

# Az elegykristály-képződéstől a radioaktív hulladékok elhelyezéséig

M. NAGY\* Noémi és KÓNYA József

Debreceni Egyetem, Kolloid- és Környezatkémiai Tanszék, Izotóplaboratórium, Egyetem tér 1. 4032 Debrecen, Magyarország

## 1. Előzmények

A Debreceni Egyetemen a radiokémiai kutatások 1949-ben Imre Lajos munkásságával kezdődtek. Imre kutatásait a harmincas évek elején Berlin-Dahlemben Otto Hahn irányításával végezte, ahol a radioaktív izotópok dúsításának, elválasztásának határfelületi problémáival foglalkozott. Kutatásainak fő irányát a kristálynövekedés és az adszorpció kapcsolatának vizsgálata jelentette. A radioaktív izotópok elválasztásának egyik klasszikus módszere az elegykristály-képződés, amikor az igen kis mennyiségben jelenlevő radioaktív elemet, izotópot (mikrokomponenset) egy nagyobb mennyiségben jelenlevő más elemmel (makrokomponenssel) együtt kristályosítjuk ki vagy csapjuk le. Ez akkor lehetséges, ha a mikro- és makrokomponens azonos kristályszerkezetű, vagyis izomorf vegyületet képez.

Az elegykristályok képződésével kapcsolatos kutatások a Hahn-féle<sup>1-6</sup> berlin-dahlemi laboratóriumon kívül Leningrádban folytak Vitalij Hlopin<sup>7</sup> vezetésével. A két iskola között élénk vita folyt a jelenségek termodinamikai értelmezéséről. Imre megállapította, hogy a makro- ill. mikrokomponenseket tartalmazó elegykristályok kialakulása során az egymásra épülő rétegekben beálló adszorpciós egyensúlyok határozzák meg a komponensek térbeli eloszlását a kristályfázisban. Értelmezte, hogy milyen adszorpciós mechanizmusok játszódnak le akkor, ha a komponensek eloszlása az elegykristály teljes térfogatában egyenletes, vagy ha a mikro- és makrokomponens eloszlása logaritmikus a csapadék különböző rétegeiben.

Imre kísérletei alátámasztását adták azoknak a ma már Hahn-féle szabályokként ismert tételeknek (leválasztási és adszorpciós szabály), amelyeket a radiokémikusok ma is használnak a nagyon híg oldatokból történő leválasztások tervezésénél és értékelésénél.<sup>8</sup>

Az Imre által felismert törvényszerűségeket Hahn igen nagyra értékelte és ennek segítségével határozta meg 1939-ben, hogy az urán neutronokkal végbemenő reakciójában báriumizotóp keletkezik, ami maghasadás eredménye. Imre Lajos munkája tehát közvetve hozzájárult a neutronokkal kiváltott maghasadás felismeréséhez.<sup>9,10</sup>

## 2. Radiokémiai kutatások a Debreceni Egyetem Természettudományi Karán

Debrecenbe kerülve, 1949 után Imre Lajos a szorpciós folyamatok kinetikáját és mechanizmusát vizsgálta.<sup>11-14</sup> Munkatársai közreműködésével foglalkozott a

nehezen oldódó fém sók határfelületi reakcióival,<sup>15-17</sup> valamint új irányként az elektródfolyamatokkal<sup>18,19</sup> és a korróziós jelenségekkel,<sup>20-22</sup> ill. a radioaktív anyagok standardizálásával.<sup>23-24</sup> Innen ágaztak el a kutatások a fizikai kémia, a kolloidkémia ill. a radiokémia irányába, amely később szervezeti változásokat is magába foglalt.

A radiokémiai kutatási területek közül hosszabb ideig folytak:

- a standardizálási vizsgálatok, melyek eredményeként egészen a kilencvenes évekig folyt radioaktív etalonok gyártása
- a korróziós kutatások,<sup>25-28</sup> amelyek a kilencvenes évek közepén létszámhiány miatt szűntek meg
- a nehezen oldódó fém sók vizsgálata a hetvenes évektől a természetes anyagok (ásványok, kőzetek, talajok) határfelületi reakcióinak kutatásával bővült, és amely jelenleg is fő kutatási témája a radiokémiai kutatásokat végző csoportnak.

