

Kémiai Közlemények

Osztályülés

1999. április 7.

40 éves az Izotóp- és Felületkémiai Intézet

WOJNÁROVITS László

Magyar Tudományos Akadémia Kémiai Kutatóközpont Izotóp- és Felületkémiai Intézet

Az 1950-es években Magyarországon is ugrásszerűen fejlődésnek indult a radioaktív izotópok gyakorlati alkalmazása. 1959-ben kezdte meg munkáját a Kísérleti Atomreaktor, melyet azóta is alkalmaznak aktív izotópok előállítására. 1959-ben az Országos Atomenergia Bizottság elhatározta, hogy a hazai izotópelőállítás, az izotópok alkalmazásának támogatására, ilyen irányú tudományos kutató, fejlesztő és szolgáltató tevékenység végzésére intézetet hoz létre. Egyúttal döntött arról, hogy az eddig Izotóp Elosztó néven működő intézmény létszámát 8 főről 15 főre kell emelni¹.

1967-ben kormányhatározat alapján az Intézet a Magyar Tudományos Akadémia felügyelete alá került, a Kémiai Tudományok Osztályának illetőségi körébe.

Az alapításkor meghatározott feladatok keretén belül az Intézet szépen fejlődött. Sorra alakultak az osztályok és nőtt a tudományos minősítettek száma. Kezdetben egy szervezetben belül végeztek az izotópkémia és kapcsoló területein kutatómunkát, fejlesztettek izotópkészítményeket és sugárforrásokat, az ipar számára nyomjelzés-technikai vizsgálatokat végeztek, izotópos műszereket gyártottak, mérőrendszereket készítettek és szervizeltek, foglalkoztak az izotópkészítmények kereskedelmével és nyilvántartásával, valamint az izotópok forgalmazása, csomagolása, szállítása, stb. területén elláttak hatósági feladatokat is. A hazai izotópgyártást 1962-ben indították meg². Nyilvánvalóan a szerteágazó feladatok meghaladták annak lehetőségét, hogy azokat egy kutatóintézet keretén belül végezni lehessen. 1984-ben IZINTA néven Izotópkereskedelmi Leányvállalatot alapítottak, mely 1993-tól IZINTA Kft néven folytatja tevékenységét.

Az IKI maximális méretét a 80-as évek végén érte el, ekkor a létszáma kb. 430 fő volt.

Az intézeti munka egyik jellegzetessége volt, hogy az osztályok egyik része túlnyomórészt csak kutatást, míg a másik része nagyobb részben termelést és hozzá kapcsolódó fejlesztést ill. szolgáltatást végzett. Ez, továbbá a nagy méretűre növekedett gyakorlati tevékenység vezetett a kétféle tevékenység szervezeti szétválasztásához. 1993. január 1-jével a tevékenység úgy vált ketté, hogy az elsősorban alapkutatásokat végző Intézet mellett jött létre az Izotópin-tézet Kft. Ez a szervezeti szétválás nagyot segített az azt követő gazdaságilag nehéz évek átvészelésében. Ugyanakkor nem szabad elfelejteni, hogy az Intézetnek az a része vált le, amelynek külső kapcsolatai voltak. Az Intézet keretében lényegében csak alapkutatást végző munkatársak maradtak kevés ipari kapcsolattal. A szétváláskor a kutatóintézeti létszám kb. 150 fő volt.

1998. január 1-jével az MTA intézetkonszolidációs programjának keretében megalakult a Kémiai Kutatóközpont, melynek az Intézet Izotóp- és Felületkémiai Intézet néven vált részévé. A konszolidációs létszám 109 fő, melyből 13 a Központ apparátusához tartozik. Az Intézetben jelenleg 1 akadémikus, 13 akadémiai doktor és 17 kandidátusi, vagy Ph.D fokozattal rendelkező kutató dolgozik. A szétválással a Kft-hez került témák sorsáról Zsinka László kandidátus, ügyvezető igazgató írásában olvashatnak³.

Az Intézetnek feladatai jellegéből eredően kezdetben szüksége volt tudásra mind a kémiai, mind a fizikai mind a műszaki tudományok területén. Később az orvosi izotópkalkalmazás irányának megfelelően biológiai, immunológiai kutatások végzése is szükségessé vált. Az intézet feladatköreinek, profiljának szűkülésével két alapvető kutatási terület maradt: a kémiai és fizikai kutatás.

A heterogén katalízis kutatások az Intézet egyik legrégebben művelt kutatási területe. A kuta-

tások a határfelületnek mint a katalitikus rendszer meghatározó elemének tanulmányozását, valamint a felületen lejátszódó katalitikus folyamatok törvényszerűségeinek feltárását célozzák.

Visszatérő kérdés volt az elmúlt 40 évben: mi köze van a katalízisnek az izotópokhoz? A válasz nem egyszerű, de a megértést elősegíti, ha megvizsgáljuk miért indult el a katalíziskutatás az Intézet megalakulásával egyidőben. Ennek részben személyi, részben szakmai indoklottsága van. Az Intézet akkori igazgatója, Tétényi Pál, a világszerte ismert Balandin iskolában szerzett minősítést és természet-szerűnek tűnt, hogy az ott megkezdett kutatásait átörökítse Magyarországra. Szakmai indoklottsága abban állt, hogy az atomenergia békés felhasználását elősegítő első genfi konferencia (1956) után mindenki kereste az izotópok felhasználásának különböző módjait. Ennek keretében természetesnek tűnt, hogy a különböző, akkor többnyire még empirián alapuló szénhidrogén átalakulások mechanizmusát izotóp - elsősorban trícium és ^{14}C - jelzéssel tanulmányozzák. A szénhidrogének alapreakcióit, mint pl. hidrogénezését, izotópcseréjét, hidrogenolízisét, vázizomerizációját, ciklizációját vizsgálták és ennek eredményeként az intézetben folyó katalízis-kutatásokat nemzetközileg is elismerték. Sikertelenül kifejlesztették pl. a deutériumot és ^{14}C izotópot használó "kettős izotópos jelzés" módszerét a felületi közti állapotok és az adszorpció/deszorpció egyensúly egyidejű tanulmányozására. A kutatások másik iránya volt a katalizátor fém aktiválása neutron-besugárral⁴. E munkákat a szakirodalom úgy minősítette, mint olyan végső vizsgálatot, amely kizárta a sugárzásos hibahelyek hatását⁵.

A reformálás egyik nyitott kérdése volt, hogy mi a fém szerepe a Pt/Al₂O₃ katalizátorokon lejátszódó átalakulásokban. Az 1960-as években az Intézetben kezdett kutatások egyértelműen kimutatták, hogy a fémek maguk is, az oxidokéhoz hasonló mechanizmus szerint katalizálják az elsősorban platinán lejátszódó nyíltláncú szénhidrogének gyűrűzárási reakcióit⁶⁻⁸. Ennek során öt- vagy hattagú gyűrű képződhet, amelynek lehetséges útját ^{14}C -nyomjelzés segítségével valószínűsítették. Az aromatiszálódás alapfolyamatai mellett tanulmányozott vázizomerizáció, hidrogenolízis, izotópcseré mechanizmusának valamint a hidrogénnek a fémekre kifejtett hatása ismeretében⁹ kutatóink azt a következtetést vonták le, hogy nem maga a fém, hanem a fém és a szubsztrátum kölcsönhatásából származó ún. „katalitikus rendszer” a felelős a fémeken lejátszódó katalízisért^{7,8,10}.

