

会議のトピックス(III)

日本原子力学会「2022年秋の大会」

核データ部会、シグマ調査専門委員会合同セッション

原子炉の廃止措置における放射化断面積データの現状と利用

2022年9月9日 13:00~14:30 茨城大学 日立キャンパス

(1) JENDL-5 の放射化断面積データ

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究センター
岩本 信之
iwamoto.nobuyuki@jaea.go.jp

1. 背景

原子炉や加速器施設等の廃止措置に関わる多くの工程において、放射能インベントリ評価は必須の情報となる。この放射能インベントリ評価を行う上で、放射化断面積データは不可欠な基盤データである。本稿では、日本原子力学会 2022年秋の大会での核データ部会・シグマ調査専門委員会合同セッションにおける発表[1]を基に、JENDL-5 の放射化断面積データについて解説する。

評価済核データライブラリである JENDL の特殊目的ファイルでは、これまでに放射化断面積データを収録した二つのファイルを公開してきた。一つは 1996 年に公開された放射化断面積ファイル 96 (JENDL/A-96) [2]、もう一つは 2018 年に公開された原子炉施設廃止措置用放射化断面積ファイル 2017 (JENDL/AD-2017) [3][4]である。JENDL/A-96 は核分裂炉や核融合炉、加速器等での利用を考慮して、(i) 安定もしくは半減期 1 日以上の標的核種、(ii) 半減期 1 日以上の生成核種、(iii) しきいエネルギーが 18 MeV 以下の反応、(iv) 捕獲や(n,2n)反応などの 14 反応という 4 つの条件から選定し整備された。JENDL/AD-2017 では、線量告示に記載された放射性核種のうち原子炉施設の廃止措置における放射化量評価で必要となる 30 日以上半減期を持つ核種に加えて、超長半減期の放射性核種

を生成する標的核種を選定し、これらの放射化断面積を収録した。また、ORIGEN-S コード[5]で JENDL/AD-2017 を利用できるように 199 群放射化断面積ライブラリ (MAXS/AD-2017) [6]が整備され、原子力機構の炉物理・熱流動研究グループ[7]より公開されている。

MAXS/AD-2017 に先行して、これと同じ形式の原子力施設廃止措置のための多群中性子放射化断面積ライブラリ (2015 年版) MAXS2015[8]が開発されていた。このライブラリでは、JENDL-4.0 をベースとして、足りない核種を JEFF-3.0/A[9]から採用することで整備された。MAXS2015 では 779 核種のデータが収録されており、このように広い核種範囲がカバーされたのは、原子炉や加速器等の構造材を構成する主要な元素の安定同位体に加えて、微量に含まれる元素の安定同位体に対する放射化量も漏れなく評価することを念頭に置いていたからである。そのため、JENDL-5 の開発においても、JEFF-3.0/A に収録されている核種範囲が必要であると考えられた。また、半減期が 30 日以下の核種であっても、対象全体の全放射化量を評価するという観点から、放射性核種を生成し得るすべての放射化断面積データを整備することが求められていた。

2. 放射化断面積データの概要

評価済核データライブラリ JENDL の最新汎用ファイルである JENDL-5 を 2021 年に公開した[10]。このファイルは 11 種のサブライブラリで構成され、このうち中性子サブライブラリ (本稿ではオリジナルと呼ぶ) には、H (原子番号 $Z=1$) から Fm ($Z=100$) までの 795 核種に対する中性子入射反応データが収録されている。最大入射エネルギーは従来通りの 20 MeV、もしくは高エネルギーファイル (JENDL-4.0/HE[11]) と同じ 200 MeV となっている。また、オリジナルからの派生データとして、最大入射エネルギーを 20 MeV までとした“u20 データ”と“放射化断面積データ” (本稿では JENDL-5/A と呼ぶ) が整備された。JENDL-5/A には、放射化量の評価に必要な断面積データが u20 データから取り出され、収録された。また、放射化量の評価には、JENDL-5/A とともに崩壊データが必要不可欠である。JENDL-5 ではこれに対応する崩壊データサブライブラリが開発され、中性子及び H から Og ($Z=118$) に至る 4,071 核種の崩壊データが収録されている。

