

Az Európai Neutronkutató Központ leszerelésével kapcsolatos sugárvédelmi számítások

Tézisfüzet

Kókai Zsófia

Okleveles mérnök-fizikus
Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest
Európai Neutronkutató Központ, Lund

Környezetfizika doktori program (Jánosi Imre Miklós, DsC, Egyetemi tanár)
Környezettudományi Doktori Iskola (Jánosi Imre Miklós, DsC, Egyetemi tanár)
Természettudományi Kar
Eötvös Loránd Egyetem, Budapest

Témavezetők:

Török Szabina, DsC

Laboratóriumvezető
Környezetfizikai Laboratórium
Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest

Péter Zagyvai, PhD

Tudományos főmunkatárs
Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest
Egyetemi docens
Budapesti Műszaki Egyetem, Budapest

Luca Zanini, PhD

Tudományos főmunkatárs
Európai Neutronkutató Központ, Lund



2019

Bevezetés

A jövő generációk védelme érdekében a radioaktív hulladékot termelő orvosi, ipari és kutatási célú létesítmények leszerelését meg kell tervezni, és a szükséges erőforrásokat biztosítani kell¹. A megfelelő tervezés biztosítja, hogy a leszerelés biztonságos és hatékony legyen. A pontos leszerelési terv elkészítéséhez számos információra van szükség. A létesítmény radioaktív leltárának pontos becslésére is szükség van². Már az építési engedély megszerzése előtt szükséges előzetes leszerelési tervet készíteni, és a tervezést a leszerelésre vonatkozóan is optimalizálni. A leszerelési tervet néhány évente felül kell vizsgálni.

Az Európai Neutronkutató Központ (European Spallation Source, ESS)³ a világ legnagyobb intenzitású neutronforrása lesz, amely széles körűen alkalmazható az anyagtudománnyal, nanotechnológiával, energiával, egészséggel és környezettel kapcsolatos kutatások során. Az ESS alapvető részei a lineáris protongyorsító, a forgó volfrám céltárgyat tartalmazó épületrész, valamint a különböző vizsgálati laborok. Az ESS lesz a világ első olyan berendezése, melynek alapját a Széchenyi-díjas magyar akadémikus professzor, Mezei Ferenc által jegyzett ún. hosszúimpulzusú forrás⁴ képezi. A 2 GeV-re gyorsított protonok szilárd, forgó volfrám céltárgyba ütköznek, és spallációt váltanak ki, azaz a volfrám atommagokból kisebb részeket hasítanak ki. A spallációban felszabaduló neutronokat moderátorok lassítják le a mérőhelyekre tervezett energiaszintre. A neutronokat a neutronvezetők juttatják el a különböző mérőhelyekre. A céltárgyat a tervek szerint ötévente cserélik, a létesítmény teljes tervezett élettartama pedig 40 év.

Az üzemidő alatt a szerkezeti anyagok felaktiválódnak, lecserélésük vagy leszerelésük után radioaktív hulladék keletkezik belőlük. Az aktiváció előzetes elemzése a tervezési szakaszban lehetővé teszi a keletkezett radioaktív hulladékok veszélyességének csökkentését. Ezen számítások alapján az anyagválasztás és a tervezés optimalizálható. Az ESS előzetes leszerelési tervében⁵ meghatároztuk a létesítmény kulcsfontosságú részeit a radioaktív hulladékok szempontjából.

Célkitűzések

Jelen kutatómunka célja olyan számítási eljárások kidolgozása, melyek lehetővé teszik az Európai Neutronkutató Központban keletkezett radioaktív hulladékok előzetes mennyiségi és minőségi elemzését. Az eredmények alapján elmondható, hogy az anyagösszetétel jelentős hatással van az aktivációra. A kidolgozott számítási eljárások segítségével előre azonosíthatók a legfontosabb keletkezett radionuklidok és azok forráselemei a gamma dózis (karbantartáshoz és felújítás esetén) és hulladékindex (feldolgozás, ideiglenes és végleges elhelyezés esetén) szempontjából. A számítási eredmények segítségével az anyagösszetétel optimalizálható a részleges és végleges leszerelés szempontjából.

Jelen értekezés az előzetes leszerelési tervben megjelölt kulcsfontosságú részek vizsgálatára fókuszál (target, neutronvezetők, reflektor, fém árnyékolás, kutatólabor), de a számítási eljárások kiterjeszthetők a teljes létesítményre.