Az 1973-ban és 1979-ben bekövetkezett olajárrobbanás és az ezt követő takarékos üzemű motorok

kifejlesztése következtében az érdeklődés némiképpen csökkent az aromatiszálás reakciói iránt, de változatlanul nagy az érdeklődés a nem-aromás nagy oktánszámú komponensek tekintetében. E periódusban a kutatások egyre inkább a katalizátorok fejlesztésében alapvető szerepet játszó szilárdtest-kémiai reakciók, a felületek állapotának vizsgálata és jellemzése felé fordultak. Ezekhez a vizsgálatokhoz az izotópos jelzés technikája mellett egyéb, szerkezet-érzékeny műszeres módszereket, mint pl. fotóelektron- (UPS, XPS, AES) és infravörös-spektroszkópiát is alkalmaztak. Az Intézetben 20 évvel ezelőtt Mössbauer-spektroszkópiás laboratóriumot hoztak létre. A módszer kiváló lehetőséget ad hordozós katalizátorokon elsősorban vas, ill. ón atomok oxidációs és koordinációs állapotainak azonosítására *in situ* körülmények között.

Szerkezet-érzékeny módszerekkel sikerült tisztázni, hogy a nanométer méretű fém részecskék mellett fémionok is mindig jelen vannak és ezek a fém tulajdonságokat kedvezően befolyásolják, valamint azt, hogy a részecskék miként stabilizálhatók¹¹. Sikeresnek bizonyult az ugyancsak nano-részecskéket tartalmazó amorf fémeken lejátszódó katalízis számos problémáját megoldani.

A világon néhány más kutatócsoporttal egyidőben kétfémes nanorészecskék előállítására zeolitok használatát kezdeményezték: e területen ma is folynak kutatások az Intézetben. A nano-részecskék előállítására a jelenleg folyó kutatásokban pulzusrendszerű lézer ablációs párologtatást, valamint szőlőgél technikával előállított kétfémes rendszereket használnak. A tematikának megfelelően újabb módszereket alkalmaznak, mint pl. pásztázó alagút mikroszkópot.

Az Intézet 1964 óta minden alkalommal képviseltette magát a négyévenként megrendezett Katalízis Világkongresszuson, ami a katalízissel foglalkozó kutatók legrangosabb eseménye. Sőt, és talán ez a legnagyobb elismerés, Magyarország kapta a 10. Kongresszus (1992) rendezési jogát és ebben jelentős szerepet játszott az Intézetben folyó katalízis kutatások elismertsége a világon. A kongresszus 3 kötetes, mintegy 4000 oldalas anyagát az Akadémiai Kiadó az Elsevier Kiadóval közösen adta ki¹².

A jelenleg folyó kutatások három rész-területre bonthatók.

1. Felületek felépítése és szerkezeti tulajdonságai. A kutatások célja a katalizátorok felületének atomi szintű megértése, ami által lehetővé válik annak tudományos tervezése, amelyen adott reakció optimális paraméterekkel játszódik le¹³⁻¹⁸. Felület spektroszkópiai módszerekkel (XPS, UPS, AES,

STM, DRIFT, stb) kimutatták például, hogy szilícium egykristályok felületén nanométer méretű kobalt részecskék hozhatók létre, melyek a szénmonoxidot disszociatív módon kötik meg, ellentétben az összefüggő kobalt felülettel. A felületi elektronállapotok hasonló változtatása idézhető elő a szilícium kristályon lévő platinán és rézen. A nanoszerkezetű fémek esetenként kiemelkedően nagy katalitikus aktivitást mutatnak, pl. az etilén hidrogénezésében.

2. A *felület-szubsztrátum kölcsönhatást* spektroszkópiai módszerekkel, modellezéssel és kvantumkémiai számításokkal vizsgálják. Különböző morfológiájú fémek adszorpciós képességét hasonlítják össze, a fémfelület-szubsztrátum kölcsönhatást elemzik és a fémek katalitikus tulajdonságai közötti különbségeket kívánják ezzel értelmezni. A mérésekhez főként Fourier-transzformációs infravörös, valamint Auger elektron spektroszkópiai technikát alkalmaznak¹⁹⁻²⁴. Az Intézetben lévő infravörös spektrométerek a távoli és a közepes tartományban egyaránt lehetővé tesznek transzmissziós, reflexiós és emissziós vizsgálatokat rendkívül széles hőmérséklettartományban. A kifejlesztett emissziós vizsgálatok kiválóan alkalmazhatók nem-transzparens anyagok, mint például palládium, platina vagy ródiium kormon lejátszódó adszorpció vizsgálatára, a felületi képződemények azonosítására²⁴.

Az infravörös vizsgálatok rendkívül fontosak a katalizátorok felületén lejátszódó reakciók mechanizmusának felderítése szempontjából. Több tucat metalligandum komplex vizsgálatára is sor került és a számolt valamint a mért vibrációs frekvenciák, infravörös intenzitások, izotóp-eltolódások segítségével kötési energiákat határoztak meg.

Részint a katalízis kutatásokhoz kapcsolódóan különböző molekulák tér- és elektron-szerkezetének felderítésére kiterjedt kvantum-kémiai számításokat végeztek²⁵⁻³⁵. Az alkalmazott kvantumkémiai módszer a sűrűségfüggő elméleten (DFT = Density Functional Theory) alapszik, és segítségével olyan rendszerek kerültek vizsgálatra, mint például a felületen kötött etilidín, zeolitok üregében lévő molekulák, vagy a hemoglobin központi része.

3. *Heterogén katalitikus reakciók* esetében a katalizátorok összetétele, fizikai és elektronállapota, adszorpciós képessége és katalitikus aktivitása közötti összefüggéseket tanulmányozzák, különös tekintettel a reagáló molekulák szerkezete és katalitikus reakcióképességük kapcsolatára.

Tanulmányozzák a *C₅-gyűrűs szénhidrogének* képzésére és bomlására irányuló vázizomerizációs reakciókat. Kimutatták, hogy az öttagú gyűrű záródása és felnyílása azonos szénatom-számú alkánokká csak négy fémkatalizátor, Pt, Pd, Ir és Rh jelenlé-

tében játszódik le. E reakciók többségének sebessége maximumot mutat a hidrogénnyomás függvényében. Kevés hidrogén jelenlétében elsősorban aromások, nagy hidrogén-feleslegben pedig C₅-cikloalkánok, ill. vázizomerek keletkeznek. Értelmezték a hidrogénhatást: a felületen disszociatív módon adszorbeált szénhidrogén-gyökökből a további (dehidrogénezett, ill. telített termékekhez vezető) reakciók különböző mértékben dehidrogénezett köztitermékeit a rendelkezésre álló hidrogén mennyisége szabja meg³⁶⁻⁴⁶.