JENDL-5/A には ^4He を除いた 794 核種が収録され、最大入射エネルギーは従来通り原子炉等での利用を想定して 20 MeV までとした。放射化断面積データは基本的に断面積形式での収録となるため、ENDF-6 フォーマット[12]の MF2 に収録された共鳴パラメータを断面積へ処理してポイントワイズデータとした。温度は 293.6 K でのドップラー広がり を考慮している。もし他の温度に対する放射化断面積データが必要であれば、u20 データから利用したい温度のポイントワイズデータを再構築することが可能となっている。ただし、u20 データの MF8-10 にある励起レベル番号 (LFS) は JENDL-5/A で採用されている番号 (アイソマー番号) とは異なるため、注意が必要である。

放射化量を計算できる FISPACT-II[13]のようなコードシステムでは、反応チャンネルご

との断面積データのみ利用可能なため、JENDL-5/A でも断面積データは核種の生成断面積ではなく、反応チャンネル形式で収録した。反応数は MF3 と MF10 のデータに対して 13,489 反応¹となっている。なお、MF10 には基底状態やアイソマー状態を生成する断面積が収録されており、それらを個別の反応として数えた。この数え方では、JENDL/A-96 には 233 核種、2,082 反応^{1,2}が収録され、JENDL/AD-2017 には 311 核種、4,702 反応¹が収録されている。これらのデータと比較すると、JENDL-5/A の核種数や反応数は圧倒的に増え、原子炉のみならず多くの加速器施設等での使用が可能となっている。また、JENDL-5/A は JEFF-3.0/A の 774 核種、12,617 反応と同程度となっており、中性子輸送計算等に利用される“評価済”汎用ファイルと整合した放射化断面積データとしては世界最大の収録数となっている。

JENDL-5/A における ENDF-6 フォーマットのファイル構成及びオリジナルとの関係を図 1 に示した。オリジナルで共鳴パラメータを収録する MF2 は、前述の通り共鳴パラメータから PREPRO[14]の RECENT を利用してポイントワイズデータに変更した。ポイントワイズデータは MF3 や MF10 の対応する反応 (MT 番号) へ収録してある。この結果、共鳴パラメータは不要となったので削除し、MF2 には散乱半径のみが収録されている。散乱半径のみの情報にほとんど意味はないが、ENDF-6 フォーマットの規則でこのような形式となっている。断面積データを収録する MF3 では、反応チャンネルごとの断面積データが収録されている。しかしながら、放射化量の評価には不要な全断面積や弾性散乱断面積、非弾性散乱の部分断面積 (MT51-91) や(n,p)反応などの部分断面積 (MT600-849) は削除した。MF8 には崩壊データに関する情報が収録されているが、詳細については 3 章で説明する。オリジナルの MF9 には基本的に Q 値が正の反応に対するアイソマー生成断面積比が収録されている。共鳴パラメータを処理した MF3 のポイントワイズデータと MF9 の断面積比との積をとることで、アイソマー生成断面積を導出し、MF10 に収録した。MF9 のデータを MF10 へ移行したので、MF9 は不要となりファイルから削除した。アイソマー生成断面積に関する MF10 については、オリジナルから励起レベル番号の変更 (3 章参照) と MF9 に収録されていたデータの追加を行った。

オリジナルには、上記 MF2,3,8,9,10 の他に、角度分布やエネルギー分布に関する MF4-6、ガンマ線データに関する MF12-15、共分散データに関する MF31-35 が収録されている。これらのうち MF4-6,12-15 は、放射化断面積データには不要なので、JENDL-5/A では削除した。また、共分散データは放射化量の評価においても重要な量であるが、オリジナルには MF3 に対応する共分散データのみの収録となっており、MF10 には対応する共分散データがないため MF31-35 も削除した。