A leszerelésnél a szilárd volfrám céltárgy lesz a legaktívabb radioaktív hulladék. A neutronvezetők aktivációja is fontos kérdés, mivel a terv szerint a neutronvezetőket néhány évente fogják cserélni a sugárkárosodás illetve mechanikai meghibásodások miatt, valamint a technológiai fejlődés következtében. A berillium reflektor cseréjét szintén tervezik, ráadásul a berillium speciális kezelést igényel. Az ESS-nél a fém alapú árnyékolás fontos szerepet játszik a nagy energiájú neutronok és a gamma sugárzás árnyékolásában. A laborok szerkezeti anyagainak aktivációja különös figyelmet igényel az ott dolgozók védelme érdekében. Ebben a disszertációban példaképp az NMX makromolekuláris diffraktométer labort tanulmányoztam. A kiválasztott részek aktivációjára nagy hatással van az anyagválasztás.

A modellszámítások validálása érdekében alumínium és üveg neutronvezető szubsztrát mintákat sugároztak be a Budapesti Neutronkutató Központban, és a mért aktivitáskoncentrációkat összehasonlítottuk a modell előrejelzéseivel.

Alkalmazott módszerek

1. Az aktivációs számítások módszertana

A létesítmény komplex felépítése részecsketranszport kódok használatát igényelte a radioaktív leltárak meghatározásához. A számításokat MCNPX2.7⁶ kóddal végeztem, ENDF/B-VII hatáskeresztmetszeti könyvtárakkal és CINDER'90⁷ aktivációs számításra alkalmazható kóddal kiegészítve. A Monte Carlo módszeren alapuló MCNPX program kiterjed a primer protonok és a szekunder részecskék mozgásának modellezésére széles energiatartományban. A céltárgy, a neutronvezetők és a berillium reflektor esetében a számításokhoz használt geometriát az ESS TDR³-ben megadott paraméterek szerint határoztam meg. A forgó volfrám céltárgy eredetileg tervezett átmérője 2.5 m, és 33 szegmensből áll. A protonnyaláb energiája 2 GeV, az áram idő szerinti átlaga 2.5 mA, ami $1.56 \cdot 10^{16}$ proton/s idő szerint átlagolt működési intenzitást jelent. Az NMX labor szerkezeti anyagainak és a fém alapú árnyékolások anyagának aktivációs számításaihoz neutronforrást tartalmazó MCNPX modelleket használtam. A választott modell érzékenységének vizsgálatára a számításokat többféle spallációs modellel is elvégeztem.

2. A hulladék besorolásának módszertana

A hulladékok osztályozása az elhanyagolható dózis kiszámításán alapuló módszerrel történt⁸. Ennek alapja, hogy ha egy hulladékcsomag radioaktív hulladékként történő kezelés és elhelyezés nélkül sem okozhat az elhanyagolható dózisonál nagyobb dózist a reprezentatív személynek, akkor felszabadítható a szabályozás alól. Ez a módszer a teljes hulladékáramhoz ún. hulladékindexet (WI, waste index) rendel, amely különböző hulladékosztályokat definiál az elhanyagolható dózishoz köthető ún. felszabadítási szintek (CL, clearance level) segítségével. A felszabadítási szinteket több NAÜ-kiadványban is közzétették, de a különböző forgatókönyvekhez kapcsolódó felszabadítási szintek legpontosabb összeállítása az RP122⁹-ben található. Számos protonaktivációból és spallációból származó radioizotóp azonban nem jelenik meg ezekben az összeállításokban^{9,10,11}, mivel ezeket a kiadványokat elsősorban az atomreaktorokban keletkező, neutronöbblettel rendelkező radioizotópokra fejlesztették ki. A hiányzó felszabadítási szintek becslésére két módszert alkalmaztam. Mindkét esetben az effektív dózis összetevőit hasonlítottam össze egy ismert felszabadítási szinttel rendelkező standard

radionukliddal. Míg a gammasugárzó radionuklidok esetén külső sugárterhelés alapján, addig az α - és β -sugárzó radionuklidok esetén belső sugárterhelés alapján becsültem meg az effektív dózist, és ezáltal a felszabadítási szintet.