Mintegy 15 éve folynak vizsgálatok *kétfémes klaszterek - zeolit üregeiben elhelyezett kétfémes részecskék* - katalitikus viselkedésének megismerésére a CO hidrogénezésében és a metán kishőmérsékletű oxigén távollétében lejátszódó konverziójában. E kutatások alapján megállapították, hogy a kétfémes rendszer megváltozott elektron szerkezete lehetővé teszi a CO molekula nem-disszociatív kemoszorpcióját és ezáltal alkoholok képződését⁴⁷⁻⁵². A kétfémes rendszer hasonló elvek alapján befolyásolja a metánból keletkező CH_x hidrogén-tartalmát, és így a képződő termékek eloszlását⁵³⁻⁵⁷.

A kétfémes katalízis témaköréhez tartozik a C₂-C₃ olefinekben nyomnyi mennyiségben előforduló diének és acetilén eltávolítása *szelektív hidrogénezéssel*. Gondoljuk például a következő feladatra: 1-buténből kell a dién és acetilén szennyezést eltávolítani úgy, hogy alkánok képződése vagy az 1-butén izomerizációja nem megengedett. Vizsgálataik szerint egyes módosított felületek, pl. Pd módosítása ezüsttel, nagy szelektivitást mutatnak a diének és az acetilén hidrogénezésében, miközben olefin hidrogénező és izomerizáló aktivitásuk elhanyagolható. A jelenséget annak tulajdonították, hogy az adszorbeálódó diének az erős komplexálódás miatt a módosított felületen kialakítják maguk számára a reakciócentrumot, míg erre az olefin nem képes⁵⁸⁻⁶².

Az utóbbi 6-8 évben Mössbauer spektroszkópiával kiterjedten tanulmányozták a zeolitalapú katalizátorokban a *katalitikus centrumokat*⁶³⁻⁶⁶. Méréseikkel például kimutatták zeolitüregekben molekulárisan diszpergált oxigénátvivő vas komplexekben a koordináció változásait a redox folyamatokban. Szelektív katalitikus oxidációs folyamatokban a dinukleáris Fe-O-Fe centrumok meghatározó szerepét valószínűsítették.

Az utóbbi évtizedekben a környezetvédelem problémái a katalitikus vizsgálatokat egyre nagyobb mértékben motiválják. Kutatóink vizsgálják az erre alkalmas volfrám- és molibdén-oxidokon a *kénmegkötődés, ill. -eltávolítás egyensúlyait*.³⁵ S izotópos nyomjelzéssel számos, különböző módosítókat is tartalmazó kétfémes hidroszulfuráló katalizátoron a reverzibilisen, ill. az irreverzibilisen megköthető

kén mennyiségeit határozták meg, ill. a katalizátor kéntartalma és aktuális katalitikus aktivitása közötti kapcsolatot tanulmányozták. A kéncseré és a hidrogén kéntelenítésben mutatózó aktivitás párhuzamos mutató ^{40, 67-71}.

Mintegy 10 éve folynak *katalitikus környezetvédelmi kutatások* olyan katalizátorok előállítására, amelyek aktívak illó szerves anyagok (VOC) teljes oxidációjában, illetve nitrogén-oxidok bontásában. E területen is a kétfémes katalizátorok bizonyultak kiemelkedő jelentőségűnek: pl. NO_x bontásában Pt-Cu-ZSM-5 katalizátorok fém- és savas helyei együttesen felelősek az aktivitásért ^{72, 73}.

Az Intézet az elmúlt évtizedben jelentős munkát végzett a kémiai és nukleáris reaktorokra is alkalmazható *tanuló számítógépi algoritmusok* elmélete, fejlesztésük és alkalmazásuk területén. Így például globálisan stabilis tanuló szabályozó algoritmust hoztak létre biológiai párhuzamok alapján. A kifejlesztett algoritmusokat pl. adaptív optikához, femtoszekundumos impulzusformálásra, vegyi reaktor szabályozására, kvantumrendszerek szabályozására vagy autonóm robot fejlesztésre használták ⁷⁴⁻⁷⁷.

A sugárzások fizikai- és kémiai hatásainak megismerésére irányuló kutatások az 1960-as évek elején kezdődtek két β-sugárforrás segítségével. 1968-ban az Intézet egy igazi nagy-berendezést, felületi jellegű besugárzásokra is alkalmas 3 PBq (80.000 Ci) névleges aktivitású ⁶⁰Co-γ besugárzó berendezést épített. Ez akkor Középeurópa legnagyobb aktivitású sugárforrása volt ⁷⁸. Az itt szerzett tapasztalatokkal indult el a hazai ipari besugárzástechnika, melynek története jól példázza azt, hogy érdemes a tudományba, műszaki fejlesztésbe beruházni, hiszen a beruházás megtérülhet. Ma az országban két nagy ipari besugárzó-berendezés működik, az Izotópinvézet Kft nagyaktivitású ⁶⁰Co sugárforrásokat gyárt és besugárzó berendezéseket exportál.

A sugártechnológiához kapcsolódik a *sugárdózismérési* fejlesztő munka. Az Intézet hírnevét jelentősen öregbítette az alkoholos klórbenzol doziméterrel kapcsolatos fejlesztés ⁷⁹. Klórbenzol alkoholos oldatát besugározva, nagy hozammal képződik sósav, mely koncentrációjának mérése képezi a dozimetria alapját. A koncentrációt korábban titrálással határozták meg. A Radelkisz által gyártott oszcillitratort felhasználva az Intézetben olyan módszert fejlesztettek ki, amelynél a dózis-meghatározás nagyfrekvenciás vezetőképességi méréssel az ampulák felnyitása nélkül elvégezhető. A módszert a világ sok nagy besugárzó-berendezésénél alkalmazzák. Az elterjedtségét az is mutatja, hogy a módszerrel amerikai szabvány is foglalkozik, mely külön említi a

magyar intézet nevét ⁸⁰. Újabban a folyadék-állapotú doziméterek (pl. terazólium sók oldatai ⁸¹) mellett szilárd fázisú spektrofotometriásan (pl. polimerizálódó GAFCHROMIC ⁸²), vagy fluorimetriásan (pl. LiF alapú SUNNA ⁸³) kiértékelhető filmdoziméterek alkalmazási lehetőségeit is kutatják.

Régóta ismert, hogy a természetben található kristályok egy részében sugárzás hatására energiacsapidák alakulnak ki, amelyek energiát gyűjtenek be, ezt hosszú időn keresztül tárolják, majd felmelegítés hatására *termolumineszcens fény* formájában kibocsátják azt. Ennek meg-előlen a vulkáni kőzetek keletkezésekor, vagy az agyagedények kiégetésekor - nagy hőmérsékleten - a kristályos szemcsék „TL órája nullázódik”, majd a környezet ionizáló háttér sugárzásának hatására a TL kronométer újra jární kezd. Az elvet az Intézetben személyi dozimetriai célra rutinszerűen használják ⁸⁴⁻⁸⁶, így például Al₂O₃ alapú dozimétert fejlesztettek ki és szabadalmaztattak ⁸⁷. A dozimétereket a NASA is alkalmazta űrhajóin. Most a dozimétereket a Paksi Atomerőmű primerkörében uralkodó dózisviszonyok feltérképezéséhez használják. A munka fontos részét képezi a kristályban keletkező hibahelyek jellegének kísérleti és elméleti vizsgálata is ⁸⁸⁻⁹⁰.