A kutatások infrastrukturális és technikai feltételei nagymértékben javultak 1960-tól kezdve, amikor felépült egy új, a radioaktív kutatások minden szükséges feltételét biztosító B-szintű izotóplaboratórium,<sup>29</sup> amely 2010-ig működött. Ez volt az ország első, közvetlenül izotóplaboratórium céljaira készült építménye.

## 3. Radiokémiai kutatások jelene

A radiokémiai kutatások jelenleg a Kolloid- és Környezatkémiai Tanszék keretein belül, annak izotóplaboratóriumaiban folynak. Rendelkezünk egy C-szintű izotóplaboratóriummal a Kémiai Épületben, ill. egy B-szintű izotóplaboratóriummal a Debreceni Egyetem Orvos- és Egészségtudományi Centrumában.

Elsősorban a földtani képződmények határfelületi reakcióit vizsgáljuk radioizotópos nyomjelzős módszerrel. A Föld szilárd kérgét alkotó talajok és kőzetek természeti környezetünk meghatározó részét képezik. A bennük, illetve felületeiken lejátszódó folyamatok alapvető hatással vannak életünk, környezetünk minőségére. Minden spontán folyamat, illetve mesterséges beavatkozás hosszú távú hatásokat válthat ki. Annak érdekében, hogy ezek a hatások lehetőség szerint kedvezőek, de legalábbis semlegesek legyenek, fontos ismerni a földtani képződmények alapvető kölcsönhatásait a velük kapcsolatba kerülő anyagokkal. E kölcsönhatások egyik csoportját képezik a talajok és agyagásványok határfelületi reakciói a legkülönbözőbb

\*tel/fax: 52 512900/22263, nagy.noemi@science.unideb.hu

anyagokkal. E kölcsönhatásokban a talaj, az ásványok szerkezete többnyire nem változik meg alapvetően, a folyamatok a határfelületeken játszódnak le, viszont ezek a folyamatok az első lépései a kőzetek és a talajok bármilyen átalakulásának.

A kőzetek és talajok a környezetből sokféle anyagot megköthetnek. A megköthődés mechanizmusát és erősségét, valamint a szorpciót követő kémiai átalakulásokat alapvetően befolyásolja a szorbens (kőzet, talaj) kémiai és ásványos összetétele, szerkezete, a határfelületi erők, a kémiai környezet, és a mindezen tényezők kölcsönhatásaként kialakuló kémiai formák. A kölcsönhatások igen összetettek a sokféle jelenlevő anyag miatt. Számos faktor, a talajoldat, ill. felszín alatti víz jelenléte, összetétele, az oldott ásványok, a pH, a redoxpotenciál, gázhalmazállapotú anyagok (pl. szén-dioxid) jelenléte, a szerves anyagok, élő szervezetek, stb. egyaránt hatással lehetnek a határfelületi reakciókra.

A folyamatok korrekt tudományos leírásához a szilárd és a folyadék fázist, határfelületet, valamint ezek kölcsönhatásait egyaránt vizsgálni kell. Az irodalomban nagyon gyakran azt tapasztaljuk, hogy a kutatók ezen összetett rendszer egy-egy aspektusára koncentrálnak, például csak a kőzetek és talajok tulajdonságait vizsgálják a többi összetevő hatását elhanyagolva vagy állandónak tekintve, vagy kiválasztott anyagoknak, pl. egy-egy környezetszennyező fémionnak, vegyületnek a hatásait tanulmányozzák. Munkánk során minden esetben arra törekszünk, hogy átfogóan kezeljük a szilárd-folyadék-határfelület rendszert és hangsúlyozzuk azoknak a kémiai formáknak a jelentőségét, amelyek a földtani képződmények, az oldatok és a határfelületek kölcsönhatásaiban kialakulhatnak.

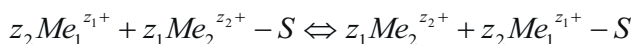
A szilárd fázisok (beleértve a kőzeteket és talajokat) és az elektrolit-oldatok határfelületén az oldott anyagok különböző folyamatok révén halmozódhatnak fel. A legfontosabbak az adszorpció, az ioncsere és a kicsapódás. Ezek termodinamikája eltérő, amelyet az irodalomban gyakran figyelmen kívül hagynak, ami téves következtetésekre vezet. Ezért nagyon fontosnak tartjuk, hogy megismerjük a felhalmozódási folyamat mechanizmusát és annak fogalmi tisztázását. Adszorpciónak nevezzük egy adott anyag felhalmozódását a még borítatlan felületen annak érdekében, hogy a felületi energia csökkenjen, például  $z_1+$  pozitív töltésű  $Me_1$  cation esetén:



ahol S a felületi kötőhelyeket jelenti. Ha két vagy több anyag kötődik meg ilyen módon, kompetitív adszorpcióról beszélünk. Ilyen esetben a  $z_2+$  töltésű  $Me_2$  ion is adszorbeálódhat:



