameter making the angle of detection very limited, therefore the best method to detect large number of product particles is the usage of solid state trace detectors. However, distinguishing between different types of particles is challanging with CR-39 measurements. Protons, alpha particles and heavier ions can all produce tracks in the plates. The simplest method would be the application of a shielding thatonly allows the alpha particles to leave traces on the plates. **Fig. 1** (right) presents the calculated penetration depths obtained using SRIM [3] for the possible particles, in our case the presence of alpha particles would be the most important, because they would suggest the occurance of certain reactions. In previous similar experiments the proton energy peaked below 200 keV [4], therefore a 4 µm thick aluminium shielding was chosen to filter out the unwanted protons and heavy ions.

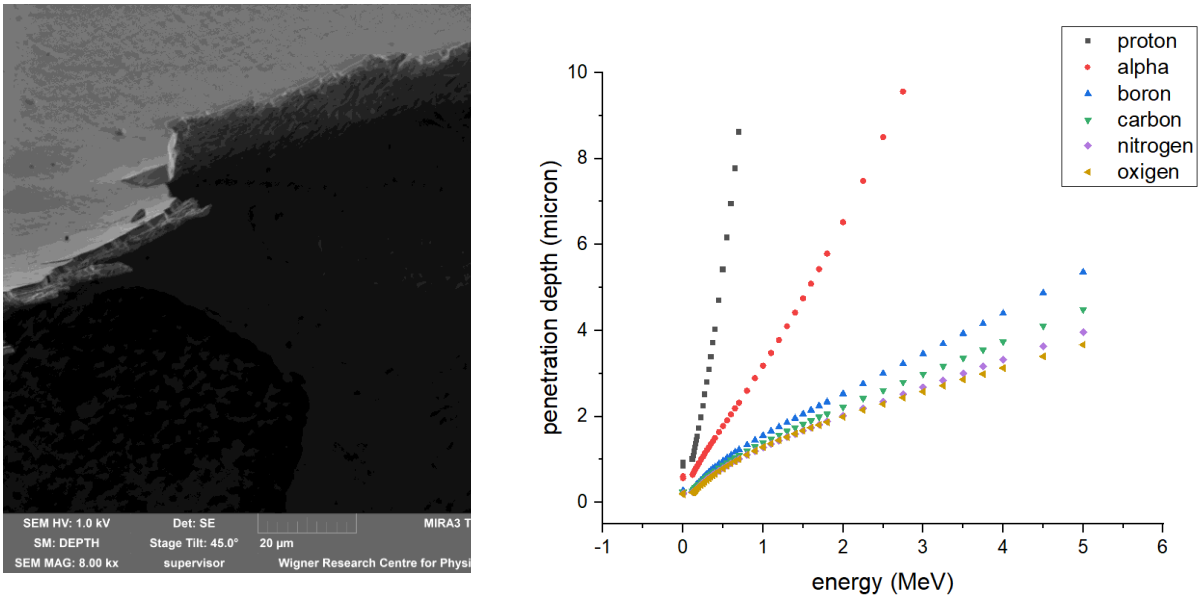


Fig. 1 SEM image of a delaminated area on the target (left); and calculated penetration depths (SRIM) for the possible particles (right)

Suprisingly, after the standard etching procedure of 70 minutes at 70°C in 6 M NaOH, the CR-39 plates showed heavy radiation damage. As shown in **Fig. 2**, the large number of tracks and their overlap made individual traces difficult to distinguish and therefore made the analysis unreliable.

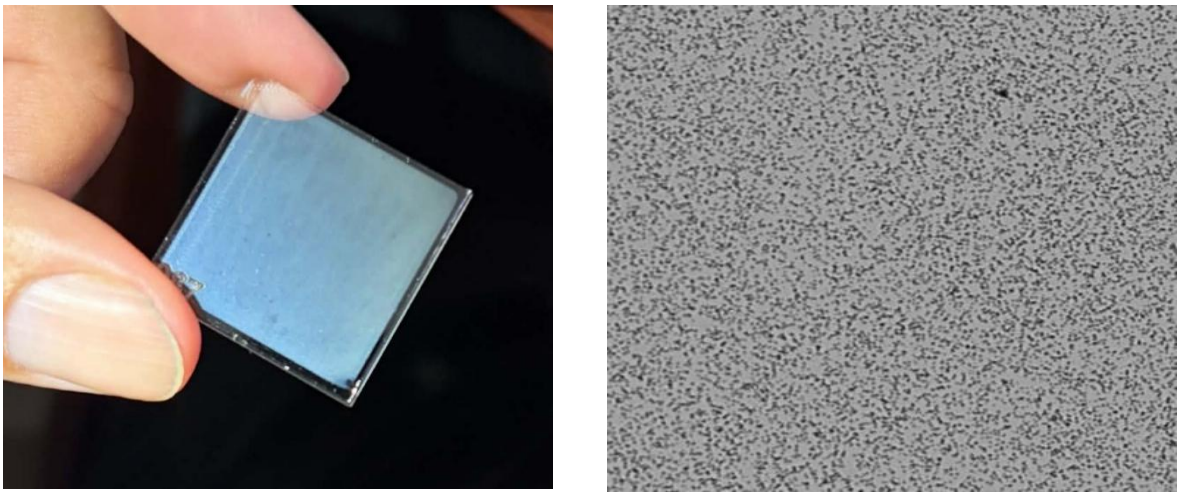


Fig. 2 Photo of the CR-39 after NaOH etching (left); and images of the traces (right)

The Thompson parabola measurements provided an important explanation for this unexpected result. This time the proton energies were above 1 MeV, which supports our theory about the plasmonic enchanced accelertion. These proton energies were considerably higher than the energies were considered when selecting the aluminium shielding, meaning that protons could penetrate the 4 µm aluminium layer and reach the CR-39 detector. Therefore, at least a portion of the heavy radiation damage observed in **Fig. 2** can be caused by the contribution of high energy protons. This result shows that the shielding cannot be considered independently from the theoretical particle energy distribution, but the experimental particle energies must be also taken into consideration when selecting the detector shielding.

Since the standard NaOH etching resulted in strongly overlapping tracks, a different method was investigated. Following the advices of Wang et al. [1], the remaining CR-39 were etched for 30 minutes at 60°C using PEW-25 solution **Fig. 3**.

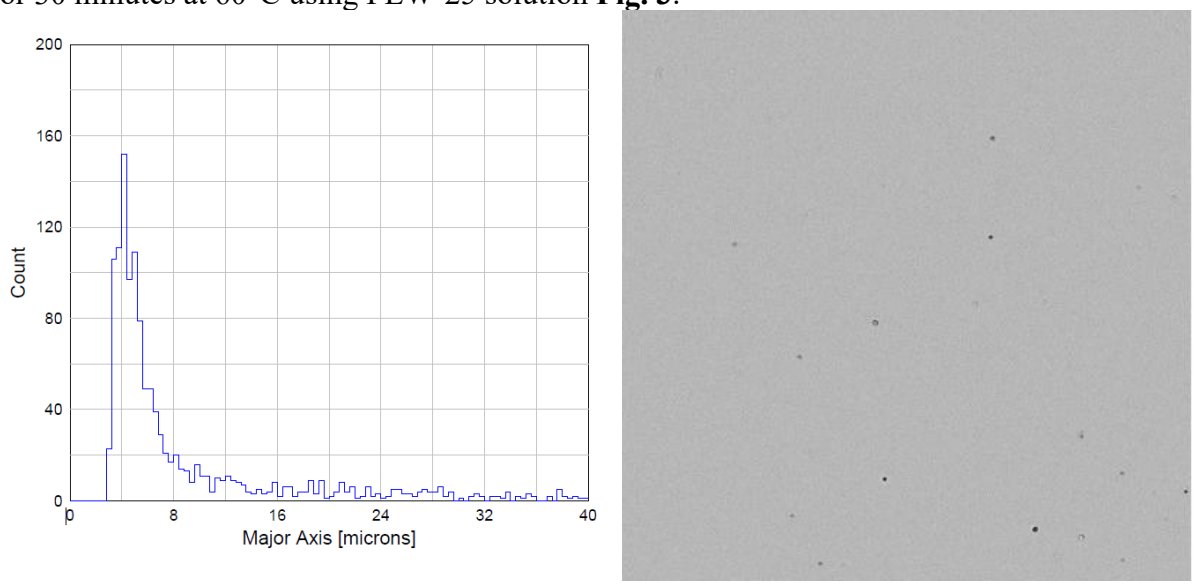


Fig. 3 Diameter distribution of the traces (left) and images of the traces in the CR-39 plate (right) after PEW-25 etching

With this method proton tracks should not become visible after etching because this solution do not have a sufficiently high ratio between the track etch rate (V_t) and the bulk etch rate (V_b). Therefore the latent traces created by protons will be etched nearly the same rate as the undamaged CR-39 matrix. As a result, the track pits remained too small or too shallow to be observed optically. In practice, this resulted far less number of visible traces after the etching as shown in **Fig. 3.** But we can know that rhese traces all belongs to high LET particles. As the the SRIM simulataions shown heavy ions are very unlikely to penetrate the applied Al shielding, as this experiment cannot produced carbon ions with many MeV energy. Therefore, taking everything into consideration the traces in **Fig. 3** most likely belongs to alpha aprticles. Another results that suggest alpha particles is that with the novel method we could determine the diameter distribution of the traces (**Fig. 3,** left) which was similar to the results that the reference ^{241}Am radiation source caused.

5. Conclusion

The study has proven the applicability of solid-state nuclear trace detectors for laser acceleration experiments as well as highlighted the importance of suitable shielding and etching conditions for particles identifications.

6. Author Contributions

Abir Dhib: sample preparation; etching and analyzation of the CR-39 plates.

7. Funding

This research was founded by an inner grant of the Wigner RCP. Travel and accommodation cost were partially supported by the ELI.

8. Acknowledgement

The author would like to express gratitude for the following scientists : Attila Lengyel, Miklós Á. Kedves, Márk Aladi, Imene Benabdelghani, Ágnes Nagyné Szokol, Ádám Inger, Péter Rácz, László P. Csernai, Tamás S. Biró, Károly Osvay, Parvin Varmayzar, Tibor Gilinger, Attila Bonyár, Zsuzsanna Márton, László Péter, Norbert Kroó for their contribution to the study and aiding her work. She also would like to thanks the ELI for providing beam time and research crew for the laser shots.

9. **References**

[1] Wang, P., Deng, X., Ma, Z., Fu, C., Fan, L., Wang, Q., Xu, J., Xu, T., Ji, L., Shen, B., Liu, Y.,Cao. *Frontiers in Physics* (**2023**) 11, doi :10.3389/fphy.2023.1166347

[2] Patangia, A.; Mishra, L.; Kumar, M.; Saczuk, K.; Lapinska, B. *Materials* (**2026**) 19, 1 doi :10.3390/ma19010113

[3] James F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* (**2010**) 268, 11-12 doi : 10.1016/j.nimb.2010.02.091.

[4] Kroó, N., Csernai, L.P., Papp, I. *et al.* Indication of $p + {}^{11}B$ reaction in Laser Induced Nanofusion experiment. *Sci Rep* (**2024**) 14, 30087. doi:10.1038/s41598-024-80070-5

A [^{18}F]FET KÉSZÍTMÉNY TISZTASÁGÁNAK VIZSGÁLATA FOLYADÉKKROMATOGRÁFIÁS MÓDSZERREL

Baricsán Fruzsina*, Jószai István

Debreceni Egyetem Általános Orvostudományi Kar Orvosi Képalkotó Intézet Nukleáris Medicina Tanszék, 4032 Debrecen, Nagyerdei krt. 98.

Absztrakt

A vizsgálat célja a [^{18}F]FET-tartalmú radiofarmakon radiokémiai és kémiai tisztaságának meghatározása, valamint a gyógyszerkönyvi HPLC-módszer UPLC körülmények közötti optimalizálása és validálása volt. A gyógyszerkönyvi módszer adaptálása során a HET és FET megfelelő elválasztását igazoltuk (Rs=7,4), míg az optimalizált UPLC-módszer 10 perces vizsgálati idő mellett Rs=6,1 értéket biztosított. A [^{18}F]FET készítmény radiokémiai tisztasága HPLC-vel 99,8%, UPLC-vel 99,6% volt. A kémiai tisztaság megfelelt az előírásoknak. A validálás során 2,4-7909 kBq között megfelelő linearitást (r^2=0,9999), 2,4 kBq LOQ-t és 0,14% RSD precizitást határoztunk meg. Az UPLC-módszer így jelentősen rövidebb vizsgálati idő mellett megfelelő analitikai teljesítményt biztosított. A módszer VRK-val összehasonlítva 99,2%-os visszanyerést mutatott.

Abstract

The aim of this study was to determine the radiochemical and chemical purity of a [^{18}F]FET-containing radiopharmaceutical and to optimize and validate the pharmacopoeial HPLC method under UPLC conditions. Following adaptation of the pharmacopoeial method, adequate separation of HET and FET was demonstrated (Rs=7.4), while the optimized UPLC method achieved an Rs value of 6.1 with a reduced analysis time of 10 minutes. The radiochemical purity of the FET018 batch was 99.78% by HPLC and 99.6% by UPLC. Chemical purity met the specified requirements. Method validation demonstrated linearity over 2.4–7909 kBq (r^2=0.9999), an LOQ of 2.4 kBq, and precision of 0.14% RSD. The method showed 99.2% recovery compared with TLC.

1. BEVEZETÉS

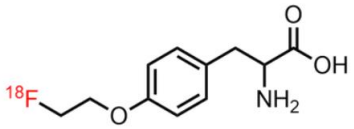
A pozitronemissziós tomográfia (PET) egy modern, nukleáris medicinában alkalmazott molekuláris képalkotó eljárás, amely *in vivo* információt szolgáltat a szövetekben és szervekben zajló élettani, biokémiai és molekuláris folyamatokról. A PET fontos szerepet tölt be többek között a daganatos betegségek diagnosztikájában, a daganatok kiterjedésének és stádiumának meghatározásában, valamint a kezelés hatásának követésében.

A daganatos sejtek megváltozott anyagcseréje és molekuláris tulajdonságai pozitronkibocsátó radionuklidokkal jelölt radiofarmakonok segítségével vizsgálhatók. A daganatképalkotásban széles körben alkalmazott radiofarmakonok egyike a 2-[^{18}F]fluor-2-dezoxi-D-glükóz ([^{18}F]FDG), amely a glükóztranszport és -metabolizmus vizsgálatára alkalmas. Számos daganattípusban fokozott glükózfelvétel és glükózmetabolizmus figyelhető meg a környező, normál szövetekhez képest, amely lehetővé teszi a daganatos elváltozások PET segítségével történő megjelenítését. A fokozott [^{18}F]FDG-felhalmozódás azonban nem kizárólag daganatos folyamatokra jellemző, mivel gyulladásos és egyéb, fokozott glükózmetabolizmussal járó folyamatokban is megfigyelhető.

A PET-vizsgálatok során alkalmazott radiofarmakonok olyan, biológiailag aktív vagy biológiai folyamatokat követő vegyületek, amelyek egy pozitronemittáló radionuklidot

tartalmaznak. A megfelelő radionuklid kiválasztásakor több szempontot kell figyelembe venni, többek között a fizikai felezési időt, a pozitron energiáját, a jelölési lehetőségeket, a radiofarmakon stabilitását, valamint annak biológiai tulajdonságait. A fizikai felezési időnek összhangban kell lennie a radiofarmakon előállításához, beadásához és a képalkotáshoz szükséges idővel, miközben a lehető legalacsonyabb, diagnosztikailag elfogadható sugárterhelésre kell törekedni.

A nukleáris medicinában az [^{18}F]FDG mellett egyre nagyobb jelentőséggel bírnak az aminosav-alapú PET-radiofarmakonok is. Ezek közé tartozik a ^{18}F-fluor-etil-L-tirozin ([^{18}F]FET), amelyet elsősorban az agydaganatok, különösen a gliomák képalkotásában alkalmaznak (1. ábra). Az [^{18}F]FET felvétele az aminosav-transzporterek fokozott aktivitásához kapcsolódik, és lehetőséget biztosít a daganatos szövetek metabolikus és biológiai jellemzésére. Az [^{18}F]FET PET különösen hasznos lehet a gliomák felismerésében és kiterjedésük meghatározásában, valamint bizonyos esetekben a daganatos és a nem daganatos szövetek elkülönítésének támogatásában [1].



1. ábra: A [^{18}F]FET szerkezeti képlete

Az [^{18}F]FET előállítása során a pozitronemittáló [^{18}F]fluoridiont nukleofil fluorozási reakcióban vezetik be a prekurzor molekulába. A reakciót követően a jelzett intermedierből megfelelő reakciólépések során kialakul a kívánt [^{18}F]FET molekula. A szintézis végén a terméket tisztítják, jellemzően preparatív HPLC alkalmazásával. A tisztított radiofarmakont ezt követően megfelelő oldatban formulálják és sterilizálják. A készítmény minőségét többek között radiokémiai tisztaság, kémiai tisztaság és egyéb minőségellenőrzési vizsgálatok segítségével ellenőrzik. A HPLC (nagyhatékonyságú folyadékkromatográfia) segítségével a [^{18}F]FET készítmény komponensei kromatográfiásan elválaszthatók. A vizsgálat során a mintát a mozgófázis segítségével egy kromatográfiás oszlopon vezetik keresztül. Az egyes komponensek eltérő kölcsönhatása az álló- és mozgófázissal eltérő retenciós időt eredményez. A komponensek detektálását radioaktivitásmérő detektorral és szükség esetén UV-detektorral végzik. A kapott kromatogram alapján meghatározható a [^{18}F]FET radiokémiai tisztasága és az esetleges szennyezők jelenléte. A vizsgálatok kivitelezésére az Európai Gyógyszerkönyvben megadott gradiens elúció mellett 30 percet vesz igénybe, melynek legnagyobb hátránya a F-18 izotóp rövid felezési ideje miatt jelentős az aktivitás veszteség a gyógyszer felhasználhatóságáig [2].