A *régi kerámiák termolumineszcenciáját* először 1960-ban detektálták. Az Intézet egyik munkatársa 1976-tól régészekkel együttműködve vizsgálta a legnagyobb magyarországi rézkori temető (Tiszapolgár) TL időrendjét, továbbá öt hazai és egy horvátországi lelőhelyről származó egyes kerámiákat. A vizsgált korok időszámításunk előtt 2960-4920 év közötti időknak adódtak és hibahatáron belül egyeztek más mérési módszerekkel és a régészeti becslésekkel ⁹¹⁻⁹³.

A *sugárhatáskémiai kutatások* központjában, hasonlóan a katalízis-kutatásokhoz több évtizeden keresztül a szénhidrogén radiolízis állt. Tehát a szénhidrogén-kémia a kutatásokhoz itt is háttérrel jelentett. Ebben a témában a 80-as évek elején jelent meg az Intézet kutatóinak tollából az Elsevier (Amsterdam) és az Akadémiai Kiadó közös gondozásában a Radiolysis of Hydrocarbons című monográfia, mely a terület meghatározó kincsesára ⁹⁴. A munkát oroszra is lefordították. Szénhidrogénkémiai vizsgálatok legfontosabb tapasztalata az, hogy a molekula válasza az energiaközlésre meglehetősen szelektív, annak ellenére, hogy a sugárhatáskémiai primer ionizáló részecske, a foton, gyorsított elektron, gyorsított nehézrészecske stb. energiája 4-7 nagyságrenddel nagyobb a kémiai kötések energiájánál. A bomlás termékeloszlása kis szerkezetbeli, kötési energiabeli különbségeket is visszatükröz. Ez arra vezethető vissza, hogy az energialeadás megle-

hetősen kis csomagokban történik és a molekulák többsége csupán a gerjesztési vagy ionizációs energiának megfelelő energiát vesz fel. Ez még a rendkívül nagy energiára felgyorsított nehézrészecskék, pl. 20 MeV energiára gyorsított szénionok energialeadására is igaz. Egy ilyen részecske 1 nm úton mintegy 500 eV energiát ad le. Az energiát elektromos kölcsönhatások révén meglehetősen nagy sugárú körben közli, így az egy molekula által felvett energia viszonylag kicsi lehet⁹⁵⁻¹⁰¹.

Az Intézetben 1985-ben az ENSZ Oktatási és Kulturális Fejlesztési Alapja, a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség és a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával *impulzus radiolízis mérőlaboratórium* létesült. A berendezés 4 MeV-es lineáris elektrongyorsítóval üzemel, mellyel 80 - 2600 ns időtartam közötti elektron impulzusok állíthatók elő. A mintában rövid idő alatt elnyeletett energia hatására keletkező köztitermékek fényemissziójuk, vagy fényabszorpciójuk alapján figyelhetők meg. A berendezés már a kezdetek óta számítógép-vezérelten, automatikus adatfeldolgozással működik¹⁰².

Az impulzus radiolízis kutatások egyik fontos területe az akrilát és akrilamid típusú monomerek sugárzásiniciált polimerizáció-kinetikájának vizsgálata vízben és szerves oldószerekben. Megállapították, hogy vizes oldatokban a víz radiolíziséből származó hidratált elektron, hidroxil gyök és hidrogén atom köztitermékek nagy sebességgel reagálnak a monomerrel miközben α -karboxialkil típusú gyök keletkezik, mely azután polimerizációt indíthat el¹⁰³. Szerves oldószerekben az α -karboxi-alkil típusú gyök az oldószer gyök és a monomer gyök reakciójával alakul ki¹⁰⁴. A kinetikai görbékhez történő illesztéssel a sebességi együtthatók határozhatók meg. Nagyszámú monomerre megállapították a polimerizáció kezdeti lépései, az iniciálás, a láncfolytatás és a lánczárás sebességi együtthatóit.

Számos akrilát típusú monomer polimerizációjával hidrogél állítható elő¹⁰⁵⁻¹⁰⁷. A sugárzásos polimerizáció előnye, hogy nem szükséges hozzá iniciátor, ami a humán alkalmazásoknál előnyös. A hidrogélek jelentős része ún. intelligens hidrogél, a környezet pH vagy hő változására esetenként 100-szoros térfogatváltozással válaszol. Meghatározták számos hidrogél kémiai és fizikai jellemzőit, és orvosokkal közösen résztvettek lassú gyógyszer-adagolás megvalósítására vonatkozó kísérletekben. Újabb kutatási terület a hidrogél nanogömbök előállítása. A nanogömbökhöz különféle bio-molekulák, például proteinek köthetők, és ez a módszer felhasználható egyes betegségek, így a malária kimutatására¹⁰⁸.

Az impulzus radiolízis vizsgálatok jól alkalmazhatók egyes környezetvédelemmel összefüggő

kérdések megválaszolásához. Így például megállapították, hogy a felszíni vizeket gyakran szennyező fenolok gyökös oxidációjának első lépéseként fenoxil gyök keletkezik. Ezek egymás közti reakciói kinon típusú vegyületeket eredményeznek, amelyek biodegradációja gyorsabb, mint a fenoloké^{109,110}.

Az Intézetben radioaktív anyagok szétválasztásához alkalmazható zirkóniumfoszfát alapú rendkívül sugárzásálló ioncserélők vizsgálatával is foglalkoznak¹¹¹.

A *prompt-gamma aktivációs analízisen* (PGAA) alapuló munka a módszert tekintve a fizikai, az eredményt tekintve a kémiai kutatásokhoz sorolható. Lényege: a szobahőmérsékletű, vagy annál kisebb hőmérsékletű neutronokat legtöbb atommag nagy hatáskeresztmetszettel fogja be. A befogáskor prompt gamma sugárzás keletkezik, mely jellemző az elem adott izotópjára. Tehát a módszer a közismert neutron aktivációs analízis rokona, azzal a különbséggel, hogy a neutron aktivációs analízisnél a készletetett (a radioaktív bomlásból származó) a PGAA-nál pedig a prompt gamma sugárzást méri^{112, 113}. A méréseket a Budapesti Kutatóreaktor Műszerközpontjához telepített berendezésén végzik¹¹⁴. A neutronokat a reaktor belsejéből mintegy 30 m távolságú neutronvezetők segítségével vezetik el, azért hogy a háttérsugárzást csökkentsék. A vezető négyzet keresztmetszetű, belsejét tükrök borítja, ahol a hideg neutronok, mint a fény esetében is reflexiót szenvednek. A hűtés 1999 végéig szobahőmérsékletre történt, ekkortól Európai Közöségi, Nemzetközi Atomenergia Ügynökségi és OTKA támogatással elkészült a cseppfolyós hidrogénnel működő hűtőberendezést használják.

PGAA-sel majdnem minden elem meghatározható, azonban az érzékenység erősen eltérő: jó esetben ppm-es érzékenység érhető el. Az eltérő érzékenység néha előnyt is jelent pl. ha egy rosszul analízálható elem jól analízálható szennyezőit kell meghatározni. Nagyon fontos a mintaelőkészítés egyszerűsége (gyakorlatilag nincs), a minták újbóli felhasználásának lehetősége. A módszert eddig például fémekben oldott hidrogén, vagy a fullerén szennyezőinek meghatározásához, régészeti és talajtani minták analíziséhez alkalmazták. Meghatározták egy Hegyeshalom közelében feltárt II-IV. századi temető sírjaiból előkerült bronz ruhacsatokban a réz és a cink arányát. Az összetétel meghatározása elősegítette a leletek korcsoportokba sorolását¹¹⁵. Nagy munkát jelentett a PGAA-hez használható, saját méréseken alapuló könyvtár összeállítása¹¹².

