

Töltött részecske gyorsítók alkalmazása radioaktív izotópok előállítására, analitikai, orvostudományi és ipari célokra

Akadémiai Doktori Értekezés Tézisei

Ditrói Ferenc



Magyar Tudományos Akadémia

Atommagkutató Intézet

Debrecen

2017

1. Előzmények

A kis és közepes méretű gyorsítók, főleg ciklotronok elterjedésével meghonosodott az addigi IBA módszereknél nagyobb energiát igénylő töltött részecske aktivációs analízis (CPAA) módszer. A módszer előnye a roncsolásmentesség, a sokszor igen alacsony, ppb szintű érzékenység és a nagy energia miatt lehetővé vált kihozott nyalábbal kombinálva a gyakorlatilag tetszőleges méretű, alakú és halmazállapotú minták mérésének lehetősége (Schweikert, 1980; Strijckmans, 1997). A módszert használták már számos mátrix és nyomelem kombináció kimutatására (Erramli, 2006). Napjainkban egyre több új ipari alapanyag jelenik meg, ezért rendkívül nagy fontossággal bír ezen új anyagok sok szempontból történő vizsgálata már a kereskedelembe való kikerülésük előtt, a kutatási fázisban. Ezek közül a szempontok közül is fontos az anyagban kis mennyiségben jelen levő szennyezők (nyomelemek vagy tervezett összetevők) nagy pontosságú kimutatása. Erre a célra az egyik alkalmas, a nukleáris technikán alapuló módszer CPAA. Az aktivációt főként proton és deuteron bombázással végzik, mivel ezek a leggyakrabban elérhető bombázó részecskék a kis és közepes gyorsító típusoknál, de vannak olyan mátrix-nyomelem kombinációk, ahol az ezekkel való aktiválás nem vezet eredményre. Ilyen megoldatlan terület például az alumínium mátrix, ami az aktiválódása miatt elnyomja a benne levő nyomelemek jelét, vagy az oxigén szennyező, amire nincs alkalmas magreakció ezekkel a bombázó részecskékkel (Ditrói et al., 1992). A CPAA és a kihozott nyaláb kombinálása lehetővé teszi nagyobb minták jól behatárolt részének aktiválását, ami az esetleges elváltozások és a nyomelemösszetétel közötti összefüggések feltárását és a forrásának azonosítását teszi lehetővé.

Az ionnyaláb analitika egy nagyon speciális témaköre a kristályos anyagok vizsgálata a csatornahatáson alapuló módszerrel, amelynek segítségével mélyebben be lehet tekinteni a kristályos anyagok

belsejébe a csatornákon keresztül, és más módszerrel nem elérhető szerkezeti és összetételi információkhoz lehet jutni a segítségével (Tesmer and Nastasi, 1995). Az is világos volt, hogy a bombázó ion és a kristályrács kölcsönhatását nem lehet leírni az eddig megszokott módon, hanem az ion és a rácsatomok közötti kölcsönhatást egyedileg kell vizsgálni (Feldmann et al., 1982). Erre születtek megoldások, de a makroszkópikus, analitikai szempontból is használható eredményeket nem mindig szolgáltatottak (Giitz and Gartner, 1988). A különösen az egyes IBA módszerekkel való kombinálás igényelte azok leírásának adaptálását (Tesmer and Nastasi, 1990).

Már a vizsgálatok elején felmerült, hogy amennyiben az analitikai módszereket abszolút módon akarjuk alkalmazni, azaz referencia minták egyidejű besugárzása nélkül, akkor szükségünk van pontos magfizikai adatokra, különösen a radioizotópok keletkezési hatáskeresztmetszeteire. Ezek a hatáskeresztmetszetek on-line adatbázisokban megtalálhatók, de munkánk során azt tapasztaltam, hogy ezek az adatbázisok sok esetben hiányosak, sokszor pedig nem elfogadható vagy egymásnak ellentmondó adatokat tartalmaznak (IAEA, 1994, 2014). A másik probléma, hogy az adatbázisok sokszor csak a népszerű orvosi célú izotópokra vonatkozó eredményeket tartalmazzák (Qaim, 2001, 2011). Számunkra ezek mellett szükség volt a nyomjelzésre alkalmas radioizotópok magfizikai adataira is.

Az aktivációs technika egy másik kutatási területet is hozott magával, a radioizotópos nyomjelzést, amelynek számos alkalmazási területe van (von Hevesy, 1962). Ezek közül az egyik a vékonyréteg aktivációs technikával végzett kopásvizsgálat (Conlon, 1979). Ezt a módszert főként az autóiparban kezdték bevezetni de alkalmazást talált például az olajiparban sőt az orvosi protézisek vizsgálatában is (Fehsenfeld et al., 2002). Az alkalmazásának szélesebb körű elterjedését elsősorban a radioaktív sugárzástól való félelem okozta, felhasználása általában radioaktív anyagok használatára és tárolására vonatkozó engedéllyel

rendelkező laboratóriumokra korlátozódik. Külön problémát okozhat, ha a radioaktív izotópok előállítása és felhasználása földrajzilag elhatárolt, ami a veszélyes anyagok szállítása miatt további problémákat vet fel és többletköltségeket okoz. A módszer által elérhető nagy érzékenység és a hagyományos tesztelésnél jelentősen rövidebb vizsgálati idő azonban felkeltette az ipar érdeklődését, ami a módszer továbbfejlesztését indokolja (Eberle et al., 2005).

Az orvosi célú radioizotópok alkalmazása és magfizikai adatainak meghatározása terén a közelmúltban számos új eredmény született (Qaim, 2015). Az eddigi túlsúlyt jelentő diagnosztikai alkalmazások mellett egyre inkább előtérbe kerültek a terápiás célú felhasználások is, amelyek az alkalmazott radioizotópoktól speciális tulajdonságokat követeltek meg a felezési idő, a kibocsátott sugárzás, fajtája és energiája valamint az izotóp kémiai tulajdonságai terén (Qaim, 2012). Ezek során kiderült, hogy vannak olyan radioizotópok, amelyek egyidejűleg teljesítik a diagnosztika és a terápia által megkövetelt feltételeket (Stevenson et al., 2015). Ezek az u.n. „teranosztikus” izotópok, amelyek várhatóan nagy jövő elé néznek a gyógyászatban, de magfizikai adataik még sokszor hiányosak vagy ellentmondóak.