Ioncsere a felületen már jelenlevő ionok ekvivalens kicserélődése más, de ugyanolyan töltésű ionokra. Kationokra például:



A jelölések megegyeznek a korábbiakkal. A kicsapódásnak különböző típusai lehetnek. Az egyik az, amikor az oldatbeli komponensek koncentrációja eléri az oldékonysági

szorzatnak megfelelő értéket, új szilárd fázis keletkezik, függetlenül más szilárd fázis jelenlététől. Ha azonban valamilyen szilárd fázis már kezdetben jelen van, az új fázis kicsapódása ennek felületén történik, így az eredeti szilárd fázis összetétele megváltozik. Ha a kicsapódási folyamat kolloid méretű részecskéket eredményez, különösen híg oldatokban, azok adszorbeálódhatnak a jelenlevő szilárd felületeken. Ez a folyamat a kolloid-adszorpció.<sup>6,7</sup>

A kicsapódás másik formája a felületi kicsapódás, amely már eleve szilárd fázis jelenlétét kívánja. Ilyenkor három lehetséges eset van. Az egyik, amikor a csapadék monoréteget képez. A második lehetőség az együttleszapás, vagy elegykristály-képződés, amikor a kis mennyiségben levő komponens beépül a nagy mennyiségben levő komponens kristályrácsába. Harmadik esetben a felület bizonyos helyein kémiai erők következtében újabb kristályfázis növekedése megy végbe és diszkrét kolloid részecskék képződnek.

#### 4. Vizsgált rendszerek és kísérleti módszerek

Munkánk lényegében két részre osztható: az egyik részét elvi kutatások képezik. Ilyenkor a természetből vett anyagok a maguk összetettségében nem megfelelőek, mivel a sok komponens miatt a jelenségek túlságosan bonyolulttá, nehezen értelmezhetővé válnak, egyik komponens hatása a másikat elfedi. Ezért az ilyen irányú vizsgálatokhoz célszerű olyan modellanyagot választani, amely alapvető tulajdonságai hasonlítanak a földtani közegekhez, de azoknál lényegesen egyszerűbbek, a zavaró hatások nagyrészt kiküszöbölhetők. Ilyen agyagásvány a rétegrácsos szerkezetű szmektitek közé tartozó montmorillonit, melyen szerkezetéből kifolyólag minden, a földtani környezetben fontos határfelületi folyamat elképzelhető, illetve modellezhető.

Kutatásaink másik részét a reális kőzet-, talajtani és környezeti problémák vizsgálata képezi. Ezek a magyarországi talajok változó töltéseivel, a 2000. évi tiszai cianid-szennyezés során felmerült esetleges hosszú távú talajszennyezés problémáival kapcsolatos vizsgálatok. Foglalkoztunk az ásványos összetételnek a radioaktív ionok megkötésére gyakorolt hatásával, valamint a sajobábonyi bentonit kőzet hasznosítási lehetőségeivel, különös tekintettel a talajok vízháztartásának javítására, nyomelemek bevitelére, nyomelemtrágyák és csávázóanyagok előállítására. Ilyen konkrét problémák esetén a természetből közvetlenül vett minták használatától nem lehet eltekinteni, tehát a feladat megoldása az ebből fakadó nehézségekkel bővül. Az eredmények is elsősorban az adott helyre, földtani képződményre (talajra, kőzetre) jellemzőek. Ha azonban a vizsgálati mintákat részletes talajtani, kémiai, ásványtani, stb. vizsgálatnak vetjük alá, akkor az eredményekből általános következtetéseket is levonhatunk.

Mint ahogy az átlagostól eltérő talajokon, kőzeteken mutatózó nagyobb különbségek választ adhatnak olyan kérdésekre is, amelyek a szokásos körülmények között mutatózó kis változások miatt nem tehetők meg, úgy az oldat fázisnak a természetes földtani környezettől eltérő paraméterei is alkalmasak erre. Vizsgálataink során ezért gyakran szélesebb koncentráció- és pH-tartományt alkalmaztunk, mint ami a földtani környezetben jellemző.