Az Intézetben folyó fizikai kutatások egyik meghatározó területe mintegy 35 éve a *stabilis atommagok izomereinek γ -gerjesztése és γ -bomlá-*

sa (γ, γ'). Az izomerek élettartama rendkívül széles időtartományt fog át, amely 1.2×10^{15} évig ($^{180}\text{Ta}^m$) terjed ¹¹⁶. A gerjesztést a hazai radioaktív sugárforrások gamma sugaraival, továbbá a már említett 4 MeV-es impulzus üzemi lineáris gyorsító elektronjainak fékezési sugárzásával, valamint külföldön különböző, egészen 50 MeV-ig terjedő energiájú gyorsítók elektronjainak fékezési sugárzásával végezték. A kutatások eredményeképpen több száz izomer előállítási hatáskeresztmetszetet, aktivációs nívóenergiát és élettartamot határoztak meg ¹¹⁶⁻¹¹⁸.

A gyakorlati alkalmazás terén kezdetben különös jelentőséggel bírt az a tény, hogy ez volt az egyetlen olyan mérési módszer, amellyel megállapítható volt a nagyintenzitású γ -besugárzások hatására a termékben keletkezett radioaktivitás (izomeraktivitás) mértéke ¹¹⁹. A FAO a nagydózisú élelmiszer besugárzások ajánlásainál ezt vette figyelembe.

Egy további alkalmazás a numizmatikai területen keltett elismerést. Munkatársaink kimutatták a Mátyás király kori aranyérmék vizsgálata során az akkori hamisítás egyik módját is ¹²⁰.

Az újabb alkalmazások terén az utóbbi tíz évben a γ -gerjesztéseknek az asztrofizikai nukleosintézisben játszott szerepét, az univerzum egyes szakaszai kialakulásának modellezését, a kozmikus óra és termométer alkalmazhatóságát vizsgálták. Az univerzum igen intenzív foton-tengere lehetővé teszi, hogy a jövőben új lendületet kapjanak további rész-kérdések vizsgálatai is ¹¹⁶.

Az izomergerjesztéssel kapcsolatos munkák hozzájárultak azokhoz az ugyancsak a kezdeti erőfeszítésekhez, amelyek a gamma lézer (grézer) kifejlesztésében a közelmúltban váltak időszerűvé. Az a tény, hogy a fénykvantum energiája 3 eV körüli érték, míg a szóba jöhető gamma kvantum energiája 10^2 - 10^5 eV nagyságrendű, óriási lehetőségeket rejt magában az informatika áramlásában és számos más területen. A kecsegtető nagy előnyök elérése azonban még rendkívüli nagy erőfeszítéseket igényel, mind tudományos vonatkozásban, mind a technológiai fejlesztések terén ¹¹⁶.

A (γ, γ') gerjesztések során is használt nagy felbontóképességű gamma-spektrometriával roncsolásmentes módszert fejlesztettek ki *nukleáris (hasadó) anyagok izotóp-összetételének* meghatározására, azonosításukra. Az ^{235}U -hoz és ^{238}U -hoz tartozó gamma-vonalak intenzitásai ismeretében a detektálás relatív hatásfoka külön-külön meghatározható a két izotópra. A spektrum alapján egy, az Intézetben elkészített szoftver az izotóparányt is automatikusan megadja. Ennek az ún. belső kalibrációs elvnek a segítségével etalon nélkül lehet nagyon pontos meghatározásokat végezni ¹²¹.

Ezt a módszert alkalmazzák a rendőrség által lefoglalt, a *csempészből származó nukleáris anyagok* összetételének meghatározására is. Szerencsére valamennyi ilyen anyag U-minta volt (vagyis elhanyagolható toxicitású); a csempészeknél eddig talált anyagok különféle fűtőelem-tabletták voltak, valamint burkolat nélküli, ill. burkolattal ellátott fűtőelem-rudak. Valamennyi kisdúsítású ill. Természetes vagy soványított U-t tartalmazott, és nem voltak besugározva, tehát hasadási termékeket nem tartalmaztak.

Nukleáris anyagok helyszíni roncsolásmentes vizsgálatára az Intézetben olyan módszereket fejlesztettek ki, melyek a hazai és nemzetközi ellenőrzésben (safeguards) alkalmazást nyerhetnek. Ezek olyan gamma-spektrometriai módszerek, melyekkel mind a besugárzatlan (friss reaktorüzem-anyagok) anyagok izotóp-összetétele (dúsítása) és teljes ^{235}U tartalma, mind pedig a reaktorban besugárzott anyagok reaktorfizikai paraméterei (kiegész, hűlési idő) a helyszínen meghatározhatók.

Az Intézetben hagyományai vannak a *nukleáris hulladékok elhelyezésével* kapcsolatban végzett izotóptranszport vizsgálatoknak is. Újabban a nagyaktivitású, kiégett atomerőműi fűtőelemek végleges elhelyezésére szolgáló tárolóhely kialakításával kapcsolatban végeznek izotópmigrációs vizsgálatokat. Egy lehetséges tárlóközvetből, a Bodai Aleurolit-formációból származó fűrómag mintákon vizsgálják ^{60}Co , ^{85}Sr , ^{137}Cs , valamint ^{125}I izotópok szorpcióját, ill. terjedését, laboratóriumi, ill. a mélységiekhez hasonló *in situ* körülmények (100 bar, 50°C) között. Az izotópokkal kb. 1 évig érintkezett fűrómag minták végeiről néhány mm vastag szeleteket vágtak le, majd az izotópok aktivitásának meghatározása után becsülték az izotópok látszólagos izotróp diffúziós állandóinak értékeit. A leggyorsabban vándorló izotóp a jód (jodid formában). Vizes közeggel érintkezett kőzetben az izotópok majdnem az oldatokban mérhető öndiffúziós sebességgel terjednek, de vízzel nem érintkező, 100 bar nyomásnak kitett kőzetben is terjedést észleltek, igaz, két nagyságrenddel kisebb sebességgel ¹²².

Az Intézetnek voltak és bizonyos területeken még ma is vannak *hatósági, illetve hatósági jellegű feladatai*, és az e tevékenység gyakorlásához szükséges háttérkutatások. Az Intézet 1996-ig mint első fokú hatóság látta el a radioaktív anyagok forgalmazásával, csomagolásával és nyilvántartásával kapcsolatos államigazgatási feladatokat. Az 1996-évi atomtörvény hatályon kívül helyezte a hatósági feladatok elvégzésére kötelező az atomtörvény alapján kiadott, korábbi minisztertanácsi rendeletet, és ezzel az Intézet hatósági jogkörének egy része megszűnt.

Ettől kezdve az előbb említett államigazgatási ügyekben - mint első fokú hatóság - az Országos Atomenergia Hivatal az illetékes: a vonatkozó jogszabályi keretek között, ill. különböző szerződésekben foglaltak alapján, az Intézet az Országos Atomenergia Hivatal részére szakértői feladatokat lát el. Így a radioaktív anyagok szállításával, csomagolásával kapcsolatos engedélyeket az Országos Atomenergia Hivatal az Intézet szakvéleménye alapján adja ki. A szakmai háttér alapját egy külső és belső tagokból álló, ad hoc bizottság tevékenysége képezi.

