

# ÚJ REAKTORDOZIMETRIAI HATÁSKERESZTMETSZET- KÖNYVTÁR, IRDF-2002

Zsolnay Éva

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,  
Nukleáris Technikai Intézet

Andrej Trkov

Nemzetközi Atomenergia Ügynökség,  
Nukleáris Adat Szekció, Bécs

A mag-, neutron- és reaktorfizikában fontos szerepet játszik az elméleti számításoknál, valamint a kísérleti adatok kiértékelésénél a felhasznált nukleáris adatok megbízhatósága. Az atomreaktorok biztonságos működtetésének, továbbá az előbb említett területeken végzett kutatási feladatok sikeres megoldásának és az eredmények megbízható gyakorlati alkalmazásának alapvető feltétele, hogy a munkához pontos nukleáris adatok (magreakció-hatáskeresztmetszetek, bomlási állandók, a radioaktív sugárzások jellemzői stb.) álljanak rendelkezésre. Számos ilyen kutatási feladatot a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ), illetve az Európai Unió is támogat. Néhány jellemző példa: korunkban az egész világon napirenden van az atomerőművek üzemidejének meghosszabbítása [1] (ez érvényes a paksi atomerőműre is), amely kiterjedt elméleti és kísérleti vizsgálatokat, elemzéseket igényel; egyre elterjedtebbé válik a kísérleti atomreaktorok neutronsugárzásának gyógyászati alkalmazása (pl. bőr neutronbefogásos rákterápia, BNCT [2]), továbbá a neutronforrások széles körű alkalmazása a geológiában és egyéb ipari területeken [3].

A neutronterek jellemzőinek vizsgálatával (pl. neutronok energiaeloszlása – neutronspektrum –, a neutronforrás erőssége stb.) általában a *neutronmetrológia* foglalkozik. Ennek egy speciális területe a *reaktorozimétria*, amely a reaktortartályon belüli neutronsugárzás tulajdonságait kutatja. Jelen cikk keretében a neutronmetrológia, illetve reaktorozi métria területén való felhasználás céljára újonnan létrehozott *Nemzetközi Reaktorozi métriai Hatáskeresztmetszet-könyvtár (International Reactor Dosimetry File, IRDF-2002)* kifejlesztésének fontosabb lépéseit, tartalmát és főbb jellemzőit foglaljuk össze a 12. Nemzetközi Reaktorozi métriai Szimpóziumon (Gatlinburg, Tennessee, USA, 2005. május 8–13.) elhangzott, hasonló témájú előadás alapján [4].

## Az új nukleáris adattár kifejlesztésének háttere és a munkában részt vevő intézetek

A nemzetközi reaktorozi métriai hatáskeresztmetszet-könyvtár megelőző, tesztelt változatát (IRDF-90 Ver. 2. [5]) 1993-ban bocsátotta ki a NAÜ. Azóta a benne foglalt adatok elavultak, számos új, jobb minőségű adat jelent meg az irodalomban. Több ország létrehozta a saját „nemzeti” reaktorozi métriai könyvtárát (zömében kísérletileg tesztelt adatokból). Így az egymástól különböző hatásker-

esztmetszetek felhasználásával kiértékelte kísérleti adatok még azonos reaktortípusok esetében is összehasonlíthatatlanná váltak. Ezért a nemzetközi reaktorozi métriai közösség kifejezte igényét a NAÜ-nél egy új, az adatok bizonytalanságát is tartalmazó, kísérletileg tesztelt reaktorozi métriai hatáskeresztmetszet-könyvtár létrehozására, amelynek kifejlesztése a NAÜ irányításával történik, és amelyet a NAÜ terjeszt. Ezt a kívánságot megerősítette az Európai Reaktorozi métriai Munkacsoport (EWGRD) és a megfelelő amerikai Reaktorozi métriai Munkabizottság (ASTM E10.5) elnöke is, majd 2000-ben a Nemzetközi Nukleáris Adatbizottság (*International Nuclear Data Committee*, INDC) javaslatára a NAÜ Nukleáris Adat Szekciója (*Nuclear Data Section*, NDS) elindította a kért új nukleáris adattár kifejlesztésére irányuló programot. A program célja egy, a legújabb nukleáris adatokon alapuló, a megfelelő bizonytalanságokat is tartalmazó, konzisztens, kísérletileg tesztelt, standardizált hatáskeresztmetszet-könyvtár (IRDF-2002) létrehozása volt, amelynek elsődleges felhasználási területe az atomerőművi reaktortartályok élettartambecslése, továbbá egyéb reaktorozi métriai és neutronmetrológiai feladatok megoldása.