Ezt azért tettük, mert így nyílt igazán lehetőség a lejátszódó folyamatok alapvető jellemzőinek és mechanizmusának megértésére.

A montmorillonit, bentonitok, kőzetek, valamint talajok és üledékek határfelületi reakcióit számos rendszerben vizsgáltuk, melyet az alábbiakban rendszereztünk.

#### SZILÁRD/ELEKTROLIT-OLDAT RENDSZEREK SZILÁRD: MONTMORILLONIT

MAKROELEMOK KATIONJAI:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$

MIKROELEMOK KATIONJAI:  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ , lantanoidaionok

SZENNYEZÉS:  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Pd}^{2+}$

RADIOAKTIV SZENNYEZÉS:  $^{22}\text{Na}^+$ ,  $^{134,137}\text{Cs}^+$ ,  $^{45}\text{Ca}^{2+}$ ,  $^{85}\text{Sr}^{2+}$ ,  $^{90}\text{Sr}^{2+}$ ,  $^{60}\text{Co}^{2+}$ ,  $^{212}\text{Pb}^{2+}$ ,  $^{36}\text{Cl}^-$ ,  $^{131}\text{I}^-$

KATALIZÁTOROK:  $\text{H}^+$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn(II,IV)}$ ,  $\text{Ce(III,IV)}$ ,  $\text{Pd(0,II)}$

KOMPLEKXPÉZŐK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA:  
borkósav, citromsav, polifoszfátok, EDTA, DTPA, NTA  
SZERVES ANYAGOK MEGKÖTŐDÉSE: valin, EDTA  
KATALITIKUS REAKCIÓK: aromás aldehidek diacililása

#### SZILÁRD: TALAJOK, KŐZETEK, BETON

MAKRO-KATIONOK:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$

ANIONOS NÖVÉNYI TÁPANYAG:  $\text{PO}_4^{3-}$

SZENNYEZÉS:  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{CN}^-$

RADIOAKTIV SZENNYEZÉS:  $^{134,137}\text{Cs}^+$ ,  $^{90}\text{Sr}^{2+}$ ,  $^{140}\text{Ba}^{2+}$ ,  $^{226}\text{Ra}^{2+}$ ,  $^{60}\text{Co}^{2+}$ ,  $^{45}\text{Ca}^{2+}$ ,  $^{36}\text{Cl}^-$ ,  $^{131}\text{I}^-$ ,  $^{14}\text{CO}_3^-$ ,  $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$

A csoportosítás természetesen önkényes, a lantanoidaionok mint geológiai indikátorok a mikroelemek kationjai közé kerültek, de például hasadványként a radioaktív szennyezések közé is besorolhatók, vagy akár katalizátorként használt agyagásványok is állíthatók elő velük.