Munkánk célja egy folyadékkromatográfiás módszer kidolgozása, amely segítségével jelentősen csökkenthető a [^{18}F]FET készítmény HPLC vizsgálatának mérési ideje.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A kromatográfiás módszer kidolgozásához Waters *I*-Class UPLC rendszert alkalmaztunk, amely a következő egységekből állt: gázmentesítő, eluenskeverő rendszer, pumpa, automata mintaadagoló, oszlopváltó, UV- és saját fejlesztésű plasztik szcintillációs radioaktivitás detektor. Az elválasztáshoz a Waters BEH C18 50 x 2,1 mm, 1,7 mm és Phenomenex LiChrospher RP-18 250 x 4,6 mm, 5µm állófázist alkalmaztuk. A kromatogramok kiértékeléséhez Empower szoftvert használtunk. A mérésekhez mozgófázisként 0,1% foszforsav oldatot és acetonitrilt alkalmaztuk. Referencia anyagként a hidroxietil-tirozin és FET 10 µg/ml oldatait alkalmaztuk, valamint a [^{18}F]FET készítmény mintáit. A linearitás

vizsgálatnál a törzsoldat hígításával kaptuk a megfelelő koncentrációjú standard oldatot. Az [^{18}F]FLT mintákat a radiogyógyszergyártó munkacsoport biztosította számunkra. A megnevezett anyagok a Sigma termékei voltak.

3. EREDMÉNYEK

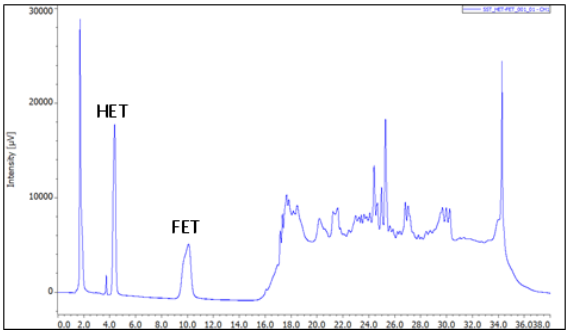
3.1. A [^{18}F]FET tartalmú készítmény radiokémiai- és kémiai tisztaság vizsgálata a gyógyszerkönyvi módszer alapján

Munkánk első lépéseként a gyógyszerkönyvi módszer segítségével végeztük el a [^{18}F]FET gyógyszer radiokémiai- és kémiai tisztaságának vizsgálatát. Az eljárás során a gyógyszerkönyvi monográfiában meghatározott kromatográfiás körülményeket adaptáltuk az általunk alkalmazott kromatográfiás rendszerre. Ennek megfelelően az alábbi paramétereket alkalmaztuk. Állófázisként az enantiomer-tisztaság vizsgálatánál alkalmazott, 250 × 4,6 mm méretű, 5 µm szemcseméretű RP-18 analitikai kolonnát használtuk. A nem radioaktív komponensek detektálását 225 nm hullámhosszon végeztük. A mérések során 20 µl mintát injektáltunk a kromatográfiás rendszerre, a mozgófázis áramlási sebessége 1,0 ml/min volt. A komponens A eluensként szén-dioxidtól mentes vizet, míg B eluensként acetonitrilt alkalmaztunk. A vizsgálat során a Ph. Eur. 2466. számú monográfiájában meghatározott gradiens elúciós programot alkalmaztuk (1. táblázat).

1. táblázat. Gyógyszerkönyvi monográfiában ajánlott gradiens elúció

Idő (perc)	A eluens (V/V%)	B eluens (V/V%)
0-10	90	10
10-20	90→5	10→95
20-30	5	95

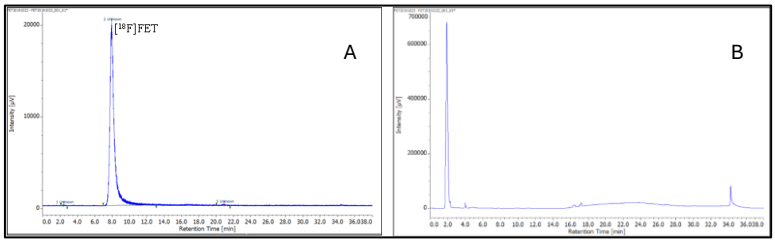
A kidolgozott kromatográfiás módszerrel szemben támasztott egyik alapvető követelmény a rendszeralkalmasság teljesülése. Ennek keretében a hidroxietil-L-tirozin (HET) és a fluoroetil-L-tirozin (FET) csúcsainak megfelelő elválasztását vizsgáltuk. A HET és FET 10 µg/mL koncentrációjú vizes oldatát a megadott kromatográfiás körülmények között analizáltuk. A HPLC-vizsgálatokat követően kiértékeltük a kapott kromatogramokat. A HET és FET csúcsai közötti felbontás (Rs) értéke 7,4 volt. Ez az érték meghaladja az 1,5-ös rendszeralkalmassági követelményt, így az elválasztás megfelelőnek bizonyult. Az eredmények alapján a kidolgozott HPLC-módszer alkalmasnak bizonyult a [^{18}F]FET-et tartalmazó radiofarmakon radiokémiai és kémiai tisztaságának vizsgálatára (1. ábra).



1. ábra. Rendszeralkalmassági vizsgálat kromatogramja

A radiokémiai tisztaság vizsgálata során azt határozzuk meg, hogy a mintában mért teljes radioaktivitás mekkora hányada található a kívánt radioaktív vegyület, jelen esetben a

[^{18}F]FET formájában. Az alkalmazott specifikáció szerint a teljes mért radioaktivitás legalább 95%-ának [^{18}F]FET formájában kell jelen lennie. A FET018 gyártási tétel radiokémiai tisztaságának vizsgálata során a [^{18}F]FET-hez tartozó fő radioaktív csúcs mellett két, a vizsgálati körülmények között nem azonosított radioaktív szennyező csúcsot detektáltunk 2,253 min, illetve 21,015 min retenciós időnél (2/A. ábra). A [^{18}F]FET-hez tartozó radioaktív csúcsterületnek az összes detektált radioaktív csúcsterülethez viszonyított aránya alapján a radiokémiai tisztaság 99,78%-nak adódott. Mivel a mért radiokémiai tisztaság meghaladta a 95%-os elfogadási kritériumot, a FET018 gyártási tétel megfelelt az előírt radiokémiai tisztasági követelménynek.



2. ábra. Radiokémiai (A) és kémiai (B) tisztaság mérés eredménye

A kémiai tisztaság vizsgálata során az UV-detektorral detektált komponensek csúcsterületeit határoztuk meg, és azokat a rendszeralkalmassági vizsgálat során kapott FET-referenciaoldat csúcsterületéhez viszonyítottuk. A szennyező komponensek koncentrációjának megfelelőségét a vonatkozó specifikációban meghatározott határérték alapján értékeltük. Amennyiben a vizsgált szennyező komponensek csúcsterületei a meghatározott elfogadási kritériumon belül maradnak, a minta megfelel az adott kémiai tisztasági követelménynek.
A [^{18}F]FET készítmény vizsgálata során a kifejlesztett HPLC-módszerrel kapott kromatogramokon az oldószerekhez rendelhető csúcsokon kívül további, a vizsgálat szempontjából releváns UV-jelet nem detektáltunk (2/B. ábra). Az eredmények alapján a vizsgált [^{18}F]FET-tartalmú radiofarmakon megfelelt a kémiai tisztaságra vonatkozó követelményeknek.

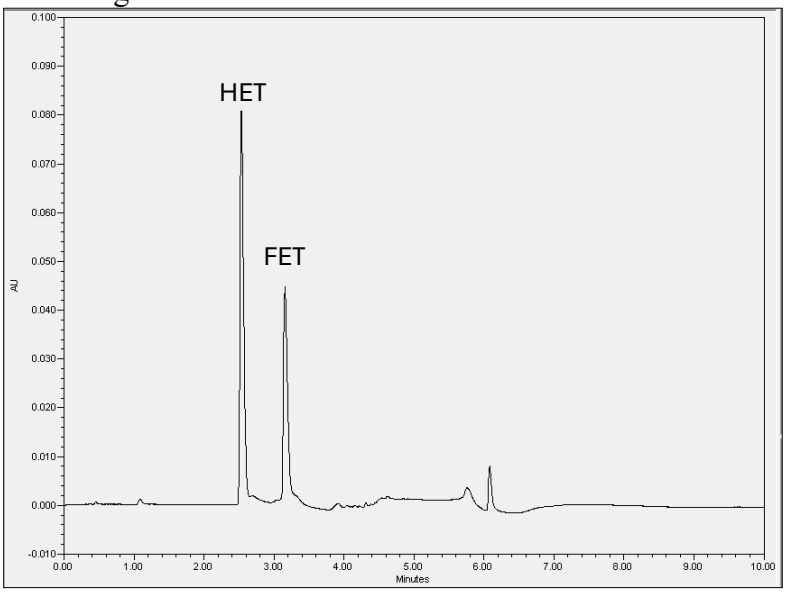
3.2. A tisztasági vizsgálat kivitelezése UPLC körülmények mellett

A továbbiakban a gyógyszerkönyvi módszer 30 perces vizsgálati idejét csökkenteni szerettük volna. Ebből a célból ígéretesnek bizonyult az ultranagyhatékonyságú (UPLC) módszer. A kromatográfiás körülményeket úgy optimalizáltuk, hogy a vizsgálati idő lecsökkent 10 percre. Ennek megfelelően az alábbi eluenseket használtuk: A: 0,1% H_3PO_4, B: acetonitril. Gradiensprofil a 2. táblázat szerint. Térfogat-áramlási sebesség: 0,6 ml/perc. Acquity UPLC BEH C18 1,7 µm 2,1x50 mm kolonna. Kolonnatér hőmérséklete: 40°C. Injektált térfogat: 10 µl. Detektorok: UV detektor (225 nm) és RA detektor. Referencia oldat: 10 µg/mL L-FET és 10 µg/mL L-HET. [^{18}F]FET készítmény.

2. táblázat. Kifejlesztett gradiens elúció

Idő (perc)	A eluens (V/V%)	B eluens (V/V%)
0	100	0
1	100	0
3	87,5	12,5
4	0	100
5	0	100
6	100	0

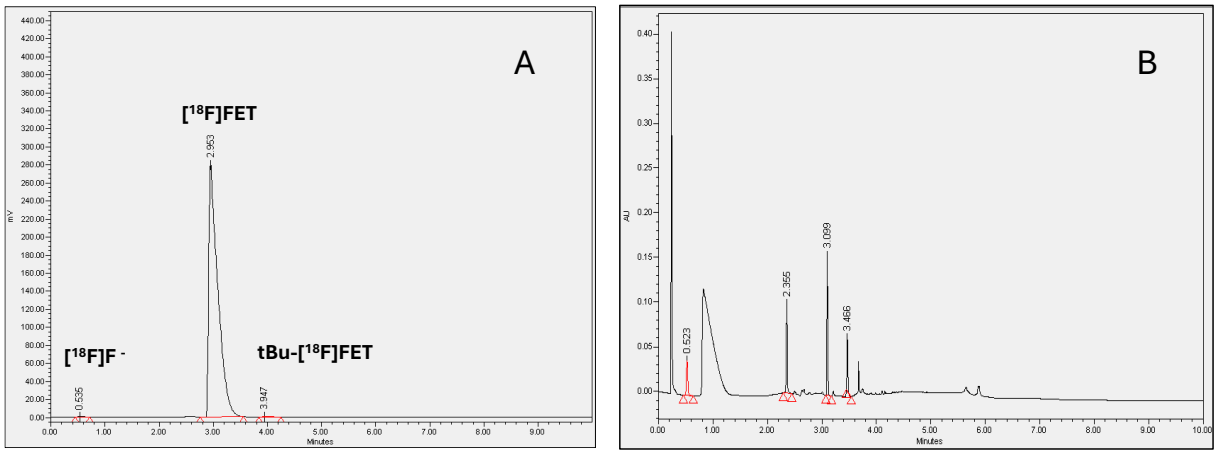
A kifejlesztett módszer rendszeralkalmassági ereményei alapján a HET és FET csúcsai közötti felbontás értéke 6,1 volt. Ez az érték meghaladja az 1,5-ös rendszeralkalmassági követelményt, így az elválasztás megfelelőnek bizonyult. Az eredmények alapján a kidolgozott HPLC-módszer alkalmasnak bizonyul a [^{18}F]FET-et tartalmazó radiofarmakon radiokémiai- és kémiai tisztaságának vizsgálatára



2. ábra. Rendszeralkalmassági kromatogram

A radiokémiai tisztaság vizsgálat során a főcsúcs mellett két szennyező csúcsot azonosítottunk: a szabad fluorid mellett a szintézis tBu-[^{18}F]FET köztitermékét (3/A. ábra). A csúcsok közötti felbontások meghaladták a 2,9 értéket, ami elfogadható eredménynek bizonyult. A radiokémiai tisztaság 99,6% volt. A radiokémiai vizsgálatot sikeresen valósítottuk meg 10 perc mérési idővel.

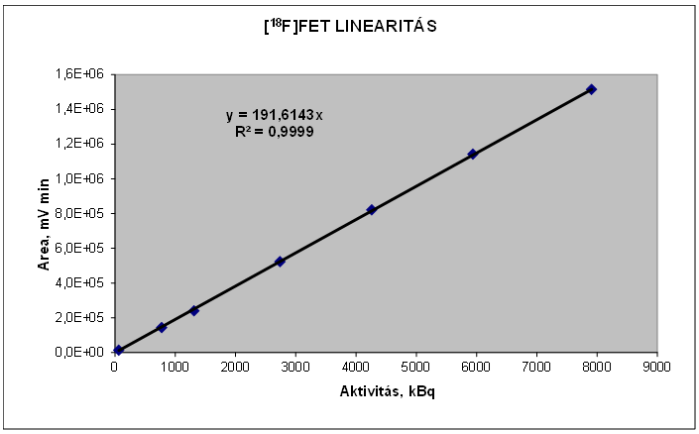
A kémiai tisztaság vizsgálatnál számos csúcsot kaptunk, azonban ezek közül csak kettő került kiértékelésre tekintettel arra, hogy a többi csúcs területe az elhanyagolási határértéken (disregard limit) belül volt (3/B. ábra). A kiértékelt csúcsterületek viszont nem haladták meg a FET referencia területértékét, így a minta kémiai tisztasága megfelelő volt.



3. ábra. Radiokémiai (A) és kémiai (B) tisztaság mérés eredménye UPLC eljárással

3.3. A kifejlesztett módszer validálása

A kifejlesztett módszer validálását az alábbi paraméterek alapján végeztük el. A [^{18}F]FET komponensre nézve linearitás vizsgálatot végeztünk (4. ábra). Az eredmények azt mutatták, hogy a 2,4-7909 kBq injektált radioaktivitás tartományon belül teljesül a linearitás. A felvett pontokra illesztett egyenes regressziós koefficiense r^2=0,9999. A legkisebb meghatározható radioaktivitás határérték (LOQ) 2,4 kBq-nek bizonyult. A [^{18}F]FET Area% értékét hat egymás követő mérésből meghatároztuk, a kapott 0,14% RSD érték megfelelő módszer precizitást jelent. A VRK vizsgálattal összehasonlított radiokémiai tisztaság vizsgálat eredményei 99,2% visszanyerést mutatott. Következésképpen a módszer helysége is megfelelő.



4. ábra. Linearitás vizsgálat [^{18}F]FET

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során sikeresen adaptáltuk a Ph. Eur. gyógyszerkönyvi HPLC-módszert a [^{18}F]FET radiofarmakon tisztaságvizsgálatára, majd a hatékonyság növelése érdekében egy új, optimalizált UPLC-eljárást fejlesztettünk ki és validáltunk. A gyógyszerkönyvi HPLC-módszer kiváló felbontást (Rs = 7,4) biztosított a HET és FET komponensek között, miközben a [^{18}F]FET gyártási tétel radiokémiai (99,8%) és kémiai tisztasága is igazoltan megfelelt az előírt követelményeknek. Az innovatív UPLC-módszerrel a vizsgálati időt harmadára, 30 percről 10 percre csökkentet, miközben megmaradt a megfelelő elválasztási hatékonyság (Rs = 6,1) és sikeresen azonosítottuk a szabad fluorid és a tBu-[^{18}F]FET szennyezőket. A módszer validálása során a [^{18}F]FET-re meghatározott széles linearitási tartomány (2,4-7909 kBq, r^2 = 0,9999), az alacsony LOQ-érték (2,4 kBq), valamint a kiváló precizitás (RSD = 0,14%) és helyesség (99,2%-os visszanyerés) bizonyította az eljárás megbízhatóságát. Konklúzióként megállapítható, hogy a kifejlesztett UPLC-módszer egy megfelelő módszer, amely a jelentős időmegtakarítás révén rutinszerűen és hatékonyan alkalmazható a rövid felezési idejű [^{18}F]FET radiofarmakon minőségellenőrzésére.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] Lau, E. W., Drummond, K. J., Ware, R. E., & Hicks, R. J. (2010). Comparative PET study using F-18 FET and F-18 FDG for the evaluation of patients with suspected brain tumour. *Journal of Clinical Neuroscience*, *17*(1), 43-49.

[2] European Pharmacopoeia. Fluoroethyl-L-tyrosine (^{18}F) injection. Monograph 2466. Strasbourg: European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare (EDQM).