A munkát egy nemzetközi munkacsoport végezte az alábbi résztvevőkkel [4]:

*Koordinátor:* NAÜ, Nukleáris Adat Szekció (NDS);

*Részt vevő intézetek, illetve laboratóriumok:*

- Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet (BME NTI)
- Institute of Physics and Power Engineering (IPPE), Obnyinszk, Oroszország
- Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Németország
- Centre d'Etudes Nucléaires (CEA), Bruyères-le-Châtel, Franciaország
- Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, USA,
- Pacific Northwest Laboratory (PNL), Richland, USA.

## Az új hatáskeresztmetszet-könyvtár létrehozásának főbb lépései

Az új hatáskeresztmetszet-könyvtár létrehozása érdekében végzett nagy volumenű munka az alábbiak szerint foglalható össze:

1. *A nemzetközi irodalomban hozzáférhető, korszerű hatáskeresztmetszet-könyvtárak adatainak részletes analízise és összehasonlítása egymással; a bibátlan adatok kiválasztása az új könyvtár számára (BME NTI)*

Ezt a közleményt *Csikai Gyula* professzor úrnak ajánljuk születésnapja 75. évfordulója alkalmából, akit szeretettel köszöntünk, jó egészséget és további sikereket kívánunk a munkájában.

Az elemzett könyvtárak az alábbiak voltak:

- IRDF-90 Ver.2. [1],
- JENDL/D-99 [6],
- RRDF-98 (eredeti és felújított változat) [7], továbbá
- új, az utóbbi években kifejlesztett hatáskeresztmetszet-adatok az alábbi adattárakból [8]: ENDF/B-VI (Rev.8), JEFF-3.0, CENDL-2.

Az analízis a következő vizsgálatok elvégzését jelentette (lásd a megfelelő cikket [9]-ben):

- Az adatok formátumának és eredetének ellenőrzése;
- A hatáskeresztmetszetek és a hozzátartozó bizonytalanságok numerikus jellemzése három elméleti spektrumfüggvényre (termikus Maxwell-spektrum,  $1/E$ -spektrum és Watt hasadási spektrum) átlagolt integrális értékek kiszámítása révén;

– A felsorolt könyvtárakból származtatott, integrális hatáskeresztmetszet-adatok (és bizonytalanságuk) összehasonlítása egymással;

– A hatáskeresztmetszet-adatok bizonytalansági értékeinek kiterjedt vizsgálata (beleértve a kovarianciamátrixok részletes analízisét is).

Összesen 180 hatáskeresztmetszet-adatot analizáltunk, egy részüket több ízben is. Az analízis eredményét a NAÜ közvetítésével eljuttattuk a megfelelő adattárak kifejlesztőihez, akik az általunk detektált hibákat kijavították, az észlelt hiányosságokat pótolták, majd az így nyert adatokat visszaküldték a NAÜ-nek ismételt ellenőrzés céljából. Végül a megvizsgált 180 hatáskeresztmetszet-adatból 117 adat bizonyult hibátlannak (beleértve a következő pontban bemutatott új fejlesztéseket is) [4, 9]. Ezekből az előzetesen kiszűrt, hibátlan adatokból kellett azután az IRDF-2002 könyvtárba szánt hatáskeresztmetszeteket a hozzátartozó bizonytalanságokkal együtt kiválasztani.

## 2. Új fejlesztések (IPPE, Obnyinszk)

A projekt keretében, a NAÜ megbízásából nyolc – a rendelkezésre álló könyvtárakban nem szereplő, vagy hibás adatokat tartalmazó – magreakcióra fejlesztettek ki új hatáskeresztmetszet-adatokat Obnyinszkban [7]. Az előzőekben ismertetett analízis után ezen hatáskeresztmetszetek mindegyike bekerült az új könyvtárba.