2. Célkitűzések

A vizsgálataim kezdetén célul tűztem ki az ATOMKI elektrosztatikus és ciklotron gyorsítóin megvalósítható analitikai módszerek használatának kidolgozását és megvalósítását tényleges problémák megoldására. Ehhez létrehoztam egy többcélú analitikai vákuumkamrát, mérőrendszereket és a nyalábkihozó berendezést és számítógépes programokat. Célunk volt a méreteik, halmazállapotuk vagy összetételük miatt eddig nehezen vagy egyáltalán nem vizsgálható minták nyomelem analízisének megoldása. Azt is célul

tűztem ki, hogy az eddig nem, vagy nehezen vizsgálható szennyezőkre is módszert találok és a módszer érzékenysége elérje a ppb tartományt.

Ezzel párhuzamosan célul tűztem ki a csatornahatáson alapuló channeling módszer kidolgozását főként cink-blende kristályokon (Si, GaAs), az ehhez szükséges mérőberendezés megtervezésével és összeállításával, valamint a jelenség leírására szolgáló, Monte-Carlo módszeren alapuló számítógépes program megalkotásával. Céлом volt még a módszer alkalmazhatóságának vizsgálata és a szükséges berendezések összeállítása a debreceni ciklotronon is.

A fenti alkalmazások vizsgálata során felmerült a rendelkezésre álló szükséges magfizikai adatok, hatáskeresztmetszetek, hozamok hiánya vagy nem megfelelősége (Qaim, 2001). Ezért elindítottam egy, a mai napig is tartó szisztematikus vizsgálat sorozatot az orvosi az ipari célra alkalmazható radioizotópok magfizikai adatainak vizsgálatára és a kapott eredmények elméleti modellekkel való összehasonlítására. Ezt a kutatást az igényelt egyre nagyobb bombázó energiák miatt széles körű nemzetközi együttműködést hoztam létre és folytatok ma is. Ennek a vizsgálat sorozatnak az ipari nyomjelző izotópokra vonatkozó részét tűztem ki saját célként, de az orvosi izotópok vizsgálatában is együttműködtem és hoztam létre saját kutatási területet, a teranostikus radioizotópok területén. A legnagyobb hiány az alfa és ^3He gerjesztéses reakciók körében mutatkozott, de voltak hiányosságok és ellentmondásos adatok a sokkal gyakoribb proton és deuteron gerjesztéses magreakciók területén is (Ditroi et al., 2015; Qaim, 2015).

Az aktivációs technika fejlesztése és alkalmazása során felmerült annak lehetősége, hogy ipari, biológia folyamatokat vizsgáljunk radioaktív nyomjelző izotópok segítségével. Ennek során alakult ki a vékonyréteg aktivációs technika, ahol a minta saját anyagában lejátszódó magreakciók segítségével hozunk létre magreakciókat.

Kutatásaim célja volt ennek az eljárásnak a bevezetése alkatrészek kopásának vizsgálatára, valamint a felmerülő, elsősorban sugárvédelmi és veszélyes anyagokkal kapcsolatos problémák megoldása.

3. Vizsgálati módszerek

Kutatásaim során a channeling vizsgálatokkal kapcsolatban az RBS és NRA módszereket¹, használtam, majd a nagyobb energiákat elérve áttértem a késleltetett aktivációs technikára. A detektálási technika terén használtam röntgen-, gamma- és részecske-detektorokat a prompt sugárzások mérésére valamint szcintillációs, Ge(Li) és HPGe gamma-detektorokat és spektrométereket az off-line mérésekhez, hatáskeresztmetszet vizsgálatokhoz és vékonyréteg aktivációs mérésekhez. A besugárzások terén vákuumban és levegőre kihozott nyalábokon végeztem méréseket kb. 90 MeV-ig terjedő proton energia tartományban.

A mérések kiértékelése során az energiaveszteség, hatótávolság, channeling, csúcsterület, stb., meghatározására helyi fejlesztésű fékezőképesség számoló, Monte-Carlo szimulációs, gamma-spektrum kiértékelő és kereskedelmi spektrum-analizáló szoftvereket használtam. A channeling jelenség leírására és a makroszkópikus jellemzők, mint a channeling dip, spektrum, stb. kiszámítására teljes egészében saját fejlesztésű Monte-Carlo alapú kódot alkalmaztam.

A vékonyréteg aktivációs technikát az aktivációs analízis számára kifejlesztett besugárzó berendezések módosításával végeztem, az esetek döntő többségében levegőre kihozott nyalábon. A minta mozgatásához saját fejlesztésű, mintatartókat és mozgatókat

¹ A rövidítések magyarázatát lásd a disszertáció legelső fejezetében

használtam, amelyeket a besugárzás közben számítógépes vezérléssel tudtam egy síkban mozgatni, valamint forgatni. A szükséges gamma-méréseket az alacsony háttérű laborban végeztem, a mélységi eloszlás ellenőrzésére különböző koptató, szeletelő és marató eszközök álltak rendelkezésre.

A magadat mérések során a fóliacsomag módszert használtam a gyorsítóidő korlátozott rendelkezésre állása miatt, ami esetenként nagyszámú mintából álló csomag besugárzását jelentette egyidejűleg. Ez bizonyos megalkuvással járt a nyalábenergia szórásának növekedése miatt. A kérdéses esetekben egyedi besugárzásokat végeztem.

A kísérleti hatáskeresztmetszet értékek összehasonlítását az elméleti modellekkel az ALICE, a TALYS és az EMPIRE elmélet magreakció modell kódok aktuális verzióinak alkalmazásával végeztem, illetve a TALYS eredményeit leggyakrabban a TENDL on-line adatbázis legfrissebb változatából vettem.

4. Új tudományos eredmények

A kutatásaim során a következő új tudományos eredmények születtek, amelyeket az alábbi **öt fő tézispontban** foglaltam össze:

1. Csatornahatás

1.1 Meghatároztam szilícium és GaAs kristályos anyagokon, a channeling (csatornahatás) jelenséget kihasználva, az energiaveszteséget csatornairányokban. Kombináltam a (p,p') rezonanciaszórást az RBS detektálási módszerrel és megmértem a rezonancia lejátszódásának mélységét, amire a visszaszórási spektrum alakjából és a rezonanciacsúcs eltolódásából lehetett következtetni. Ezzel igazoltam, hogy az általam felállított

energiaveszteség modell és a rá épülő Monte-Carlo szimulációs program helyesen működik [DF-6, DF-7, DF-8].