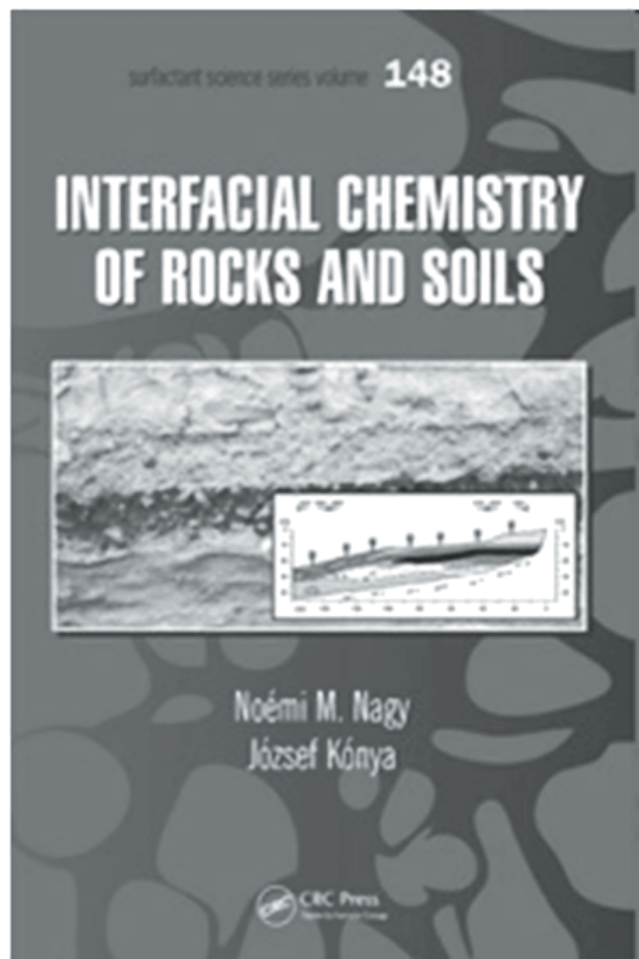
A határfelületeken megkötődő anyagmennyiség meghatározására alapvető módszerként a radioizotópos nyomjelzést (gamma- és béta-spektroszkópia) alkalmazunk. Ez a módszer nagy érzékenysége miatt igen kedvező: a határfelületeken megtalálható anyagmennyiség  $10^{-9}$  mol/cm<sup>2</sup> nagyságrendű. Egy rétegű megkötődés esetén az adszorbeált mennyiség is nagyjából ekkora, tehát annak változását csak megfelelően érzékeny analitikai módszerrel lehet érzékelni. Természetesen valamennyi elért eredmény a stabilis izotópok esetén ugyanúgy érvényes. A földtani képződményeken lejátszódó folyamatok bonyolultsága miatt azonban a radioizotópos nyomjelzés önmagában nem elegendő, azokat egyéb analitikai és szerkezetvizsgáló technikákkal kell kiegészíteni. Ilyen módszerek a röntgenfluoreszcencia spektroszkópia, BET-féle felületmeghatározás, porozimetria, dinamikus fényszórás mérés, termoanalízis, röntgendiffrakció, pH-, potenciometria, redoxpotenciál-mérés, atomabszorpció és ICP spektrometria, infravörös spektrometria, elektronspektroszkópia, pásztázó elektronmikroszkópia, atomerő mikroszkópia, NMR spektroszkópia, Mössbauer-spektroszkópia, amelyre széleskörű hazai és nemzetközi együttműködésben teremtjük meg a lehetőséget.

A határfelületi folyamatok statikus vizsgálatán kívül az utóbbi másfél évtizedben intenzíven vizsgáljuk a vízdoldható anyagok mozgását a földtani közegekben, ill. hulladéktárolók mérnöki gátjaiban, különös tekintettel arra a kérdésre, hogy a tömbfázisok szerkezete ill. a határfelületi kölcsönhatások hogyan hatnak a bennük migráló vízdoldható anyagok mozgási sebességére.

Kiemelten vizsgáljuk a migrációt befolyásoló szorpciós (adszorpció, ioncsere, kicsapódás) folyamatokat, azok hatását a migrációra. A vizsgált ionok antropogén környezetszennyező ionok, ill. radioaktív izotópok. A vizsgálatok során arra a kérdésre keresünk választ, hogy az adott közegre alkalmazható migrációs modellbe milyen kvantitatív paraméterekkel illeszthetők be a migrációs közeget jelentő pórusrendszer releváns szerkezeti paraméterei, illetve a migráló anyag és a közeg határfelületi folyamatait, valamint egyéb kölcsönhatásait (pl. a tömbfázissal) jellemző tulajdonságok.

Kifejlesztettünk egy migrációs modellt, mely a kőzetek ásványos összetétele és az alkotó ásványokra jellemző határfelületi folyamatok termodinamikai paraméterei alapján lehetőséget ad arra, hogy ismert összetételű kőzetre megbecsüljük a migrációra gyakorolt hatást.

Kutatási eredményeinkről 2009-ben a Taylor and Francis (CRC Press) önálló kötetet jelentetett meg, melynek címlapját az 1. ábrán mutatjuk be.



1. Ábra. A Taylor and Francis (CRC Press) Kiadónál 2009-ben megjelent könyvünk fedőlapja.

## 5. Az eredmények gyakorlati alkalmazása

Kutatási eredményeink számos, a kőzetekkel és talajokkal, valamint hulladéktárolók mérnöki gátjaival kapcsolatos gyakorlati feladat megoldásában hasznosíthatók a környezetvédelem, környezetvédelmi technológiák kialakítása, a talajkémia, a mezőgazdaság és az ipar területén. Ezek az ismeretek jól alkalmazhatók szennyezett talajok dekontaminálása, szigetelőrétegek kialakítása a radioaktív és egyéb hulladékok tárolása, során. Agyagásványokkal megoldható a nyomelemek bevitelét tápanyagban szegény talajokba, segítségükkel környezetbarát szintézisek valósíthatók meg.

