

Méréstechnikai és módszertani fejlesztések a röntgenspektrometria analitikai alkalmazásaiban

PhD téziszfüzet

Gerényi Anita

Témavezető: Dr. Szalóki Imre

Nukleáris Technikai Intézet
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Budapest

2018

A kutatások előzményei

A röntgenemisszió alapuló elemanalitika (XRF) mérés technikája az első alkalmazások óta látványos technikai és módszertani fejlődésen ment keresztül. Ez a folyamat elsősorban a nagy röntgenfluxust biztosító szinkrotronok és a kis elektromos teljesítményű, léghűtéses röntgensövegek, új típusú röntgenoptikai elemek és kompakt röntgendetektorok megjelenésének, valamint a röntgenspektrometriai folyamatokat leíró elméleti modellek fejlesztésének és azok gyors, numerikus megoldását biztosító számítástechnikai eljárások és informatikai eszközrendszer megjelenésének volt köszönhető [West2016]. Ennek következtében, az utóbbi 10-20 évben a szakirodalomban közzé tett röntgenspektrometriai eredmények egyre jobb energia- és térbeli felbontással, nagyobb abszolút és relatív kimutathatósággal rendelkező XRF elemzési eljárásokról és azok alkalmazási lehetőségeiről számolnak be.

Az analitikai célokra alkalmazott szinkrotronsugárzással vagy röntgensövekkel végzett emissziós röntgenspektrometriában a jelenleg megfigyelhető egyik legfontosabb fejlesztési tendencia a „minél kisebb anyagmennyiségben, minél kisebb koncentrációban előforduló kémiai elemek kimutatása, a lehető legrövidebb mérési idő alatt” elvet követi. Az XRF analitikai technika fejlődésének egyik jelentős következménye, hogy már az anyagokat alkotó kémiai elemek mennyiségének térbeli eloszlása is mérhető, azaz 2D/3D elem térképeket lehet meghatározni olyan speciális XRF módszerekkel, mint a konfokális mikro XRF és az emissziós mikrotomográfia. Ezért a röntgenspektrometriával végzett mikroanalitika fontos jellemző paraméterei a térbeli felbontás és a vizsgált kémiai elemek kimutatási határai, amelyek értékeinek javítása a kutatások gyakori témája. Emellett erős tendencia figyelhető meg a kvantitatív analízis egyre megbízhatóbb, a 2D/3D elemzésben is alkalmazható elméleti modelljeinek kidolgozása, valamint a modellek matematikai megoldási algoritmusának fejlesztése terén. A laboratóriumi körülmények között, röntgensöves forrásokkal is elvégezhető elemzések területén a fejlesztési célokat nemcsak a „minél kisebb és minél gyorsabb” elv határozza meg, hanem olyan, az elmúlt 10-15 évben kifejlesztett, kompakt kialakítású röntgenspektrometriai eszközök jelentik, amelyek felhasználásával specializált analitikai feladatokhoz adaptált, egyedi kialakítású XRF röntgenspektrométerek hozhatók létre [Tsuji2011].

Követve a fentiekben vázolt, a röntgenspektrometriát az elmúlt 15 évben jellemző fejlesztési és kutatási trendet, ezen a területen végzett kutatómunkám eredményeit

összefoglaló dolgozatomban főként az emissziós röntgenspektrometria analitikai vonatkozású technikai és módszertani fejlesztési tevékenységemet mutatom be.