1.2 Meghatároztam a channeling és a NRA módszer kombinálásával GaAs kristály szennyezőit és azok elhelyezkedését. A minták szén ionokkal random irányban implantált kristályok voltak, ahol a szénionok vándorlását mértem meg különböző időtartamú és hőmérsékletű hőkezelések hatására a $^{12}\text{C}(\text{d},\text{p})^{13}\text{C}$ magreakció segítségével. A mérési eredményekből kimutattam, hogy a szénatomok a hőkezelés hatására, a hőmérséklet és hőkezelés idejétől függően elhagyják a csatorna közepét és a kristályrács atomjainak környezetében dúsulnak fel. A mérési eredményeket szimuláltam az általam készített MABIC programmal, a szénatomok feltételezett helyének kimutatására [DF-9].

1.3 Megmértem a Si és GaAs kristályokban a channeling jelenség viselkedését a debreceni ciklotron nagyobb energiáin, egy pályázatból beszerzett távirányítású goniométert installálva egy nagyméretű szórókamrába. A kísérleti eredményeket összehasonlítottam a szimulációs programmal végzett számolásokkal és meghatároztam a channeling gödör mélységének és szélességének változását az energia függvényében [DF-10, DF-11, DF-12].

1.4 Meghatároztam ECR ionforrással létrehozott majd RFC utógyorsítóval felgyorsított magas töltésállapotú ionok, kristályok fő rácsirányaiban történő töltésállapot változását. Megmértem magas töltésállapotú argon ionok csatorna és random irányban történő töltésállapot és energiaváltozását amely kísérleti eredmény megegyezett a szimulációs programmal végzett számításokkal [DF-13].

2. Töltött részecske aktivációs analízis

2.1 A ciklotron egyik nyalábján üzembe helyeztünk egy saját fejlesztésű vákuumkamrát, ami alkalmas volt az összes általunk használt sugárzás (részecske, röntgen, gamma) észlelésére alkalmas detektorok fogadására. Létrehoztunk egy alacsony háttérű gamma-mérőlaboratóriumot árnyékolt mérőhellyel. A létrehozott berendezéseken besugárzásokat és méréseket végeztem és kidolgoztam a mérések kiértékeléséhez szükséges számítógépes programokat. Kifejlesztettem egy nyalábkihozó berendezést, amely lehetővé tette a vákuumból kihozott nyalábbal levegőben vagy egyéb atmoszférikus nyomású gázban való besugárzást.

Ezzel az eszközcsoporttal meghatároztam motorolajok nyomelemtartalmát folyadék céltárgyak kihozott nyalábon történő besugárzásával és összefüggést állapítottam meg a nyomelemtartalom változása és a futásteljesítmény között. Jelentős számú nyomelemet azonosítottam, és tudtam csoportosítani aszerint, hogy a motorolaj eredetileg is tartalmazta őket (Ca, Zn, Ti, Cu), vagy a környezetből (üzemanyag, hengerfal, henger) kerültek az üzemanyagba (Pb, Fe, Cr) **[DF-1]**.

2.2 Kidolgoztam az iparban előforduló nagytisztaságú Al illetve Ga termékek nyomelem vizsgálatára az aktivációs analitikai módszereket mindkét fajta minta esetében elsősorban a legnagyobb problémát okozó oxigén tartalom meghatározására. ^3He aktiválás segítségével meghatároztam az oxigéntartalmat és az oxidálódási modell felállításával az oxidréteg vastagságát is a térfogatban levő szemcsék felületén. A gallium gyors oxidálódása miatt speciális eljárást dolgoztam ki a felületi és a térfogati oxidréteg megkülönböztetésére **[DF-2, DF-3, DF-4]**.

2.3 Meghatároztam szilárd üveg minták hibáinak környezetében aktivációs módszerrel a nyomelem összetételt és összefüggést mutattam ki a nyomelem összetétel változása és a különböző fajta hibák előfordulása között. Zárvány formájú és elszíneződéses hibákat vizsgálatával megállapítottam, hogy az első esetben a kemence falából származó Zr még a második esetben az újrahasznosítás során bekerült vascsoport elemeinek feldúsulása okozza a problémát [DF-5].

3. Vékonyréteg aktiváció (TLA)

3.1 Meghatároztam bór-nitrid és polikristályos gyémánt keményfém lapkás forgácsoló szerszámok vágóéleinek kopását vékonyréteg aktivációval különböző geometriákban ^7Be és ^{56}Co nyomjelző radioizotópok alkalmazásával. Mind a módszer laboratóriumi alkalmazásához, félvezető spektrométerrel, mind az ipari felhasználásához, szcintillációs mérőrendszerrel megfelelő eszközöket fejlesztettem ki és alkalmaztam azokat a gyakorlatban [DF-14].

3.2 Megmértem a ^7Be izotóp magfizikai jellemzőit, mivel ez az izotóp nagyon alkalmas radioaktív nyomjelzőnek bizonyult. Új hatáskeresztmetszet értékeket határoztam meg a proton és deuteron természetes bóron valamint ^3He gerjesztéssel szénen és berilliumon lejátszódó, ^7Be -et eredményező magreakcióra. Meghatároztam a keletkezett radioizotóp céltárgyból való kilöködését is, ami a későbbi másodlagos implantáció szempontjából fontos eredmény. A TLA módszer jellemzőinek és az alkalmazás irányvonalainak kidolgozására, valamint a szükséges magfizikai adatok összefoglalására irányuló NAÜ CRP projektből, egy technikai dokumentáció született [DF-15, DF-16].

3.3 Meghatároztam a nem aktiválható elemösszetételű minták esetén a másodlagos implantációra alkalmas magreakciókat, azok

hatáskeresztmetszetét megmértem és meghatároztam a kilökődési hatásokokat és a kilökődött radioaktív izotópok térbeli eloszlását **[DF-18, DF-19]**.

3.4 Módszereket dolgoztam ki nagyfelületű valamint görbült felszínű minták egyenletes besugárzására és vékonyréteg aktivációs nyomjelzésére **[DF-20]**.