Kutatócsoportunk a Széchenyi-terv keretében elnyert pályázat résztvevője volt [GY11-GY14]. A pályázat címe: Borsodi bentonittelep kutatása, komplex anyagvizsgálata, importkiváltó bentonittermékek fejlesztése, környezetvédelmi, ipari, mezőgazdasági felhasználás lehetőségei.

Kutatásaink szorosan kapcsolódnak a nukleáris hulladékok föld alatti elhelyezéséhez. Az előzőekben ismertetett alapkutatásokon kívül két évtizede veszünk részt a Bátaapáti radioaktív hulladék-tároló előkészítő munkáiban, vizsgáltuk a radioaktív izotópok megkötődését, deszorpcióját, illetve migrációját a Bátaapáti körzetében levő kőzeteken. Kutatásokat folytattunk a hulladéktárolóban alkalmazni kívánt mérnöki gátak anyagain is. Részt vettünk a püspökszilágyi radioaktív hulladék-tároló hulladéksomagjainak megfelelőségi vizsgálatában. Az említett területeken 17 kutatási jelentést készítettünk, az ezekben levő eredményeket használják a biztonsági elemzések készítésénél. A Paksi Atomerőműben 2006. áprilisi üzemzavart követően tanulmányban foglaltuk össze azokat a lehetséges folyamatokat, amelyek során az urán különböző kémiai formái megkötődhetnek az atomreaktorok szerkezeti anyagain, cirkónium-ötvezeten, ill. rozsdamentes acélon. Ezeket a dekontaminálásnál hasznosították, ill. nemzetközi közleményekben is megjelentek.

## 6. Oktatómunka

Oktatómunkánkat a magkémia, ill. radiokémia területén végezzük. 2007-ben, ill. 2008-ban Izotópia I. és II. címmel jegyzetet jelentettünk meg, melyben rendszerbe foglaltuk a Debreceni Egyetemen általunk kialakított tematika szerint oktatott ismereteket. A hallgatói gyakorlatokon különös hangsúlyt fektetünk arra, hogy a hallgatók megismerjék a nyitott radioaktív készítményekkel való biztonságos laboratóriumi munkavégzést. Oktatómunkánk a 2011. szeptemberétől radiokémikus MSc szakirány indításával bővült.

## Összefoglalás

Közleményünkben a Debreceni Egyetem Kolloid- és Környezettudományi Tanszékének radiokémiai kutatásait foglaljuk össze. Áttekintjük azokat a kutatásokat, amelyek meghatározóak voltak a mai kutatási profil kialakításában, ill. érintjük azokat a csatlakozási pontokat, amelyek a korábbi radiokémiai munkák a tudományterület nemzetközi

élvonalához kapcsolódtak. Jelenlegi kutatásaink a földtani közegek határfelületi reakcióinak vizsgálatára irányulnak. Ezeket a folyamatokat elsősorban radioizotópos nyomjelzéssel tanulmányozzuk. Elvi kutatásokkal és konkrét gyakorlati környezetvédelmi problémákkal egyaránt foglalkozunk. Ezek közül kiemelhető a szorpciós mechanizmusok vizsgálata, ill. a környezeti tényezők (földtani közegek, oldatfázis összetételének) hatása a megkötődési folyamatokra. A statikus vizsgálatokon kívül tanulmányozzuk a vízdoldható anyagok mozgását a földtani közegekben, ill. a hulladéktárolók mérnöki gátjaiban, valamint a megkötődési folyamatok hatását az anyagmozgásra. Munkánk szorosan kapcsolódik a radioaktív hulladékok föld alatti elhelyezéséhez. Röviden szólunk a Debreceni Egyetemen folyó radiokémia-oktatásáról és a 2011. szeptemberében induló radiokémikus vegyész MSc szakirányról. Megemlítjük az általunk írt és a közelmúltban megjelent jegyzeteinket, ill. tudományos monográfiánkat (1. ábra).