¹ MF3 の非弾性散乱断面積 (MT4) を含む。また、MF10 の断面積で MF3 の断面積が再現できれば、MF3 の反応 (MT) は数えない。

² MF10 に収録された反応 (MT) のみを数えると、1,246 反応になる。

JENDL-5/A の MF3 と MF10 に収録してある断面積データの関係について簡単に説明する。MF10 には基底状態とアイソマー状態のそれぞれの生成断面積が収録されており、これらと整合するデータが MF3 に収録されている。従って、MF3 のデータは MF10 のデータから再構築できるので、MF10 に収録のある反応(MT)は MF3 から削除した。JENDL/AD-2017 では、MF3 と MF10 の両方にデータを収録していたが、JENDL-5/A では、MF3 と MF10 のデータ間に不整合が発生する可能性をなくすため収録方法を変更した。この収録方法は JEFF-3.1/A でも採用されている。なお、ある反応で生成される核種にアイソマー状態がない場合には MF10 はなく、MF3 にのみ断面積が収録されている。

非弾性散乱には基底状態に対応する断面積がないので、MF10 には標的となっているレベル(通常は基底状態)の生成断面積は収録されていない。このため、MF10 のみから MF3 を再構築することができないので、非弾性散乱にデータがある全ての核種では MF3 に非弾性散乱断面積(MT4)を収録した。もし標的がアイソマー状態であった場合には、MF10 に基底状態と標的以外のアイソマー状態に対する断面積を収録してある。

オリジナル		JENDL-5/A
MF1		MF1
MF2(共鳴パラメータ)	ポイントワイス	MF2(散乱半径のみ) 削除(共鳴パラメータ)
MF3(断面積)		MF3(ポイントワイス断面積) 削除(全断面積、弾性散乱断面積、 部分断面積等)
MF4-6(角度分布・スペクトル)		削除
MF8(崩壊データ)		MF8(崩壊データ)
MF9(アイソマー生成断面積比)	MF10に移行	削除
MF10(アイソマー生成断面積)		MF10(アイソマー生成断面積)
MF12-35(ガンマ線データ・共分散)		削除

図1 ENDF-6フォーマットのMF番号におけるオリジナルとJENDL-5/Aとのデータ構成の比較

3. JENDL-5/A と崩壊データサブライブラリ

JENDL-5/A では、安定核種や放射性核種によらず、ある反応で生成された核種の情報が MF8 に収録してある。図 2 には、ENDF-6 フォーマットの MF8 に収録された ^{151}Eu の捕獲反応の例が示してあり、2 から 4 行目にあるように、データは生成核種の ZA 番号 ($Z \times 1000 + A$; Z と A はそれぞれ原子番号と質量数を表す) と励起エネルギー、断面積

データが収録された MF 番号、アイソマー番号のみに限られている。MF8 データは、崩壊データサブライブラリと併用することが想定されているので、崩壊データサブライブラリの核種との対応付けが容易であることが重要である。そのために、MF8 及び MF10 において ENDF-6 フォーマットでは励起レベル番号であるべきところをアイソマー番号に変更した。この変更理由は、励起レベル番号よりもアイソマー番号の方が変わる可能性が低いからであり、できる限り長く整合性を維持し、ユーザーに対する利便性を高めるためでもある。JENDL-5/A と崩壊データサブライブラリとの間のアイソマー番号に対して可能な限り整合性を取ったが、例えば、 $^{182}\text{W}(n,nd)$ 反応で生成される $^{180\text{m}}\text{Ta}$ の場合のように、すべてに対して対応が取れなかったことはご容赦いただきたい。また、前述の通りオリジナルでは ENDF-6 フォーマットに従って励起レベル番号で与えてあるので、この点についてもご注意いただきたい。

標的核	6.315100+4	1.496230+2	0	0	3	16325	8102	1
生成核	6.315200+4	0.000000+0	10	0	0	06325	8102	2
	6.315200+4	4.560000+4	10	1	0	06325	8102	3
	6.315200+4	1.478600+5	10	2	0	06325	8102	4
	励起エネルギー		MF10にデータ収録		アイソマー番号	MF		MT