3. Besugárzási kísérletek

Alumínium és üveg neutronvezető szubsztrát mintákat sugároztak be a Budapesti Neutronkutató Központban. A névleges anyagösszetételt röntgenfluoreszcencia-spektroszkópiával (XRF) igazolták. A besugárzott minták aktivitáskoncentrációit gamma-spektroszkópiával határozták meg. A besugárzási kísérleteket a besugárzási csatorna MCNPX modelljével és CINDER'90 aktivációs kóddal szimuláltam. A kísérletek és a szimulációk eredményei hibahatáron belül megegyeztek.

Tézispontok

1. A hulladékindex meghatározásához a vizsgált anyagban található összes mesterséges radionuklid felszabadítási szintjére szükség van. A felszabadítási szinteket tartalmazó NAÜ és EU kiadványokban^{9,10,11} ismertetett forgatókönyvek alapján meghatároztam a felszabadítási szinteket a felaktiválódott volfrám céltárgy azon összetevőire, melyek ezen kiadványokból hiányoztak [T1].

2. Meghatároztam az ESS volfrám céltárgyának radioaktív leltárát és hulladékindexét, melyet összehasonlítottam előzetesen vizsgált koncepciókkal.

a) Az ESS volfrám céltárgyának radionuklid leltárának és hulladékindexének meghatározásához nagy energiájú modelleket hoztam létre MCNPX2.7⁶ és CINDER'90⁷ programkódok kombinálásával. A spalláció folyamatának szimulációjára egylépcsős és kétlépcsős modelleket is alkalmaztam. A proton-indukálta spalláció első lépését intranukleáris kaszkád (INC) modellekkel szimuláltam, ezekhez Bertini¹², INCL4.2¹³ és Isabel¹⁴ kódot alkalmaztam. A magok legerjesztődését, amely a folyamat második lépése, Dresner¹⁵ és ABLA¹⁶ kódokkal szimuláltam. A CEM02¹⁷ modell, amelyet szintén alkalmaztam a számításokban, a spallációs folyamat mindkét egymást követő lépését tartalmazza. A különböző modellekkel kapott teljes aktivitáskoncentráció trícium nélkül: 10^9 Bq/cm³ ($\pm 10\%$). A trícium esetében azonban az alkalmazott modellek eredményei közt 3 nagyságrendnyi különbség adódott. A CEM02 modell adta a legkonzervatívabb becslést a tríciumra: 1.4×10^{10} Bq/cm³. A többi jelentős radionuklidra az INCL4.2 és az ABLA kódok kombinációja adta a legkonzervatívabb becslést [T1, T5, T9, T12, T15].

b) A radioaktív izotópleltár meghatározása alapján megállapítottam, hogy a volfrám céltárgy 5 éves besugárzás és 10 éves hűtési idő után nagy aktivitású hulladékként (HLW, high level waste) lesz besorolva. A hulladékindexet 2 GeV-es proton energiával számolva 3.2×10^7 értékre becsültem. A hulladékindex alapján megállapítottam, hogy a volfrám target leszerelés szempontjából kedvezőbb választás, mint az előzetesen tervbe vett ólom-bizmut eutektikum (LBE, lead-bismuth eutectic) és higany target koncepciók, hasonló működési paraméterek mellett. A hulladékindexhez a következő nuklidok járultak hozzá a legjelentősebben: ¹⁴⁸Gd, ¹³³Ba, ¹⁵²Eu, ¹⁷⁹Ta, ⁶⁰Co és ¹⁵⁴Eu. Megállapítottam, hogy a ⁶⁰Co 99%

-ban a volfrám anyagának kobaltszennyezéséből származik, ezért csekély kobalttartalmú szerkezeti anyagok használatát javasoltam [T1, T9, T13].

3. a. Megvizsgáltam a céltárgyhoz legközelebb eső neutronvezető szubsztrát anyagainak aktivációját üzemelés és leszerelés szempontjából. A számításokat MCNPX2.7⁶/CINDER'90⁷ modellekkel végeztem, három különféle anyagra. Megállapítottam, hogy a neutronvezetők cseréjekor, azaz öt év működés után az alumíniumból készült neutronvezetők (1.9×10^7 Bq/cm³) kevésbé lennének aktívak, mintha üveg (1.1×10^8 Bq/cm³) vagy zerodur (1.2×10^8 Bq/cm³) lenne a neutronvezetők anyaga. Zerodur esetében a trícium adja a legfontosabb hozzájárulást. A fő gammakibocsátó izotópok, amelyek meghatározzák az eszköz cseréjét végző személyzet dózisterhelését, alumínium és zerodur esetén ⁶⁵Zn, üveg esetén a rövid élettartamú ²⁴Na lenne. Mivel a ⁶⁵Zn nagyrészt a cinkből keletkezik, ezért célszerű csekély cinktartalmú alumíniumot illetve zerodurt használni [T7, T8, T11, T13].