Az XRF analitika egyik unikális tulajdonsága a roncsolásmentesség, ami más műszeres analitikai módszerekkel szemben különösen alkalmassá teszi a különböző ipari vonatkozású felhasználásokban, mivel az elemzésből legtöbbször elhagyható a sokszor hosszadalmas mintaelőkészítési fázis. Egyik ilyen lehetséges felhasználási terület az atomipar, ahol az atomerőművek reaktorblokkjainak karbantartási időszakában folyamatosan szükség van hulladéknak minősülő és gyakran ismeretlen eredetű tárgyak, anyagdarabok azonosítására, amit a legegyszerűbben és leggyorsabban azok atomi összetételének in-situ XRF meghatározásával lehet elvégezni. Az XRF analízishez nem feltétlenül szükséges etalon minták használata, ami az egyik fő oka annak, hogy ezt az eljárást széles körben alkalmazzák nem laboratóriumi körülmények között is, például terepi mérésekhez. Az XRF elemzés területén végzett előzetes kutatásaink eredményeinek köszönhetően a BME NTI Nukleáris Analitikai Csoportja több felkérést kapott ennek az analitikai eljárásnak egy-egy specializált változatának kifejlesztéséhez, így az MVM PAZrt Vegyészeti Főosztályától egy K+F projekt keretében a fentiekben említett ipari-analitikai probléma egy lehetséges megoldásának kidolgozására. Ebből a célból építettünk egy saját fejlesztésű XRF+Raman spektrométert. A másik ilyen innovációs célú megkeresés az Országos Atomenergia Hivatal részéről történt, amelyben a biztosítéki feladatokhoz alkalmas, kompakt és mobil XRF berendezés és kiértékelési eljárás kifejlesztését kérték, azzal a feltétellel, hogy a berendezéssel akár radioaktív anyagokat is lehessen elemezni. A fenti fejlesztési feladatokat két, több éves időtartamú K+F+I projekt keretében oldottuk meg kifejlesztve egy kvantitatív elemanalízist lehetővé tevő modellt a röntgenspektroszkópiai folyamatok matematikai leírására. Ezen kívül a fejlesztési munka részét képezte a vizsgált anyagok kémiai elemei koncentrációját meghatározó megoldási algoritmus és a numerikus számításokat végző szoftver létrehozása MATLAB programozási környezetben. A projektek fő célkitűzése két, különböző analitikai tulajdonságokkal rendelkező XRF berendezés volt, amelyeket sikerrel meg is valósítottunk [5], [9], [10].

A röntgenanalitikai szakirodalmi információk alapján elmondható, hogy a szinkrotronsugárással végezhető elemanalitikai vizsgálatok között az utóbbi 10 évben egyre nagyobb szerepet kapott a μ XRF-CI, μ XRF-CT és XANES mérés technika. Az első két elemzési eljárásban a mikro-méretű (10-20 μ m) gerjesztő röntgensugárzás nyomvonalában és a detektor előtt elhelyezett, egy-egy

kapilláris röntgenlencsével lehetőség van anyagok elemeloszlási térképeinek 10-100 μm térbeli felbontású meghatározására [Servin2012]. Ezekről az új analitikai-technikai lehetőségekről kiderült, hogy széles körben alkalmazhatóak a különböző anyagok mikrostruktúrájának és a bennük lévő kémiai elemek 2D/3D elemeloszlásának feltérképezésére. Ezért, ezek a mikroanalitikai vizsgálati lehetőségek viszonylag gyorsan ismertté váltak és alkalmazásuk elterjedt néhány olyan társtudományban, ahol a tudományos vizsgálatokhoz esetenként szükség van az elem térképek kvantitatív kiértékelésére is, így a biológia [7], geológia [Laforce2014], archeológia és képzőművészet [[Dik2008] területén. A kvantitatív mikroelemzés problémaköre a makro XRF eljárásokhoz kifejlesztett FPM röntgenanalitikai modelleknek a μXRF -CI technikához történő adaptálását tette szükségessé elsősorban a monokromatikus szinkrotronsugárzással végezhető vizsgálatokban [Mantouvalou2014]. Ehhez a tendenciához kapcsolódott az ELTE Növényélettani és Molekuláris Növénybiológiai Tanszékével (NMNT) közös kutatási projektünk, amelynek keretén belül a kutatócsoportunk vállalt feladata növényi minták szinkrotronsugárzással végezhető 2D/3D μXRF elemanalitikai vizsgálati módszereinek kifejlesztése és a növények által tápoldatból felvett toxikus elemek (arzén) kémiai formájának meghatározására volt. Ez utóbbi elemzési feladathoz a XANES abszorpciós mérés technika egy in-vivo körülmények között is használható megoldását dolgoztuk ki.