## Köszönetnyilvánítás

Jelenleg a kutatásainkat a TÁMOP 4.2.1./B-09/1/KONV-2010-0007 számú projekt támogatja. A projekt az Új Magyarország Fejlesztési Terven keresztül az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## Hivatkozások

- Hahn, O. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft* **1926**, 59, 2014–2025.
- Hahn, O. *Naturwiss.* **1926**, 14, 1197.
- Mumbrauer, Z.B.R. *Z. Phys. Chem. A.* **1931**, 156, 113–134.
- Mumbrauer, Z.B.R. *Z. Phys. Chem. A.* **1933**, 165, 477.
- Käding, H. *Z. Phys. Chem. A.* **1931**, 162, 174.
- Imre, L. *Z. Phys. Chem. A.* **1930**, 146, 41
- Hlopin, V., Polesszitszkij, A., Nyikitine, B., Tolmacsev, P., Ratner, A. munkái, *Z. Anorg. Chem.* **1929-1935**.
- Hahn, O., Imre, L. *Z. Phys. Chem. A.* **1929**, 144, 161.
- Hahn, O., Strassmann, F. *Naturwiss.* **1939**, 27, 11.
- Hahn, O., Strassmann, F. *Naturwiss.* **1939**, 27, 1.
- Imre, L. *Kolloid-Zeitschrift* **1953**, 131, 21.
- Imre, L. *Kolloid-Zeitschrift* **1954**, 135, 161.
- Imre, L. *Kolloid-Zeitschrift* **1957**, 166, 119.
- Imre, L. *Kolloid-Zeitschrift* **1959**, 135, 122.
- Imre, L., Nagy J. *Acta Physica et Chimica Debrecina* **1965**, 10, 5.
- Imre, L., Bartha, L. *Acta Physica et Chimica Debrecina* **1956**, 3/2, 63.
- Imre, L., Tóth, B. *Acta Physica et Chimica Debrecina* **1969-70**, 15-16, 127.
- Imre, L., Csongor, J. *Acta Physica et Chimica Debrecina* **1963**, 9, 41.
- Imre, L., Fejes, G. *Acta Physica et Chimica Debrecina* **1967**, 13, 41.
- Imre, L., Tóth, G., *Acta Physica et Chimica Debrecina* **1959**, 5, 207.
- Imre, L., Kónya, J., *Acta Chimica Academiae Scientiarum Hungaricae* **1967**, 53, 219.
- Kónya, J., Imre, L. *Magyar Kémikusok Lapja*, **1971**, 26, 313.
- Imre, L., Fábry, Gy., Dézsi I. *MTA Kémiai osztály Közlemények*, **1963**, 19, 1.
- Imre, L., Nagy, J. *Acta Physica et Chimica Debrecina* **1976**, 20, 99.

25. Kónya, J. J. *Electroanal. Chem.* **1977**, *84*, 83-91.
26. Kónya, J., Bába Á. *J. Electroanal. Chem.* **1980**, *109*, 125-139.
27. Kármán, H.F., Kálmán, E., Várallyai, L., Kónya J. Z. *Naturforsch.* **1991**, *46a*, 183-186 .
28. Várallyai, L., Kónya J., Kármán, H.F., Kálmán, E., Telegdi J. *Electrochimica Acta* **1991**, *36*, 981-984.
29. Imre, L., Nagy, J. *Magyar Kémikusok Lapja*, **1964** , *19*, 141.
30. Goering, B. K. Ph.D. Diss76ertation, Cornell University, 1995.
31. Haslam, E. *Shikimic Acid Metabolism and Metabolites*, John Wiley & Sons: New York, **1993**.
32. Buchanan, J. G.; Sable, H. Z. *In Selective Organic Transformations*; Thyagarajan, B. S., Ed.; Wiley-Interscience: New York, **1972**; Vol. 2, pp 1–95.
33. Lyle, F. R. U.S. Patent 5 973 257, 1985; *Chem. Abstr.* **1985**, *65*, 2870.

### From co-precipitation to nuclear waste

The radiochemical studies in the Department of Colloid and Environmental Chemistry, University of Debrecen are summarized. Previous studies determining the recent research profile are also sketched, mentioning the connection points with the international radiochemical studies. Recently, the interfacial reactions of geological formations are investigated, mostly by radioisotopic tracer methods. Our studies have both principles and practical, environmental aspects. The study of the sorption mechanisms and the factors (the composition of the geological formations and the

solution phases) influencing the interfacial studies are emphasized. Beside the static investigation, the migration processes of the water soluble substances in geological media and in the engineering barriers of waste disposals as well as the effect of the sorption process on migration are also studied. This work is related to the geological storage of nuclear wastes. In addition, the radiochemical education of University of Debrecen and the radiochemistry MSc starting in September, 2011 is mentioned. The books and textbooks recently presented are shown (Fig. 1).