図2 JENDL-5/Aにおける ^{151}Eu の捕獲反応に対するMF8の収録データ

4. 評価結果の比較例

JENDL-5/A に収録されている放射化断面積について、JENDL/A-96 や JENDL/AD-2017 との比較例を図 3 に示す。図 3(a)には、 $^{13}\text{C}(n,\gamma)^{14}\text{C}$ 反応断面積が示されており、JENDL/A-96 では共鳴領域における断面積が温度 0 K のヒストグラム形式で提供されていた。JENDL-5/A と JENDL/AD-2017 は入射エネルギーが 1 keV 以上の領域で JENDL/A-96 より断面積が大きくなっている。これは JENDL-5/A と JENDL/AD-2017 の断面積には直接捕獲反応による成分が追加されているためである。この成分により 10 keV から 100 keV の範囲にある Shima et al.[15]の測定データを再現している。図 3(b)には、 $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 反応断面積に対する比較が示してある。入射エネルギーが 6 から 13 MeV で JENDL-5/A は Wagner et al.[16]の測定データを再現しており、Sudar et al.[17]ともおおよそ整合している。14 MeV 辺りには多くの測定データがあり、また分散も小さいので、どの評価データもほぼ一致した結果となっている。図 4(a)では、 $^{60}\text{Ni}(n,p)$ 反応による $^{60\text{m}}\text{Co}$ (半減期 10.5 分) の生成断面積に対して評価データと測定データを比較している。JENDL/A-96 にはデータの収録はないが、JENDL-5/A と JENDL/AD-2017 はほぼ同じ評価結果を与えている。図

4(b)には、 $^{134}\text{Ba}(n,2n)$ 反応による $^{133\text{m}}\text{Ba}$ (半減期 1.6 日) の生成断面積に対する評価結果を示した。測定データの多い 14 MeV 辺りで JENDL-5 は JENDL/AD-2017 より小さく、JENDL/A-96 に近い結果となっている。これは近年、中国で測定されたデータが Ikeda et al.[18]よりも小さい傾向にあるためである。