AUTOMATED SYNTHESIS OF [^{18}F]DPA-714 TO BE USED FOR PET STUDIES OF TSPO IN NEUROINFLAMMATION

Ákos Vizbel[1,2], Milán Nacsa[1,2,3], Zoltán Varga[1], László Forgách[1,2], Ralf Bergmann[1], Krisztián Szigeti[1,2], Noémi Kovács[1], Ildikó Horváth[1], Polett Hajdrik[1], Sangram Nag[4], Prodip Datta[4], Domokos Máthé[1,2], Christer Halldin[1,4]

[1]*Department of Biophysics and Radiation Biology, HUN-REN TKI, Semmelweis University, Budapest, Hungary*
[2]*In Vivo Imaging Advanced Core Facility, Hungarian Centre of Excellence for Molecular Medicine,*
Budapest, Hungary
[3]*Pozitron-Diagnosztika Kft., Budapest, Hungary*
[4]*Karolinska Institutet, Stockholm, Sweden*

Absztrakt
A neuroinflammáció központi szerepet játszik a legtöbb neurodegeneratív betegség kialakulásában és progressziójában. A gliasejtek aktivációja a Transzlokátor Protein (TSPO) emelkedett expressziójához vezet, ami ígéretes biomarkerré teszi. A PET-képalkotás alkalmas a TSPO-expresszió kvantitatív meghatározására megfelelő radiotracer használatával, például a ^{18}F-jelzett DPA-714-gyel. Jelen munkánkban bemutatjuk a [^{18}F]DPA-714 szintézisét, tisztítását és analitikáját a kereskedelmi TacerMaker szintézisplatform felhasználásával. A radioszintézis nagy tisztaságú terméket eredményezett (>99%), 608 ± 238 GBq/µmol moláris aktivitásértékkel, valamint 33,4% bomláskorrekcióval számított radiokémiai kitermeléssel. A kifejlesztett módszer robusztusnak és reprodukálhatónak bizonyult, praktikus megközelítést biztosítva a TSPO-szelektív, neuroinflammációs képalkotó vizsgálatokhoz alkalmas radiotracer rutin gyártásához.

Abstract
Neuroinflammation plays a central role in the development and progression of most neurodegenerative diseases. Glial cell activation leads to an increase in Translocator Protein (TSPO) expression, which makes it a promising biomarker. PET imaging is suitable for the quantitative measurement of TSPO expression using an appropriate radiotracer such as ^{18}F-labeled DPA-714. We report the automated synthesis, purification, and quality control of [^{18}F]DPA-714 using the commercially available TracerMaker synthesis platform. The radiosynthesis yielded a product with high radiochemical purity (>99%), a molar activity (MA) of 608 ± 238 GBq/µmol, and a decay-corrected radiochemical yield of 33,4%. The developed protocol proved robust and reproducible, providing a practical approach for routine production of the TSPO-targeting radiotracer for neuroinflammation imaging studies.

1. INTRODUCTION

Under physiological circumstances, the expression of TSPO is very low, but during inflammation its level increases significantly in microglia. The cause of this overexpression is still not entirely clarified, but one explanation might be the increased energy requirement of the activated glial cells. This leads to functional changes in the mitochondria, where most of the receptors reside. [1,3] Furthermore, research shows that TSPO plays a role in the formation of

free radicals and can be connected to inflammatory transcription pathways [1]. In general, PET imaging can be well utilised for imaging the increased expression of TSPO resulting from neuroinflammation, as the PET signal is proven to correlate with the localisation of the pathological changes. [2] [^{18}F]DPA-714 (Figure 1) is a 2nd-generation radiotracer with several advantages over the previously used, mainly ^{11}C-labeled compounds. [4] It can be effectively synthesised by nucleophilic aromatic substitution of the tosylate precursor with K-^{18}F - Kryptofix 2.2.2 complex in anhydrous acetonitrile. [5] Our main goal was to produce the tracer with the highest possible molar activity, as essential for obtaining a suitable PET image. [6]

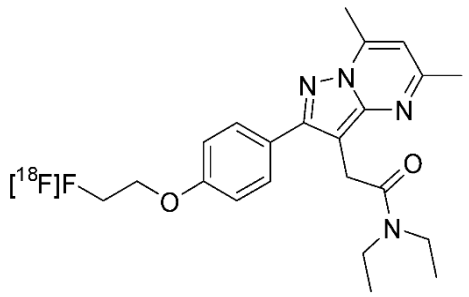


Figure 4. Chemical structure of [^{18}F]DPA-714

2. MATERIALS

2.1. *Synthesis* setup

The synthesis was conducted on a TracerMaker (ScanSys Laboratoireteknik ApS, Copenhagen, Denmark) universal synthesis module controlled by TracerMaker software. The front panel holds the reagent vials in two rows, connected by Teflon tubing (Figure 2). Three-way valves control the flow of the liquids, which are transferred by pressurized helium gas; in some steps (dilution, injection), a 2500 µL syringe pump is utilised as well. The reaction takes place in reactor R2, which can be heated or cooled by an air fan located behind the assembly. The right side of the machine houses the syringe pump, column, and injection loop for the semi-preparative HPLC separation. The commercial HPLC pumps (Knauer 4.1s, 2.1s) and the eluent reservoir are separate. The synthesis setup is contained inside a lead-shielded hot cell (RadiÖko Ltd., Veszprém¸ Hungary) with a separate compartment for the product collection vial.

2.2. Analytical setup

The components of the HPLC setup were a Jasco PU-2089 Plus HPLC pump, Jasco AS-4050 automatic sampler, Jasco UV-2075 Plus UV-Vis and LabLogic Gamma-RAM 4 detectors. The modules are connected to the PC by Jasco LC-NetII/ADC interface, which runs the Jasco ChromNav software. For quality control, a Kinetex 5u C18 100 Å (250 × 4.6 mm) RP column was used at room temperature (25°C)

3. *METHODS*

3.1. Preparations for the synthesis

Before the synthesis, the system was washed with various solvents (ethanol, acetonitrile, sterile water) and then dried with helium. After drying, the reagents were placed. The vials were prepared as follows: vial 1 was filled with 1 mL of absolute ethanol. Sterile water was added to vials 2, 3, and 8 in volumes of 8, 3, and 40 mL, respectively. Vial 5 was filled with 1.2 mL of QME eluent. (containing 100 mg Kryptofix 2.2.2, 18 mg potassium carbonate, 850 µL Milli-Q water, and 20 mL acetonitrile) The tosylate-DPA-714 precursor was dissolved in 1 mL anhydrous acetonitrile and added into vial 4. For vial 6, 5 mL of sterile saline was measured out, after which the vial was crimp-sealed. The QMA cartridge is preconditioned with 6- 8 mL of 0,5 M K_2CO_3 solution, then washed with 8-10 mL of sterile water. Residual water was removed with air. To prepare the SPE cartridge, 5 mL of absolute ethanol, followed by 5 mL of sterile water, was pushed through it with a syringe.

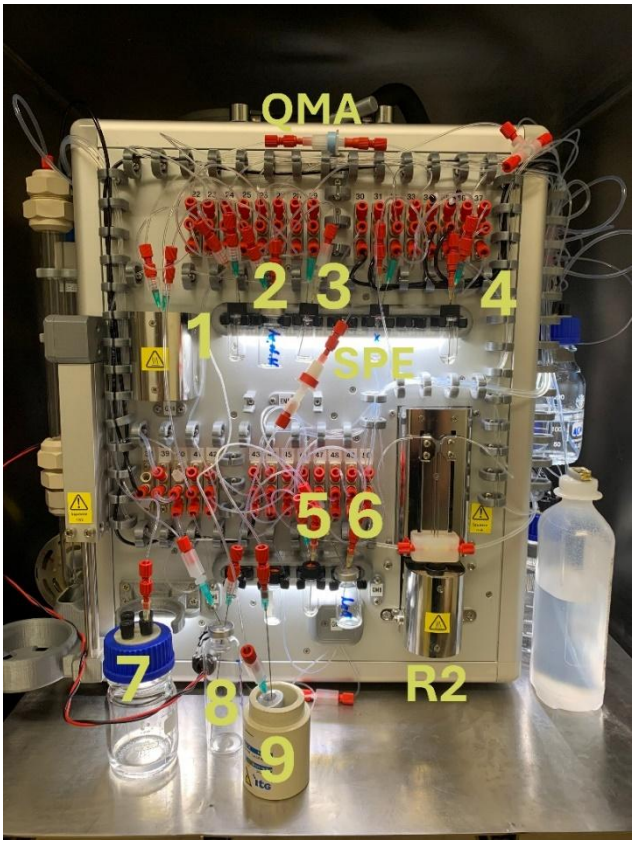


Figure 2. Picture of the experimental setup labeled with main components and reagent placement

3.2. Trapping of ^{18}F and labeling reaction

The ^{18}F-fluoride in enriched ^{18}O-water is pushed through the preconditioned QMA cartridge with helium gas. To elute the trapped ^{18}F-fluoride, 1,2 ml QME eluent solution was pushed through the column into reactor R2. The mixture was dried azeotropically at 120°C for 4 minutes under continuous helium flow, followed by 2 minutes of after-drying. When the reactor was cooled down to 80°C, the 2 mg precursor (2-(4-(3-(2-(diethylamino)-2-oxoethyl)-5,7-dimethylpyrazolo[1,5-*a*]pyrimidin-2-yl)phenoxy)ethyl 4-methylbenzenesulfonate) dissolved in 1 mL anhydrous acetonitrile was added to the dry K-^{18}F -Kryptofix 2.2.2 complex. The

mixture was heated again and allowed to react for 10 minutes at 105°C in a closed vial (Figure 3). When the reaction was completed and the reaction mixture cooled down to 50°C, 2,5 ml of sterile water was added to the reactor vial for dilution. The diluted reaction mixture was transferred quantitatively to the injection loop by successive rinsing steps.

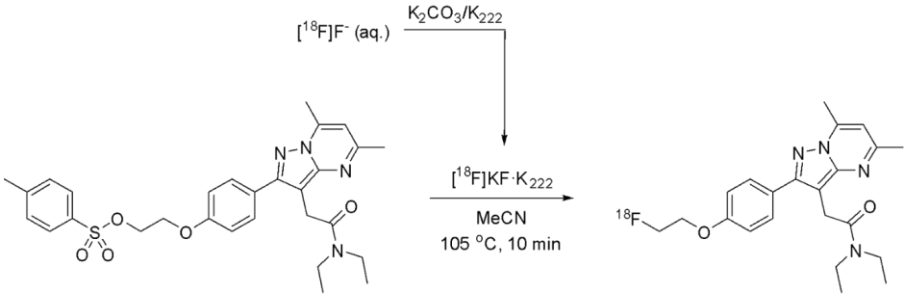


Figure 3 Nucleophilic substitution reaction of [^{18}F]DPA-714

3.3. HPLC separation of the product

A semi-preparative 18C column (Avantor ACE 5 C18-HL, 250 x 10 mm) was used to separate the [^{18}F]DPA-714 from byproducts; the eluent was a 65:35 ratio mixture of 0,1M ammonium formate solution in Milli-Q water and HPLC-grade acetonitrile. The elution was isocratic, with a flow rate of 5 ml/min, a pressure of 100 bars, at room temperature (25°C). The eluted liquid was passed through a UV detector (254 nm) and a GM-tube-based gamma detector; both chromatograms can be followed in the software. The solution was pushed through the preconditioned SPE cartridge, followed by a wash with 8 mL of sterile water. Then the product was quantitatively eluted with 1 mL of absolute ethanol into the reformulation vial containing 5 mL of sterile saline, then transferred into the product vial.

3.4. QC and MA measurement

The eluent used was a mixture of acetonitrile and 0,05M sodium acetate, using gradient elution; the concentration of the acetonitrile changed from 35 to 80 percent during the measurement time (16,8 min). The flow was set to 5 ml/min, UV detection at 254 nm, and gamma detection. First, the system was calibrated by injecting 10 µl of 0.1 mg/ml DPA-714 (MW=398,47 g/mol) standard solution in acetonitrile. For identification and quality control purposes, we prepared a solution containing 20 µl of DPA-714 standard solution and 480 µl MQ water. To this mixture, we added 2 drops of product, then injected 10 µL onto the column. For the determination of molar activity, we calibrated the system by injecting 10 µL of 0.007, 0.004, 0.002, and 0.001 mg/ml standard solutions. Then filled an HPLC vial fitted with an insert and injected 50 µL onto the column; the concentration was measured by correlating it with the calibration curve. By knowing the radioactivity of the whole 6 mL product, the MA could be calculated.

4. RESULTS

The radiochemical yield based on the starting ^{18}F activity and product activity at the end of the synthesis was an average of 33,4%. Starting activity was decay-corrected from production time to the moment the synthesis was started. The measured molar activity value was 608 ± 238

GBq/µmol. Radiochemical purity exceeded 99% in every case. The synthesis time was an average of 53 minutes.

5. DISCUSSION

Comparing different approaches (Table 1), the basic theory of the synthesis method used was identical in every case: the ^{18}F nucleophilic substitution of the tosylate precursor. However, practical implementation varied greatly. In every case, the ^{18}F-fluoride was trapped on a commercial anion exchange resin but eluted using different eluent and phase-transfer catalyst compositions. Reaction conditions regarding temperature and duration also varied; lower temperatures required longer reaction times, but other groups, like us, preferred slightly higher temperatures for shorter duration. These parameters greatly influence yield and purity and are therefore a focus of optimization. Parameters of the HPLC separation are also important, because increasing the apolar constituent shortens the separation time, but may decrease the purity of the product. The product in all cases was eluted into sterile saline using ethanol.

In light of our results, it can be stated that the production of [^{18}F]DPA-714 was successful and repeatable using the TracerMaker module. After optimization, the system showed stable operation, which is supported by consistent yields. The detailed analytical validation, including the radioHPLC-based identity and purity measurements, confirmed that the synthesized product is sufficient from a pharmacological standpoint and that its contamination profile doesn't affect its use in preclinical applications. Measured molar activity values were higher than previously published, which is beneficial for the minimization of competitive binding interactions with the unlabeled molecule. [6] The combination of moderate reaction temperature, efficient purification strategy, and robust quality control workflow resulted in a practical production method suitable for routine preclinical applications. The successful implementation of this synthesis on a flexible open-platform module further expands the accessibility of TSPO radiotracer production and provides a foundation for translational neuroinflammation studies, which we conduct in our research group.

Platform	Zymate-XP (Damont et al., 2008)[7]	AllinOne (Cybulska et al., 2021)[8]	Synthera (Vavere et al., 2024)[9]	Elixys/FlexChem (McCauley et al., 2022)[10]	TracerMaker (present work)
Phase transfer catalyst	Kryptofix 2.2.2	TEAB	TBA HCO_3	Kryptofix 2.2.2	Kryptofix 2.2.2
Solvent	dimethyl-sulfoxide	acetonitrile	dimethyl-sulfoxide	acetonitrile	acetonitrile
Precursor mass	4,5-5,0 mg	4 mg	2 mg	6 mg	2 mg
Reaction temperature	165°C	90°C	165°C	100°C	105°C
Reaction time	5 min	10 min	5 min	15 min	10 min
Molar activity (MA, GBq/µmol)	37 - 111	166.5±48.1	140.6±25.9	136.9 ± 51.8	608 ± 238
Radiochemical purity	>95%	100%	100%	>99%	>99%

Table 1. Comparison of different synthesis setups

6. CONCLUSION

Overall, the present work demonstrates that [^{18}F]DPA-714 can be produced reliably on the TracerMaker platform with high radiochemical purity, high molar activity, and reproducible yields. Compared with previously reported automated synthesis procedures, the developed protocol provided substantially higher molar activity while maintaining comparable product quality.

7. REFERENCES

[1] Betlazar, C., Middleton, R., Banati, R., & Liu, G. (2020). The Translocator Protein (TSPO) in Mitochondrial Bioenergetics and Immune Processes. *Cells*, *9*(2), Article 512. https://doi.org/10.3390/cells9020512

[2] Werry, E., Bright, F., Piguet, O., Ittner, L., Halliday, G., Hodges, J., Kiernan, M., Loy, C., Kril, J., & Kassiou, M. (2019). Recent Developments in TSPO PET Imaging as A Biomarker of Neuroinflammation in Neurodegenerative Disorders. *International Journal of Molecular Sciences*, *20*(13), Article 3161. https://doi.org/10.3390/ijms20133161

[3] Salerno, S., Viviano, M., Baglini, E., Poggetti, V., Giorgini, D., Castagnoli, J., Barresi, E., Castellano, S., Da Settimo, F., & Taliani, S. (2024). TSPO Radioligands for Neuroinflammation: An Overview. *Molecules*, *29*(17), Article 4212. https://doi.org/10.3390/molecules29174212

[4] Singh, P., Adhikari, A., Singh, D., Gond, C., & Tiwari, A. (2022). The 18-kDa Translocator Protein PET Tracers as a Diagnostic Marker for Neuroinflammation: Development and Current Standing. *Acs Omega*, *7*(17), 14412–14429. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00588
[5] James, M. L., Fulton, R. R., Vercoullie, J., Henderson, D. J., Garreau, L., Chalon, S., Dolle, F., Costa, B., Guilloteau, D., & Kassiou, M. (2008). DPA-714, a new translocator protein-specific ligand: synthesis, radiofluorination, and pharmacologic characterization. *J Nucl Med*, *49*(5), 814–822. https://doi.org/10.2967/jnumed.107.046151
[6] Luurtsema, G., Pichler, V., Bongarzone, S., Seimbille, Y., Elsinga, P., Gee, A., & Vercouillie, J. (2021). EANM guideline for harmonisation on molar activity or specific activity of radiopharmaceuticals: impact on safety and imaging quality. *EJNMMI Radiopharmacy and Chemistry*, *6*(1), 34. https://doi.org/10.1186/s41181-021-001496
[7] Damont, A., Hinnen, F., Kuhnast, B., Schöllhorn-Peyronneau, M., James, M., Luus, C., Tavitian, B., Kassiou, M., & Dollé, F. (2008). Radiosynthesis of ¹⁸F DPA-714, a selective radioligand for imaging the translocator protein (18 kDa) with PET. *Journal of Labelled Compounds & Radiopharmaceuticals*, *51*(7-8), 286–292. https://doi.org/10.1002/jlcr.1523
[8] Cybulska, K. A., Bloemers, V., Perk, L. R., & Laverman, P. (2021). Optimised GMP-compliant production of [(18)F]DPA-714 on the Trasis AllinOne module. *EJNMMI Radiopharm Chem*, *6*(1), 20. https://doi.org/10.1186/s41181-021-00133-0
[9] Vavere, A. L., Ghosh, A., Amador Diaz, V., Clay, A. J., Hall, P. M., & Neumann, K. D. (2024). Automated radiosynthesis of [(18)F]DPA-714 on a commercially available IBA Synthera(R). *Appl Radiat Isot*, *207*, 111257. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111257
[10] McCauley, K. S., Wilde, J. H., Bufalino, S. M., & Neumann, K. D. (2022). An automated radiosynthesis of [(18)F]DPA-714 on a commercially available radiosynthesizer, Elixys Flex/Chem. *Appl Radiat Isot*, *180*, 110032. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.110032

KÜLÖNBÖZŐ Eu-TARTALMÚ PREKURZOROKBÓL ELŐÁLLÍTOTT Eu-ADALÉKOLT GOETHIT NANOKOMPOZITOK VIZSGÁLATA ^{57}Fe- ÉS ^{151}Eu MÖSSBAUER-SPEKTROSZKÓPIÁVAL, VALAMINT RÖNTGENDIFFRAKTOMETRIÁVAL

Kudor Mátyás*[1], Béres Kende[1,2], Homonnay Zoltán[1], Shiro Kubuki[3], Krehula Stjepko[4], Kuzmann Ernő[1]

[1]ELTE TTK Kémiai Intézet, Magkémiai Laboratórium, 1117 Budapest, Pázmány Péter s. 1/A
[2]HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont, Anyag- és Környezetkémiai Intézet, 1117 Budapest, Magyar tudósok körútja 2.
[3]Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan
[4]Division of Materials Chemistry, Ruđer Bošković Institute, Bijenička cesta 54, 10000 Zagreb, Croatia

Absztrakt

$Eu_xFe_{100-x}OOH$ (x=0,10,30 mol%) összetételű, Eu_2O_3 és $Eu(NO_3)_3$ prekurzorokból hidrotermális úton előállított minták vizsgálata történt ^{57}Fe- és ^{151}Eu-Mössbauer-spektroszkópiával valamint por-röntgendiffraktometriával. A kutatás közvetlen célja, hogy tanulmányozzuk a hőkezeletlen és 300 °C hőfokon 30 percen át hőkezelt minták fázisösszetételét, lokális szerkezetét, különös tekintettel az alkalmazott Eu-prekurzor hatására vonatkozóan.