3.5 Kimutattam, hogy a szabadforgalmi szint alatti aktivitásokkal megfelelő nyomjelzési aktivitást lehet elérni, és alkalmazni a vékonyréteg aktivációs technikában. A szállítási költségek csökkentésére és a sugárvédelmi követelmények miatt módszert dolgoztam ki vékonyréteg aktivációs vizsgálatokra szabadforgalmi szint alatti aktivitásokkal. Meghatároztam az erre a célra használható radioizotópokat és kidolgoztam az előállítási technikájukat. Kidolgoztam az alacsony aktivitások legoptimálisabb felhasználását, miszerint nem egész alkatrészeket kell vizsgálni, hanem azok kivágott szegmenseit és ellendarbjait, egy erre kifejlesztett speciális rendszerben. Kifejlesztettünk egy mérőkamrát, amelyben a kisméretű alkatrészdarabok egymáshoz képesti mozgatása és a paraméterek (nyomóerő, frekvencia, lökethossz, ...) szabályozása megoldott volt. A lekopott anyaggal együtt a radioaktív részecskéket a súrlódó felületek hűtésére és/vagy kenésére használt folyadékkal szállítottam a nagy hatásfokú üreges (szcintillációs) detektorba. Ez a módszer egyúttal a használt kenőanyagok vizsgálatát is lehetővé tette **[DF-21]**. Ennek segítségével meghatároztam alumínium ötvözetek és acélból készült alkatrészek kopását, ahol mind kisebbségi mind a többségi összetevő alapján megvalósítottam a kísérleti kopásgörbe meghatározását. Mindkét esetben az általunk kifejlesztett kisméretű mérőkamrát használtam, mentességi szint alatti radioaktív anyagmennyiség felhasználásával. Mindkét esetben kimutattam az egymással érintkező alkatrészek kopásának

különböző fázisait (bejáratás, normál üzem, elhasználódás,). A publikált eredményeken kívül a módszert egyéb, ipari együttműködő partnerek munkája során felmerült kopásvizsgálati feladat megoldására alkalmaztam [DF-22, DF-23].

4. *Töltöttrészecske indukált magreakciók hatáskeresztmetszetének meghatározása*

Ezeket a vizsgálatokat szisztematikusan végeztem, az éppen aktuális vizsgálat célját a rendelkezésre álló céltárgyanyag, gyorsítóenergia és részecske döntötte el.

³He-gerjesztett reakciók

4.1 Új hatáskeresztmetszeteket, esetenként hozamokat és mélységi eloszlás görbéket határoztam meg, **títánon, vason, platinán, ónon és vanádiumon**, amelyekből a nyomjelzésre alkalmas radioizotópokra vontam le következtetéseket és megmértem az egyéb azonosított izotópokra vonatkozó hatáskeresztmetszeteket. Mint a gyorsítók körül legritkábban hozzáférhető bombázó részecske, a ³He-ra vonatkozó gerjesztési adatok és hatáskeresztmetszetek még napjainkban is nagyon hiányosak. Azonban bebizonyosodott, hogy számos esetben a ³He aktiváció egyedülálló jelentőséggel bír. Új és részben új hatáskeresztmetszeteket és hozamokat határoztam meg elsősorban vékonyréteg aktivációs célra, de ennél sokkal több izotópra keletkezett új eredmény a vizsgálatok másodlagos céljaként vagy mellékeredményként [DF-24, DF-25, DF-26, DF-27, DF-28].

α -gerjesztett reakciók

4.2 Új hatáskeresztmetszet, hozam és aktivitás eloszlás adatokat határoztam meg a következő céltárgyakon lejátszódó alfa részecske gerjesztésű magreakciókra: **nióbium, vas, tantál és molibdén**. Ezeknél a magreakcióknál a nyomjelzésre alkalmas jellemzőket határoztam meg, de számos mellékeredmény született

orvosi célú izotópokra is, valamint az összes azonosítható radioizotópra meghatároztam a hatáskeresztmetszeteket. Az eredmények egy része teljesen új, egy része még nem vizsgált energiatartományt fed le, részben pedig az irodalmi eredményeket igazolja vagy pontosítja. Az alfa részecskékkel gerjesztett magreakciók hatáskeresztmetszet adatai a ^3He -hez hasonlóan ugyancsak hiányosságokat mutatnak, ezért ezen a területen is érdemes volt vizsgálatokat folytatni. A debreceni ciklotron energia tartományát itt is számos esetben kinőttük, ezért a besugárzások és mérések jelentős részét külföldi laboratóriumokban végeztem el. A kísérletek célja orvosi és ipari célra alkalmazható radioizotópok meghatározása volt, a jelen munkában elsősorban a vékonyréteg aktivációs vizsgálatok számára alkalmas izotópokra elért új eredményeket hangsúlyozom [DF-29, DF-30, DF-31, DF-32].

Deuteron-gerjesztett reakciók

4.3 Hatáskeresztmetszet, hozam és aktivitás eloszlási adatokat határoztam meg a következő elemeken lejátszódó deuteron gerjesztéses magreakciókra: **nióbium, cirkónium, cink, platina, ezüst, erbium, ólom, vas, kobalt, mangán, ón, vanádium és indium.** Az eredmények jelentős részben újak, illetve új energiatartományt fednek le. A legmegfelelőbb nyomjelző izotóp jelöltekre a mélységi eloszlásokat is meghatároztam. A deuteron, mint bombázó részecske a proton után a leggyakoribb rendelkezésre álló részecske a kis és közepes energiájú gyorsítók mellett. Külön érdekessége az anyaggal való kölcsönhatás közbeni felhasadás, ami az elméleti magreakció modell kódokkal való számításokat különösen megnehezíti, mint az a közleményeink ábráin is láthatók. Számos esetben, mint például a kettős aktiválás esetén a proton mellett a deuteron aktiválás is szükséges az elsőtől eltérő radioizotóp létrehozására ugyanabban a mintában vagy a kopásvizsgálatnál használt ellendarabban. A deuteron gerjesztésű

magreakciók vizsgálata a fúziós reaktorok anyagának aktiválódása szempontjából is fontos [DF-33, DF-34, DF-35, DF-36, DF-37, DF-38, DF-39, DF-40, DF-41, DF-42, DF-43, DF-44, DF-45, DF-45, DF-46].

