

EXTRAKCIÓS KROMATOGRÁFIÁS VIZSGÁLATOK Cs-, U- és Th-FÉMIONOK NYOMANALITIKAI CÉLÚ ELVÁLASZTÁSÁRA

Bodnár László¹, Metzinger Anikó¹, Kovács-Széles Éva², Galbács Gábor²

¹SZTE TTIK Szerzetlen és Analitikai Kémiai Tanszék

²MTA EK Sugárbiztonsági Laboratórium

Bevezetés

Munkánk során négy, Triskem gyártmányú, Cs-, U- és Th-ionok elválasztására alkalmas extrakciós kromatográfiás töltet (*Resin Product Sheets*, 2015) viselkedését vizsgáltuk. A kutatócsoport, amelynek kutatásaiba bekapcsolódtam, ezen töltetek felhasználásával távlatilag olyan analitikai módszereket kíván kifejleszteni, amelyek lézerindukált plazmaspektroszkópiás detektálással kombinálva nukleáris biztosítéki célú terepi mérések elvégzésére is alkalmasak lehetnek.

Jelen munka keretén belül induktív csatolású plazma tömegspektrometriás mérések segítségével végeztünk kísérleteket annak meghatározása céljából, hogy különböző oldatmintákban található, nyomnyi koncentrációjú tórium-, urán- és céziumionok extrakciója milyen hatékonysággal hajtható végre. Ennek jellemzésére a visszanyerést használtuk (1). Kétféle mintamatrixot (csurgalékvizet és humán vizeletet) és többféle eluálószerrel is megvizsgáltunk.

A Sugárbiztonsági Laboratórium fő tevékenységei a nukleáris biztosítéki rendszerhez és a sugárbiztonsághoz kapcsolódnak, mint például: az izotóp-nyilvántartási rendszer keretében a zárt sugárforrások ellenőrzése, vizsgálatok elvégzése egy esetleges atomkatasztrófa vagy nukleáris terrorcselekmény helyszínén. Emellett szakértői háttér és különböző szolgáltatások nyújtásával segíti az Országos Atomenergia Hivatal hatósági feladatainak ellátását.

A hatósági mérések mellett – a Nemzetközi Atomenergia Ügynökséggel kötött nukleáris biztosítéki egyezmény értelmében – nukleáris anyagok ellenőrzéséhez szükséges mérés-technikai módszerek fejlesztését is végzik. Ezen módszerek két nagy csoportba sorolhatók: az egyik a roncsolásmentes (gammaspectrometriai, neutronmérési), a másik a roncsolásos (tömegspektrometriai) méréseket foglalja magában.

Extrakciós kromatográfias vizsgálatok...

A fejlesztés egyik iránya egy gyors, helyszínen alkalmazható módszer kidolgozása, mely tömeges sérülést okozó sugárbalesetek vagy terrorcselekmények esetén lehetőséget ad az izotópterhelés becslésére. E célra a lézer indukált plazma spektrometriát (LIPS/LIBS) találták a legmegfelelőbbnek, ennek mérési körülményeit igyekeznek optimalizálni. A LIBS-spektrometria elvben képes izotópok megkülönböztetésére is, azonban ez nem volt jelen tanulmány célja.

A fő feladat a helyszínen vett csurgalékvízben és vizeletmintákban található nyomnyi mennyiségű aktinoidák gyors és hatékony vizsgálata, mely eredményéből megbecsülhető lehet a környezet és az érintett személyek sugárszennyezettsége. A csurgalékvíz összetevői lehetnek a bórsavas primerköri szervezett ürítések és szivárgások, a bórsavas és nem bórsavas (pl. primerköri helyiségek takarítása során keletkező) szervezetlen szivárgások és légtelenítések, a dekontaminálás hulladékai, illetve a primerköri víztisztítók regenerátumai, mosó és lazító vizei. A primer kör fő részei a reaktor, a gőzfejlesztő, a főkeringető szivattyú, a térfogat-kompenzátor és a primer csővezeték, emellett ide soroljuk az üzemzavari hűtőrendszereket is (Rónaky, 2005:41). Bár üzemszerű működés közben a primer körben áramló víz nem kerül fizikai kontaktusba a hasadóanyaggal, mégis itt a legnagyobb a kontamináció esélye. A nyomottvizes reaktorok (pl. Paks) primer körü vízéhez jelentős mennyiségű bórsavat adnak, mivel a bór jó termikusneutron-elnyelő; a láncreakció ezáltal is szabályozható. Mivel sok forrásból származhat, a csurgalékvíz rendkívül összetett mátrix, a benne található fémionok jelentős hatást gyakorolhatnak az ioncsere-egyensúlyokra (1. táblázat).