Az XRD- és ^{57}Fe-Mössbauer-eredmények igazolták a goethit kialakulását. A minták fő kristályos Eu-tartalmú fázisa $Eu(OH)_3$, emellett jelentős amorf hozzájárulás is megfigyelhető. Az ^{57}Fe Mössbauer- és XRD mérések alapján a hőkezelés hatására a goethit hematittá alakul az Eu_2O_3 prekurzorból készített mintákban, míg az $Eu(NO_3)_3$ prekurzorból készített minták esetében a fázisátalakulás csak részlegesen megy végbe. Továbbá, az Eu_2O_3 -ból készített minta esetében a goethit egy része paramágneses állapotban van, míg az $Eu(NO_3)_3$ használatával a goethit teljesen antiferromágneses. Ez azt mutatja, hogy az Eu-prekurzor jelentősen befolyásolja a fázisösszetételt és a hőindukált fázisátalakulás mértékét. Továbbá egy szokatlan nagy intezitású goethit reflexió volt megfigyelhető a 10 mol% Eu tartalmú, Eu_2O_3 prekurzor használatával készített mintában, ami az Eu goethitbe történő lehetséges beépülésére utal.

A 10 mol%-os Eu-minták ^{151}Eu-Mössbauer-spektrumai egyértelmű különbségeket mutattak a hiperfinom paraméterekben a hőkezeletlen és hőkezelt esetekben, prekurzor típustól függetlenül, amely változások az Eu goethitbe való beépülésére utalnak.

$Eu_xFe_{100-x}OOH$ (x = 0, 10, and 30 mol%) samples synthesised hydrothermally using Eu_2O_3 and $Eu(NO_3)_3$ precursors were investigated by ^{57}Fe and ^{151}Eu Mössbauer spectroscopy as well as powder X-ray diffractometry. The primary aim of the study was to examine the phase composition and local structure of the as-prepared samples and of those heat-treated at 300 °C for 30 min, with particular emphasis on the effect of the Eu precursor.

^{57}Fe Mössbauer spectroscopy and XRD measurements showed that the hydrothermal reaction produced goethite. According to the ^{57}Fe Mössbauer and XRD measurements, the heat treatment transforms the goethite into hematite in the samples prepared from the Eu_2O_3 precursor, whereas the phase transformation is only partial in the samples prepared from $Eu(NO_3)_3$. Furthermore, in the Eu_2O_3-derived sample, part of the goethite is in a paramagnetic state, while in the $Eu(NO_3)_3$-derived sample, the goethite remains fully antiferromagnetic. This

shows that the Eu precursor significantly influences the phase composition and the extent of the heat-induced phase transformation. In addition, an unusually intense goethite reflection was observed in the 10 mol% Eu-containing sample prepared using the Eu_2O_3 precursor compared with the undoped sample, which suggests possible Eu incorporation into the goethite structure.

The ^{151}Eu Mössbauer spectra of the 10 mol% Eu samples show clear difference between the average hyperfine parameters of the ^{151}Eu Mössbauer spectra in the as-prepared and heat-treated states, in both the oxide- and nitrate-derived systems. These changes indicate possible incorporation of Eu into goethite.

1. Bevezetés

A goethit (α-FeOOH) természetben is széles körben előforduló vas-oxihidroxid. Megfelelő előállítási körülmények alkalmazásával és különböző elemek adalékolásával kedvező elektromos, elektrokémiai és fotokatalitikus tulajdonságok érhetők el. Ezek a tulajdonságok lehetővé teszik a goethitalapú nanokompozit anyagok alkalmazását többek között Na-ion akkumulátorok elektródanyagaként, valamint fotokatalitikus víztisztítási eljárásokban [1]. A dolgozatban bemutatott, nemzetközi együttműködésben végzett kutatás távlati célja annak vizsgálata, hogy a ritkaföldfém-adalékolás miként befolyásolja a goethit szerkezetét és az alkalmazási szempontból fontos tulajdonságait.

Korábbi vizsgálatokban La-, Gd- és Lu-adalékolt goethit nanorészecskék szerkezeti, elektromos, elektrokémiai és fotokatalitikus tulajdonságait tanulmányozták [1]. Az eredmények azt mutatták, hogy a lantanoida-adalékolás jelentősen módosíthatja a goethit fizikai és funkcionális tulajdonságait. Különösen a 10 mol% Lu-adalékolt goethit minta esetében, ahol a tiszta goethithez képest 4 nagyságrenddel nagyobb, 1.05×10^{-5} S cm^{-1} elektromos vezetőképesség, valamint 500 mAh/g Na-ion akkumulátor kapacitás volt kimutatható, ami arra utal, hogy a ritkaföldfém-ionok által előidézett szerkezeti módosulások fontos szerepet játszhatnak az anyag tulajdonságainak hangolásában.

A lantanoida-adalékolt rendszerek közül az Eu-tartalmú goethit nanorészecskék külön vizsgálat tárgyát képezik [2]. Az eredmények arra utalnak, hogy az Eu jelenléte összefüggésben lehet a goethit szerkezetének és lokális környezetének módosulásával, valamint az egyes kísérőfázisok megjelenésével és a hőkezelés során bekövetkező átalakulásokkal.

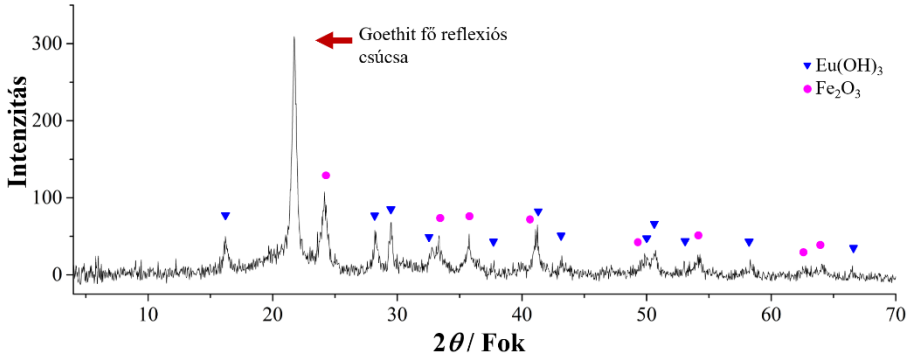
Mivel az Eu-adalékolt goethit minták Eu_2O_3 és $Eu(NO_3)_3$ kiindulási vegyület felhasználásával egyaránt előállíthatók, lehetőség nyílik annak közvetlen vizsgálatára, hogy a prekurzor típusa milyen hatással van az Eu goethit szerkezetbe történő beépülésére, a kialakuló Eu-tartalmú fázisokra, valamint a goethit–hematit fázisátalakulás mértékére. Jelen munkában arra helyeztük a hangsúlyt, hogy az alkalmazott Eu-prekurzor miként befolyásolja a kialakuló fázisösszetételt és a hőkezelés hatására végbemenő szerkezeti átalakulásokat. Ennek vizsgálatára ^{57}Fe- és ^{151}Eu-Mössbauer-spektroszkópiát, valamint por-röntgendiffrakciót alkalmaztunk.

2. Eredmények és diszkusszió

Az Eu_2O_3-prekurzorból előállított, hőkezeletlen Eu-adalékolt goethit minták por-röntgendiffrakciós vizsgálata alapján a fő kristályos fázisok a goethit és az $Eu(OH)_3$, emellett a diffraktogrammokon jelentős amorf hozzájárulás is megfigyelhető [2]. A nagy mennyiségben megjelenő $Eu(OH)_3$ arra utal, hogy a kiindulási összetételben jelen lévő európiumnak csak

korlátozott hányada épülhet be a goethit szerkezetébe. A korábbi vizsgálatok alapján az Eu Fe-pozíciókba történő maximális beépülése hozzávetőleg 4–5%-ra becsülhető [2].

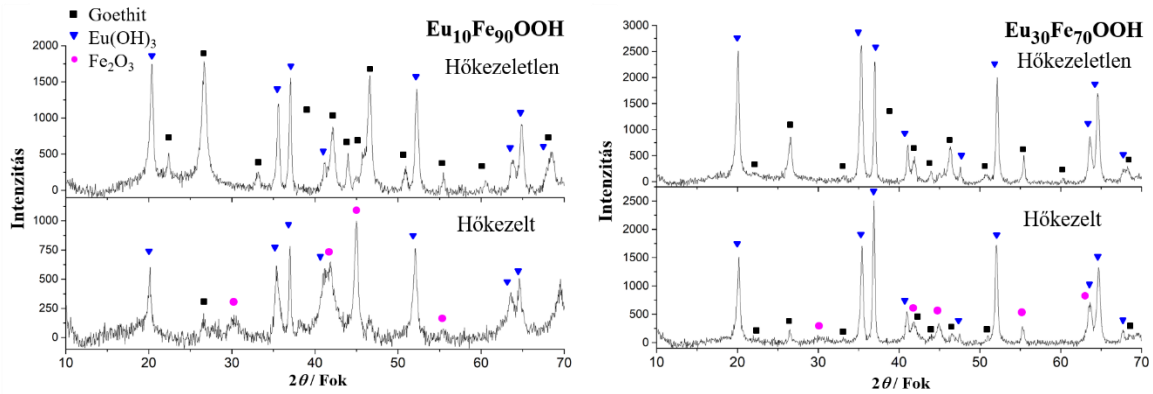
A 300 °C-on 30 percen át tartó hőkezelést követően az $Eu(OH)_3$ továbbra is az egyik meghatározó Eu-tartalmú kristályos fázis az Eu-adalékolt goethit mintákban, ugyanakkor a goethithez tartozó reflexiók intenzitása jelentősen csökken vagy teljesen eltűnik. Ezzel párhuzamosan hematitra jellemző reflexiók jelennek meg, ami azt mutatja, hogy a goethit jelentős része a hőkezelés során hematittá alakul. Hasonló fázisátalakulást más lantanoidákkal adalékolt goethit rendszerek esetében is megfigyeltek [1]. Azonban a 10 mol% kezdeti Eu-tartalmú, Eu_2O_3-prekurzorból előállított és hőkezelt minta diffraktogramjának részletesebb vizsgálata során a goethit fő reflexiójának helyén egy szokatlanul nagy intenzitású csúcs figyelhető meg, miközben a goethit további reflexiói csak lényegesen kisebb intenzitással jelennek meg (1. ábra). A jelenség lehetséges magyarázataként kezdetben egy másodlagos fázis jelenléte, a minta preferált orientációja (textúrája), illetve az Eu goethitbe történő beépülésével összefüggő szerkezeti módosulás merült fel.



1. ábra: Eu_2O_3-prekurzorból előállított hőkezelt $Eu_{10}Fe_{90}OOH$ minta por-röntgendiffraktogramja.

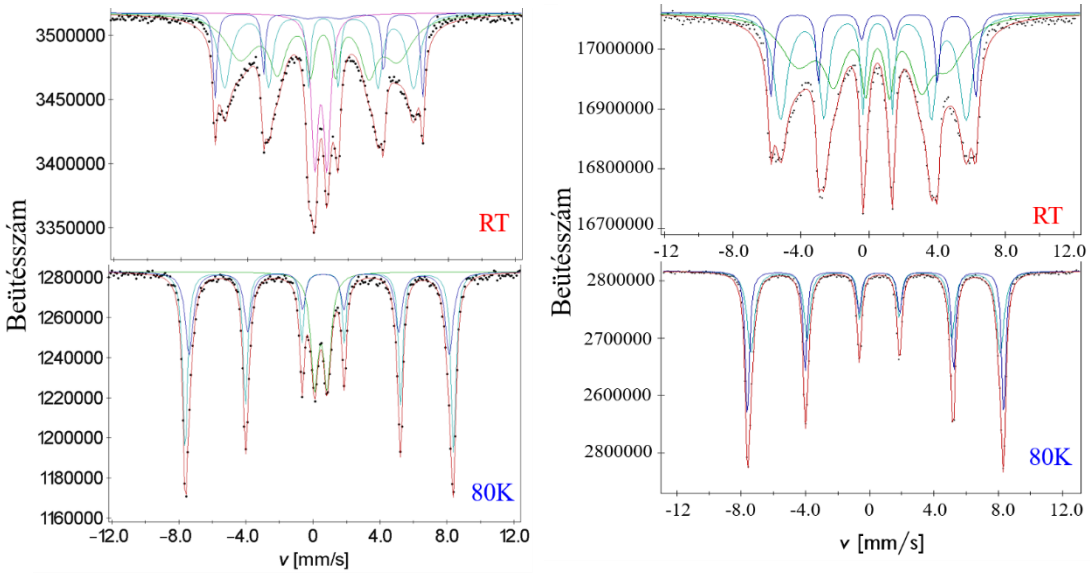
A minta különböző orientációiban megismételt por-röntgendiffrakciós mérések alapján a másodlagos fázis és a preferált orientáció lehetőségét kizártuk, így a nagy intenzitású reflexió valóban a goethithez rendelhető. A reflexió szokatlan megjelenését feltehetően a goethit rácsparaméterének, illetve lokális szimmetriájának megváltozása okozza, az Eu goethit szerkezetbe történő részleges beépülésére utalva.

Ennek további vizsgálatára és annak tisztázására, hogy a megfigyelt szerkezeti sajátosságok és a hőkezelés során végbemenő fázisátalakulás milyen mértékben függnek az alkalmazott kiindulási Eu-vegyülettől, további mintákat készültettünk $Eu(NO_3)_3$ prekurzor használatával. Az összehasonlító vizsgálatokhoz 10 és 30 mol% kezdeti Eu-tartalmú mintákat választottunk, amelyek por-röntgendiffraktogramjait hőkezelés előtt és a 300 °C-on 30 percig végzett hőkezelést követően egyaránt felvettük (2.ábra). A hőkezeletlen, $Eu(NO_3)_3$ prekurzorból előállított mintákban a fő kristályos fázisok, hasonlóan az Eu_2O_3 prekurzoros mintákhoz, a goethit és az $Eu(OH)_3$. A hőkezelést követően mindkét vizsgált összetételben megjelennek a hematithoz rendelhető reflexiók, ami igazolja a goethit–hematit fázisátalakulást. Lényeges különbség azonban, hogy a nitrát prekurzorból előállított mintákban a hőkezelést követően is jól megfigyelhetők a goethithez tartozó reflexiók. Ez arra utal, hogy ezekben a mintákban a goethit hematittá történő átalakulása kisebb mértékben megy végbe, mint az Eu_2O_3 prekurzorból előállított minták esetében. A porröntgendiffrakciós eredmények tehát azt mutatják, hogy az alkalmazott Eu-prekurzor típusa jelentősen befolyásolja a hőkezelés során végbemenő fázisátalakulás mértékét.



2. ábra: 10 és 30 mol% kezdeti Eu tartalmú, $Eu(NO_3)_3$ prekurzorból előállított minták por-röntgendiffraktogramjai hőkezelés előtt és után.

Annak vizsgálatára, hogy ezek a különbségek miként jelennek meg a vas lokális környezetében, ^{57}Fe-Mössbauer-spektroszkópiai méréseket végeztünk. Az Eu-mentes minta ^{57}Fe-Mössbauer-spektrumának hiperfinom paraméterei jó egyezést mutattak a goethitre vonatkozó irodalmi értékekkel. Szobahőmérsékleten a spektrum három szextettkomponenssel, 80 K-en pedig egyetlen szextettel volt leírható, ami megerősítette, hogy az alkalmazott hidrotermális eljárással sikeresen előállítható a kívánt goethitfázis. A továbbiakban elsősorban a 10 mol% kezdeti Eu-tartalmú minták eredményeit hasonlítjuk össze, mivel ezeknél figyelhetők meg a prekurzorhatással és az Eu lehetséges beépülésével kapcsolatos jellegzetesebb különbségek. A 3. ábrán az Eu_2O_3- és $Eu(NO_3)_3$ prekurzorból előállított, 10 mol% kezdeti Eu-tartalmú hőkezeletlen minták szobahőmérsékleten és 80 K-en felvett ^{57}Fe-Mössbauer-spektrumai láthatók. Az Eu_2O_3 prekurzorból előállított minta ^{57}Fe Mössbauer-spektrumaiban a goethithez rendelhető mágnesesen felhasadt komponensek mellett egy további dublett komponens is megjelenik. Ez a komponens 80 K-en is megfigyelhető, ami arra utal, hogy eredete nem egyszerűen a szobahőmérsékleten fellépő szuperparamágneses relaxációval magyarázható, hanem összefüggésben állhat a por-röntgendiffrakcióban megfigyelt szokatlan reflexióval, és így a goethit lokális szerkezetének módosulásával és az Eu goethitbe való részleges beépülésével is. Ezzel szemben a $Eu(NO_3)_3$-prekurzorból előállított minta Mössbauer-spektrumait megfigyelve a két mintasorozat spektrumai között egyértelmű különbségek tapasztalhatók, amelyek részben a részecskeméret, illetve az ezekhez kapcsolódó lokális Fe mikrokörnyezet eltéréseivel magyarázhatók. A legfontosabb különbség ugyanakkor az, hogy az Eu_2O_3 eredetű mintában megfigyelt dublettkomponens az $Eu(NO_3)_3$ prekurzorból előállított mintában nem jelenik meg.