Proton-gerjesztett reakciók

4.4 Proton gerjesztéses magreakciók hatáskeresztmetszeteit határoztam meg a következő céltárgy anyagokon: **platina, molibdén, tantál, cink, irídium, ezüst, vas, ón, kadmium, nióbbium, kobalt, cirkónium, mangán, antimon, vanádium és indium.** A proton a leggyakrabban használt bombázó részecske, amely gyakorlatilag minden gyorsítón hozzáférhető, és a legtöbb számunkra használatos izotópra létezik proton-gerjesztéses magreakció különböző energiatartományokban. Ennek következtében az ezekre vonatkozó magreakció adatok a legteljesebbek, bár vizsgálataink során számos hiányosságot fedeztem fel. A meghatározott hatáskeresztmetszetek részben újak voltak, részben a meglévő adatokat pontosították [DF-27, DF-48, DF-49, DF-50, DF-51, DF-52, DF-53, DF-54, DF-55, DF-56, DF-57, DF-58, DF-59, DF-60, DF-61, DF-62].

5. Teranosztikus radioizotópok vizsgálata

Dúsított ^{116}Cd céltárgyat használva kísérletileg meghatároztam a $^{117\text{m}}\text{Sn}$ radioizotóp előállítására vezető magreakciók hatáskeresztmetszetét és hozamát az 50 MeV-ig terjedő energiatartományban, valamint az összes, egyidejűleg keletkező radioizotóp hatáskeresztmetszetét. A teranosztikus izotópok tulajdonságaik révén alkalmasak egyidejű diagnosztikai és terápiás feladatok ellátására. Ezen a területen elsősorban a $^{117\text{m}}\text{Sn}$ radioizotóp bizonyult a kettős alkalmazás szempontjából a legalkalmasabbnak, valamint a belőle készíthető jelzett termékek a legsokrétűbbek. Mivel az $^{117\text{m}}\text{Sn}$ nagyspinű állapot, ezért figyelembe véve a környező stabil izotópokat, a legalkalmasabb

gerjesztésnek a kadmium céltárgyon történő alfa indukált magreakció volt. Ezek az eredmények részben újak, részben jelentősen módosították az eddigi kísérleti eredményeket. Részletesen tárgyaltam a lehetséges szennyezők szerepét és eliminálását a végtermékben **[DF-63]**. Új és részben új hatáskeresztmetszeteket határoztam meg a természetes kadmiumon lejátszódó alfa-gerjesztéses magreakciókra, valamint meghatároztam és összehasonlítottam az ezekből számolt hozamokat is. A vizsgálatokat természetes összetételű kadmium céltárgyon is elvégeztem, mivel az összes kadmiumon lejátszódó alfa-gerjesztéses magreakcióra pontos hatáskeresztmetszet értékeket kellett meghatározni, mivel a dúsított céltárgy is tartalmazza az összes természetes összetevőt (8 db), sokkal kisebb arányban. A kapott eredményeket dúsított és természetes céltárgyon is összehasonlítottam a meglévő irodalmi értékekkel és a rendelkezésre álló elméleti magreakció modell kódok eredményeivel **[DF-64, DF-65]**.

5. Az eredmények hasznosítása

A fentebb felsorolt tézispontokhoz tartozó kutatómunkát elsősorban metodológiai szempontból végeztem, de mivel osztályunk elsődleges feladata a kutatási eredmények gyakorlatba való mielőbbi átültetése, valamint elsősorban gyakorlatban alkalmazható kutatási eredmények elérése volt, ezért minden ilyen eredmény kapcsán olyan partnereket kerestem és többnyire találtam is, akik ezeket a módszereket működésük során hasznosítani tudták.

A channeling módszerrel történő vizsgálatokat felhasználtam a félvezető kutatásban és gyártásban konkrét problémák megoldására.

A töltötttrészecske aktivációs módszerrel problémákat oldottam meg az üvegyiparban, az alumíniumgyártásban és az autóiiparban.

A vékonyréteg aktivációval végezhető radioaktív nyomjelzéses vizsgálatok bizonyultak a legegységibb alkalmazásnak, amelynek nem volt versenytársa az érzékenység, a gyorsaság területén, ezért ezt a módszert alkalmaztam különböző nagykeménységű anyagokból készült forgácsoló szerszámok kopásának vizsgálatára, vasúti és autóiipari alkatrészek kopásának vizsgálatára valamint az ezekhez köthető különböző egyszerű és különleges anyagok kopásának nyomon követésére. A hosszú ideje fennálló rendszeres külföldi együttműködések ezen a területen, valamint az egyik ilyen kapcsolatból kifejlődött nyertes FP6 pályázat (WEMESURF) az eredményeim hasznosíthatóságát jelzik.

A nagyszámú hatáskeresztmetszet adatot, amelyek meghatározásában részt vettem, nemzetközi adatbázisokba töltötték fel (pl. NAÜ) és az évi több ezer letöltés igazolja, hogy van rájuk igény és érdeklődés [DF-17].

6. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közleményeim

DF-1. F. Ditrói, I. Mahunka, S. Takács, S.S. Elnasr, Trace-Element Analysis of Motor Oil by Cpa Method on External Proton-Beam, J Radioan Nucl Ch Ar, 130 (1989) 263-268.

DF-2. S. Takács, F. Ditrói, I. Mahunka, Investigation of Aluminum Made by Powder-Metallurgy by Using the Cpa Method, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 43 (1989) 99-100.

DF-3. S. Takács, F. Ditrói, I. Mahunka, Measurement of oxide-layer thickness of internal granules in high-purity aluminium, Acta Physica Hungarica 65 (1989) 355.

DF-4. F. Ditrói, S. Takács, I. Mahunka, P. Mikecz, G. Toth, Determination of Oxygen in High-Purity Gallium by Using Charged-Particle Activation-Analysis, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 68 (1992) 166-169.

DF-5. F. Ditrói, S. Takács, I. Mahunka, Z. Gemesi, Trace-Element Study of Glass Samples by Using Activation Methods, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 50 (1990) 62-64.

DF-6. F. Ditrói, J.D. Meyer, R. Michelmann, D. Kislat, K. Bethge, Investigation of Silicon Width (P, P') Resonance Scattering in (110) Channeling Direction, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 89 (1994) 164-167.