1. táblázat: A modell csurgalékvízmátrix összetétele

Komponens	Koncentráció (mg/L)
Bórsav	18000
Ca ²⁺	300
K ⁺	80
Mg ²⁺	5
Na ⁺	45
Li ⁺	0,2
Mn ²⁺	0,4

A vizeletmátrix vizsgálatára azért van szükség, mert egy valós baleseti szituációban a benne található nyomnyi mennyiségű aktinoida mennyiségéből következtetni lehet a sugárzásnak való kitettség mértékére. A vizelet, biológiai mátrix révén, igen összetett szerves és szervetlen komponenseket, köztük fémionokat és potenciális komplexképzőket egyaránt tartalmaz (2. táblázat).

2. táblázat: Egy felnőtt 24 órás vizeletének jellemző összetétele
(Considine, 2005:1657)

Komponens	Koncentráció (g/1250 mL)
Karbamid	6,0-180,0
Kreatinin	0,3-0,8
Ammónia	0,4-1,0
Húgysav	0,08-0,2
Nátrium	2,0-4,0
Kálium	1,5-2,0
Kalcium	0,1-0,3
Magnézium	0,1-0,2
Klorid	4,0-8,0
Bikarbonát	—
Foszfát	0,7-1,6
Szervetlen szulfát	0,6-1,8
Szerves szulfát	0,06-0,2

Munkánk során négy, a Triskem cég által forgalmazott ioncserélő gyanta urán-, tórium- és céziummegkötő képességét vizsgáltuk a két mátrixban. A töltetek várhatóan eltérő affinitást és kapacitást mutatnak a vizsgálandó ionokra nézve, így a közeg megfelelő megválasztásával lehetővé válik azok szelektív dúsítása, megnövelve a meghatározás érzékenységét. A töltetek különböző kiserelésben és fizikai paraméterekkel kerülnek forgalomba, a szemcseméret 20 és 600 µm között változik; rendelhetők ömlesztve, oszlopba vagy kazettába töltve. A TRU, TEVA és UTEVA töltetek megegyeznek abban, hogy a Th és U nitráto-komplexei (Auwer et al., 1999:101) nagy affinitást mutatnak irányukba, tehát az adszorpció mértéke várhatóan

függ majd az oldatok HNO_3 -tartalmától. A vizsgált gyanták viselkedése vizes közegben jól dokumentált, azonban vizelet- és csurgalékmátrixban még nem használták őket.

Mivel a Sugárbiztonsági Laboratóriumban rutinszerűen alkalmazzák ezeket a tölteteket mind a módszerfejlesztés, mind pedig a töltetek gyártója által megrendelt körmérések során, így munkánk során az ő tapasztalataikra építve igyekeztünk a mérési körülmények olyan kompromisszumos megválasztására törekedni, hogy a laboratóriumi körülmények között elérhető nagy precizitás, reprodukálhatóság és magas visszanyerés találkozzon a terepi munka által támasztott követelményekkel, mint például a vizsgálatához szükséges eszközök minimális száma, kompakt mérete, valamint a minimális eluens- és mintamennyiség.

A távlati cél egy olyan, helyszínen alkalmazható LIBS mérési eljárás kifejlesztése, mellyel gyorsan és megbízhatóan lehet meghatározni nyomnyi radioaktív szennyezők mennyiségét. A módszer kimutatási határa ppm körüli, azonban ez a meghatározandó komponensek dúsításával csökkenthető. A dúsítás egyik módja az extrakciós kromatográfia, melynek során ioncserélő gyantán adszorbeáltatjuk a meghatározandó fémionokat, majd lehetőleg a mintatérfogatnál kisebb, ismert térfogatú eluenssel deszorbeáltatjuk. Az így kapott oldat egy szilárd felületre szárítva LIBS-módszerrel kvantitatívan mérhetővé válik. A LIBS alapvetően szelektív módszer, azonban a vizsgált mátrixokban előforduló nagyszámú fém jelentős spektrális zavarást okozhat, főként egy terepi mérésekre optimált, kisebb felbontású LIBS-rendszerrel való méréskor. Az extrakciós kromatográfias töltetek alkalmazásával egyrészt javítható a szelektivitás, másrészt dúsítás érhető el, ami a kimutatási határok csökkentését teszi lehetővé.