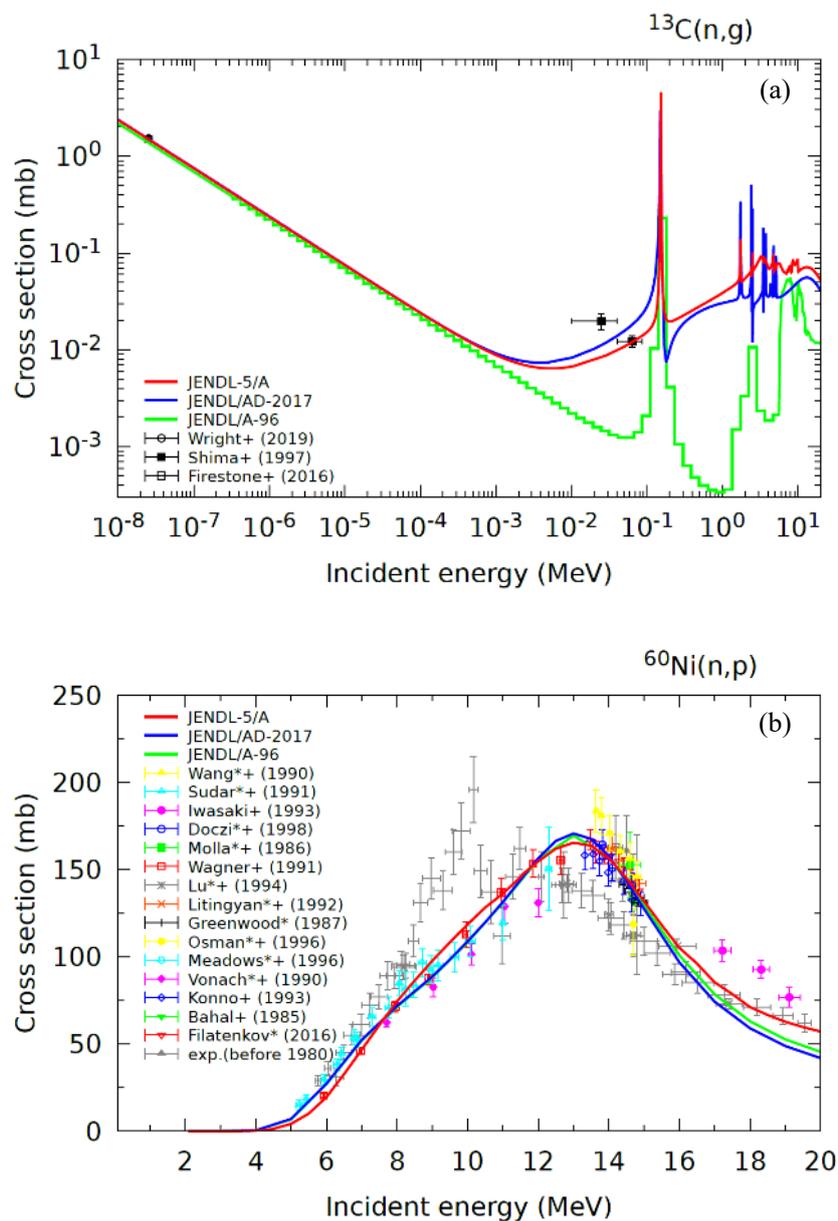


図3 放射化断面積に対する JENDL-5/A、JENDL/AD-2017、JENDL/A-96 と測定データとの比較。(a) $^{13}\text{C}(n,\gamma)^{14}\text{C}$ 反応断面積、(b) $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 反応断面積