DF-7. J.D. Meyer, R.W. Michelmann, F. Ditrói, K. Bethge, Investigation of the Electronic-Energy Loss of Light-Ions for Materials Analysis, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 89 (1994) 186-190.

DF-8. F. Ditrói, J.D. Meyer, R.W. Michelmann, K. Bethge, Computer-Simulation of Channeling in Si and GaAs Crystals, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 99 (1995) 182-186.

DF-9. J.D. Meyer, R.W. Michelmann, F. Ditrói, K. Bethge, Nuclear-Reaction Channeling, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 99 (1995) 440-443.

DF-10. F. Ditrói, J.D. Meyer, R.W. Michelmann, K. Bethge, Application of the combined channeling method at higher ion energies on cyclotron, Mater Sci Forum, 248- (1997) 361-364.

DF-11. F. Ditrói, J.D. Meyer, R.W. Michelmann, K. Bethge, Feasibility study of high energy channeling experiments at the Debrecen Cyclotron, Radiat Eff Defect S, 145 (1998) 57-64.

DF-12. F. Ditrói, J.D. Meyer, R.W. Michelmann, K. Bethge, Investigation of (100) silicon samples on cyclotron beams with channeling method, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 139 (1998) 253-257.

DF-13. F. Ditrói, J.D. Meyer, K. Stiebing, S. Biri, K. Bethge, Investigation of charge-state modifications under channeling conditions by highly charged heavy projectiles, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 161 (2000) 111-114.

DF-14. L. Vasvary, F. Ditrói, S. Takács, Z. Szabo, J. Szucs, J. Kundrak, I. Mahunka, Wear Measurement of the Cutting Edge of Superhard Turning Tools Using Tla Technique, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 85 (1994) 255-259.

DF-15. F. Ditrói, S. Takács, F. Tárkányi, A. Fenyvesi, J. Bergman, S.J. Heselius, O. Solin, Investigation of the charged particle nuclear reactions on natural boron for the purposes of the thin layer activation (TLA), Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 103 (1995) 389-392.

DF-16. F. Ditrói, S. Takács, F. Tárkányi, I. Mahunka, Study of the C-nat(He-3,2 alpha)Be-7 and Be-9(He-3,alpha n)Be-7 nuclear reactions and their applications for wear measurements, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 103 (1995) 412-414.

DF-17. F. Ditrói, P. Fehsenfeld, A.S. Khanna, I. Konstantinov, I. Majhunka, P.M. Racolta, T. Sauvage, J. Thereska, The thin layer activation method and its applications in industry, in: IAEA TECDOC-924, Vienna, 1997.

DF-18. F. Ditrói, I. Mahunka, Thin layer activation of non-metallic materials by using nuclear implantation, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 113 (1996) 415-419.

DF-19. F. Ditrói, I. Mahunka, Investigation of the recoil implantation for thin layer activation and wear measurements, Wear, 219 (1998) 78-83.

DF-20. F. Ditrói, S. Takács, F. Tárkányi, M. Reichel, M. Scherge, A. Gerve, Thin layer activation of large areas for wear study, Wear, 261 (2006) 1397-1400.

DF-21. F. Ditrói, S. Takács, F. Tárkányi, E. Corniani, R.W. Smith, M. Jech, T. Wopelka, Sub-micron wear measurement using activities under the free handling limit, J. Radioanal. Nucl. Chem., 292 (2012) 1147-1152.

DF-22. E. Corniani, M. Jech, F. Ditrói, T. Wopelka, F. Franek, TLA and wear quantification of an aluminium-silicon-copper alloy for the car industry, Wear, 267 (2009) 828-832.

DF-23. E. Corniani, M. Jech, T. Wopelka, F. Ditrói, F. Franek, A. Pauschitz, High-resolution wear analysis of a ball-on-disc contact using low-activity radioactive isotopes, P I Mech Eng C-J Mec, 226 (2012) 319-326.

DF-24. F. Ditrói, M.A. Ali, F. Tárkányi, I. Mahunka, Investigation of the ^3He induced reactions on natural Ti for the purpose of activation analysis and nuclear implantation, in: G. Reffo, A. Ventura, C. Grandi (Eds.) International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Italian Physical Society, Trieste, Italy, 1997, pp. 1746.

DF-25. F. Tárkányi, F. Ditrói, S. Takács, Excitation functions of He-3 -particle induced nuclear reaction on iron, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 211 (2003) 312-318.

DF-26. M. Al-Abyad, F. Tarkanyi, F. Ditroi, S. Takacs, Excitation function of He-3 induced nuclear reactions on Pt-nat up to 26 MeV, Appl. Radiat. Isot., 72 (2013) 73-82.

DF-27. B.M. Ali, M. Al-Abyad, U. Seddik, S.U. El-Kameesy, F. Ditroi, S. Takacs, F. Tarkanyi, Measurement and theoretical analysis of the excitation functions for He-3 induced reactions on Sn-nat, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 362 (2015) 93-102.

DF-28. B.M. Ali, M. Al-Abyad, U. Seddik, S.U. El-Kameesy, F. Ditroi, S. Takacs, F. Tarkanyi, Experimental investigation and theoretical calculation for He-3 induced nuclear reactions on vanadium, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 373 (2016) 76-79.

DF-29. F. Tárkányi, F. Ditrói, F. Szelecsényi, M. Sonck, A. Hermanne, Measurement and evaluation of the excitation functions for alpha particle induced nuclear reactions on niobium, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 198 (2002) 11-31.

DF-30. F. Tárkányi, F. Ditrói, S. Takács, F. Szelecsényi, A. Hermanne, M. Sonck, Activation cross-sections of alpha induced nuclear reactions on iron up to 40 MeV, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 207 (2003) 381-394.

DF-31. F. Tárkányi, S. Takács, A. Hermanne, F. Ditrói, L. Ando, S.J. Heselius, J. Bergman, New experimental data on excitation functions for practical applications of alpha induced nuclear reactions un Ta up to 30 MeV, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 211 (2003) 22-32.

DF-32. F. Ditrói, F. Tárkányi, S. Takács, Wear measurement using radioactive tracer technique based on proton, deuteron and alpha-particle

induced nuclear reactions on molybdenum, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 290 (2012) 30-38.

DF-33. F. Ditrói, F. Tárkányi, M.A. Ali, Investigation of deuteron induced nuclear reactions on niobium, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 161 (2000) 172-177.