b. Megvizsgáltam az anyagi összetétel hatását a fém-alapú árnyékolóelemek aktivációjára. A számításokat MCNPX2.7⁶/CINDER'90⁷ modellekkel végeztem. Három anyagot vizsgáltam: acél, réz és alumínium. Közvetlenül a leállítás után az acélból készült árnyékoló blokk lenne a legkevésbé radioaktív, a benne keletkező főbb radionuklidok ⁵⁵Fe, ⁵⁹Fe, ⁵⁴Mn, ⁵⁶Mn. Ezért acél használata esetén, ha lehetséges, célszerű csökkenteni annak mangántartalmát az előnyös termikus és fizikai tulajdonságainak megtartásával. 5 napos hűtési idő után a rézből készült árnyékoló blokk lenne a legkevésbé radioaktív, mivel ebben a rövid élettartamú réz radionuklidok: ⁶⁴Cu és ⁶⁶Cu dominálnak. A felaktiválódott alumínium árnyékolásban a rövid élettartamú ²⁸Al, ⁵⁶Mn, ⁶⁴Cu és a hosszabb élettartamú ⁶⁵Zn a legjelentősebb radionuklidok. Ezért célszerű itt is csekély cinktartalmú alumíniumot használni [T4, T13].

4. Aktivációs számításokat és dózisbecslést végeztem a felaktiválódott berillium reflektor cseréje során fellépő dóziskövetkezmények becslésére. A radionuklid leltár meghatározását MCNPX2.7⁶/CINDER'90⁷ modellekkel végeztem. Megállapítottam, hogy 1 éves működés után a legaktívabb gammasugárzó radionuklidok a ⁵⁶Mn (1.8×10^9 Bq/cm³) és ⁷Be (9.7×10^8 Bq/cm³). Az egyéves besugárzási idő után a berillium reflektor külső

felületi dózisteljesítménye 720 Sv/h, ami 2 hetes hűtési idő után 60 mSv/h-ra csökken. Ezen értékek alapján megállapítható, hogy a berilliumot forró kamrában (hot cell) kell tárolni, mielőtt végleges ártalmatlanításra kerülne sor. Ezen kívül legalább két hetet érdemes várni a leállítás után a berillium cseréjével. Két hétig tartó hűtési idő után a felaktiválódott berilliumban a legaktívabb gammakibocsátók: ^7Be , ^{51}Cr , ^{46}Sc , ^{95}Nb , ^{95}Zr , ^{60}Co és ^{88}Y . Ez azt jelenti, hogy a kobalt, króm, szkandium nióbium és itrium szennyeződések mennyiségét a lehető legnagyobb mértékben csökkenteni kell a berillium anyagösszetételében [T5, T9].

5. A fent bemutatott szoftver eszközök kombinációjával végzett szimulációs számítások validálására besugárzási kísérleteket terveztem. Alumínium neutronvezető szubsztrát mintákat 6 órán át sugároztak be a Budapesti Neutronkutató Központ egyik gyorsneutron besugárzó csatornájában. A minták névleges anyagösszetételének felhasználásával végzett számítások meglehetősen nagy különbséget mutattak a kísérleti eredményekhez képest. Ezen eredmények alapján javasoltam, hogy a minta névleges összetételét (különös tekintettel a nyomelemekre) röntgenfluoreszcenciás spektroszkópiával (XRF, X-ray fluorescence spectrometry) ellenőrizzék. Az XRF elemzéssel kapott anyagösszetétel felhasználásával végzett számítások nagyságrendi egyezést mutattak a kísérleti adatokkal. Egyhetes hűtési idő után két különböző mintában a legaktívabb radionuklidok ^{65}Zn (4.8×10^4 és 7.1×10^7 Bq/cm³), ^{64}Cu (2.4×10^4 és 1.8×10^6 Bq/cm³) és ^{51}Cr (3×10^6 és 2.39×10^6). Ezek az eredmények azt mutatják, hogy az alumínium szubsztrátnak a lehető legkisebb Zn, Cu és Cr koncentrációt kell tartalmaznia. ^{60}Co esetén a mért adatok egy nagyságrenddel nagyobbak voltak, mint a szimulált. Ez valószínűleg a minta a kobalttartalmából adódott, amit sem az XRF elemzés nem mutatott ki; sem a névleges összetétel nem tartalmazott. Ezért tanácsos az anyagösszetételeket az XRF mellett több különféle kísérleti módszerrel ellenőrizni, pl. neutronaktivációs analitika alkalmazásával. Figyelembe véve a minták névleges és kísérleti úton meghatározott elemi összetételének eltéréseit, a mérési és a számított eredmények közötti egyezés megfelelően pontos volt ahhoz, hogy ezzel igazoljuk a dolgozatban bemutatott szimulációs eljárások alkalmasságát. Ugyanezen módszerekkel végzett számítások az ESS neutronvezetőinek aktivációs számításához is felhasználhatók [T3].