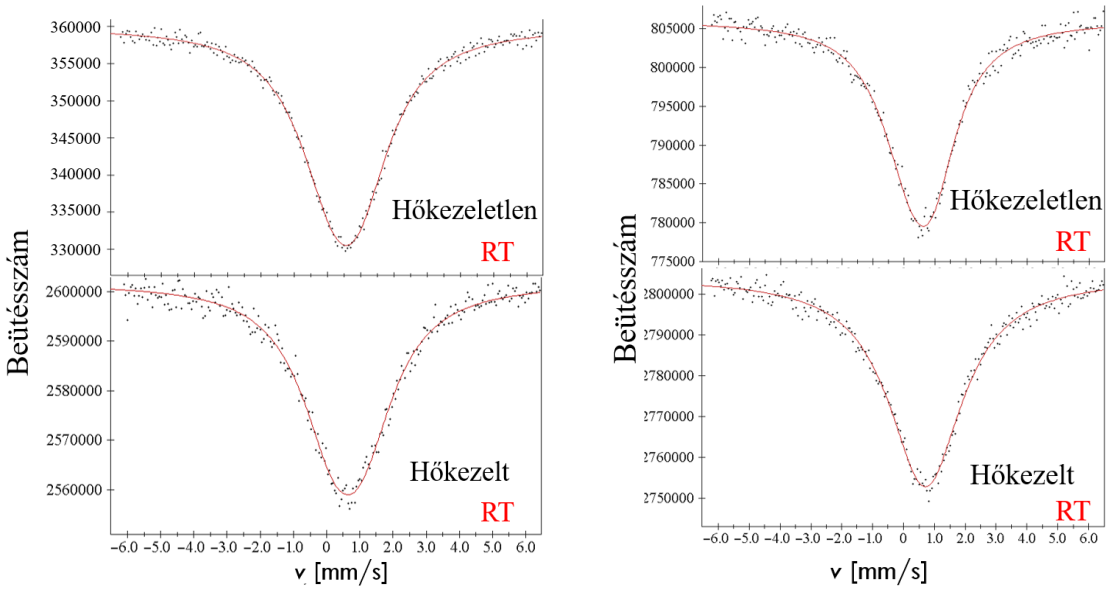


3. ábra: A 10 mol% kezdeti Eu-tartalmú, Eu_2O_3 (balra) és $Eu(NO_3)_3$ prekurzorból (jobbra) előállított hőkezeletlen minták ^{57}Fe-Mössbauer-spektrumai szobahőmérsékleten és 80 K-en.

A hőkezelést követően a két prekurzorból előállított minták ^{57}Fe Mössbauer-spektrumai ismét egyértelmű különbséget mutatnak. Az Eu_2O_3-prekurzorból készített mintában a mágnesesen felhasadt komponens hematithoz rendelhető, ami megerősíti a XRD mérése által jelzett goethit-hematit fázis transzformációt. Ugyanakkor a mintához tartozó XRD-mérésben (1.ábra) a goethit fő reflexió pozíciójában egy intenzív csúcs figyelhető meg. Ez arra enged következtetni, hogy a Mössbauer-spektrumban a hőkezelés után is megmaradó dublett komponens paramágneses goethithez rendelhető. Ezzel szemben az $Eu(NO_3)_3$ prekurzorból előállított hőkezelt mintában a goethithez tartozó mágneses komponens továbbra is jelen van a ^{57}Fe-Mössbauer-spektrumban. Ez összhangban van a por-röntgendiffrakciós eredményekkel, és megerősíti, hogy a goethit hematittá történő átalakulása a nitrát prekurzoros mintában kisebb mértékben megy végbe.
A két előállítási útvonal közötti eltérés felveti annak lehetőségét, hogy az alkalmazott Eu-prekurzor befolyásolja az Eu goethitbe történő beépülésének mértékét, ami a hőkezelés során végbemenő fázisátalakulásra is hatással lehet.

Az Eu-tartalmú minták lokális Eu-környezetének és oxidációs állapotának vizsgálatára ^{151}Eu-Mössbauer-spektroszkópiát alkalmaztunk. Az európium oxidok és hidroxidok ^{151}Eu Mössbauer-spektrumainak kiértékelésekor a kvadrupólus kölcsönhatás figyelembevétele indokolt [3]. A ^{151}Eu 7/2→5/2 kvadrupólus átmenete egy nyolc vonalú mintázatot eredményez, azonban a ^{151}Eu 21.6 keV Mössbauer-vonal 1,4 mm/s természetes vonalszélessége miatt [4], ezek a vonalak jelentős átlapolásban vannak, így kialakítva a spektrumok burkológörbéjét (4. ábra). Tekintettel a mintákban található különböző mikrokörnyezetek kvadrupólus kölcsönhatást mutató, európium vonalainak nagy átfedésére, a több mikrokörnyezetre való kiértékelés nagy bizonytalansággal lett volna megtehető, ennek megfelelően a spektrumok mindegyikét egyetlen mikrokörnyezethez rendelhető kvadrupólus felhasadást mutató görbére értékeltük, amely átlagosan jellemzi a mintákban található európium mikrokörnyezeteket. A kiértékelés során azt találtuk, hogy az egyes mintákhoz tartozó izomereltolódás értéke az Eu^{3+} oxidációs állapotra jellemző tartományba esik [5] és közel áll az $Eu(OH)_3$, $\delta \approx 0.67$ mm/s izomereltolódás értékéhez [1], ami összhangban van röntgendiffraktometriai mérésekkel,

miszerint az európium hidroxid a fő kristályos Eu tartalmú fázis. Emiatt a ^{151}Eu-Mössbauer-spektroszkópia érzékenysége korlátozott a goethitbe esetlegesen beépült Eu és az $Eu(OH)_3$-hoz tartozó Eu-mikrokörnyezetek elkülönítésére. Azonban a 10 mol% Eu minták esetében, a hőkezelés egyértelmű változást okozott az átlagos ^{151}Eu Mössbauer-paraméterekben, mind az Eu_2O_3-, mind az $Eu(NO_3)_3$ prekurzorból előállított minták esetében. Az izoméreltolódás értéke a hőkezeletlen állapotban mért 0,53 mm/s értékről a hőkezelést követően rendre 0,63 mm/s-ra, illetve 0,69 mm/s-ra növekedett. Ennek egy lehetséges magyarázata, hogy a hőkezelés hatására hematittá alakuló goethit szerkezetében a vas pozíciókban található európium tovább öröklődött a hematit kristályszerkezetébe. Továbbá a goethithez képest a hematit kristályszerkezet vas pozícióiba, az európium nagyobb valószínűséggel beépíthető, ennek következtében a hematitban található európium hozzájárulhat az izomereltolódás értékének növekedéséhez.



4. ábra: 10 mol% kezdeti Eu-tartalmú, Eu_2O_3 (bal) és $Eu(NO_3)_3$ (jobb) prekurzorból előállított minták ^{151}Eu-Mössbauer-spektrumai hőkezelés előtt és után.

3. Összefoglalás

Az eredmények alapján az Eu_2O_3 és $Eu(NO_3)_3$ prekurzorokból előállított Eu-adalékolt goethit minták fázisösszetétele és a hőkezelés során végbemenő fázisátalakulás mértéke függ az alkalmazott Eu-prekurzor típusától. A hőkezeletlen minták fő kristályos fázisai mindkét előállítási útvonal esetében az α-Fe(Eu)OOH és az $Eu(OH)_3$. A ^{151}Eu-Mössbauer-vizsgálatok alapján az Eu lokális környezetében csak kisebb eltérések figyelhetők meg, miközben az európium minden vizsgált mintában kizárólag Eu^{3+} oxidációs állapotban van jelen. A kapott eredmények továbbá arra utalnak, hogy az Eu oldhatósága a goethitben korlátozott, ami összhangban van más lantanoidákkal adalékolt goethit rendszereknél tapasztalt megfigyelésekkel [1].

IRODALOMJEGYZÉK

[1] Doumae, A. et al. J. Materials Chemistry and Physics **2025,** 346

[2] Kubuki, S. et al., *J. Phys. Chem. Solids* **219** (2026) 114043.

[3] Stadnik, Z. et al. Solid State Commun. **1984,** 50, 335–337

[4] Stevens, J.G., Stevens, V.E., Adam Hilger, London **1965-85**

[5] Bauminger, E., M. et al. North-Holland, Amsterdam, New York, Oxford, **1978** 10. fejezet

2026. október 13.
kedd

további előadások

NYOMJELZŐ RADIONUKLIDOK A BIOSZERVETLEN KÉMIA SZEMSZÖGÉBŐL

Szemenyei Erzsébet, Környei József

Izotóp Intézet Kft.,
H-1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

A bioszervetlen kémia tárgya az élet szempontjából fontos elemek biokémiája. A biogén elemeknek a nagy többsége a periódusos rendszer első négy sorában foglal helyet és csak három elem található az ötödikben. Közülük a jód a legnagyobb rendszámú (Z=53).

Az elsődleges biogén elemek és a másodlagos nemfém biogén elemek legfontosabb radionuklidjai között találunk tiszta béta-sugárzót (^{3}H, ^{14}C, $^{32/33}P$, ^{35}S), pozitron-sugárzót (^{11}C, ^{13}N, ^{15}O, ^{34m}Cl) és γ/β^{-}-sugárzót (^{38}Cl). A triciált aminosavak, peptidek, proteinek, nukleotid-bázisok, különféle gyógyszerhatóanyagok mellett rendkívül sokfélék a szén-izotóppal jelzett szerves vegyületek, jelentősek a foszfor-/kén-izotóppal jelzett nukleotidok, valamint a kéntartalmú aminosavak. Mindezek a jelzett vegyületek használatosak az élettudományi kutatásokban és a nukleáris medicina területén.

A másodlagos fém biogén elemek legfontosabb radionuklidjait tekintve pozitron-sugárzó a ^{22}Na, ^{38}K, ill. γ/β^{-}-sugárzó a ^{24}Na, ^{28}Mg, ^{42}K, $^{45/47}Ca$. Nagyságrendi különbség van a pozitron-sugárzó, ill. a γ/β^{-}-sugárzó nátrium- és kálium-izotópok fajlagos aktivitásában, a pozitron-sugárzók javára. A szintén γ/β^{-}-sugárzó ^{28}Mg hordozómentes formában megkapható, azonban leányeleme az ultrarövid felezési idejű nem biogén ^{28}Al mindig jelen van a rendszerben. Ugyanígy a ^{47}Ca mellett annak leányeleme a ^{47}Sc is mindig jelen van, amely szintén nem biogén elem (elválasztásuk $^{47}Ca/^{47}Sc$ generátorban történhet, de ott a ^{47}Ca marad az oszlopon és a ^{47}Sc kerül az eluátumba).

A mikro-, ill. nyomelemek között a legkisebb rendszámú a pozitron-sugárzó ^{18}F, amit fluoridként csak ritkábban alkalmaznak nyomjelzésre, inkább a sokféle radiofluorozott vegyületnek van biokémiai jelentősége. További pozitron-sugárzók is találhatók a mikro-, ill. nyomelemek között: a ^{48}V, ^{52}Mn, ^{58}Co, $^{61/64}Cu$, ^{76}Br és ^{124}I. A γ/β^{-}-sugárzók közül a ^{31}Si-ra a rendkívül labilis orto-sziliciumsavként lenne szükség, mert így kerül be az egysejtűekbe és bizonyos csípős vagy szúrós növényekbe. A nyomjelzéshez viszont a kolin-kloriddal stabilizált formáját használhatják. További γ-sugárzást (is) kibocsátó mikro-, ill. nyomelem radionuklidok: ^{51}Cr, ^{57}Co, ^{59}Fe, ^{65}Zn, ^{75}Se, ^{82}Br, $^{123/125/131}I$.

Megállapítható, hogy a biogén elemek radionuklidjai nagy jelentőségűek az élettudományokban és egy részük alapvető a radiogyógyszerek előállításánál is. Ugyanakkor a nukleáris medicinában szokásosan alkalmazott radioizotópok jelentős hányada nem biogén elem.

^{177}Lu ÉS ^{161}Tb: A „TRÓNON ÜLŐ” ÉS A „TRÓNKÖVETELŐ”

Szemenyei Erzsébet, Keresztes Szilvia, Környei József

Izotóp Intézet Kft.,
H-1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

A ^{177}Lu radionuklid joggal számíthat a „trónon ülő” címre: legalább hat gyártó listáján szerepel, kiépült egy összehangolt, egész éven át heti ellátást biztosító hálózat és a ^{177}Lu-peptideknek olyan, nagyszámú beteget magába foglaló indikációs területe van, mint az áttétes prosztatarák, ill. a szomatosztatin receptorokat termelő neuroendokrin tumorok kezelése.

A ^{161}Tb fizikai felezési ideje hasonló a ^{177}Lu izotóphoz (6,9 ill. 6,7 nap), a β^--sugárzás átlagos energiája is közeli érték: 154 keV szemben a 134 keV-vel). Jelentős különbség viszont az, hogy a ^{161}Tb intenzív Auger- és konverziós-elektronokat is kibocsát, melyek a 10 nm-es ill. 13 µm-es dimenzióban nyelődnek el, plusz terápiás hatást kifejtve. Ennek alapján nevezhetjük a ^{161}Tb izotópot „trónkövetelő”-nek.

A ^{177}Lu radionuklidot dúsított ^{176}Lu célanyagból közvetlen neutron-besugárzással is elő lehet állítani, azonban nem célszerű a besugárzást 10-12 napnál hosszabb ideig végezni, mert az aktivitás később már nem növekszik. A Budapesti Kutatóreaktorban végzett néhány korábbi kísérletben a kapott fajlagos aktivitás jó összhangban volt a Dash[1] és munkatársai által közölt eredményekkel. Ugyanakkor a fajlagos aktivitás nem érte el a 800 GBq/mg értéket, ami miatt csak meglehetősen rövid, kb. 4 napos előrekalibrálással lehetne számolni. Közvetett aktiválás esetén viszont ^{177}Yb radionuklidot állítunk elő, ami 1,91 óra felezési idővel bomlik ^{177}Lu-má. Elválasztás után ≥ 3000 GBq/mg fajlagos aktivitás érhető el, (míg a hordozómentes érték 4100 GBq/mg).

A ^{161}Tb-ot nem lehet közvetlen aktiválással tiszta formában kinyerni, mert mindig marad jelentős aktivitású ^{160}Tb szennyező. Közvetett módszer alkalmazásakor dúsított ^{160}Gd-ot aktiválnak ^{161}Gd-má, mely 3,66 perces felezési idővel ^{161}Tb-má bomlik. Ezáltal ≈ 4000 GBq/mg fajlagos aktivitás érhető el, (a hordozómentes érték 4300 GBq/mg). A Gd/Tb elválasztás szkémáját Gracheva és munkatársai[2] mutatták be.

Preklinikai vizsgálatok szerint (De Nardo és munkatársai[3]) a 25-1000 µm méretű sejtcsoportok esetén a ^{161}Tb 2,8-3,6-szor nagyobb dózist adott le a sejtmagra, mint a ^{177}Lu. Schaefer-Schüler és munkatársai[4] prosztatarákos betegeken végeztek összehasonlító vizsgálatokat és megállapították, hogy a valamivel kisebb aktivitású ^{161}Tb-PSMA nagyobb dózist exponál a tumorra, mint a ^{177}Lu-PSMA; ugyanakkor az egyéb szervek sugárterhelése alig nagyobb. A ^{161}Tb terápiás előnye a kisméretű tumorok, ill. mikrometasztázisok esetében mutatkozik meg.

A ^{161}Tb „igazi” versenytársai azonban inkább az α-sugárzók, mert a 45-65 µm dimenzióban elnyelődő α-részecskék energiája (5,4-6,1 MeV) lényegesen nagyobb, mint az Auger és konverziós elektronoké.

Irodalmi hivatkozások:

1) *Dash A. et al.: Nucl. Med. Mol. Imaging, 2015, 49, 85-107, doi: 10.1007/s13139-014-0315-z*
2) *Gracheva et al. EJNMMI Radiopharmacy and Chemistry, 2019, 4:12, 16 pages, doi: 10.1186/s41181-019-0063-6*
3) *De Nardo L. et al. EJNMMI Physics, 2024, 11:94, 24 pages, doi: 10.1186/s40658-024-00696-2*
4) *Schaefer-Schuler A. et al.: Theranostics 2024, 14(5), 1829-1840, doi: 10.7150/thno.92273*

RADIOAKTÍV HULLADÉKOKAT MINŐSÍTŐ MOBIL KONTÉNER FEJLESZTÉSE

Petrányi János[1], Zsitnyányi Attila[1], Jónás Jácint[1], Garai Zoltán[1], Veres Gábor[2]

[1]Gamma Zrt.
[2]ELTE Atomfizikai Tanszék

Az előadás egy terepen alkalmazható, konténeralapú mérőrendszer fejlesztését mutatja be, amelynek célja a radioaktív hulladékok gyors, megbízható és költséghatékony minősítése, különös tekintettel a felszabadítási és elhelyezési döntések támogatására. Ellenőrzött területeken – különösen nagyszabású leszerelési és felújítási projektekben – a keletkező hulladékot potenciálisan radioaktívan szennyezettként kell kezelni. A hagyományos mérési eljárások magas háttérsugárzás vagy nagyon alacsony kimutatási határértékek mellett nem mindig teszik lehetővé a szükséges megbízhatóságú minősítést.