## 3. Az előzetesen kiszűrt, hibátlan hatáskeresztmetszet-adatok összehasonlítása korszerű kísérleti értékekkel, és konzisztenciavizsgálat benchmark neutronterekben (BME NTI, Budapest – PTB, Braunschweig – SNL, PNL – USA)

Az 1. pontban említett 117 hatáskeresztmetszetnek és a hozzájuk tartozó bizonytalanságoknak kiszámítottuk az integrális (spektrumra átlagolt) értékeit az alábbi standard neutronterekben: termikus Maxwell-,  $1/E$ - és  $^{252}\text{Cf}$  hasadási neutronspektrumban, továbbá 14 MeV neutronenergiánál (lásd a megfelelő cikkeket [9]-ben). A kapott integrális értékeket összehasonlítottuk a megfelelő korszerű mérési adatokkal (C/E), és minősítettük a kapott eredményeket (lásd a megfelelő cikkeket [9]-ben).

Végül a kiválasztott hatáskeresztmetszetek zömét konzisztenciavizsgálatnak vetettük alá két referencia-neutronterben (ACRR és SP-III) végzett kísérleti vizsgálatok eredményeinek felhasználásával [4], továbbá lásd a megfelelő cikket [9]-ben).

1. táblázat

### Az IRDF-2002 nemzetközi reaktordozimetriai hatáskeresztmetszet-könyvtárban szereplő reakciók és a vonatkozó hatáskeresztmetszet-adatok forrásai

Reakciók	Hatáskeresztmetszetek forrása	Reakciók	Hatáskeresztmetszetek forrása
$^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$	IRDF-90*	$^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$	IRDF-90*
$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$	IRDF-90	$^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$	IRDF-90
$^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$	RRDF-98(u)	$^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$	RRDF-98(u)
$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$	IRDF-90*	$^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$	JENDL/D-99
$^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$	JENDL/D-99(u)	$^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89}\text{Zr}$	IRDF-90
$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$	IRDF-90	$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$	RRDF-98
$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	RRDF-98(new)	$^{93}\text{Nb}(n,n)^{93m}\text{Nb}$	RRDF-98
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	IRDF-90	$^{93}\text{Nb}(n,\gamma)^{93}\text{Nb}+$	IRDF-90*
$^{31}\text{P}(n,p)^{31}\text{Si}$	IRDF-90	$^{103}\text{Rh}(n,n)^{103m}\text{Rh}$	RRDF-98(new)
$^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$	IRDF-90	$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110m}\text{Ag}$	IRDF-90
$^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$	IRDF-90	$^{113}\text{In}(n,2n)^{114m}\text{In}$	IRDF-90*
$^{46}\text{Ti}(n,2n)^{45}\text{Ti}$	RRDF-98(u)	$^{115}\text{In}(n,n)^{115m}\text{In}$	RRDF-98(new)
$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	RRDF-98(u)	$^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116m}\text{In}+$	ENDF/B-VI
$^{47}\text{Ti}(n,x)^{46}\text{Sc}$	RRDF-98(u)	$^{127}\text{I}(n,2n)^{126}\text{I}$	IRDF-90
$^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$	IRDF-90	$^{139}\text{La}(n,\gamma)^{140}\text{La}$	RRDF-98(new)
$^{48}\text{Ti}(n,x)^{47}\text{Sc}$	RRDF-98(u)	$^{141}\text{Pr}(n,2n)^{140}\text{Pr}$	RRDF-98(u)
$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	RRDF-98(u)	$^{169}\text{Tm}(n,2n)^{168}\text{Tm}$	JENDL/D-99
$^{49}\text{Ti}(n,x)^{48}\text{Sc}$	RRDF-98(u)	$^{181}\text{Ta}(n,\gamma)^{182}\text{Ta}+$	JENDL/D-99
$^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$	RRDF-98(u)	$^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$	RRDF-98(new)
$^{52}\text{Cr}(n,2n)^{51}\text{Cr}$	IRDF-90	$^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$	IRDF-90
$^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$	IRDF-90*	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	IRDF-90*
$^{54}\text{Fe}(n,2n)^{53}\text{Fe}$	RRDF-98(u)	$^{199}\text{Hg}(n,n)^{199m}\text{Hg}$	JENDL/D-99(u)
$^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$	RRDF-98(u)	$^{204}\text{Pb}(n,n)^{204m}\text{Pb}$	RRDF-98(new)
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	IRDF-90*	$^{232}\text{Th}(n,\gamma)^{233}\text{Th}+$	IRDF-90
$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	RRDF-98(u)	$^{232}\text{Th}(n,f)$	IRDF-90
$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	JENDL/D-99(u)	$^{235}\text{U}(n,f)$	IRDF-90
$^{59}\text{Co}(n,2n)^{58}\text{Co}$	IRDF-90	$^{238}\text{U}(n,f)$	JENDL/D-99
$^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$	RRDF-98(u)	$^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$	IRDF-90*
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	IRDF-90*	$^{237}\text{Np}(n,f)$	RRDF-98(new)
$^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$	JEFF3.0	$^{239}\text{Pu}(n,f)$	JENDL/D-99
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	RRDF-98(new)	$^{241}\text{Am}(n,f)$	JENDL/D-99
$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$	ENDF/B-VI	$^{\text{nat}}\text{B}(n,x)\#$	ENDF/B-VI
$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	ENDF/B-VI	$^{\text{nat}}\text{Cd}(n,x)\#$	ENDF/B-VI
$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$	IRDF-90*	$^{\text{nat}}\text{Gd}(n,x)\#$	ENDF/B-VI
$^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$	RRDF-98(u)		