Az Országos Atomenergia Hivatal megbízásából az Intézet vezeti az *országos izotópnylvántartást*, egyben ellát helyszíni ellenőrzési feladatokat is. Ellenőrzi a helyi nyilvántartások vezetését és - az un. mentesített anyagmérleg-körzetben - a nukleáris anyagok tárolására vonatkozó szabályok betartását.

Az első Intézeti publikációk 1961-ben jelentek meg: számszerint 5. Majd a publikációk számában fokozatos emelkedés volt tapasztalható. Az elmúlt 20 évben az éves átlagos publikációs szám nagyjából állandó, 100 körüli. Meg kell jegyezni, hogy a számok mögött erősen eltérő kutatói létszámok vannak: például a 80-as évek közepe óta a kutatói létszám mintegy a felére csökkent. A megalakulás óta az intézeti dolgozók mintegy 3300 tudományos dolgozatot készítettek. Az Intézet kutatói mindig is kivették a részüket az oktatásból: az Intézetben jelenleg 3 kihelyezett egyetemi tanszék működik.

Mint az elmondottakból is kiderül, az Intézet rendkívül szerteágazó tevékenységet végez. Úgy érzem szükség van ránk. Meg szeretném köszönni az Intézet dolgozóinak munkáját és mindazoknak, így elsősorban a Magyar Tudományos Akadémiának, az Országos Atomenergia Hivatalnak segítségét amit munkánkhoz kaptunk.

Összafoglalás

A munka az MTA KK Izotóp és Felületkémiai Intézet 40. évfordulójára készült és az elmúlt időszak fontosabb tudományos eredményei mellett ismerteti a jelenleg folyó kutatásokat. Így beszámol az Intézetben folyó katalitikus, spektroszkópiai, sugárhatókémiai, magfizikai és nukleáris ellenőrzési kutatásokról.

40 years of the Institute of Isotope and Surface Chemistry of the CC HAS.

L. Wojnárovits

The paper was prepared for the 40 years anniversary of the Institute. It gives an account on the

main scientific results of the past as well as on the present activities in the fields of catalysis, spectroscopy, radiation chemistry, nuclear physics and safeguards.

IRODALOM

- ¹ P. Tétényi: Kém. Közl., 32. 321. 1969.
- ² Á. Veres: Izotóptechnika, 22. 223. 1979.
- ³ L. Zsinka: Magy. Kém. Folyóirat, közlés alatt.
- ⁴ P. Tétényi, L. Guzzi, L. Babernics, K. Schöchter: In "Industrial Uses of Large Radiation Sources", V. 2. 57. IAEA, 1963.
- ⁵ E.H. Taylor: Adv. Catal., 18. 111. 1968.
- ⁶ T. Baird, Z. Paál, S.J. Thomson: J. C. S., Faraday Trans. I, 69. 1237. 1973.
- ⁷ Z. Paál, P. Tétényi: J. Nature, 267. 234. 1977.
- ⁸ Z. Paál, P. Tétényi: In "Specialist Periodical Reports on Catalysis", V. 5, 80. Roy. Soc. Chem., Burlington House, London, 1982.
- ⁹ P. Tétényi, L. Guzzi, Z. Paál: Acta Chim. Hung., 83. 37. 1974.
- ¹⁰ P. Tétényi: Catal. Today, 17. 439. 1993.
- ¹¹ L. Guzzi: In "Proc. 9th Int. Cong. Catal.", Vol. 5, 114. Elsevier, Amsterdam, 1989.
- ¹² L. Guzzi, F. Solymosi, P. Tétényi: New Frontiers in Catalysis, Proc. 10th Int. Congr. Catal., Akadémiai Kiadó-Elsevier, Budapest-Amsterdam, 1992.
- ¹³ Z. Pásztó, G. Pető, E. Horváth, A. Karacs, L. Guzzi: J. Phys. Chem. B., 101. 2109. 1997.
- ¹⁴ A.S. Eppler, G. Rupprechter, L. Guzzi, G. Somorjai: J. Phys. Chem. B, 101. 9973. 1997.
- ¹⁵ T. Katona, L. Guzzi, G. A. Somorjai: J. Catal., 135. 434. 1992.
- ¹⁶ G. Pető, G. Molnár, G. Bogdányi, L. Guzzi: Catal. Lett., 26. 383. 1994.
- ¹⁷ G. Bogdányi, Z. Zsoldos, G. Pető, L. Guzzi: Surf. Sci., 306, L563. 1994.
- ¹⁸ R. Sundararajan, G. Pető, E. Koltay, L. Guzzi: Appl. Surf. Sci., 90. 165. 1995.
- ¹⁹ J. Mink, G. Keresztury, T. Szilágyi, P. Tétényi: J. Mol. Struct., 293. 283. 1993.
- ²⁰ G. Keresztury, J. Mink, J. Kristóf: Anal. Chem., 67. 3782. 1995.
- ²¹ J. Kristóf, S. Daolio, C. Piccirillo, B. Facchin, J. Mink: Surf. Sci., 348. 287. 1996.
- ²² J. Mink, G. Keresztury: Encyclopedia of Pharmaceutical Technology, Vol. 14, 123. Ed: J. Swarbrick and J.C. Boylan, Marcel Dekker, Inc., New York. 1996.
- ²³ J. Mink, G. Keresztury, J. Kristóf, J. Mihály: FT-IR and FT-Raman Study of Surface and Thin Layers. In "Interfacial Sciences in Germanic