A fejlesztett rendszer egy alacsony háttérsugárzású, intelligens detektorokkal integrált mérőkonténerre épül. Lehetővé teszi a hordókban vagy hulladékcsomagokban található alacsony aktivitáskoncentrációk kimutatását, az aktivitás kezelhető mérési időn belüli becslését, valamint a sugárzási forrópontok azonosítását. A cserélhető detektorok alkalmazásának köszönhetően a rendszer nagy aktivitású hordók hiteles mérésére, előválogatására is alkalmassá tehető. A mérési eredmények alapján a rendszer támogatni tudja a kis és nagyon kis aktivitású radioaktív hulladékok minősítését, illetve – a vonatkozó nuklid-specifikus követelmények teljesülése esetén – felszabadítható kategóriába sorolását.

A hordók mérésén túl a projekt keretében a dörzsmintavételhez kapcsolódó mérési technológiával is foglalkozunk, amelynek eredményeként új mérési elrendezést alakítottunk ki. Az előadás ismerteti a hordó- és detektorgeometriák szimulációját, az alacsony hátterű mérőkonténer tervezését, valamint a különböző detektortechnológiák integrációját. A fejlesztés és validálás során szcintillációs, HPGe-, GM-csöves és CZT-alapú mérési technológiákat alkalmaztunk. A mérési eredményeket képalkotási és LIDAR-alapú 3D-modellezéssel is kiegészítettük, amely lehetővé tette a sugárzás intenzitásának térbeli elemzését. A hordók előminősítéséhez emellett drónalapú sugárzásmérési technológiát is alkalmaztunk. A szimulációs és valós mérési eredmények bemutatják a rendszer alkalmasságát a hulladékkategóriák megbízható megkülönböztetésére és a hulladékgazdálkodási folyamat hatékonyabbá tételére.

A fejlesztést a GAMMA Zrt. az Eötvös Loránd Tudományegyetemmel közösen, a 2024-1.1.1-KKV_FÓKUSZ-2024-00076 projekt keretében valósította meg.

DEVELOPMENT OF A MOBILE CONTAINER FOR CHARACTERIZING RADIOACTIVE WASTE

János Petrányi [1], Attila Zsitnyányi [1], Jácint Jónás [1], Zoltán Garai [1], Gábor Veres [2]

[1]*Gamma Zrt.*
[2]*ELTE Atomfizikai Tanszék*

The presentation describes the development of a field-deployable, container-based measurement system designed for the rapid, reliable, and cost-effective characterization of radioactive waste, with particular emphasis on supporting clearance and disposal decisions. In controlled areas, particularly during large-scale decommissioning and refurbishment projects, the resulting waste must be treated as potentially radioactively contaminated. Conventional measurement methods do not always provide sufficiently reliable characterization under conditions of elevated background radiation or when very low detection limits are required.

The developed system is based on a low-background measurement container equipped with integrated smart detectors. It enables the detection of low activity concentrations in drums or waste packages, estimation of activity within practical measurement times, and identification of radiation hotspots. Thanks to the use of interchangeable detectors, the system can also be configured for the verification and pre-sorting of high-activity drums. Based on the measurement results, the system can support the characterization of very low-level and low-level radioactive waste and, provided that the applicable radionuclide-specific requirements are fulfilled, its classification as material eligible for clearance.

In addition to drum measurements, the project also addresses measurement technology associated with smear sampling, resulting in the development of a new measurement configuration.

The presentation covers the simulation of drum and detector geometries, the design of the low-background measurement container, and the integration of different detector technologies. During the development and validation process, scintillation, HPGe, GM-tube, and CZT-based measurement technologies were employed. The measurement results were complemented by imaging and LiDAR-based 3D modelling, enabling spatial analysis of radiation intensity. Drone-based radiation measurement technology was also applied for the pre-characterization of drums. Simulation and experimental measurement results demonstrate the system's capability to reliably differentiate between waste categories and to improve the efficiency of the waste management process.

The development was carried out jointly by GAMMA Technical Corporation and Eötvös Loránd University within the framework of project 2024-1.1.1-KKV_FÓKUSZ-2024-00076.

La^{3+} MEGKÖTÉSE CA-MONTMORILLONITON: KINETIKAI SZAKASZOK, NEM SZTÖCHIOMETRIKUS IONCSERE ÉS KÉSLELTETETT Fe-MOBILIZÁCIÓ

Kovács Eszter Mária, Kónya József, Nagy Noémi

Debreceni Egyetem TTK Fizikai Kémiai Tanszék Imre Lajos Izotóplaboratórium, 4032 Debrecen Egyetem tér 1.

A háromértékű kationok agyagásványokon történő megkötésének megértése fontos a radioaktív hulladékok elhelyezésére szolgáló bentonitalapú mérnöki gátak jellemzésében. Munkánkban a La^{3+} Ca-montmorilloniton történő megkötésének, valamint a kapcsolódó Ca- és Fe-mobilizációnak a kinetikáját vizsgáltuk 0, 25 és 40 °C-on. A szilárd fázis összetételének időbeli változását röntgenfluoreszcens analízissel követtük, kiegészítő felületi információt XPS-mérésekkel nyertünk.

A La^{3+} megkötése három kinetikai tartományra bontható. A kezdeti gyors szakaszban az eredeti Ca^{2+}-tartalom mintegy 94%-a felszabadult az első 10 percben, ami gyors rétegközi ioncserére utal. Ezzel szemben a Fe mobilizációja hosszabb időskálán folytatódott, és 120 perc után megközelítette a 40%-ot. A La^{3+}-felvétel és a felszabaduló kationok mennyisége eltért az ideális sztöchiometrikus Ca^{2+}–La^{3+} cserétől. Az eredmények alapján a gyors rétegközi ioncserét lassabb folyamatok követik, amelyekhez élhelyi szorpció, korlátozott oldódás és lokális szerkezeti átrendeződés is hozzájárulhat. A Fe-mobilizáció kinetikailag elkülönül az elsődleges ioncserétől, ami rámutat a háromértékű kationok és a montmorillonit közötti kölcsönhatások összetettségére.

La^{3+} UPTAKE BY CA-MONTMORILLONITE: KINETIC STAGES, NON-STOICHIOMETRIC EXCHANGE AND DELAYED Fe MOBILIZATION

Eszter Mária Kovács, József Kónya, Noémi Nagy

Imre Lajos Isotope Laboratory, Department of Physical Chemistry, University of Debrecen, Debrecen, Hungary

Understanding the uptake of trivalent cations by clay minerals is important for the characterization of bentonite-based engineered barriers used in radioactive waste disposal. The kinetics of La^{3+} uptake by Ca-montmorillonite and the associated mobilization of Ca and Fe were investigated at 0, 25 and 40 °C. Time-dependent changes in the solid-phase composition were monitored by X-ray fluorescence analysis, while supplementary surface information was obtained by X-ray photoelectron spectroscopy.

La^{3+} uptake exhibited three characteristic kinetic domains. During the initial rapid stage, approximately 94% of the original Ca^{2+} content was released within the first 10 min, indicating rapid interlayer cation exchange. In contrast, Fe mobilization continued over a longer timescale and approached 40% after 120 min. The relationship between La^{3+} uptake and cation release deviated from ideal stoichiometric Ca^{2+}–La^{3+} exchange. The results indicate that rapid interlayer exchange is followed by slower processes, potentially involving edge-site sorption, limited dissolution and local structural rearrangement. Fe mobilization is kinetically decoupled from the primary exchange process, highlighting the complexity of trivalent-cation interactions with montmorillonite.

2026. október 14.
szerda

FROM TARGET TO TRACER: [^{64}Cu]$CuCl_2$ PRODUCTION AND ROBUST RADIOLABELING OF THE HYPOXIA PET AGENT [^{64}Cu][Cu(ATSM)]

Miroslav Taranda[1,2], Zoltán Kassai[1,2], Zuzana Čepeľová[1], Patrik Mrmus[1], Andrej Tibenský[1,2], Peter Mikuš[2], Marek Leporis[1]

[1] BIONT, a.s., Bratislava, Slovakia
[2] Department of Pharmaceutical Analysis and Nuclear Pharmacy, Faculty of Pharmacy, Comenius University Bratislava, Slovakia

taranda@biont.sk; kassai@biont.sk

Copper-64 ($t_{1/2}$=12.7 h) combines PET imaging with theranostic potential. [^{64}Cu][Cu(ATSM)] (Cu-diacetyl-bis (N4 –methylthiosemicarbazone)) is an established tracer for imaging tumour hypoxia, a major cause of radio- and chemoresistance. Routine use requires a reliable precursor, a robust labeling protocol, dependable quality control and control of radiolysis.

At BIONT, [^{64}Cu]$CuCl_2$ is produced by the ^{64}Ni(p,n)^{64}Cu reaction (~55 mg enriched ^{64}Ni, 12 MeV protons, IBA Cyclone 18/9). The target is dissolved in 6 M HCl, ^{64}Cu is separated by anion exchange and ^{64}Ni is recycled. The product is formulated as a sterile solution in 0.1 M HCl, with a yield at end of synthesis of 90 ± 10 % and radionuclidic purity ≥ 99.5 %. In 2025, 56 production runs yielded 1.6 TBq.

Using this precursor, we optimized the manual radiolabeling of ATSM in acetate buffer (pH 5.5). We varied ligand amount (10–40 µg), starting activity (100–1000 MBq) and temperature (room temperature vs. 95 °C, 20 min). Radiochemical purity (RCP) was determined by radio-TLC on silica gel 60 with three mobile phases, at the end of synthesis and after 24 h. Sodium ascorbate (0–20 mg) was tested as a radioprotectant.

Labeling was near-quantitative under all conditions (RCP ≈ 99–100 %), and 95 °C gave the cleaner and more stable product. Ethanol and ammonium acetate/methanol gave concordant results. Citrate buffer produced a spurious copper–citrate band (≈ 4–7 %, confirmed with a [^{64}Cu]$CuCl_2$ control) and was excluded. Without a stabilizer, 24 h stability depended on the activity-to-ligand ratio: RCP dropped sharply between 300 and 500 MBq per 10 µg ATSM (≈ 8–13 MBq/nmol). Sodium ascorbate added after labeling prevented this radiolysis. The minimum effective dose was 5 mg, which kept 24 h RCP at ≈ 99.9 % at 600 MBq.

A precursor in growing supply, combined with a simple, radioprotected labeling and QC protocol, allows routine preparation of [^{64}Cu][Cu(ATSM)] at high activity and high molar activity.

SZABÁLYOZHATÓ SZERKEZETŰ NANOMÉRETŰ VEGYES ÁTMENETIFÉM OXID KATALIZÁTOROK ELŐÁLLÍTÁSA SZILÁRD-FÁZISÚ KVÁZI-INTRAMOLEKULÁRIS REDOXIREAKCIÓ SEGÍTSÉGÉVEL

Béres Kende Attila[1,2], Tulik Bálint István[1], Novodárszki Gyula[1], Solt Hanna[1], Barthos Róbert[1], Libor Kvitek[3], Shiro Kubuki[4], Homonnay Zoltán[2], Kótai László[1]

[1]HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont, Anyag- és Környezetkémiai Intézet
[2]Eötvös Loránd Tudományegyetem, Kémia Intézet, Magkémiai Laboratórium
[3]Department of Physical Chemistry, Palacky University Olomouc, Olomouc, Czech Republic
[4]Graduate School of Science, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan

A munkánk célja különféle központi fémeket (Fe^{III}, Co^{III}, Ag^{I}), redukáló ligandumokat (karbamid, NH_3 vagy piridin) és oxidáló anionokat (MnO_4^-, $Cr_2O_7^{2-}$, CrO_4^{2-}, ReO_4^-, stb.) tartalmazó átmenetifém-komplexek előállítása, szerkezeti jellemzése, termikus vizsgálata [1,2,3,4]. A komplexek hőkezelése során szilárd-fázisú kvázi-intramolekuláris redoxireakció játszódik le, amely alacsony hőmérsékleten (<200 °C) különböző, nanoméretű vegyes átmenetifém oxidokat eredményez. Ezeknek az energiatakarékosan előállított oxidoknak a szerkezeti tulajdonságai (fémek eloszlása tetraéderes vagy oktaéderes pozícióba, fém/oxigén vakanciák helye és száma, stb.) a hőkezelésekhez használt prekurzorkomplexek összetételével és a hőkezelések körülményeivel (atmoszféra, hőmérséklet, idő) finomhangolható[1-4]. A hőkezelések során kapott vegyes oxidok különböző katalitikus folyamatokban alkalmazhatók jó hatásfokkal. A vas(III)-karbamid komplexekből előállított Fe-Mn és Fe-Cr oxidok a CO_2 hidrogénezésénél alkalmazhatók jó konverzióval, melynek során CO, CH_4, C_2H_6 és C_3H_8 keletkezett[3,4], valamint Li- és Na-akkumulátorok másodlagos elektródanyagként hasznosíthatók. Az ezüst(I)-piridin komplexekből kapott Ag-Re oxidok a metanol dimetoxi-metánná történő katalitikus átalakítása során mutatnak jó hatékonyságot. Végezetül a kobalt(III)-ammóniával alkotott komplexeiből előállított Co-Cr oxidok folyadék- és gáz-fázisú katalitikus reakciókban is alkalmazhatók: Rodamin B fotokatalitikus bontásában és CO oxidációjában mutatnak jó katalitikus tulajdonságot.

Köszönetnyilvánítás: Béres Kende Attila köszönetét fejezi ki a Campus France-nak a Scientist France Excellence Hongrie keretében, az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-3; 22-3; és 23-3 Új Nemzeti Kiválóság Programjának és a Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-26-4-II-ELTE-20260109 kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programjának, valamint a 2023-1.2.4-TÉT-2023-00108 TÉT-programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból forrásából a kutatás támogatásáért.

[1] Kovács G.B. et al. *RSC Adv.*, **2019**, *9*, 28387-28398.
[2] Fogaça L.A, et al. *Inorg. Chem.*, **2021**, *60*, 3749-3760.
[3] Béres K.A., et al. *Inorg. Chem.*, **2022**, *61*, 14403-14418.
[4] Béres K.A., et al. *Inorg. Chem.*, **2025**, *64*, 3427-3444.

ELEMENTAL FINGERPRINTS AND ORIGIN IDENTIFICATION OF FOOD POWDERS USING NAA, PGAA AND XRF

Gméling Katalin[1], Szilágyi Veronika[1], Maróti Boglárka[1], Kovács János Aurél[1], Tóth Zita[1], Murillo-Rincon Jairo Alberto[1]

[1] HUN-REN Centre for Energy Research, Budapest Neutron Centre

Verifying the authenticity of high-value food products increasingly relies on multi-elemental characterization techniques capable of distinguishing geographical origin and identifying potential adulteration. Different samples of paprika and coffee from different origins were collected to analyze differences in the composition using k_0 standardized neutron activation analysis (NAA), prompt-gamma activation analysis (PGAA) and X-ray fluorescence equipment (XRF) at Budapest Neutron Centre, with the aim of evaluating the capabilities and advantages of these three techniques for determining the overall elemental composition of food powders. Commercially available paprika powders purchased from Hungarian retail stores were used, as well as coffee samples from Africa, Asia and South America obtained directly from roasters and retail stores. The k_0 NAA measurements yielded precise mass fractions for more than twenty elements in each sample, including Br, Ca, Ce, Cl, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, Hf, K, La, Mg, Mn, Na, Rb, Sb, Sc, Sm, Sr, and Zn. Several of these elements (e.g. Rb, Sr, Cs, Sc, and the rare earth elements) serve as robust geochemical tracers that reflect soil composition and regional environmental signatures. Compared to other methods NAA and PGAA provide matrix independent, highly reproducible results without the need for chemical dissolution, thereby avoiding digestion related uncertainties and contamination risks, while XRF provides a complementary and accessible analysis for this type of product. Furthermore, these are nondestructive, multielement analysis methods with excellent sensitivity for the most informative provenance markers, making it particularly well suited for constructing reliable elemental fingerprints of food powders.

RÉGÉSZETI ÜVEGLELETEK EREDETMEGHATÁROZÁSA NEUTRONAKTIVÁCIÓS TECHNIKÁKKAL

Kasztovszky Zsolt[1], Szilágyi Veronika[1], Gméling Katalin[1], Harsányi Ildikó[1, 2], Maróti Boglárka[1], Roxana Bugoi[3], Alexandra Ţârlea[4], Laurenţiu Cliante[5]

[1]HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet, Budapest Neutron Centrum, Budapest
[2]HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
[3]Horia Hulubei National Institute for Physics and Nuclear Engineering, Bukarest
[4]University of Bucharest, Faculty of History, Bukarest
[5]Museum of National History and Archaeology, Constanţa

Az üveg az emberiség történetében az egyik első mesterségesen előállított anyag. A legkorábbi régészeti üvegleletek a bronzkorból, a Kr. e. 3. évezredből származnak. A nyersanyag fő összetevőinek mennyisége szerint a régészeti-történelmi üvegek ún. alaptípusokba sorolhatók, amely alaptípusok egy-egy korszakra, ill. területre (készítési központra) jellemzőek. A régészeti üvegleletek fő- és nyomelemtartalmának mérése információt szolgáltathat a történelmi receptek (azaz az adott régióhoz köthető alaptípus, illetve a színező és színtelenítő anyagok) azonosításához, ill. utalhat az üveg újrafelhasználására is.

A 2000-es évek elejétől a Budapesti Neutron Centrumban széleskörűen alkalmaztuk a neutronaktivációs módszereket, elsősorban a PGAA-t, különböző korú régészeti üvegleletek vizsgálatára.