Célkitűzések

Nukleáris ipari és hatósági K+F+I projektek keretében felkérést kaptunk egy-egy olyan röntgenfluoreszcens spektrométer kifejlesztésére és megépítésre, amely alkalmas főként atomerőművi hulladékok és nukleáris biztosítéki eredetű minták gyors és roncsolásmentes kvantitatív analízisére, függetlenül azok kémiai-fizikai formáitól. A projektek alapvető célkitűzése nemcsak az atomi összetétel meghatározása volt, hanem információt kapni a vizsgált anyag kémiai felépítéséről is. Ennek érdekében egy olyan kombinált spektrométer fejlesztését tűztük ki célul, amely az XRF elemzésen kívül Raman-vizsgálatot is képes végezni ugyanazon minta, ugyanazon felületi pontjában.

A BME NTI Nukleáris Analitikai kutatócsoportja által kifejlesztett XRF spektrométerek, illetve a HASYLAB L szinkrotron nyalábcsatornánál végzett méréseinkhez használt spektroszkópiai berendezések egymástól sok mérés technikai tulajdonságban jelentősen eltérő röntgenspektroszkópiai elemekből épültek fel. Az egyes XRF kísérleti összeállításokhoz célszerűen egy olyan kvantitatív analízisre alkalmas FPM modellt kellett létrehozni, amely moduláris

felépítésű, így viszonylag könnyen adaptálható az egyes rendszerek sajátos röntgenspektroszkópiái tulajdonságaihoz. A kidolgozott modell alapjául a konvencionális XRF elemzésben ismert FPM analitikai modell szolgált, amelyből kiindulva fejlesztettük ki a mikro-méreteken és folytonos energiaeloszlású gerjesztő röntgenspektrum esetében is alkalmazható modellt, amely akár konfokális geometriában is alkalmazható [7].

Az ELTE Növényélettani és Molekuláris Növénybiológiai Tanszékének munkatársai az arzénnek és más toxikus kémiai elemnek az uborkára, mint modellnövényre kifejtett élettani hatásait kutatják. A projekt keretében azt vizsgálják, hogy milyen biokémiai feltételek mellett lehet az arzénmérgezés növényekre gyakorolt káros hatásait csökkenteni. A látható biológiai elváltozások mellett fontos annak ismerete, hogy a növények milyen mennyiségben veszik fel a tápoldatból az egyes kémiai elemek ionjait, így pl. az arzént, illetve a felvett anyagok a növények mely részében és milyen mértékben és mennyiségi eloszlásban halmozódnak fel. A szinkrotronsugárással végzett mikroanalitikai és XANES vizsgálataink célja az uborka növény arzén okozta mérgezéssel szemben kialakított biokémiai ellenállásának vizsgálatához szükséges elemeloszlási és kémiai formákra vonatkozó mennyiségi jellemzők meghatározása volt a növények gyökerében és hipokotiljában.

A konfokális XRF analitikai technika jelenleg egyik fő nehézsége a kvantifikáció, azaz a vizsgált kémiai elemek által emittált karakterisztikus röntgensugárzás intenzitása és az elemek mennyisége a minta egy opcionálisan kiválasztott mikro-térfogató darabjában. A probléma elméleti megoldására folyamatosan újabb módszerek jelennek meg a szakirodalomban [Mantouvalou2017], de ezek többnyire csak speciális mintatípusokra és adott mérési körülményekre alkalmazhatók. A számítási eljárások többnyire túl bonyolultak, ami azzal a hátránnyal jár, hogy a numerikus approximációs eljárás nem minden esetben konvergens. Ezért kutatási célul tűztük ki egy könnyen alkalmazható, FPM alapú számítási modell és numerikus közelítő algoritmus kifejlesztését, amely segítségével lehetőség van konfokális mérések kvantitatív kiértékelésére.