- Joining". Eds: A. Bellosi, T. Kosmac, P. Antoni, 233. Kluwer, Dordrecht, 1998.
- ²⁴ J. Bódis, Cs. Németh, J. Mink, G. Keresztury, P. Tétényi: *J. Mol. Struct.*, 410-411. 179. 1997.
- ²⁵ R. Fournier, I. Pápai: *Infrared Spectra and Binding Energies of Transition Metal-Monoligand Complexes*. In "Rec. Adv. Comp. Chem." - Vol. 1, Ed. D.P. Chong, World Scientific, 219. 1995.
- ²⁶ I. Pápai: *J. Chem. Phys.*, 103. 1860. 1995.
- ²⁷ A. Stirling: *J. Chem. Phys.*, 104. 1254. 1996.
- ²⁸ I. Pápai, A. Stirling: *Chem. Phys. Lett.*, 253. 196. 1996.
- ²⁹ A. Stirling, I. Gunji, A. Endou, Y. Oumi, M. Kubo, A. Miyamoto: *J. C. S., Faraday Trans.*, 93. 1175. 1997.
- ³⁰ A. Endou, A. Stirling, R. Yamauchi, E. Broclawik, M. Kubo, A. Miyamoto, K. G. Nakaruma, M. Kitajima: *Surf. Sci.*, 387. 59. 1997.
- ³¹ M. Kubo, Y. Oumi, R. Miura, A. Fahmi, A. Stirling, A. Miyamoto: *J. Chem. Phys.*, 107. 4416. 1997.
- ³² I. Pápai, J. Mascetti, R. Fournier: *J. Phys. Chem. A*, 101. 4465. 1997.
- ³³ Y. K. Lee, L. Manceron, I. Pápai: *J. Phys. Chem. A*, 101. 9650. 1997.
- ³⁴ F. Galan, M. Fouassier, M. Tranquille, J. Mascetti, I. Pápai: *J. Phys. Chem. A*, 101, 2626. 1997.
- ³⁵ A. Stirling: *J. Phys. Chem. A*, 102. 6565. 1998.
- ³⁶ Z. Paál: *Catal. Today*, 12. 297. 1992.
- ³⁷ Z. Paál: *Basic Catalytic Naphtha Reforming on Metal Catalysts*, Eds: G.J. Antos, A.M. Aitani, J.M. Parera, Chapter 2., 19. Marcel Dekker, Inc., 1995.
- ³⁸ Z. Paál, Z. Zhan, I. Manninger, W.M.H. Sachtler: *J. Catal.*, 155. 43. 1995.
- ³⁹ Z. Paál: *J. Catal.*, 156. 301. 1995.
- ⁴⁰ M. Dobrovolszky, Z. Paál, P. Tétényi: *Appl. Catal. A*, 142. 159. 1996.
- ⁴¹ Z. Paál, A. Györy, I. Uszkurat, S. Olivider, M. Guérin, C. Kappenstein: *J. Catal.*, 168. 164. 1997.
- ⁴² Z. Paál, G. Somorjai: *Promoters and Poisons, Chapter 2.*, In "Handbook of Heterogeneous Catalysis", Eds. G. Ertl, H. Knözinger, J. Weitkamp, Vol. 3, 1084. VCH-Wiley, 1997.
- ⁴³ Z. Hlavathy, Z. Paál, P. Tétényi: *J. Catal.*, 166. 118. 1997.
- ⁴⁴ Z. Paál, Z.O. Zhan: *Langmuir*, 13. 3752. 1997.
- ⁴⁵ Z. Paál, M. Muhler, K. Matusek: *J. Catal.*, 175. 245. 1998.
- ⁴⁶ Z. Hlavathy, P. Tétényi: *Surf. Sci.*, 410. 39. 1998.
- ⁴⁷ L. Guzzi: *Catal. Rev. Sci. Eng.*, 23. 329. 1981.
- ⁴⁸ L. Guzzi, Z. Schay, K. Lázár, A. Vizi, L. Markó: *Surf. Sci.*, 106. 516. 1981.
- ⁴⁹ L. Guzzi: *J. Mol. Cat.*, 25. 13. 1984.
- ⁵⁰ L. Guzzi: In "Metal Cluster in Catalysis", Eds. B.C. Gates, L. Guzzi and H. Knözinger, 547, Elsevier, Amsterdam, 1986.
- ⁵¹ A. Beck, S. Dobos, L. Guzzi: *Inorg. Chem.*, 22. 3220. 1988.
- ⁵² L. Guzzi, A. Sárkány: In "Catalysis", Vol. 11, Specialist Periodical Reports, Ed.: J.J. Spivey, 318. Roy. Soc. Chem., London. 1994.
- ⁵³ L. Guzzi, R. van Santen, K.V. Sarma: *Catal. Rev. - Sci. Eng.*, 38. 249. 1996.
- ⁵⁴ L. Guzzi, K.V. Sarma, L. Borkó: *Catal. Lett.*, 39. 43. 1996.
- ⁵⁵ L. Guzzi, K.V. Sarma, L. Borkó: *J. Catal.*, 167. 495. 1997.
- ⁵⁶ L. Guzzi, R. Sundararajan, Zs. Koppány, Z. Zsoldos, Z. Schay, F. Mizukami, S. Niwa: *J. Catal.*, 167. 482. 1997.
- ⁵⁷ L. Guzzi, Z. Könya, Zs. Koppány, G. Stefler, J. Kiricsi: *Catal. Lett.*, 44. 7. 1997.
- ⁵⁸ A. Sárkány, Z. Zsoldos, G. Stefler, J.W. Hightower, L. Guzzi: *J. Catal.*, 157. 179. 1995.
- ⁵⁹ A. Sárkány, Z. Schay, Gy. Stefler, L. Borkó, J.W. Hightower, L. Guzzi: *Appl. Catal.*, 124. L181. 1995.
- ⁶⁰ A. Sárkány: *Appl. Catal. A.*, 165. 87. 1997.
- ⁶¹ A. Sárkány, Gy. Stefler, J.W. Hightower: *Appl. Catal.*, 127. 77. 1995.
- ⁶² A. Sárkány: *J. Catal.*, 180. 149. 1998.
- ⁶³ I. Pálkó, K. Lázár, I. Hannus, I. Kiricsi: *J. Phys. Chem. Solids*, 57. 1067. 1996.
- ⁶⁴ K. Lázár, A.M. Szeleczky, N.K. Mal, A.V. Ramaswamy: *Zeolites*, 19. 123. 1997.
- ⁶⁵ K. Lázár, G. Lejeune, R.K. Ahedi, S.S. Shevade, A.N. Kotasthane: *J. Phys. Chem. B*, 102. 4865. 1998.
- ⁶⁶ K. Lázár, A.M. Szeleczki, F. Notheisz, Á. Zsigmond: *Stud. Surf. Sci. Catal.*, 94. 720. 1995.
- ⁶⁷ M. Dobrovolszki, T. Koltai, Z. Paál, P. Tétényi: *App. Catal. A*, 166. 65. 1998.
- ⁶⁸ Z. Paál, M. Dobrovolszki, T. Korányi, P. Tétényi: *Kém. Közl.*, 80. 13. 1995.
- ⁶⁹ T. Koltai: Ph.D. Tézis, Veszprémi Egyetem, 1999.
- ⁷⁰ M. Dobrovolszki, Z. Paál, P. Tétényi: *Appl. Catal. A*, 142. 159. 1996.
- ⁷¹ M. Dobrovolszki, K. Matusek, P. Tétényi: *React. Kinet. Catal. Lett.*, 59. 269. 1996.
- ⁷² L. Borkó, Z. Schay, L. Guzzi: *Appl. Catal.*, 130. 157. 1995.
- ⁷³ Z. Schay, Knözinger H., Pál-Borbély G., L. Guzzi: *Appl. Catal. B*, 18. 263. 1998.