DF-34. F. Tárkányi, A. Hermanne, F. Ditrói, S. Takács, B. Király, M. Baba, T. Ohtsuki, S.F. Kovalev, A.V. Ignatyuk, Production of longer lived radionuclides in deuteron induced reactions on niobium, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 255 (2007) 297-303.

DF-35. F. Ditrói, F. Tárkányi, S. Takács, A. Hermanne, A.V. Ignatyuk, Activation cross sections of deuteron induced reactions on niobium in the 30–50 MeV energy range, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 373 (2016) 17-27.

DF-36. F. Tárkányi, S. Takács, F. Ditrói, A. Hermanne, M. Sonck, Y. Shubin, Excitation functions of deuteron induced nuclear reactions on natural zinc up to 50 MeV, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 217 (2004) 531-550.

DF-37. F. Tárkányi, S. Takács, F. Ditrói, A. Hermanne, Y.N. Shubin, A.I. Dityuk, Activation cross-sections of deuteron induced reactions on platinum, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 226 (2004) 490-498.

DF-38. M.S. Uddin, M. Baba, M. Hagiwara, F. Tárkányi, F. Ditrói, S. Takács, A. Hermanne, Experimental studies of the deuteron-induced activation cross-sections on Ag-nat, Appl. Radiat. Isot., 64 (2006) 1013-1019.

DF-39. F. Ditrói, F. Tárkányi, S. Takács, A. Hermanne, A.V. Ignatyuk, Activation cross sections of deuteron induced reactions on silver in the 33–50 MeV energy range, Appl. Radiat. Isot., 120 (2017) 60-65.

DF-40. F. Tárkányi, A. Hermanne, B. Király, S. Takács, F. Ditrói, M. Baba, T. Ohtsuki, S.F. Kovalev, A.V. Ignatyuk, Study of activation cross-sections of deuteron induced reactions on erbium: Production of radioisotopes for practical applications, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 259 (2007) 829-835.

DF-41. F. Ditrói, F. Tárkányi, S. Takács, M.S. Uddin, M. Hagiwara, M. Baba, A. Ignatyuk, S.F. Kovalev, Investigation of excitation functions of deuteron

induced nuclear reactions on lead, J. Radioanal. Nucl. Chem., 276 (2008) 835-841.

DF-42. F. Ditrói, F. Tárkányi, S. Takács, A. Hermanne, A.V. Ignatyuk, Excitation functions of Pb-nat(d,x) Bi-206,Bi-205,Bi-204,Bi-203,Bi-202, Pb-203cum,Pb-202m,Pb-201cum and Tl-202cum,Tl-201cum reactions up to 50 MeV, J. Radioanal. Nucl. Chem., 300 (2014) 1267-1279.

DF-43. F. Ditrói, F. Tárkányi, S. Takács, A. Hermanne, H. Yamazaki, M. Baba, A. Mohammadi, A.V. Ignatyuk, Activation cross-sections of deuteron induced nuclear reactions on manganese up to 40 MeV, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 269 (2011) 1878-1883.

DF-44. F. Tárkányi, F. Ditrói, A. Hermanne, S. Takács, B. Király, M. Baba, A.V. Ignatyuk, Experimental study of the excitation functions of deuteron induced reactions on ^{nat}Sn up to 40 MeV, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 269 (2011) 405-416.

DF-45. A. Hermanne, F. Tárkányi, F. Ditrói, S. Takács, Extension of the excitation functions of deuteron induced reactions on natSn up to 50 MeV, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 391 (2017) 1-9.

DF-46. F. Tarkanyi, F. Ditroi, S. Takacs, A. Hermanne, M. Baba, A.V. Ignatyuk, Investigation of activation cross-sections of deuteron induced reactions on vanadium up to 40 MeV, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 269 (2011) 1792-1800.

DF-47. F. Tárkányi, F. Ditrói, S. Takács, J. Csikai, A. Hermanne, M.S. Uddin, M. Hagiwara, M. Baba, Y.N. Shubin, A.I. Dityuk, Activation cross-sections of light ion induced nuclear reactions on platinum: proton induced reactions, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 226 (2004) 473-489.

DF-48. M.S. Uddin, M. Hagiwara, F. Tárkányi, F. Ditrói, M. Baba, Experimental studies on the proton-induced activation reactions of molybdenum in the energy range 22-67 MeV, Appl. Radiat. Isot., 60 (2004) 911-920.

DF-49. M.S. Uddin, M. Hagiwara, N. Kawata, T. Itoga, N. Hirabayashi, M. Baba, F. Tárkányi, F. Ditrói, G. Csikai, Measurement of excitation functions of the proton-induced activation reactions on tantalum in the energy range 28-70MeV, Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 4(2004) 160.

DF-50. F. Tárkányi, B. Király, F. Ditrói, S. Takács, J. Csikai, A. Hermanne, M.S. Uddin, A. Hagiwara, M. Baba, T. Ido, Y.N. Shubin, A.I. Dityuk, Activation cross sections of proton induced nuclear reactions on iridium, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 239 (2005) 293-302.

DF-51. M.S. Uddin, M. Hagiwara, M. Baba, F. Tárkányi, F. Ditrói, Experimental studies on excitation functions of the proton-induced activation reactions on silver, Appl. Radiat. Isot., 62 (2005) 533-540.

DF-52. A. Hermanne, F. Tárkányi, F. Ditrói, S. Takács, R.A. Rebeles, M.S. Uddin, M. Hagiwara, M. Baba, Y. Shubin, S.F. Kovalev, Experimental study of the excitation functions of proton induced reactions on Sn-nat up to 65 MeV, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 247 (2006) 180-191.

DF-53. F. Tárkányi, B. Király, F. Ditrói, S. Takács, J. Csikai, A. Hermanne, M.S. Uddin, M. Hagiwara, A. Baba, T. Ido, Y.N. Shubin, S.F. Kovalev, Activation cross-sections on cadmium: Proton induced nuclear reactions up to 80 MeV, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 245 (2006) 379-394.

DF-54. F. Ditrói, S. Takács, F. Tárkányi, M. Baba, E. Corniani, Y.N. Shubin, Study of proton induced reactions on niobium targets up to 70 MeV, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 266 (2008) 5087-5100.