Munkánk során a már bevált receptekből kiindulva vizsgáltuk, hogy a két rendkívül összetett mátrix hogyan befolyásolja a töltetek fémionmegkötő képességét, és mely paraméterek változtatásával lehet a rendszert terepi alkalmazásra alkalmassá tenni.

Kísérleti eszközök és körülmények

A csurgalékvízmátrixhoz először egy százszoros töménységű oldatot készítettünk, melyhez szilárdan bemértünk KNO_3 -ot ($c = 80$ ppm), $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -ot, NaNO_2 -et ($c = 45$ ppm), $\text{MnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -ot ($c = 0,4$ ppm) és LiCl -ot, majd Milli-Q vízzel 50 ml-re jelre töltöttük. Az egyes alapoldatokhoz (továbbiakban *load*oldatok) ebből mértünk be 0,500 ml-t, valamint 0,06 g kristályos CaCl_2 -ot, 0,9 g szilárd bórsavat és megfelelő mennyiségű

tömény salétromsavat (TRU és TEVA töltetek esetében 10,4 ml-t, UTEVA esetén 27,8 ml-t, CS töltetnél 0,3 ml-t). A 18,24 mg/l koncentrációjú urán törzsoldatból a TRU töltetre kerülő *load*ba 0,410 ml-t, a TEVA töltetre kerülő *load*ba 4,11 ml-t, az UTEVA-ra kerülőbe pedig 6,17 ml-t pipettáztunk, majd 50 ml-re jelre töltöttük. A 27,28 mg/l koncentrációjú tóriumtörzsoldatból a TRU töltetre kerülő *load*ba 0,275 ml-t, a TEVA töltetre kerülő *load*ba 2,75 ml-t, az UTEVA-ra kerülőbe 4,12 ml-t pipettáztunk, majd ezeket is 50 ml-re hígítottuk. A cézium tartalmú *load*ba 0,0476 g CsCl-ot mértünk be szilárdan. Az oldódást ultrahangos szonikálással segítettük.

A vizeletmátrixhoz nem készült külön törzsoldat, mindegyik *load*ot egyenként készítettük el. Megfelelő mennyiségű vizeletet (2. táblázat) (TRU töltet és urán esetén 7,918 ml-t, TRU töltet és tórium esetén 7,945 ml-t, TEVA töltet és urán esetén 7,178 ml-t, TEVA töltet és tórium esetén 7,45 ml-t, UTEVA töltet és urán esetén 3,206 ml-t, UTEVA töltet és tórium esetén 3,616 ml-t, a CS töltet esetén 9,93 ml-t), tömény salétromsavat (TRU, TEVA esetén 2 ml-t, UTEVA-nál 5,56 ml-t, CS töltethez 0,07 ml-t) és a csurgalékvíz-mátrixnál említett fémion tartalmú törzsoldatból a szükséges térfogatot (U: 0,082 ml-t TRU-hoz, 0,822 ml-t TEVA-hoz, 1,234 ml-t UTEVA-hoz; Th: 0,055 ml-t TRU-hoz, 0,55 ml-t TEVA-hoz, 0,824 ml-t UTEVA-hoz), illetve kristályos CsCl-ból a szükséges tömeget (0,00952 g) mértük be, majd homogenizáltuk. A teljes *load*térfogat rendre 10,00 ml volt.

A töltetekből 5 ml-es, műanyag, kupakkal zárható kémcsövekbe 0,05 g-os részleteket mértünk be, majd a kémcsöveket a minták kódolásának megfelelő feliratokkal láttuk el. A kódolás során a következő rövidítéseket használtuk: U: urán; Th: tórium; TR: TRU töltet; TEV: TEVA töltet; UT: UTEVA töltet; CS: cézium töltet; V: vizeletmátrix; Cs: csurgalékvíz-mátrix; 01, 02, 03: a párhuzamos minták sorszáma; BL: vakminta (*blank*). Ezáltal egy tetszőleges minta kódja például a következőképpen nézett ki: U-TR-V-01, vagyis a kémcső TRU töltetet tartalmazott, melyre urán tartalmú vizeletmátrix *load* került, és az adott sorozatból ez volt az első minta.