- ⁷⁴ J. Somló, D.J. Tannor: *J. Phys. Chem.*, **99**, 2552. 1995.
- ⁷⁵ B. Space, H. Rabitz, A. Lőrincz, P. Moore: *J. Chem. Phys.*, **105**, 9515. 1996.
- ⁷⁶ G.J. Tóth, A. Lőrincz, H. Rabitz: *J. Mod. Optic.*, **44**, 2049. 1997.
- ⁷⁷ B. Amstrup, G.J. Tóth, G. Szabó, H. Rabitz, A. Lőrincz: *J. Phys. Chem.*, **99**, 5206. 1995.
- ⁷⁸ J. Hirling, V. Stenger: *Energ. és Atomtechnika.*, **22**, 446. 1969.
- ⁷⁹ Zs. Horváth, É. Bányai, G. Földiák: *Radiochim. Acta.*, **13**, 150. 1970.
- ⁸⁰ ASTM E 1538 - 93 (USA szabvány).
- ⁸¹ A. Kovács, L. Wojnárovits, W.L. McLaughlin, S.E. Ebrahim Eid, A. Miller: *Radiat. Phys. Chem.*, **47**, 483. 1996.
- ⁸² W.L. McLaughlin, M. Al-Sheikhly, D.F. Lewis, A. Kovács, L. Wojnárovits: In "Irradiation of Polymers, Fundamentals and Technological Applications". Eds R.L. Clough, S.W. Shalaby, ACS Symp. Ser. 620, 153. Amer. Chem. Soc., Washington D.C., 1996.
- ⁸³ W.L. McLaughlin, J.M. Puhl, A. Kovács, M. Baranyai, I. Slezsák, M.C. Saylor, S.D. Miller, M. Murphy: *Radiat. Phys. Chem.* **55**, 767. 1999.
- ⁸⁴ Á. Pető, Gy. Uhrin (Eds): *Proc. 11th Int. Conf. Solid State Dosim., Radiat. Protect. Dosimetry*, **65** (1-4), 66(1-4) 1996.
- ⁸⁵ M. Osvay, T. Biró: *Aluminium Oxide*, in "Termoluminescent Materials", Prentice Hall Inc. USA, 243. 1993.
- ⁸⁶ M. Osvay: *Radiat. Prot. Dosim.*, **66**, 217. 1996.
- ⁸⁷ M. Osvay, L. Sztankovics, Gy. Podhorányi, T. Biró, F. Golder: *Eljárás alumínium-oxid alapú termolumineszcens sugárzásdetektor előállítására. Magyar Szabadalom*, 201 611 (1991).
- ⁸⁸ Á. Pető: *Radiat. Prot. Dosim.*, **65**, 123. 1996.
- ⁸⁹ Á. Pető, A. Kelemen, N. Ötvös: *J. Lumin.*, **72-74**, 778. 1997.
- ⁹⁰ L. Kovács, S. Erdei, Á. Pető, J. Vandlik, P.D. Townsend, F.W. Aigber: *J. Appl. Phys.*, **82**, 2567. 1997.
- ⁹¹ L. Benkő: *Mitt. Arheol. Inst. Ung. Akad. Wissen.*, **14**, 307. 1985.
- ⁹² L. Benkő, I. Bognár-Kutzián: *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, **14**, 287. 1988.
- ⁹³ L. Benkő, I. Bognár-Kutzián: *Radiat. Prot. Dosim.*, **47**, 665. 1993.
- ⁹⁴ Gy. Cserép, I. György, M. Róder, L. Wojnárovits: *Radiolysis of Hydrocarbons*, Ed. G. Földiák, Akadémiai Kiadó-Elsevier, Budapest-Amsterdam, 1981. *Radiacionnaja Himija Uglevodorodov, Energoatomizdat. Moszkva*, 1985.
- ⁹⁵ G. Földiák, M. Róder, L. Wojnárovits: *J. Phys. Chem.*, **98**, 6046. 1994.
- ⁹⁶ L. Wojnárovits, J.A. LaVerne: *J. Phys. Chem.*, **98**, 8014. 1994.
- ⁹⁷ J.A. LaVerne, L. Wojnárovits: *J. Phys. Chem.*, **98**, 12635. 1994.
- ⁹⁸ L. Wojnárovits, J.A. LaVerne: *J. Phys. Chem.*, **99**, 3168. 1995.
- ⁹⁹ J.A. LaVerne, J. Wojnárovits: *J. Phys. Chem.*, **99**, 9862. 1995.
- ¹⁰⁰ L. Wojnárovits, J.A. LaVerne: *J. Phys. Chem.*, **99**, 11292. 1995.
- ¹⁰¹ J.A. LaVerne, S.A. Pimblott, L. Wojnárovits: *J. Phys. Chem. A*, **101**, 1628. 1997.
- ¹⁰² G. Földiák, P. Hargittai, L. Kaszanyiczki, L. Wojnárovits: *J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles*, **125**, 19. 1988.
- ¹⁰³ Á. Biró, E. Takács, L. Wojnárovits: *Macromol. Rapid Commun.*, **17**, 353. 1996.
- ¹⁰⁴ E. Takács: *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **232**, 121. 1998.
- ¹⁰⁵ Á. Sáfrány: *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, **131**, 376. 1997.
- ¹⁰⁶ F. Martellini, O. Higa, E. Takács, Á. Sáfrány, M. Yoshida, R. Katakai: *Radiat. Phys. Chem.*, **52**, 295. 1998.
- ¹⁰⁷ Á. Sáfrány: *Radiat. Phys. Chem.*, **46**, 203. 1995.
- ¹⁰⁸ Á. Sáfrány: *Radiat. Phys. Chem.*, **55**, 121. 1999.
- ¹⁰⁹ A. Kovács, K. Gonter, G. Földiák, I. György, L. Wojnárovits: *ACH Models in Chem.*, **134**, 453. 1997.
- ¹¹⁰ M. Róder, L. Wojnárovits, G. Földiák, S.S. Emmi, G. Beggato, M. D'Angelantonio: *Radiat. Phys. Chem.*, **54**, 475. 1999.
- ¹¹¹ L. Szirtes, A.M. Szelezky, E. Kuzmann: *Solid State Ionics*, **97**, 223. 1997.
- ¹¹² T. Belgya, G. Molnár, B. Fazekas, J. Östör: *Report INDC(NDS)-367, IAEA, Vienna*, 1997.
- ¹¹³ G. Molnár, R.M. Lindstrom: *III. Nuclear Reaction Prompt Gamma-Ray Analysis. In "Nuclear Techniques in Mineralogy and Geology"*. Eds. A. Vértes, K. Nagy, K. Süveg, 145. Plenum, New York, 1998.
- ¹¹⁴ G. Molnár, T. Belgya, L. Dabolczy, B. Fazekas, Zs. Révay, Á. Veres, I. Bikát, Z. Kiss, J. Östör: *J. Radionucl. Chem.*, **215**, 111. 1997.
- ¹¹⁵ Zs. Kasztovszki, Zs. Révay, T. Belgya, B. Fazekas, J. Östör, G.L. Molnár, A. Vaday, A. Figler: *Proc. 31st Int. Symp. Arheol.*, Budapest, 1999.
- ¹¹⁶ A. Veres: *Stabil atommagok izomerjeinek gerjesztése, asztrofizikai és lézertechnikai alkalmazásai. Akadémiai Kiadó, Budapest, megjelenés alatt.*

- ¹¹⁷ *L. Lakosi: Z. Phys. A, 356. 155. 1996.*
- ¹¹⁸ *N.X. Khanh, L. Lakosi, I. Pavlicsek: Phys. Rev., C 51. 1676. 1995.*
- ¹¹⁹ *A. Veres: J. Radioanal. Chem., 38. 155. 1977.*
- ¹²⁰ *A. Veres, I. Pavlicsek: J. Radioanal. Chem., 69. 325. 1982.*
- ¹²¹ *Tam N.C., K. Baricza, L. Lakosi: Radiat. Meas., 28. 781. 1997.*
- ¹²² *K. Lázár, J. Megyeri, L. Riess, L. Szirtes: Study of Migration of Radionuclides in Claystone Considered as Prospective Media for Nuclear Waste Disposal. IAEA CPR Report, 1998.*