Vizsgálati módszerek

A röntgen-emissziós és abszorpciós vizsgálatokat, illetve modell- és mérés technikai fejlesztéseket a BME NTI röntgencsöves forrásaival, illetve a DESY DORIS-III szinkrotron HASYLAB L nyalábcsojánál által biztosított röntgensugárással végeztük. A kutatómunka részét képezte két, különböző célokra kifejlesztett laboratóriumi XRF spektrométer építése kis elektromos

teljesítményű (4W) röntgensóvel és kompakt kialakítású SD detektorral. Mindkét analitikai berendezés makro XRF-CI elven működik. A laboratóriumi XRF berendezésekkel végzett méréseink eredményein végzett kvantitatív elemzést egy saját fejlesztésű, az FPM modell adaptált változatára kidolgozott kóddal végeztem, amely a fenti két XRF berendezésen kívül általános röntgenemissziós analitikai feladatokra is alkalmazható.

Az ELTE Növényélettani és Molekuláris Növénybiológiai Tanszékének munkatársaival közös kutatási projekt keretében vizsgáltuk a növények hipokotiljában a tápoldatból felvett arzén kémiai állapotát, valamint annak 2D mennyiségi eloszlását in-vivo és in-vitro röntgenspektrometriai technikákkal. A biológiai minták előzetes vizsgálatait a saját fejlesztésű laboratóriumi XRF spektrométerrel végeztük, amelynek eredményei segítették a szinkrotronnál végzett μ XRF, μ XRF-CI és μ XRF-CT mérések tervezését és optimalizált kivitelezését. A szinkrotronnál végzett kísérleteket a Genti Egyetem munkatársaival közösen, a szinkrotron nyalábidőkre elnyert pályázatok anyagi támogatásával végeztük, amely projektek során többféle mintapreparációs eljárást és kriogén mintahűtési technikát dolgoztunk ki. A mikroanalitikai mérések során több ezer röntgenspektrumot detektáltunk, amelyek kvantitatív kiértékeléséhez a MICROXRF2, valamint az annak magját képező AXIL, illetve a WinQXas spektrumillesztő szoftvereket alkalmaztam. A XANES spektrumok előzetes feldolgozásához az ATHENA szoftvert (IFEFFIT csomag) használtam. A mérési adatok utólagos feldolgozását, illetve a 2D μ XRF-CI rekonstrukciós modellszámításokhoz kifejlesztett algoritmusokat MATLAB környezetben kifejlesztett, saját szerkesztésű szoftverekkel végeztem.

Nyalábidők a Deutsches Elektronen-Synchrotron, DORIS-III szinkrotron HASYLAB L nyalábcatornájánál:

1. 2010. május 24 - 28. *Confocal X-Ray fluorescence imaging on cucumber hypocotyls.*
2. 2010. november 26 - december 2. *Confocal X-Ray fluorescence imaging on cucumber hypocotyls*
3. 2011. május 24 - 30., *Three-dimensional micro-XRF/XANES studies on metal toxicity in biological model systems.*
4. 2011. július 19. - szeptember 8., *Development of wavelength-dispersive detection at beamline L, Hasylab Summer Students Program, L and A1 beamline.*

5. 2011. november 24. - december 2., *μ XRF-CI experiments on cucumber hypocotyls for mapping of 2D As distribution.*
6. 2012. május 15 - 22., *XANES experiments for determination of oxidation number of As in cucumber samples in-vivo.*
7. 2012. október 6 - 10., *Three-dimensional micro-XRF studies on metal toxicity in biological model systems.*
8. 2012. november 24. - december 2., *3D μ XRF-CI experiments on metal toxicity in biological model systems.*

Új tudományos eredmények

1. Kiterjesztettem a röntgenemissziós spektrometria alapvető paraméterek módszere (FPM) modelljét folytonos emissziós spektrummal rendelkező röntgenforrásokra. Kísérletekkel és elméleti számításokkal kimutattam, hogy a folytonos spektrummal rendelkező röntgenforrás sugárzásának gerjesztő hatása ekvivalensen helyettesíthető véges számú, diszkrét energiaértékkel rendelkező, fiktív röntgenforrással végzett egyidejű gerjesztéssel. Az FPM modell nemlineáris egyenletrendszerének általános numerikus megoldására egy új számítási eljárást és azt megvalósító szoftvert fejlesztettem ki MATLAB programozási környezetben.