6. Számításokat végeztem az ESS NMX kísérleti labor szerkezeti anyagainak aktivációjára. A tervek szerint a falak betonból, a padló pedig alumíniumból készül, ezért a számításaimban is ezt tételeztem fel. A számításokhoz MCNPX2.7⁶/CINDER'90⁷ modelleket használtam. Megállapítottam, hogy 40 év működés után a mérőhelyen tartózkodó személyzet dózisterheléséhez a felaktiválódott alumínium padló (2.46 kBq/g) járul hozzá leginkább a benne keletkező gammasugárzó ²⁸Al és ⁵⁶Mn miatt. Ezért azt javasoltam, hogy az alumínium, mint szerkezeti anyag használata helyett valami más, nukleáris iparban használatos anyagot vagy acélborítású bórtartalmú padlót használjanak. A felaktiválódott betonfalban a ²⁴Na fogja a legnagyobb hozzájárulást adni a dózistérhez [T2].

Publikációk

[T1] Zs. Kókai, Sz. Török, P. Zagyvai, D. Kiselev, R. Moormann, E. Börcsök, L. Zanini, A. Takibayev, G. Muhrer, R. Bevilacqua, J. Janik: Comparison of different target material options for the European Spallation Source based on certain aspects related to the final disposal, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 416, 1 February 2018, Pages 1-8 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X17309977>

[T2] G. Náfrádi, Zs. Kókai, P. Zagyvai: Az NMX mérőhelyének sugárnyékolása (Shielding of ESS NMX cave), Nukleáris Technikai Szimpózium, 2017

[T3] Zs. Kókai, E. Dian, L. Zanini, F. Mezei, A. Takibayev, E. Klinkby, Sz. Török, P. Zagyvai, G. Patriskov, F. Gergely: Neutron guide activation calculations for the European Spallation Source and validation measurements at Budapest Neutron Centre, International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS XXII), 27-31 March 2017, Oxford, UK, <http://icansxxii.iopconfs.org>

[T4] D. Dijulio, C. P Cooper-Jensen, H. Björgvinsdóttir, Zs. Kókai, P. M. Bentley: High-energy in-beam neutron measurements of metal-based shielding for accelerator-driven spallation neutron sources, Physical Review Accelerators and Beams, 19, 053501 (2016) <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.053501>

[T5] Yongjoong Lee (Ed.): ESS Materials Handbook, Beryllium dose maps in the target area, ESS-0028465, 2015

[T6] Zs. Kókai, L. Zanini, F. Mezei, A. Takibayev, E. Klinkby, P. Zagyvai, Sz. Török: Activation of the neutron guides designed for the European Spallation Source, 6th International Conference "Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena - Channeling 2014", Capri, October 5-10, 2014

[T7] Zs. Kókai, L. Zanini, F. Mezei, A. Takibayev, E. Klinkby, P. Zagyvai, Sz. Török: Neutron guide activation and handling for the European Spallation Source, ICANS XXI: International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Mito, 29 Sep - 3 Oct 2014

[T8] Kókai Zs., Zagyvai P., Török Sz.: Az Európai Neutronkutató Központ leszerelési terve (Decommissioning plan of ESS), Nukleon VII.évf. 4.szám, 2014, <http://nuklearis.hu/nukleon/az-europai-neutronkutato-kozpont-leszerelési-terve>