DF-55. F. Ditrói, A. Hermanne, E. Corniani, S. Takács, F. Tárkányi, J. Csikai, Y.N. Shubin, Investigation of proton induced reactions on niobium at low and medium energies, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 267 (2009) 3364-3374.

DF-56. F. Ditrói, S. Takács, F. Tárkányi, R.W. Smith, M. Baba, Investigation of Proton and Deuteron Induced Reactions on Cobalt, J Korean Phys Soc, 59 (2011) 1697-1700.

DF-57. M. Al-Abyad, A.S. Abdel-Hamid, F. Tarkanyi, F. Ditrói, S. Takacs, U. Seddik, I.I. Bashter, Cross-section measurements and nuclear model calculation for proton induced nuclear reaction on zirconium, Appl. Radiat. Isot., 70 (2012) 257-262.

DF-58. F. Tarkanyi, F. Ditrói, S. Takacs, A. Hermanne, M. Al-Abyad, H. Yamazaki, M. Baba, M.A. Mohammadi, New activation cross section data on longer lived radio-nuclei produced in proton induced nuclear reaction on zirconium, Appl. Radiat. Isot., 97 (2015) 149-169.

DF-59. F. Ditrói, F. Tárkányi, S. Takács, A. Hermanne, H. Yamazaki, M. Baba, A. Mohammadi, Activation cross-sections of longer lived products of proton induced nuclear reactions on manganese up to 70 MeV, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 308 (2013) 34.

DF-60. A. Elbinawi, M. Al-abyad, E. Abd-Elmageed Karima, F. Hassan Khaled, F. Ditroi, Proton induced nuclear reactions on natural antimony up to 17 MeV, in: Radiochim. Acta, 2016, pp. 221.

DF-61. F. Ditroi, F. Tarkanyi, S. Takacs, A. Hermanne, Activation cross-sections of proton induced reactions on vanadium in the 37-65 MeV energy range, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 381 (2016) 16-28.

DF-62. F. Tarkanyi, F. Ditroi, A. Hermanne, S. Takacs, M. Baba, Investigation of activation cross sections of proton induced reactions on indium up to 70 MeV for practical applications, Appl. Radiat. Isot., 107 (2016) 391-400.

DF-63. F. Ditrói, S. Takács, H. Haba, Y. Komori, M. Aikawa, Z. Szűcs, M. Saito, Excitation function of the alpha particle induced nuclear reactions on enriched ^{116}Cd , production of the $^{117\text{m}}\text{Sn}$ theranostic isotope, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, 385 (2016) 1-8.

DF-64. F. Ditroi, S. Takacs, H. Haba, Y. Komori, M. Aikawa, Cross section measurement of alpha particle induced nuclear reactions on natural cadmium up to 52 MeV, Appl. Radiat. Isot., 118 (2016) 266-276.

DF-65. F. Ditroi, F. Tarkanyi, S. Takacs, A. Hermanne, New developments in the experimental data for charged particle production of medical radioisotopes, J. Radioanal. Nucl. Chem., 305 (2015) 247-253.

Hivatkozások

Conlon, T.W., 1979. Thin-Layer Activation - Current Applications to Wear and Corrosion Measurements and Future Potential in Studies of Surface-Treatment and Sputtering. Tribol Int 12, 60-64.

Ditroi, F., Tarkanyi, F., Takacs, S., Hermanne, A., 2015. New developments in the experimental data for charged particle production of medical radioisotopes. J. Radioanal. Nucl. Chem. 305, 247-253.

Ditrói, F., Takács, S., Mahunka, I., Mikecz, P., Toth, G., 1992. Determination of Oxygen in High-Purity Gallium by Using Charged-Particle Activation-Analysis. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 68, 166-169.

Eberle, D.C., Wall, C.M., Treuhaft, M.B., 2005. Applications of radioactive tracer technology in the real-time measurement of wear and corrosion. Wear 259, 1462-1471.

Erramli, H., 2006. Charged Particle Activation Analysis, Encyclopedia of Analytical Chemistry. John Wiley & Sons, Ltd.

Fehsenfeld, P., Eifrig, C., Kubat, R., 2002. Application of RNB for high sensitive wear diagnostics in medicine technique and industry. Nucl Phys A 701, 235c-239c.

Feldmann, L.C., Mayer, J.W., Picraux, S.T., 1982. Materials Analysis by Ion Channeling. Academic Press,, New York.

Giitz, G., Gartner, K., 1988. High Energy Ion Beam Analysis of Solids. Akademia-Verlag, Berlin.

IAEA, 1994. MENDL Medium Energy Nuclear Data Library. IAEA, http://www-nds.iaea.org/public/mendl2p/mendl2p_new.dat.

IAEA, 2014. EXFOR DATABASE <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>, <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>.

Qaim, S.M., 2001. Nuclear data for medical applications: an overview. Radiochim. Acta 89, 189-196.

Qaim, S.M., 2011. Recent Advances in Nuclear Data Research for Medical Applications. J Korean Phys Soc 59, 1965-1970.

Qaim, S.M., 2012. The present and future of medical radionuclide production. Radiochim. Acta 100, 635-651.

Qaim, S.M., 2015. Nuclear data for medical radionuclides. J. Radioanal. Nucl. Chem. 305, 233-245.

Schweikert, E.A., 1980. Charged Particle Activation Analysis. Anal Chem 52, 827A-844A.

Stevenson, N.R., St George, G., Simon, J., Srivastava, S.C., Mueller, D.W., Gonzales, G.R., Rogers, J.A., Frank, R.K., Horn, I.M., 2015. Methods of producing high specific activity Sn-117m with commercial cyclotrons. J. Radioanal. Nucl. Chem. 305, 99-108.

Strijekmans, K., 1997. Charged Particle Activation Analysis, in: Hellborg, R., Brune, D. (Eds.), Surface characterisation: a practical approach. Scandinavian Scientific Press & VCH, Weinheim, p. 1.

Tesmer, J.R., Nastasi, M., 1990. Oxygen Depth-Profile Channeling of Radiation-Damaged High-Tc Thin-Film Superconductors. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 45, 476-479.

Tesmer, J.R., Nastasi, M., 1995. Handbook of modern ion beam materials analysis. Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania.

von Hevesy, G., 1962. Adventures in radioisotope research: the collected papers of George Hevesy. Pergamon Press.