Az 1. Tézishez kapcsolódó publikációk: [5], [6], [10].

2. Kifejlesztettem és megépítettem az XRF-Raman kombinált spektrométer optikai és mechanikai pozicionáló rendszerét. Kidolgoztam a spektrométer He gázzal történő alkalmazhatóságát az FPM alapú elemzésekhez, amely megteremtette a rendszer analitikai határai kiterjesztésének lehetőségét a $11 < Z < 15$ rendszámú elemek kvantitatív elemzésére is. Meghatároztam az XRF spektrométer rendszám- és gerjesztési paramétereiktől függő kimutatási határait biológiai mátrixra és bizonyítottam, hogy He gáz alkalmazásával ez az érték javítható a kis és közepes rendszámú elemekre.

A 2. Tézishez kapcsolódó publikációk: [5], [6], [9], [10].

3. Kifejlesztettem a μ XRF-CI röntgenemissziós analitikai módszert leíró FPM egyenletrendszer numerikus megoldó algoritmusát és a számításokat megvalósító szoftvert a monokromatikus szinkrotronsugárzással végezhető röntgenfluoreszcens konfokális leképezés rekonstrukciójára. Az eljárás algoritmus és a kód alkalmas könnyű elemekből álló mátrixszal rendelkező minták kémiai elemeinek 2D/3D mennyiségi eloszlásának számítására. A teljes

analitikai eljárás és az FPM modell alkalmazhatóságát a HASYLAB L nyalábcatornánál a μ XRF-CI méréseink eredményén végzett számításokkal teszteltem és igazoltam.

A 3. Tézishez kapcsolódó publikációk: [3], [7].

4. Kimutattam, hogy javítani lehet a monokromatikus szinkrotronsugárzással végzett μ XRF-CI eljárás térbeli felbontását a mérés technikai paraméterek optimalizálásával, a mintavétel lépésközének, a gerjesztő energia hangolásának és a fókuszolt méretének változtatásával a gerjesztett kémiai elem rendszámától függően. Kísérleti úton bizonyítottam, hogy kriogenikus mérési körülmények között, fókuszált, monokromatikus szinkrotronnaláb és in-vivo μ XRF-CT leképezés kombinációjával, meghatározható kisméretű (1-5 mm) biológiai mintákban lévő kémiai elemek térbeli eloszlása a belső biológiai struktúra szétesése nélkül.

A 4. Tézishez kapcsolódó publikációk: [1], [2], [11].

5. Szinkrotronsugárzással végzett XANES mérés technikai és adatkiértékelési eljárást fejlesztettem ki növényi mintákban található arzén oxidációs állapotának meghatározására. In-vivo és in-vitro XANES méréseket végeztem a HASYLAB L nyalábcatornánál uborka növények hipokotiljában lévő arzén oxidációs állapotainak meghatározására. A XANES eredmények kvantitatív kiértékelésére kidolgoztam egy új algoritmust és a numerikus számításokat végző szoftvert MATLAB programozási környezetben, amely alkalmas az arzén lehetséges oxidációs állapotai mennyiségi arányainak meghatározására.

Az 5. Tézishez kapcsolódó publikációk: [4], [8].

Irodalmi hivatkozások listája

[West2016] M. West, A. T. Ellis, P. J. Potts, C. Strelis, C. Vanhoof, P. Wobrauschek, 2016 Atomic Spectrometry Update - a review of advances in X-ray fluorescence spectrometry and its applications, *J. Anal. At. Spectrom.*, 2016, 31, 1706-1755.

[Servin2012] A. D. Servin, H. Castillo-Michel, J. A. Hernandez-Viezas, B. C. Diaz, J. R. Peralta-Videa, J. L. Gardea-Torresdey, Synchrotron Micro-XRF and Micro-XANES Confirmation of the Uptake and Translocation of TiO₂ Nanoparticles in Cucumber (*Cucumis sativus*) Plants, *Environ. Sci. Technol.* 2012, 46, 7637-7643.