[T9] P. Zagyvai, Zs. Kókai, D. Ene: Initial decommissioning plan for ESS, SSM2012-131, 2013

[T10] Zs. Kókai, P. Zagyvai. Sz. Török, L. Zanini: Health physics calculations related to the target station radiation protect, Accelerator and Integrated Control System Retreat, 2013

[T11] Zagyvai P., Kókai Zs.: A nukleáris energiatermelés radioaktív hulladékai - lektorált egyetemi jegyzet (Radioactive waste of nuclear fuel cycle), 2013 <https://www.scribd.com/doc/316374945/Nuklearis-Uzemanyciklus-Radioaktiv-Hulladekai-MTA-EK>

[T12] Zagyvai P., Kókai Zs., Török Sz.: Leszerelési tervek európai nagyberendezésekhez (Decommissioning plan of European research facilities), Nukleáris Technikai Szimpózium, Budapest, 2013

[T13] Kókai Zs., Zagyvai P., Bodor K.: Az Európai neutronkutató központ (ESS) előzetes leszerelési tervével kapcsolatos kutatások (Research related to initial decommissioning plan of ESS), XXXVIII. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam, Hajdúszoboszló, 2013

[T14] Kókai Zs., Breitner D., Török Sz.: Nagyaktivitású hulladék végleges elhelyezésére vonatkozó nemzetközi elképzelések (Final disposal of high level radioactive waste), Nukleáris Technikai Szimpózium, Paks, 2012

Referenciák

- ¹ Decommissioning of medical, industrial and research facilities, IAEA Safety Standards Series no. Ssg-49, Vienna, 2019
- ² Methodologies for assessing the induced activation source term for use in decommissioning applications, Safety Reports Series No. 95, IAEA, Vienna, 2019
- ³ S. Peggs (Ed.), ESS Technical Design Report, 2013.
- ⁴ F. Mezei, Long pulse spallation sources, In *Physica B: Condensed Matter*, Volumes 234–236, 1997, Pages 1227-1232
- ⁵ P. Zagyvai, Zs. Kókai, D.Ene: Initial decommissioning plan for ESS, SSM2012-131, 2013
- ⁶ D. Pelowitz. (ed.), 2011. MCNPX User's Manual, Version 2.7.0, LA-CP-11-00438
- ⁷ W. B. Wilson, S. T. Cowell, T. R. England, A. C. Hayes & P. Moller, *A Manual for CINDER'90 Version 07.4 Codes and Data*, (2007)
- ⁸ *Radiobiology for the Radiologist* E.J. Hall & A.J. Giaccia. 6th ed. Lippincott. Williams & Wilkins, Philadelphia 2006.
- ⁹ Radiation Protection 122/I *Guidance on General Clearance Levels for Practices* Recommendations of the Group of Experts (2000)
- ¹⁰ Radiation Protection 157 *Comparative Study of EC and IAEA Guidance on Exemption and Clearance Levels* Directorate-General for Energy Directorate D — Nuclear Energy Unit D4 — Radiation Protection (2010)
- ¹¹ IAEA Safety Reports Series 44 *Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance* Vienna, 2005.
- ¹² H.W. Bertini, *Phys. Rev.* 188 (1969) 1711–1730
- ¹³ A. Boudard, J. Cugnon, S. Leray, and C. Volant., *Phys. Rev. C* 66, 044615 (2002)
- ¹⁴ Y. Yariv, Z. Fraenkel, 1981. *Phys. Rev. C.* **24**. 488-494

¹⁵ L. Dresner, 1981. EVAP-A Fortran Program for Calculating the Evaporation of Various Particles from Excited Compound Nuclei, Oak Ridge National Laboratory report ORNL-TM-7882

¹⁶ A.R. Junghans, M. de Jong, H.-G. Clerc, A.V. Ignatyuk, G.A. Kudyaev, K.-H. Schmidt, Projectile-fragment yields as a probe for the collective enhancement in the nuclear level density, In Nuclear Physics A, Volume 629, Issues 3–4, 1998, Pages 635-655

¹⁷ K.K. Gudima, S.G. Mashnik, V.D. Toneev, Cascade-exciton model of nuclear reactions, Nuclear Physics A, Volume 401, Issue 2, 1983, Pages 329-361