Összesen 14 féle összetételű *load* készült, mivel a TRU, TEVA és UTEVA töltetek segítségével urán és tórium kinyerésére, a CS töltettel csak cézium kinyerésére tettünk kísérletet, minden töltetnél csurgalékvíz- és vizeletmátrixból is. Ez összesen 24 urántartalmú mintaoldatot, 24 tóriumtartalmú mintaoldatot, 16 céziumtartalmú mintaoldatot és 14 *load* oldatot jelent, vagyis összesen 78 mintán hajtottuk végre a teljes mintaelőkészítési és mérési műveletsort.

A *load*oldatokat homogenizáltuk, majd 2,00–2,00 ml-t pipettáztunk a megfelelő kémcsövekbe, a töltetekre. A vakmintákra *load*oldat

helyett az adott töltetnek megfelelő mosó oldat (TRU és TEVA esetén 3 M koncentrációjú salétromsav, UTEVA esetén 8 M koncentrációjú salétromsav, míg a CS töltetre 0,1 M salétromsav) került, de minden további műveletet a mintákkal azonos módon végeztünk el velük. Ezt követően fél órán át rázattuk a mintákat, hogy az extrakció minél nagyobb hatékonysággal menjen végbe és az összes töltetszemcse megfelelően érintkezzen az oldattal. A rázatási idő letelte után a mintákat a töltettel együtt töltet nélküli, műanyag elválasztó oszlopokra öntöttük, melyeket előzetesen szintén feliratoztunk. A kémcsövekben maradt töltetszemcséket és folyadékcseppeket 0,450 ml mosóoldattal átöblítettük az oszlopokra, majd egy újabb 0,450 ml-es részlettel az oszlopon lévő töltetet mostuk. A töltetről lejövő *loadot* és a 0,900 ml mosó oldatot egy frakcióként kémcsövekbe szedtük, a szokásos kódon kívül *L* jelöléssel láttuk el.

Eluálószerként az urán és a tórium esetében savakat vagy savelegyeket alkalmaztunk. Az adatlapok szerint az uránt hígabb, míg a tóriumot töményebb sósavval lehet leszorítani a töltetről. A CS töltet esetén kétféle eluálószerrel végeztünk kísérleteket (3. táblázat).

3. táblázat: Az elválasztás során alkalmazott eluensok

	TRU	TEVA	UTEVA	CS	
U	0,01M HCl + 0,1M HF	0,01M HCl	0,01M HCl	-	-
Th	0,2M HF + 4M HCl	9M HCl	9M HCl	-	-
Cs	-	-	-	5M NaOH	5M NH ₄ NO ₃

Az eluens a csurgalékvíz- és a vizeletmátrixszal készült minták esetén rendre megegyezett. Az eluálószerből 2,00-2,00 ml-t pipettáztunk az oszlopokra, majd megvártuk, míg magától lecsepeg, nem alkalmaztunk vákuumot vagy a légkörinél nagyobb nyomást. Az effluentet külön frakcióként, szintén kémcsövekben fogtuk fel, melyeket a minták kódján kívül *E*-vel jelöltünk meg.

A tömegspektrometriás mérés során ezt az eluátumot kezeltük mintaként.

Bár az ICP-MS berendezések rendkívül érzékenyek (a kimutatási határok ppt szintűek (Záray, 2006) és a lineáris dimanikus tartományuk is igen széles (akár 8-9 nagyságrend), ez egyben azt is jelenti, hogy

könnyen elszennyeződnek, ezért az elkészített minták jelentős hígítására volt szükség. Ennek mértéke a csurgalékvizes mintáknál 50000-szeres, vizeletmátrixú mintáknál 10000-szeres, csurgalékvizes *load*-oldatoknál 5000-szeres, míg vizeletmátrixú *load*oldatok esetén 1000-szeres volt, a hígításhoz 1%-os HNO₃-oldatot használtunk. A méréseket ki-, illetve bekapcsolt ütközési cellával (He) is elvégeztük.

Az eredmények és értelmezésük

Az adatok értékelése során elsősorban a visszanyerésre (1) voltunk kíváncsiak, mivel ez jellemzi leginkább egy extrakciós kromatográfiás töltet megkötő képességét. A visszanyerés (*recovery*) kiszámítása:

$$R_{\%} = \frac{Q_A}{Q'_A} \times 100 \quad (1)$$

ahol Q_A az *A* mintaalkotó végső mennyisége, Q'_A pedig az *A* mintaalkotó kiindulási mennyisége (IUPAC, 2006). Esetünkben a Q'_A a *load*oldatok mért koncentrációja volt.