[Laforce2014], Schmitz S, Vekemans B, Rudloff J, Garrevoet J, Tucoulou R, Brenker FE, Martinez-Criado G, Vincze L., Nanoscopic X-ray fluorescence

imaging of meteoritic particles and diamond inclusions, *Anal. Chem.*, 2014, 86, 24, pp. 12369-12374.

[Dik2008] J. Dik, K. Janssens, G. Van Der Snickt, L. van der Loeff, K. Rickers, M. Cotte Visualization of a Lost Painting by Vincent van Gogh Using Synchrotron Radiation Based X-ray Fluorescence Elemental Mapping, *Anal. Chem.*, 2008, 80, 6436-6442.

[Mantouvalou2014] I. Mantouvalou, T. Wolff, C. Seim, V. Stoytschew, W. Malzer, B. Kanngießer, Reconstruction of Confocal Micro-X-ray Fluorescence Spectroscopy Depth Scans Obtained with a Laboratory Setup, *Spectrochim. Acta B*, 2014, 97, 99-104.

[Tsuji2011] K. Tsuji, K. Nakano, Development of a new confocal 3D-XRF instrument with an X-ray tube, *J. Anal. At. Spectrom.*, 2011, 26, 305–309.

[Mantouvalou2017] I. Mantouvalou, T. Lachmann, S. P. Singh, K. Vogel-Mikus, B. Kanngießer, Advanced Absorption Correction for 3D Elemental Images Applied to the Analysis of Pearl Millet Seeds Obtained with a Laboratory Confocal Micro X-ray Fluorescence Spectrometer, *Anal. Chem.* 2017, 89, 5453-5460.

A kutatási eredmények hasznosítása

Kifejlesztettünk egy XRF-Raman kombinált spektrométert és egy általános, az alapvető paraméterek módszerén alapuló számítási modellt, amelyeket a Paksi Atomerőmű Radiokémiai Laboratóriumában a labor munkatársai rendszeresen alkalmaznak ismeretlen összetételű, szilárd minták gyors elemvizsgálására. Az eszköz egy újabb, Raman-próba nélküli, továbbfejlesztett 2D/3D konfokális mérésekre alkalmas verziója a BME Oktatóreaktor laboratóriumában áll rendelkezésre ismeretlen összetételű minták vizsgálatára. Ez utóbbi berendezést jelenleg is folyamatosan fejlesztjük az analizálható elemtartomány kiterjesztésére, a kimutatási határ és a térbeli felbontás javítására. Ezt a MA-XRF-CI röntgenspektrométert alkalmazzuk az Oktatóreaktorban felmerülő analitikai feladatok megoldásához, az oktatásban, illetve külső kutatóintézetekkel végzett közös együttműködésben, projektfeladatokban: ELTE: növényélettani vizsgálatok, Ferenzy Múzeum Szentendre, Paks-II: Cement és betonadalek minták elemzése, OAH, MTA EK SL: nukleáris anyagok szennyezőinek meghatározása.

A szinkrotronsugárzással biológiai mintákon végzett mikroanalitikai vizsgálatok eredményei hozzájárultak az uborka, mint modellszervelet élettani folyamatainak mélyebb megértéséhez. A kutatási eredmények biológiai következményeinek megfogalmazása Dr. Czech Viktória (ELTE NMNT) doktori disszertációjának részét képezte. A μ XRF-CI FPM modellünk megjelenése előtt csak több sik