Az előadásban áttekintem az üvegek neutronalapú archeometriai kutatásának a lehetőségeit. Esettanulmányként egy közel 300 darabos, a Fekete-tenger partvidékéről származó római és késő antik leletanyag kutatási eredményeit mutatom be. Méréseink alapján a Histria és Tomis lelőhelyekről származó valamennyi minta a római kori üvegtípusok (szóda-mész-homok alaptípus) kémiai jellemzőit mutatja. Mért összetételük szerint a legtöbb lelet egyiptomi műhelyekből származó elsődleges nyersanyagból készült, míg néhány lelet levantei műhelyekből származik. Az elemzett tárgyak közül néhány esetben kimutatható volt az üveg újrahasznosítása, ami – a többféle eredetű üveg keverése és összeolvasztása miatt – lehetetlenné teszi az eredet meghatározását. A színtelen üvegmintákban mangánt, antimont vagy a kettő különböző arányú jelenlétét azonosítottuk színtelenítő anyagként. A színes üvegleletek színezőanyagként jelentős mennyiségű Mn-t, Co-t, Cu-t vagy Fe-t tartalmaznak.

PROVENANCE STUDY OF ARCHAEOLOGICAL GLASS ARTIFACTS USING NEUTRON ACTIVATION TECHNIQUES

Zsolt Kasztovszky[1], Veronika Szilágyi[1], Katalin Gméling[1], Ildikó Harsányi[1, 2], Boglárka Maróti[1], Roxana Bugoi[3], Alexandra Ţârlea[4], Laurenţiu Cliante[5]

[1]HUN-REN Centre for Energy Research, Institute for Energy Security and Environmental Safety, Budapest Neutron Centre, Budapest
[2]HUN-REN Wigner Research Centre for Physics, Budapest
[3]Horia Hulubei National Institute for Physics and Nuclear Engineering, Bucharest
[4]University of Bucharest, Faculty of History, Bucharest
[5]Museum of National History and Archaeology, Constanţa

Glass is one of the first artificially produced materials in human history. The earliest archaeological glass artifacts date back to the Bronze Age, the 3rd millennium B.C. Based on the proportions of their major raw material components, archaeological and historical glass artifacts can be classified into so-called "basic types," each of which is characteristic of a specific era or region (production center). Measuring the major and trace element content of archaeological glass finds can provide information for identifying historical recipes (i.e. glass types, colouration/decolouration) connected to certain regions by traditions and may also indicate the reuse of glass.

Since the early 2000s, we have extensively applied neutron activation methods – primarily PGAA – at the Budapest Neutron Centre to examine archaeological glass artifacts of various ages.

In this presentation, the possibilities of neutron-based archaeometric research on glass are reviewed. As a case study, the results of research on a collection of nearly 300 Roman and Late Antique artifacts from the Black Sea coast are presented. Based on our measurements, all samples from the Histria and Tomis sites exhibit the chemical characteristics of Roman-period glass types (soda-lime-silica type). Based on their measured composition, most of the artifacts were produced in Egyptian workshops, while a few originated from Levantine workshops. In some cases, evidence of glass recycling was detected in the analysed objects, what makes the provenance identification impossible, as glass of various origins might have been mixed and remelted. The colourless glass samples contained traces of manganese, antimony, or varying ratios of the two. The coloured glass artifacts contain significant amounts of Mn, Co, Cu, or Fe as colouring agents.

FUNKCIONÁLIS MOLEKULÁK VIZSGÁLATA PUMPA-SZONDA SZÓRÁSI KÍSÉRLETEKKEL ULTRAGYORS IDŐSKÁLÁN

Mikeházi Antal János[a,b], **Németh Zoltán**[a], **Vankó György**[a]

[a]*Wigner Fizikai Kutatóközpont, RMI, NAO Femtoszekundumos Spektroszkópia és Röntgenspektroszkópia "Lendület" Kutatócsoport*
[b]*Budapesti Múűszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar, Fizika Tanszék, Budapest, Műegyetem rkp. 3*

A kutatás témája funkcionális molekulák, vas(II)-bisz-terpiridin[1]([Fe(4'-R-2,2':6',2"-terpiridin)$_2$]$^{2+}$ molekulaion) és annak 4' pozícióban szubsztituált származékainak vizsgálata optikai pumpa - röntgenszonda kísérleti módszerrel. A kutatás célja különböző anyagi tulajdonságok, de elsősorban két fontos paraméter meghatározása mind az alaprendszer a vas(II)-bisz-terpiridin minta, mind a vizsgált származékai esetében. A két kiemelten követett paraméter a gerjesztett állapot és az alapállapot energiakülönbsége (ΔE), valamint a gerjesztett kvintett állapot élettartama (τ). Míg az élettartamokat más kísérleti módszerrel (laboratóriumi tranziens optikai spektroszkópia)[2] is meg lehet határozni, az energiakülönbségre csak elméleti úton kapott érték áll rendelkezésünkre.

Az ESRF harmadik generációs szinkrotronban időfelbontott röntgen oldatszórás (*Time Resolved X-ray Solution Scattering*, TR-XSS) méréseket végeztem. A mérési eredményeket a mérés után rögtön redukáltuk (maszk, detektorkorrekciók, azimutális integrálás), ezzel az adatsorokat kezelhetővé téve a részletesebb analízis számára. A második fázisban először egy részletes adatszűrést, skálázást és normalizálási folyamatot, majd pedig a több, egymásra épülő modell illesztését végeztem el.

Végül az illesztett modellel a kívánt paraméterek meghatározhatók. A szubsztituálatlan vas(II)-bisz-terpiridin alaprendszer esetén a τ és ΔE paraméter a korábbi más típusú mérésekből, számításokból származó eredményekkel konzisztens, azonos eredményt hozott. A többi minta esetében az élettartamok egy kiugró esettől eltekintve jól meghatározhatók, viszont a ΔE paraméter meghatározása az alaprendszeren kívül a többi minta esetén nem kielégítő. Emiatt egyrészt további munkával az illesztések esetleg javíthatók, másrészt további kísérletek szükségesek az elégtelen mérési adatok pótlására. A kutatásból publikáció készült.[3]

SZULFADIAZIN ÉS A SZULFAMETAZIN HIDROXILGYÖK-REAKCIÓINAK KINETIKÁJA ÉS TRANZIENS KÖZTITERMÉKEI

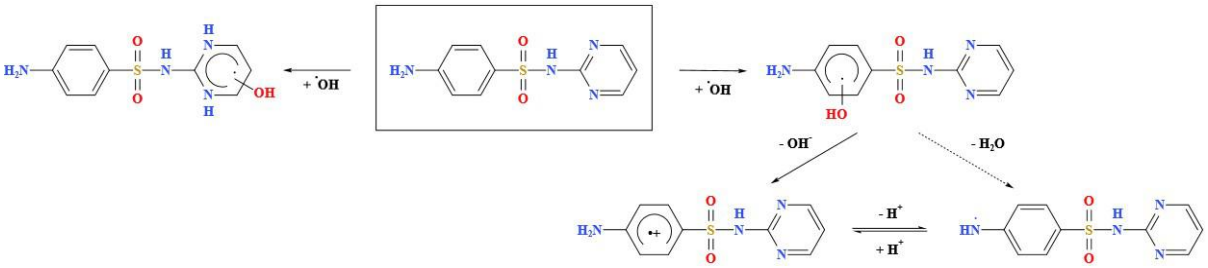
Kovács Krisztina[1], Pfeil Anna[2], Wojnárovits László[1]

[1]*HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Felületkémiai és Katalízis Laboratórium, Sugárkémiai Csoport, 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.*
[2]*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*

A szulfonamidok a humán- és állatgyógyászatban alkalmazott, széles spektrumú szintetikus antibiotikumok: hatásukat a bakteriális folsav-bioszintézis gátlásán keresztül fejtik ki, mivel szerkezetük hasonló a *p*-aminobenzoesavéhoz. Széles körű felhasználásuk és nem teljes metabolizmusuk következtében folyamatosan bekerülnek a vízi környezetbe.

Munkánkban, szerkezetileg nagyon hasonló szulfonamid-antibiotikum, a szulfadiazin és a szulfametazin hidroxilgyökökkel ($^{\bullet}$OH) lejátszódó reakcióit vizsgáltuk. $^{\bullet}$OH számos nagyhatékonyságú oxidációs vízkezelési eljárás, köztük az ionizáló sugárzásos technológiák egyik legfontosabb reaktív részecskéje. Reakcióik kinetikájának és rövid élettartamú köztitermékeinek feltárása ezért alapvető fontosságú lebomlási mechanizmusuk megértéséhez és eltávolításuk hatékonyságának előrejelzéséhez.

A $^{\bullet}$OH mindkét vegyülettel gyorsan reagált, jellegzetes, 390-420 nm közötti abszorpciós maximumú köztiterméket eredményezve. A spektrumok alakjában, az abszorpciós sávok intenzitásában és lecsengésében megfigyelt pH-függő változások a kiindulási vegyületek eltérő protonáltsági állapotával, valamint a gyökkation és annak deprotonált, anilino típusú gyöke közötti sav-bázis egyensúllyal magyarázhatók (1. ábra). A hidroxilgyök és a vizsgált szulfonamidok közötti másodrendű sebességi együtthatók $6{,}76 \times 10^9$ és $1{,}04 \times 10^{10}$ $dm^3\ mol^{-1}\ s^{-1}$ között változtak, növekedtek a pH függvényében. A növekedés a molekulák deprotonálódásával és anionos formáik nagyobb reaktivitásával hozható összefüggésbe.



1. ábra: Szulfadiazin $^{\bullet}$OH-gyökkel lejátszódó feltételezett reakcióútja

Köszönetnyilvánítás
A kutatás a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott, FK-23 pályázati program (azonosítószám: FK146883) finanszírozásában valósult meg.

KINETICS AND TRANSIENT INTERMEDIATES OF THE REACTIONS OF SULFADIAZINE AND SULFAMETHAZINE WITH HYDROXYL RADICALS

Krisztina Kovács[1], Anna Pfeil[2], László Wojnárovits[1]

[1]*HUN-REN Centre for Energy Research, Surface Chemistry and Cataéysis Departments, Radiation Chemistry Group, 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.*
[2]*Budapest University of Technology and Economics. Faculty of Chemical Technology and Biotechnology, 1111 Budapest, Műeyetem rkp. 3.*

Sulfonamides are broad-spectrum synthetic antibiotics used in human and veterinary medicine. They exert their antibacterial effects by inhibiting bacterial folate biosynthesis owing to their structural similarity to *p*-aminobenzoic acid. Their widespread use and incomplete metabolism result in their continuous release into aquatic environments.

In this study, we investigated the reactions of two structurally closely related sulfonamide antibiotics, sulfadiazine and sulfamethazine, with hydroxyl radicals ($^{\bullet}$OH). The $^{\bullet}$OH radical is one of the key reactive species involved in several advanced oxidation processes for water treatment, including technologies based on ionizing radiation. Elucidating the kinetics of these reactions and identifying the short-lived intermediates are therefore essential for understanding the degradation mechanisms of these antibiotics and predicting their removal efficiency.

The $^{\bullet}$OH radical reacted rapidly with both compounds, producing characteristic intermediates with absorption maxima between 390 and 420 nm. The pH-dependent changes observed in the spectral shapes, absorption-band intensities, and decay kinetics can be attributed to the different protonation states of the parent compounds and to the acid–base equilibrium between the radical cation and its deprotonated anilino-type radical (Fig. 1). The second-order rate constants for the reactions of $^{\bullet}$OH with the investigated sulfonamides ranged from 6.76×10^{9} to 1.04×10^{10} L mol^{-1} s^{-1} and increased with increasing pH. This increase can be attributed to molecular deprotonation and the greater reactivity of the corresponding anionic forms.

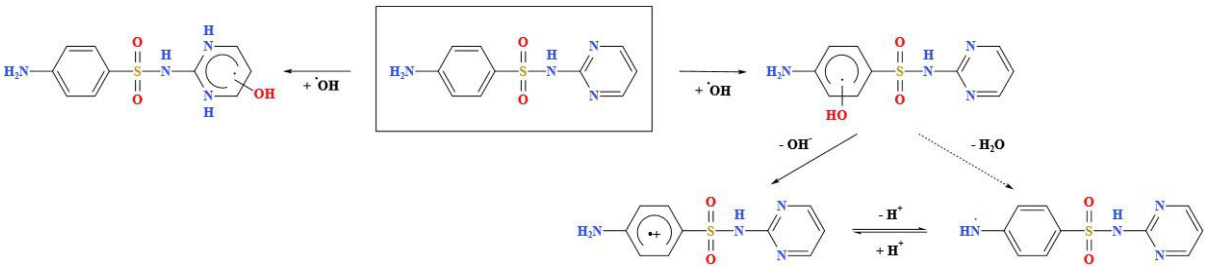


Figure 2. Proposed reaction pathway of sulfadiazine with $^{\bullet}$OH radicals

Acknowledgements
This research was supported by the János Bolyai Research Scholarship of the Hungarian Academy of Sciences and by by the Ministry of Culture and Innovation of Hungary from the National Research, Development and Innovation Fund financed under the OTKA FK 23 funding scheme (Project No. 146883).

ÓZONOZÁSI RENDSZER FEJLESZTÉSE ÉS ALKALMAZÁSA SZERVES MIKROSZENNYEZŐK KEZELÉSÉRE: ÖSSZEHASONLÍTÁS ELEKTRONSUGARAS BESUGÁRZÁSSAL

Homlok Renáta[1], Tegze Anna[1], Pavel Monica[2], Takács Erzsébet[1], Wojnárovits László[1], Kovács Krisztina[1]

[1]HUN-REN EK, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet, Felületkémiai és Katalízis Laboratórium, Sugárkémiai csoport, Konkoly-Thege M. út 29-33, H-1121 Budapest, Magyarország
[2]"Ilie Murgulescu" Institute of Physical Chemistry of the Romanian Academy, 202 Spl. Independentei, 060021 Bukarest, Románia

A gyógyszermaradványok és egyéb szerves mikroszennyezők vízi környezetben való jelenléte egyre nagyobb környezeti problémát jelent. A fejlett oxidációs eljárások (AOP), többek között az ózonozás és az ionizáló sugárzás, ígéretes lehetőséget kínálnak a perzisztens szerves szennyezők lebontására. A különböző AOP-eljárások kombinációja további lehetőséget teremthet a kezelési hatékonyság növelésére és az egyes technológiák korlátainak csökkentésére.

Jelenlegi kutatásunk keretében laboratóriumunkban egy ózon-előállító és -mérő rendszert fejlesztettünk ki és állítottunk össze. Ezzel az ózonozás kiegészítő kezelési eljárásként való alkalmazhatóságát vizsgáljuk, és megteremtjük az ózonozás és a nagyenergiájú ionizáló sugárzás jövőbeni kombinálásához szükséges kísérleti feltételeket. A kialakított rendszer szabályozott ózonelőállítást és az ózon vizes oldatokban történő, meghatározott körülmények közötti alkalmazását teszi lehetővé.

Az első kísérleteket szalicilsav és fenol modellvegyületekkel végeztük. Mindkét vegyület lebomlását ózonozás és elektrongyorsítóval végzett besugárzás során is vizsgáltuk. Az önálló kezelések eredményei kiindulópontot adnak a két eljárás hatásának összehasonlításához és a kombinált kezelés megtervezéséhez.

E jelenlegi munka az ózonozás és az ionizáló sugárzás kombinációján alapuló integrált kezelési rendszer kialakításának első lépését jelenti. A következő szakaszban a két eljárás hatását külön-külön és kombinálva is vizsgáljuk, meghatározzuk az optimális működési paramétereket és értékeljük az esetleges szinergikus hatásokat. Az eredmények hozzájárulhatnak a szerves mikroszennyezők hatékonyabb eltávolítására alkalmas fejlett oxidációs technológiák fejlesztéséhez.

Köszönetnyilvánítás:
A kutatást az NKM2025-90 számú magyar–román kétoldalú akadémiai együttműködési projekt támogatta.

DEVELOPMENT OF AN OZONATION SYSTEM AND ITS APPLICATION FOR ORGANIC MICROPOLLUTANT TREATMENT: COMPARISON WITH ELECTRON BEAM IRRADIATION

Renáta Homlok[1], Anna Tegze[1], Monica Pavel[2], Erzsébet Takács[1], László Wojnárovits[1], Krisztina Kovács[1]

[1]Radiation Chemistry Group, Surface Chemistry and Catalysis Department, Institute for Energy Security and Environmental Safety, HUN-REN Centre for Energy Research, Konkoly-Thege Miklós út 29–33, 1121 Budapest, Hungary
[2]"Ilie Murgulescu" Institute of Physical Chemistry of the Romanian Academy, 202 Spl. Independentei, 060021 Bucharest, Romania

The presence of pharmaceutical residues and other organic micropollutants in water has become an increasing environmental concern. Advanced oxidation processes (AOPs), including ozonation and ionizing radiation, offer promising approaches for the degradation of persistent organic contaminants. The combination of different AOPs may provide additional possibilities for improving treatment efficiency and help address the limitations of individual processes.

In our current research, an ozone generation and measurement system was developed and recently assembled in our laboratory. The system enables us to investigate ozonation as a complementary treatment process and establishes the experimental conditions needed for its future combination with high-energy ionizing radiation. It allows controlled ozone generation and application to aqueous solutions under defined conditions.

The initial experiments were performed using salicylic acid and phenol as model organic compounds. We investigated the degradation of both compounds by ozonation and by electron beam irradiation. The results of these separate treatments provide a basis for comparing the two processes and designing a combined treatment.

The current work represents the first step towards the development of an integrated treatment system combining ozonation and ionizing radiation. In the next stage of the research, the two processes will be further investigated separately and in combination, determine optimal operating conditions and assess possible synergistic effects. The findings may contribute to the development of advanced oxidation technologies for more effective removal of organic miucropollutants.

Acknowledgements:
This work was supported by the Hungarian–Romanian bilateral inter-academic cooperation project NKM2025-90.