A Triskem cég által *CS resin* néven forgalmazott és a sugárbiztonsági gyakorlatban elterjedten használt töltet vizsgálata során megállapítottuk, hogy adott eluens esetén csurgalékvízmátrixból mintegy másfélszer nagyobb visszanyerés érhető el, mint vizeletből (4. táblázat). Ezt feltehetően a vizelet ammónia tartalma, illetve az oldott fémionok okozzák, melyek kompetitív folyamatban szintén megkötődhetnek a tölteten.

4. táblázat: A cézium tartalmú eluátumok koncentrációi és a számolt visszanyerési értékek

Mátrix	Eluens	Koncentráció (ppm)	Visszanyerés (%)	RSD (%)
Csurgalékvíz	NaOH	391,1	71,4	5,92
	NH ₄ NO ₃	221,5	40,4	3,52
Vizelet	NaOH	340,9	47,9	4,70
	NH ₄ NO ₃	175,9	24,7	4,13

Megfigyelhető az is, hogy mátrixtól függetlenül a NaOH, ami mellékhatásként a gyantát is elroncsolja, hatékonyabb eluensnek bizonyult, mint az NH₄NO₃. A töltet ioncserélő komponenséhez olyan nagy a Cs⁺ ionok affinitása, hogy még 5 M koncentrációjú NH₄NO₃-oldat használatával sem tudjuk ammóniumionokkal leszorítani őket. A visszanyerés növelésére hatékony megoldás lehet az elúciós térfogat, illetve adott NaOH-térfogat esetén a roncsolási idő megnövelése.

Az urántartalmú minták vizsgálata során azt tapasztaltuk, hogy a TRU és az UTEVA töltetekkel mind a két mátrix esetén meglehetősen jó visszanyerést tudtunk elérni. A 3 M illetve 8 M HNO₃ jó adszorpciós közegnek, a 0,01 M HCl jó eluensnek bizonyult. TEVA töltet esetén 3 M volt a HNO₃ oldat koncentrációja, ilyen közegben az urán(VI)-ionok affinitása csupán a 10⁰ nagyságrendbe esik, tehát az alacsony visszanyerést az okozhatta, hogy az ionok nagyon kis része kötődött csak meg a tölteten (5. táblázat). A TEVA töltet ilyen körülmények között nem alkalmas U(VI)-ionok elválasztására, a másik két töltet feltehetően az adszorpciós közeg összetételének optimalizálása után is jobban megfelel a célnak. Ez a megfigyelés összhangban van a Sugárbiztonsági Laboratórium munkatársainak korábbi tapasztalataival, illetve a töltet gyártójának ajánlásával.

Érdeemes megjegyezni, hogy az irodalomban nagyon ritkán találkozni 80–90%-os visszanyeréssel, az elérhető maximum általában 70% körül alakul.

5. táblázat: Az urán tartalmú eluátumok koncentrációi és a számolt visszanyerési értékek

Mátrix	Töltet	Koncentráció (ppm)	Visszanyerés (%)	RSD (%)
Csurgalékvíz	TRU	65,1	98,4	
	TEVA	3,78	5,12	9,27
	UTEVA	61,2	84,1	2,94
Vizelet	TRU	67,7	95,3	3,46
	TEVA	2,95	3,94	0,14
	UTEVA	66,7	85,7	0,29

Az adatokból kitűnik, hogy vizeletmátrix esetén ebben az esetben is alacsonyabb visszanyerést értünk el, melynek oka feltehetően a vizeletmátrix foszfát tartalma, mely az adszorpcióval kompetitív folyamatban komplexet képez az urán(VI)-ionokkal. A visszanyerést tovább lehet növelni, ha növeljük az elúciós térfogatot és/vagy az elúciós időt.

Tóriumionokra az általunk vizsgált három töltet közül egyedül a TEVA-val sikerült számottevő visszanyerést elérnünk (6. táblázat). Bebizonyosodott, hogy mind csurgalékvíz-, mind vizeletmátrixban eredményesen alkalmazható, a mérési körülmények későbbi optimalizálásával Th(IV)-ionok dúsítására alkalmas módszer alapjává tehető. A Th(IV)-ionok megkötődését feltehetően befolyásolják a mátrixban jelen lévő szulfát- és foszfátionok.