réteggel rendelkező minták esetében volt kvantitatív analitikai lehetőség a μ XRF-CI technikával, azonban az új számítási modellünk megjelenésével lehetőség nyílt teljesen heterogén összetételű minták kvantitatív analizésére is.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [1] I. Szalóki, V. Czech, B. De Sambers, A. Gerényi and L. Vincze, Confocal X-Ray fluorescence imaging on cucumber hypocotyls, *HASYLAB Annual Report* 2010. http://hasylab.desy.de/annual_report/files/2010/20101198.pdf
- [2] A. Gerényi, V. Czech, J. Garrovet, B. De Sambers, L. Vincze and I. Szalóki, Confocal X-ray fluorescence micro-imaging on cucumber hypocotyls, *HASYLAB Annual Report*, 2011. http://photon-science.desy.de/annual_report/files/2011/20111711.pdf
- [3] A. Gerényi, I. Szalóki, Micro-XRF studies on biological samples using synchrotron radiation, *PhD Conference of the Doctoral School for Physics*, pp. 63-66, ISBN 978-963-313-065-0, Budapest, 22. June, 2012.
- [4] A. Gerényi, V. Czech, K. Appel, J. Garrovet, L. Vincze and I. Szalóki, Study of arsenic uptake in cucumber by XANES at HASYLAB Beamline L, *HASYLAB Annual Report*, 2012. http://photon-science.desy.de/annual_report/files/2012/20122445.pdf
- [5] Gerényi Anita, Szalóki Imre, Röntgenfluoreszcens spektrométer fejlesztése, *Őszi radiokémiai napok*, pp. 82-86, ISBN 978-963-9970-42-7, Eger, Október 16-18, 2013.
- [6] A. Gerényi, G. Radócz, I. Szalóki, Simultaneous application of X-Ray fluorescence and gamma spectrometer for analysis of radioactive waste material, *26th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety*, pp. 617-624, ISBN: 978-963-7351-27-3, Helsinki, Finland, 10-14., October, 2016.
- [7] I. Szalóki, A. Gerényi, G. Radócz, A. Lovas, B. De Samber, L. Vincze, FPM model calculation for micro X-ray fluorescence confocal imaging using synchrotron radiation, *J. Anal. At. Spectrom.*, 32, 334-344, 2017.
- [8] A. Gerényi, V. Czech, F. Fodor, L. Vincze, I. Szalóki, In-vivo XANES measuring techniques for studying the arsenic uptake in cucumber plants, *X-ray Spectrom.*, Vol. 46, pp. 143-150, 2017.

- [9] I. Szalóki, A. Gerényi, G. Radócz, Confocal macro X-ray fluorescence spectrometer on commercial 3D printer, *X-Ray Spectrom.*, 46, 497-506, 2017.
- [10] I. Szalóki, G. Radócz, T. Pintér, jnr. I. Szalóki and A. Gerényi, Development of mobile macro XRF spectrometer and FPM algorithm for surface analysis of solid objects, *J. Anal. At. Spectrom.*, (benyújtva, várható megjelenés 2018).
- [11] I. Szalóki, A. Gerényi, V. Czech, F. Fodor, L. Vincze, XRF micro-tomography and confocal imaging of 2D distribution of toxic elements in biological objects, (szerkesztés alatt, *Analytical Chemistry*).

További tudományos közlemények

- [12] A. Gerényi, M. Borchert and K. Appel, Wavelength-dispersive detection at beamline L, *HASYLAB Annual report 2011*.
http://photon-science.desy.de/annual_report/files/2011/20111547.pdf
- [13] I. Szalóki, G. Radócz, A. Gerényi, FPM model for quantitative determination of surface contamination on Si wafers by TXRF analysis, (benyújtva, *Spectrochim. Acta B*, 2018).
- [14] G. Radócz, A. Gerényi, Sz. Czifrus, I. Szalóki, Determination of ¹³⁷Cs content in fuel assemblies of a zero power reactor by Monte Carlo based efficiency calibration, (benyújtva, *Annals of Nuclear Energy*, 2018)

Szakmai előadások nemzetközi konferenciákon a 2011-2018 időszakban: 26, amelyek részletes jegyzékét a disszertáció tartalmazza.

Rövidítések jegyzéke

DESY	Deutschen Elektronensynchrotron
μXRF	micro X-ray fluorescence
CT	computer tomography
CI	confocal imaging
XANES	X-ray Absorption Near Edge Structure
FPM	Fundamental Parameter Method
HASYLAB	Hamburger Synchrotronstrahlungslabor