+ Diagonális kovarianciamátrix.

# Burkoló anyag; kovarianciainformáció nem áll rendelkezésre.

u Újraértékelt adat.

\* Eredeti forrás: ENDF/B-VI Rel. 8.

(n, x<sup>#</sup>) – Az (n,np), (n,pn) és (n,d) magreakciók hatáskeresztmetszetének összege.

## 4. Az IRDF-2002 könyvtárba kerülő hatáskeresztmetszet-adatok végleges kiválasztása (NAÜ, NDS – BME NTI, Budapest – IPPE, Obnyinszk – PTB, Braunschweig – CEA, Franciaország – SNL, PNL, USA)

Az IRDF-2002 könyvtárba kerülő hatáskeresztmetszet-adatok végleges kiválasztását a projekt résztvevői együttesen végezték a NAÜ székhelyén 2003 októberében megtartott technikai tanácskozás alkalmával [9]. Az adatok kiválasztása az alábbi kritériumok figyelembe vételén alapult:

– a szóba jöhető hatáskeresztmetszetek integrális adatainak a megfelelő kísérleti eredményekkel való összevetése;

– a hatáskeresztmetszetekhez tartozó bizonytalansági adatok minősége;

– a vizsgált adatok konzisztenciája.

Ezen kritériumok alapján az IRDF-2002 hatáskeresztmetszet-könyvtárba került magreakciókat és a vonatkozó hatáskeresztmetszet-adatok forrását az 1. táblázat mutatja (lásd pl. [4]-ben).

## Az új könyvtár tartalma

Az új nemzetközi reaktordozimetriai hatáskeresztmetszet-könyvtár, IRDF-2002, a készítés időpontjában fellelhető legjobb minőségű reaktordozimetriai hatáskeresztmetszet-adatokat tartalmazza (az adatgyűjtés 2003 decemberében fejeződött be). A könyvtár lényegében három adatkészletből áll [4]:

### a) Sokcsoportos hatáskeresztmetszet-adatok neutronmetrológiai felhasználás céljára

– hatáskeresztmetszetek 66 neutronaktivációs (és hasadási) magreakcióra nézve a vonatkozó bizonytalansági adatokkal együtt (utóbbiak kovarianciamátrixok formájában állnak rendelkezésre);

– három neutronárnyékoló anyag (B, Cd és Gd) totális hatáskeresztmetszete bizonytalansági adatok nélkül;

– sugárkárosodási hatáskeresztmetszetek néhány elemre és vegyületre, bizonytalansági adatok nélkül.

### b) Adatok pontformátumban

– jelen vannak az összes, fentiekben felsorolt hatáskeresztmetszetre nézve, kivéve a sugárkárosodási adatokat;

– rendelkezésre állnak továbbá a könyvtárban szereplő valamennyi neutronbefogási és hasadási magreakció totális hatáskeresztmetszetére is a megfelelő bizonytalansági adatokkal együtt.

### c) Egyéb adatok (CEA, Franciaország, feldolgozásában lásd pl. [9]-ben)

– valamennyi, a könyvtárban szereplő céltárgymag izotópgyakorisága;

– valamennyi, a könyvtárban szereplő reakciótermék-mag radioaktív bomlási jellemzői.

Ez az adatsorozat most szerepel első ízben a nemzetközi reaktordozimetriai hatáskeresztmetszet-könyvtárban.