6. táblázat: A tórium tartalmú eluátumok koncentrációi és a számolt visszanyerés értékek

Mátrix	Töltet	Koncentráció (ppm)	Visszanyerés (%)	RSD (%)
Csurgalékvíz	TRU	4,92	8,9	1,42
	TEVA	52,9	91,5	1,51
	UTEVA	5,35	9,09	31,90
Vizelet	TRU	4,91	8,21	3,18
	TEVA	45,9	74,7	0,83
	UTEVA	5,41	8,76	77,2

A TRU és UTEVA töltetek esetén a 3 M koncentrációjú HNO_3 -as közegben és a 4 M koncentrációjú HCl -as közegben meghatározott affinitásértékek közötti különbség nem igazán jelentős, ez magyarázatot adhat az alacsony visszanyerési értékekre.

TEVA töltet esetén az affinitás 9 M HCl közegben három nagyságrenddel alacsonyabb, mint 3 M HNO_3 közegben, így a megkötött Th(IV) -ionok jelentős része deszorbeálódik.

Összefoglalás

Összefoglalásként tehát elmondható, hogy a cézium az extrakciós töltetről még 5 M koncentrációjú ammónium-nitrát-oldattal sem eluálható hatékonyan, a tömény lúg jóval hatékonyabbnak bizonyult a visszanyerésre, de a kapott értékek még így is elmaradnak a többi töltet hasonló adataitól. A visszanyerés értéke feltehetően némiképp tovább javítható lenne hosszabb elúciós idő és nagyobb eluens térfogat alkalmazásával, de a 100% megközelítése akkor sem tűnik reálisnak; a gyári adatlapok egyszerű vizes mátrixra is kb. 60% visszanyerést adnak meg.

Uránionok kinyerésére kiválóan alkalmasak a TRU és UTEVA töltetek, az alkalmazott körülmények között kimagasló visszanyeréseket sikerült elérnünk.

Tórium elválasztására a TEVA töltet a legalkalmasabb, mind vizelet-, mind csurgalékvízmátrixban alkalmazható. A közeg és az eluens összetételének változtatásával javítható az elválasztás.

Elmondható, hogy a töltetek mind a két mátrixban alkalmazhatók, azonban meg kell jegyezni, hogy a vizeletmátrixban jelenlévő nagy mennyiségű interferáló komponens – pl. foszfátok, kompetitív fémionok, ammónia stb. –, illetve komplexképzők jelentősen rontják az elérhető

visszanyerést. Ezt fontos figyelembe venni, mivel a munka azt a törekvést volt hivatott szolgálni, hogy kifejlesszünk egy terepen alkalmazható, az extrakciós kromatográfián alapuló oldatmintaelőkészítési eljárást, amely lézer indukált plazma spektroszkópiás (LIBS) detektálással kombinálva alkalmas lehet nyomnyi mennyiségű cézium- és aktinoidaionok kimutatására, pl. nukleáris biztosítéki célokra.

Következő lépésként a bevált töltetekkel elérhető dúsítás, valamint az elúciós idő és térfogat optimalítása, majd a megfelelő LIBS mérési követelmények kidolgozása lesz a kutatócsoport munkájának célja.

Irodalomjegyzék

Auwer, C. D./Revel, R./Charbonnel, M. C./Presson, M. T./Conradson, S. D./Simoni, E./Le Du, J. F./Madic, C.: Journal of Synchrotron Radiation **6**, 101–104. 1990.

Considine, G. D./Wiley-VCH (szerk.): Van Nostrand's Encyclopedia of chemistry 5th edition. 2005.

IUPAC Compendium of Chemical Terminology, <http://old.iupac.org/goldbook/R05207.pdf>

Rónaky J. (kiad.): Műszaki sugárvédelem és radioaktív hulladékkezelés az atomerőművek üzemeltetése során, 4.4. sz. útmutató. Budapest 2005.

TRISKEM Cs resin Product Sheet

www.triskem-international.com/iso_album/ft_resines_cs_en_151210.pdf
2016.

TRISKEM TEVA resin product sheet

www.triskem-international.com/iso_album/ft_resine_teva_en_151210.pdf
2016.

TRISKEM TRU resin Product Sheet,

www.triskem-international.com/iso_album/ft_resine_tr_en_151210.pdf 2016

TRISKEM UTEVA resin Product Sheet

www.triskem-international.com/iso_album/ft_resine_uteva_en_151210.pdf
2016.

Záray Gy. (szerk.): Az elemanalitika korszerű módszerei. Budapest 2006.