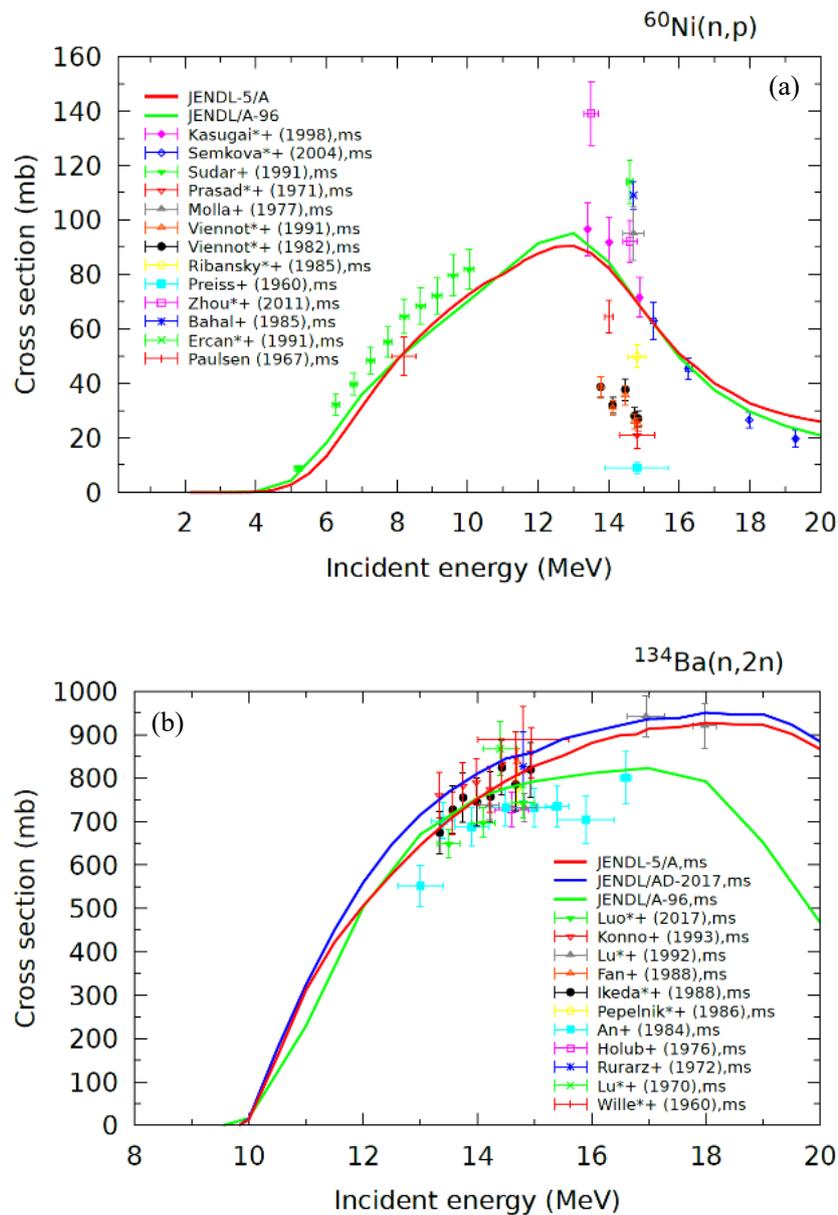


図4 放射化断面積に対する JENDL-5/A、JENDL/AD-2017、JENDL/A-96 と測定データとの比較。(a) $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 反応断面積、(b) $^{134}\text{Ba}(n,2n)^{133\text{m}}\text{Ba}$ 反応断面積

4. まとめ

評価済核データライブラリ JENDL の最新汎用ファイルである JENDL-5 に加わった放射化断面積データについて概要を説明した。放射化断面積データは中性子サブライブラリからの派生データの一つであり、794 核種に対して 13,489 反応が収録されている。このデータでは、オリジナルに収録されている共鳴パラメータやアイソマー生成断面積比

をポイントワイズ断面積へ処理し、さらにデータ構成をオリジナルから変更した。また、JENDL-5 の崩壊データサブライブラリとともに利用されることを想定しているため、アイソマー状態の励起レベル番号をアイソマー番号へ変更し、崩壊データとの整合性を高めることで、ユーザーの利便性を向上させた。評価済核データライブラリでは、これまで放射化断面積データと中性子輸送計算用のデータは同一のライブラリを起源としたものはなかったが、JENDL-5 に初めて両者を整合させたデータを収録し、提供した。

参考文献

- [1] 岩本信之、日本原子力学会 2022 年秋の大会、核データ部会・シグマ調査専門委員会合同セッション, 3N_PL01
- [2] Y. Nakajima et al., JAERI-M 91-032, p.43 (1991)
- [3] K. Shibata et al., JAEA-Conf 2016-004, p.47 (2016)
- [4] N. Iwamoto et al., J. Nucl. Sci. Technol. to be submitted (2022)
- [5] I.C. Gauld et al., ORNL/TM-2005/39 Ver. 6 Vol. II, Sect. F7 (2009)
- [6] C. Konno, JAEA-Conf 2020-001, p.193 (2020)
- [7] <https://rpg.jaea.go.jp/main/en/MAXSAD-2017/index.html>
- [8] K. Okumura et al., JAEA-Conf 2015-003, p.43 (2016)
- [9] J.-Ch. Sublet et al., JEFDOC-982 (2003)
- [10] O. Iwamoto et al., J. Nucl. Sci. Technol. submitted (2022)
- [11] S. Kunieda et al., JAEA-Conf 2016-004, p.41 (2016)
- [12] A. Trkov et al., BNL-203218-2018-INRE (2018)
- [13] J.-Ch. Sublet et al., Nuclear Data Sheets, 139, 77 (2017)
- [14] D.E. Cullen, IAEA-NDS-0238 (2021)
- [15] T. Shima et al., JAERI-Conf 97-004, p.131 (1997)
- [16] M. Wagner et al., Conf. on Nucl. Data for Sci. and Technol., Juelich 1991, p.358 (1991)
- [17] S. Sudar et al., Conf. on Nucl. Data for Sci. and Technol., Juelich 1991, p.291 (1991)
- [18] Y. Ikeda et al., JAERI 1312 (1988)