HULLADÉK GUMIABRONCS-ŐRLET ALAPÚ ADSZORBENSEK FEJLESZTÉSE SUGÁRZÁSSAL INICIÁLT OJTÁSI TECHNOLÓGIÁVAL SZENNYVÍZTISZTÍTÁSI ALKALMAZÁSOKHOZ

Kiss Lóránt[1], Homlok Renáta[2], Tóth Petra[1], Tegze Anna[2], Mészáros László[1,3]

[1]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Műegyetem rkp. 3., H-1111 Budapest, Magyarország
[2]HUN-REN EK, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet, Felületkémiai és Katalízis Laboratórium, Sugárkémiai csoport, Konkoly-Thege M. út 29-33, H-1121 Budapest, Magyarország
[3]HUN-REN-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Műegyetem rkp. 3., H-1111 Budapest, Magyarország

A természetes vizek nehézfém-szennyezése, például a réz(II)-ionok (Cu^{2+}) jelenléte, komoly környezeti és egészségügyi kockázatot jelent, mivel ezek a szennyezők toxikusak, biológiailag nem bomlanak le, és a táplálékláncban felhalmozódhatnak. A hagyományos eltávolítási eljárások, mint a kémiai kicsapás, az ioncsere vagy a membránszeparáció, gyakran költségesek és jelentős mennyiségű másodlagos hulladékot termelnek. Emiatt egyre nagyobb figyelem irányul a hulladékokból előállított, olcsó adszorbensekre. Az elhasznált gumiabroncsok őrlésével nyert gumiőrlet (GTR) nagy mennyiségben rendelkezésre álló másodnyersanyag, amely adszorbensként is hasznosítható lehet. Kezeletlen formában azonban apoláris felülete és kevés funkciós csoportja miatt csak korlátozott mértékben képes fémionok megkötésére.

Munkánk célja a GTR felületének sugárzással iniciált ojtással történő módosítása volt a Cu^{2+}-ionok megkötésének javítása érdekében. A besugárzást TESLA LINAC LPR-4 típusú, 4 MeV-os elektrongyorsítóval végeztük levegőn és vizes közegben is, lehetővé téve a besugárzási közeg ojtási hatékonyságra gyakorolt hatásának összehasonlítását. A besugárzott gumiőrletre ezt követően 50 °C-on metil-metakrilátot (MMA, hígítás nélkül) vagy maleinsav-anhidridet (MAH, 10 m/m%-os acetonos oldatban) ojtottunk. Az előállított GTR-g-MMA és GTR-g-MAH anyagok FTIR-vizsgálata oxigéntartalmú funkciós csoportok megjelenését mutatta, míg a SEM-vizsgálatok a felületi morfológia megváltozását igazolták.

Az adszorbensek Cu^{2+}-megkötő képességét szakaszos (batch) kísérletekben vizsgáltuk, elsősorban a kiindulási koncentráció és az érintkezési idő hatását követve. Az oldat Cu^{2+} koncentrációjának időbeli változását összehasonlítva vizsgáltuk a kezeletlen, a hagyományosan módosított, a besugárzott, valamint a sugárzással iniciált ojtással előállított GTR-mintákat. Eredményeink azt mutatták, hogy a sugárzással iniciált ojtás fokozta a Cu^{2+}-ionok eltávolítását a vizes oldatból, és az ojtási körülmények, valamint az alkalmazott monomer típusa is befolyásolta az adszorpciós teljesítményt. A módosított gumiőrlet ígéretes, hulladék alapú adszorbensnek bizonyult a Cu^{2+} vizes közegből történő eltávolítására, egyúttal lehetőséget kínálva a hulladék gumiabroncsok értéknövelő hasznosítására.

Köszönetnyilvánítás
A kutatást a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott EKÖP-25-4-I-BME-277 kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programja támogatta. A szerzők ezúton mondanak köszönetet továbbá a Nemzetközi Atomenergia-ügynökségnek (NAÜ) az F23036 számú Koordinált Kutatási Projekt (CRP) keretében nyújtott anyagi támogatásért.

DEVELOPMENT OF WASTE TIRE RUBBER-BASED ADSORBENTS USING RADIATION-INDUCED GRAFTING FOR WASTEWATER TREATMENT APPLICATIONS

Lorant Kiss[1], Renata Homlok[2], Petra Toth[1], Anna Tegze[2], Laszlo Meszaros[1,3]

[1]*Department of Polymer Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Budapest University of Technology and Economics, Muegyetem rkp. 3, Budapest H-1111, Hungary*
[2]*Radiation Chemistry Group, Surface Chemistry and Catalysis Department, Institute for Energy Security and Environmental Safety, HUN-REN Centre for Energy Research, Konkoly-Thege M. Street 29-33, Budapest H-1121, Hungary*
[3]*HUN-REN-BME Research Group for Composite Science and Technology, Budapest University of Technology and Economics, Muegyetem rkp. 3, Budapest H-1111, Hungary*

Heavy metal contamination of natural waters, such as contamination by copper(II) ions (Cu^{2+}), poses significant environmental and health risks, as these pollutants are toxic, non-biodegradable, and may accumulate in the food chain. Conventional removal methods, such as chemical precipitation, ion exchange, and membrane separation, can be costly and may generate considerable amounts of secondary waste. Consequently, increasing attention is being paid to low-cost adsorbents derived from waste materials. Ground tire rubber (GTR), obtained by grinding end-of-life tires, is a widely available secondary raw material with potential for use as an adsorbent. However, in its untreated form, GTR has limited metal-ion binding capacity due to its predominantly non-polar surface and low content of functional groups.

The aim of this work was to modify the surface of GTR by radiation-induced grafting to improve its ability to bind Cu^{2+} ions. Irradiation was performed using a TESLA LINAC LPR-4 electron accelerator with an energy of 4 MeV, both in air and in an aqueous medium, allowing the effect of the irradiation medium on grafting efficiency to be evaluated. Either methyl methacrylate (MMA, undiluted) or maleic anhydride (MAH, 10 wt% solution in acetone) was subsequently grafted onto the irradiated GTR at 50 °C. FTIR analysis of the resulting GTR-g-MMA and GTR-g-MAH materials indicated the formation of oxygen-containing functional groups, while SEM analysis revealed clear changes in surface morphology.

The Cu^{2+} removal performance of the adsorbents was investigated in batch experiments, focusing on the effects of the initial Cu^{2+} concentration and contact time. The time-dependent change in Cu^{2+} concentration was compared for untreated GTR, GTR treated with H_2O_2 or NaOH, irradiated GTR, and GTR modified by radiation-induced grafting. The results showed that radiation-induced grafting enhanced Cu^{2+} removal from aqueous solution compared with untreated and conventionally modified GTR, while the type of grafted monomer and the grafting conditions also influenced the removal performance. The modified GTR materials show promise as low-cost, waste-derived adsorbents for the removal of Cu^{2+} ions from aqueous solutions, while offering an opportunity for the value-added utilization of waste tires.

Acknowledgements
This work was supported by the EKÖP-25-4-I-BME-277 University Research Scholarship Programme of the Ministry for Culture and Innovation, financed from the National Research, Development and Innovation Fund. The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the International Atomic Energy Agency (IAEA) within the framework of the Coordinated Research Project (CRP F23036).

RADIOAKTÍV ANYAGOK HELYI NYILVÁNTARTÁSÁVAL KAPCSOLATOS TAPASZTALATOK

Gonter Katalin, Lőrincz Hajnalka

Országos Atomenergia Hivatal

Az atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI törvény rendelkezik a radioaktív anyagok központi és helyi nyilvántartásának vezetéséről, melynek végrehajtásáról az Országos Atomenergia Hivatal gondoskodik. A jelenleg alkalmazott elektronikus nyilvántartási rendszer 2004-ben jött létre.

Szót ejtünk az ide vonatkozó jogszabályokról, jelentési kötelezettségekről, a nyilvántartás vezetésében történt változásokról.

Összefoglaljuk a központi nyilvántartás adatfeldolgozása során azonosított hatósági felügyeleti szemszögből fontos tapasztalatokat.

A digitális államról és a digitális szolgáltatások nyújtásának egyes szabályairól szóló 2023. évi CIII. törvény alapján az Országos Atomenergia Hivatal hatósági eljárásaiban elektronikus ügyintézésre kötelezett.

Elektronikus ügyintézésre kötelezett ügyfeleink kizárólag kormányzati honlap elektronikus ügyintézési felületén keresztül nyújthatják be beadványaikat, az egyes ügytípusoknak megfelelő űrlap kitöltésével. Az elektronikus ügyintézés során az OAH a hatósági eljárásaiban keletkezett dokumentumokat ezen keresztül küldi meg az Ügyfelek részére.

Továbbá ismertetjük az eddigi tapasztalatok alapján felmerült problémákra és kérdésekre a válaszokat.

DESCRIPTION OF EXPERIENCES RELATED TO LOCAL REGISTRY OF RADIOACTIVE MATERIALS

Katalin Gonter, Hajnalka Lőrincz

Hungarian Atomic Energy Authority

The Act CXVI of 1996 on atomic energy provides regulations for the management of the central and local registy of radioactive materials, which is managed by the Hungarian Atomic Energy Authority. Currently employed electronic registry system was created in 2004.

We discuss the relevant legislation, reporting obligations, and changes made to the registration process.

In addition, we summarize the experiences identified during the data processing of the central registry that are significant from a regulatory oversight perspective.

The Act CIII of 2023 on the Digital State and Certain Rules for the Provision of Digital Services, the Hungarian Atomic Energy Authority is obliged to conduct its administrative procedures electronically.

Our clients subject to electronic administration requirements must submit their filings exclusively through the electronic administration interface of the government portal by completing the forms specific to each case type. During this electronic process, the HAEA transmits documents generated during regulatory proceedings to clients via the same platform.

Furthermore, we present responses to the issues and questions that have arisen based on experience to date.

RÉSZTVEVŐK LISTÁJA

LIST OF PARTICIPANTS

Abir Dhib
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
lengyel.attila@wigner.hun-ren.hu

Bacskai Zoltán Péter
Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest Fényes Adolf u 4.
bacskai.zoltan@haea.hu

Bagosi Norbert Sándor
Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest Fényes Adolf u 4.
bagosinorbert@haea.hu

Baricsán Fruzsina
Debreceni Egyetem OKI
Nukleáris Medicina Tanszék
4032 Debrecen, Nagyerdei krt. 98.
csapoilyesfruzsi@mailbox.unideb.hu

Béres Kende Attila
HUN-REN TTK
1117 Budapest, Magyar Tudósok Körútja 2
beres.kende.attila@ttk.hu

Bokori Edit
RADANAL Kft.
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
edit.bokori@gmail.com

Bátor Gergő
RadiÖko Kft.
8200 Veszprém, Wartha Vince u. 1/2.
batorgergo@radioko.hu

Buda Csaba
Canberra-Packard Kft.
1221 Budapest, Honfoglalás út 72.
c.buda@cpce.net

Christer Halldin
Semmelweis Egyetem Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet
1085 Budapest Üllői út 26.
christer.halldin@ki.se

Csizmadia Lilla Kinga
ELTE TTK
1053 Budapest Egyetem tér 1-3
csiz.kinga2004@gmail.com

Csurgai József
SOMOS Alapítvány
1033 Budapest, Vajda János utca 6.
jcsurgai@gmail.com

Flachner Orsolya
Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest Fényes Adolf u 4.
flachner@haea.hu

Fülöp Tamás
Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest Fényes Adolf u 4.
fulopt@haea.hu

Fűrész Kristóf
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar
2600 Vác, Hanusz István utca 28.
furesz.kristof@gmail.com

Gonter Katalin
Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest Fényes Adolf u 4.
gonter@haea.hu

Hegyes Hanga Panna
Debreceni Egyetem OKI
Nukleáris Medicina Tanszék
4032 Debrecen, Nagyerdei krt. 98.
hegyes.hanga@gmail.com

Hella Tünde
Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest Fényes Adolf u 4.
hella.tunde@haea.hu

Homlok Renáta
HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
homlok.renata@ek.hun-ren.hu

Homonnay Zoltán
Eötvös Loránd Tudományegyetem
1053 Budapest Egyetem tér 1-3.
homonnay.zoltan@ttk.elte.hu

Jószai István
Debreceni Egyetem OKI
Nukleáris Medicina Tanszék
4032 Debrecen, Nagyerdei krt. 98.
joszai.istvan@med.unideb.hu

Kasztovszky Zsolt
Energiatudományi Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
kasztovszky.zsolt@ek.hun-ren.hu

Kertész István
Debreceni Egyetem OKI
Nukleáris Medicina Tanszék
4032 Debrecen, Nagyerdei krt. 98.
kertesz.istvan@med.unideb.hu

Kirchhofer Beáta
Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft
2040 Budaörs Puskás Tivadar u. 11
betti.kiss07@gmail.com

Koller László Olivér
LynXes Innovations Ltd.
2600 Vác, Hanusz István utca 28.
klaszlooliver@gmail.com

Kónya József
Debreceni Egyetem, Fizikai Kémiai Tanszék
4032 Debrecen, Egyetem tér 1.
konya.jozsef@science.unideb.hu

Kovács Krisztina
ELTE Kémiai Intézet
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/a
krisztina.kovacs@ttk.elte.hu

Kovács Krisztina
HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
kovacs.krisztina@ek.hun-ren.hu

Kudor Mátyás
ELTE TTK Kémiai Intézet, Magkémiai Laboratórium
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/a
kudor.matyas@gmail.com

Kuzmann Ernő
ELTE, Kémiai Intézet, Magkémia
1117 Budapest, Pázmány P. s 1/A
erno.kuzmann@ttk.elte.hu

Lázár Károly
HUN-REN EK
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
lazar.karoly@ek-cer.hu

Lengyel Attila
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
lengyel.attila@wigner.hun-ren.hu

Lőrincz Hajnalka
Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest Fényes Adolf u 4.
lorinczh@haea.hu

Madarász István
Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest Fényes Adolf u 4.
madarasz.istvan@haea.hu

Machula Gábor Tibor
Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest Fényes Adolf u 4.
machulag@haea.hu

Mikeházi Antal János
Wigner FK
2600 Vác, Hanusz István utca 28.
mikehazi.anton@gmail.com

Miovecz Ádám
Canberra-Packard Kft.
1118 Budapest, Pannonhalmi út 35/A
a.miovecz@cpce.net

Taranda Miroslav
BIONT, a.s.
Karloveská 63, 842 45, Bratislava - Pozsony, Szlovákia
taranda@biont.sk

Molnár Mihály
HUN-REN Atommagkutató Intézet
4026 Debrecen, Bem tér 18/c
mmol@atomki.hu

Molnár Péter
Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft
2040 Budaörs Puskás Tivadar u. 11
turzap@gmail.com

Molnár Zsuzsa
RADANAL Kft.
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
molnarzs22@gmail.com

Murillo-Rincon Jairo Alberto
HUN-REN EK
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
jairo.murillo@ek.hun-ren.hu

Nacsa Milán
Pozitron-Diagnosztika Kft.
1117 Budapest, Hunyadi János út 9-11.
milan.nacsa@pet.hu

Nagy Noémi
Debreceni Egyetem, Fizikai Kémiai Tanszék
4032 Debrecen, Egyetem tér 1.
nagy.noemi@science.unideb.hu

Németh Zoltán
LynXes Innovation Kft.
2600 Vác Hanusz István 28.
zoltan.nemeth@lynxes.eu

Nényei Árpád
MVM Paksi Atomerőmű Zrt.
7030 Paks hrsz 8803/17
nenyeia@npp.hu

Novák Dávid
Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft
2040 Budaörs Puskás Tivadar u. 11
novak.dawid@gmail.com

Osváth Szabolcs
NNGYK
1097 Budapest, Albert Flórián út 2-6.
osvath.szabolcs@nngyk.gov.hu

Papp István
Isotoptech Zrt.
4026 Debrecen, Bem tér 18/C.
pappistvan@isotoptech.hu

Pappné Kovács Eszter Mária
Debreceni Egyetem
4032 Debrecen, Egyetem tér 1.
kovacs.eszter.maria@science.unideb.hu

Pávics László
Szegedi Tudományegyetem
6720 Szeged, Dugonics tér 13.
pavics.laszlo@szte.hu

Petrányi János
GAMMA Zrt.
1097 Budapest Illatos út 11/b
petranyi@gammatech.hu

Rátkai Ákos Tamás
HUN-REN EK
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
ratkai.akos@ek.hun-ren.hu

Schiller Róbert
HUN-REN EK
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
schiller.robert@ek.hun-ren.hu

Stefánka Zsolt
Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest, Fényes Adolf utca 4.
stefanka@hahea.hu

Stichleutner Sándor
Izotóp Intézet Kft.
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
stichleutner@izotop.hu

Szalay Brigitta
Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest Fényes Adolf u 4.
szalay@haea.hu

Szántó Zoltán
Országos Atomenergia Hivatal
1036 Budapest, Fényes Adolf utca 4.
szantoz@haea.hu

Szikora Gergő
Országos Atomenergia Hivatal
1036
Budapest Fényes Adolf u 4.
szikora.gergo@haea.hu

Szemenyei Erzsébet
Izotóp Intézet Kft.
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
szemenyei@izotop.hu

Szottfried Csaba
Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft
2040 Budaörs Puskás Tivadar u. 11
csabi.rhkkht@freemail.hu

Taba Gabriella
Semmelweis Egyetem
1085 Budapest Üllői ut 26.
tabagabi@gmail.com

Takács Erzsébet
HUN-REN EK
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
takacs.erzsebet@ek.hun-ren.hu

Vajda Nóra
RADANAL Kft.
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
vajdanor@gmail.com

Vizbel Ákos
Semmelweis Egyetem
1085 Budapest Üllői út 26.
vizbel.akos@gmail.com

Wojnárovits László
HUN-REN EK
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
wojnarovits.laszlo@ek.hun-ren.hu

Zagyvai Péter
HUN-REN EK
1121 Budapest, Konkoly-Thege u. 29-33
zagyvai.peter@ek.hun-ren.hu

Zsille Ottó
SOMOS Alapítvány
1033 Budapest, Vajda János utca 6
penge59@gmail.com