## Formátum (a NAÜ NDS kezelésében)

A pont-hatáskeresztmetszet adatok ENDF-6 formátumban vannak megadva, míg a sokcsoportos hatáskeresztmetszetek és bizonytalanságaik (SAND II típusú 640 energiacsoportban) két formában is rendelkezésre állnak: szigorú ENDF-6 formátumban (a sugárkárosodási adatok kivételével) és egyszerűsített ENDF-6 formátumban a neutronmetrológiai alkalmazásokhoz.

Az új hatáskeresztmetszet-adattárat a 12. Nemzetközi Reaktordozimetriai Szimpóziumon mutattuk be ez év tavaszán Gatlinburgban [4]. Az adatok megtalálhatók és letölthetők a NAÜ NDS honlapjáról.

## Irodalom

1. a) *Reactor Dosimetry in the 21st Century* (szerk.: J. Wagemans, H.A. Abderrahim, P. D'hondt, C. De Raedt) – Proc. of the 11th International Symposium on Reactor Dosimetry, Brussels, Belgium, 18–23 August, 2002. World Scientific, 2003.
- b) 12th International Symposium on Reactor Dosimetry, May 5–13, 2005, Gatlinburg, Tennessee, USA (megjelenés alatt).
2. *Advances in Neutron Capture Therapy*, Vol. I–II. (szerk.: B. Larson, J. Crawford, R. Weinreich) – Excerpta Medica Int. Congr. Ser. 1132. Elsevier, 1997
3. FÖLDIÁK GÁBOR: *Az izotópok ipari alkalmazása* – Műszaki Könyvkiadó, 1972.
4. E.M. ZSOLNAY, A. TRKOV: *Release of the New International Reactor Dosimetry File IRDF-2002* – 12th International Symposium on Reactor Dosimetry, May 5–13, 2005, Gatlinburg, Tennessee, USA [1.b]
5. N.P. KOCHEROV, P.K. MCLAUGHLIN: *The International Reactor Dosimetry File IRDF-90, Ver. 2.* – Report IAEA/NDS/141, Rev. 2., IAEA, Vienna, Oct. 1993.
6. K. KOBAYASHI, T. IGUCHI ET AL.: *JENDL Dosimetry File (JENDL/D-99)* – Report, JAERI 1344, Japan Atomic Energy Research Institute, January 2002.
7. K.I. ZOLOTAREV, A.V. IGNATYUK, V.N. MANOKHIN ET AL.: *RRDF-98, Russian Reactor Dosimetry File* – Report IAEA/NDS/193. Rev. 0. March, 1999.  
K.I. ZOLOTAREV: *New Russian evaluations for IRDF-2002* – [9]
8. *CD WINENDF* – October 2002. ENDF package includes Release 8 of ENDF/B-VI, Release 3.3. of JENDL, Release 3.0 of JEFF, WINENDF Prepro2000 codes, WNDVER codes, Utility codes, Manuals, Utils, ZaLibs. IAEA Nuclear Data Section
9. *Summary Report of the Final Technical Meeting on International Reactor Dosimetry File: IRDF-2002* – Report INDC (NDS)-448, IAEA, Vienna, Oct. 2003.

# A NUKLEÁRIS TECHNIKA FEJLŐDÉSE A THAIFÖLDI THAMMASAT EGYETEMEN

Tawee Chim-oye  
Fizika Tanszék, Thammasat Egyetem, Thaiföld

Mikrokontrollerek mérőrendszerekben történő alkalmazásával csökkenthető az elektromos áramkörök bonyolultsága, növelhető az adatok pontossága és a rendszer könnyen változtatható, fejleszhető. Egy neutronszámoló fontos eszköz a tanuláshoz és a kutatáshoz, amelyet általában mérődrágán kell importálnunk külföldről. Mérőrendszerek fejlesztése elengedhetetlenül szükséges a thai tudomány fejlődése érdekében, ezért fejlesztettük ki a BF<sub>3</sub>-detektorral és mikrokontrollerrel működő neutron-

számoló prototípusát. Írásunkban bemutatjuk, hogy a kifejlesztett eszközt mi módon alkalmaztuk nedvességtartalom mérésére és üzemanyag-összetétel vizsgálatára.

## Elmélet

A sugárzás detektálására és mérésére kifejlesztett eszköznek két része van. Az érzékelő egység a sugárzás energiáját elektromos jellé alakítja. Az elektromos jel vagy egyenesen a kijelzőhöz kerül, vagy előbb erősítésre van szükség.

Csikai Gyulának ajánlva, 75-ik születésnapjára. Fordította: Tóth Eszter.