

話題・解説(III)

JENDL アクチノイドファイル 2008

日本原子力研究開発機構

岩本 修

iwamoto.osamu@jaea.go.jp

1. はじめに

JENDL 特殊目的ファイルの一つとして、JENDL アクチノイドファイル 2008 (JENDL/AC-2008) を 3 月に公開しました。JENDL/AC-2008 は Ac (Z=89) から Fm (Z=100) までのアクチノイド核種に対する 10^{-5} eV から 20 MeV までの中性子誘起核反応についての評価済核データファイルです。JENDL-3.3 に収録されている 62 核種に、半減期が 1 日以上、17 核種を新たに加えて、全部で 79 核種に対するデータで構成されています。表 1 に収録核種を示します。最新の測定データを含め、JENDL-3.3 の評価時に使用した測定データも再検討を行い、JENDL-3.3 の評価データの全面的な改訂を行っています。核反応理論計算コード CCONE の開発を行い、アクチノイド核データの評価に全面的に用いました。JENDL/AC-2008 の開発は主に原子力機構の中川庸雄氏、大塚直彦氏 (現 IAEA)、千葉敏氏、奥村啓介氏、千葉豪氏に私を加えたメンバーで行いました。この JENDL/AC-2008 に関する解説文は、これらのメンバーを著者として PHYSOR'08 へ投稿した論文をもとに執筆しました。JENDL/AC-2008 は <http://www.ndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-ac-2008.html> から入手できます。

2. 共鳴パラメータ

共鳴パラメータの評価のため、熱中性子断面積を再評価しました。核分裂断面積と捕獲断面積の測定データに、年代に応じた重みをかけて平均しています。この熱中性子断面積の評価結果を再現するように負共鳴パラメータ及び低エネルギーの共鳴パラメータを調整しました。また、測定データと共鳴パラメータで違いが大きい場合には、それ以外の共鳴パラメータについても再評価を行っています。 ^{243}Cm の核分裂断面積の JENDL-3.3 及び JENDL/AC-2008 の比較を図 1 に示します。

表 1. JENDL/AC-2008 の収録核種。カラム名 A~E は評価の優先順位で、
A が高く E が低い。E は新たに追加した核種。

	A	B	C	D	E
Ac				225, 226, 227	
Th	232		228, 229, 230	227, 233, 234	231
Pa			231, 232, 233		229, 230
U	233, 235, 238	232, 234, 236	237		230, 231
Np		237	236, 238, 239	235	234
Pu	239, 240, 241	242	238, 244	236, 237, 246	
Am	241, 243	242m	242	244, 244m	240
Cm		242, 244, 245	243, 246, 247, 248, 250	240, 241, 249	
Bk			247	249, 250	245, 246, 248
Cf			249, 250	251, 252, 254	246, 248, 253
Es				254, 255	251, 252, 253, 254m
Fm				255	

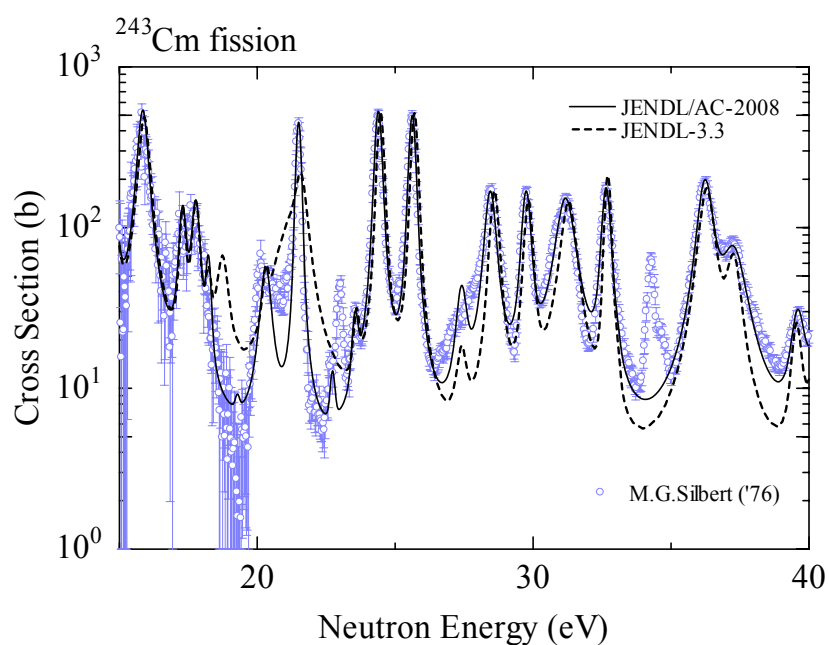


図 1. ^{243}Cm の核分裂断面積

^{232}Th , $^{233,238}\text{U}$, ^{231}Pu 等の主要核種の共鳴パラメータは ENDF/B-VII.0 に入っている最近の ORNL グループの SAMMY コードによる評価値を採用しました。 ^{235}U については、ウラン体系の高速炉でナトリウムボイド反応度等の予測精度が悪化し、その原因が keV 領域の捕獲断面積に起因するという問題が指摘されているため、共鳴領域の上限を 2.25 keV から 500 eV に変更し、500 eV 以上の断面積の再評価を行うことで、この問題を回避しました。

3. CCONE コードによる計算

JENDL/AC-2008 の整備にあたって、核データ評価計算の効率化や信頼性の向上のため、新たな核反応理論計算コード CCONE を開発しました。CCONE は核データ評価計算で有用と思われるいくつかの反応モデルを統合したコードです。現在、核データ評価で必要とされている反応を同時に扱うことができる理論モデルが無いため、核データの評価計算では、いくつかのモデルを組み合わせた計算を行っています。CCONE では、直接過程のモデルとしてチャンネル結合光学モデルや歪曲波ボルン近似、前平衡過程として 2 成分励起子モデル、複合核過程として Hauser-Feshbach-Moldauer 統計モデルを使用しています。モデル計算の中で特に重要なものとして、光学ポテンシャルがあります。今回の評価では、最近得られた Soukhovitskii 等 (2005) や国枝等 (2007) のチャンネル結合光学ポテンシャルを元に、全断面積の再現性を良くするように調整して使用しました。また、アクチノイド核種で大切なものとして、核分裂障壁があります。核分裂障壁は核分裂断面積に非常に大きな影響を与えるので、核分裂断面積を再現するように細かく調整する必要があります。

図 2 に ^{237}Np の捕獲断面積についての CCONE による計算値と JENDL-3.3 及び ENDF/B-VII.0 の評価値、測定値との比較を示します。低エネルギー領域では、今回の計算値と各評価値間で違いは小さいですが、エネルギーが高くなるにつれ大きな差がみられます。これは、測定データが少ないことと、理論計算において他の競合反応の寄与が大きくなることにより不確実性が増すためと考えられます。

図 3 に $^{242\text{m}}\text{Am}$ の核分裂断面積の CCONE による計算値と GMA による評価値、測定データとの比較を示します。図中の“present”は GMA コードを用いた評価結果で、JENDL/AC-2008 に採用されているデータです。図を見ると、CCONE による計算値と GMA による評価値はよく一致しており、測定データを再現していることが分かります。この場合、実際の評価値としては CCONE による計算結果は使用していませんが、他の競合反応の断面積を正しく見積もるためには、大きな断面積を持つ核分裂の再現性は重要です。

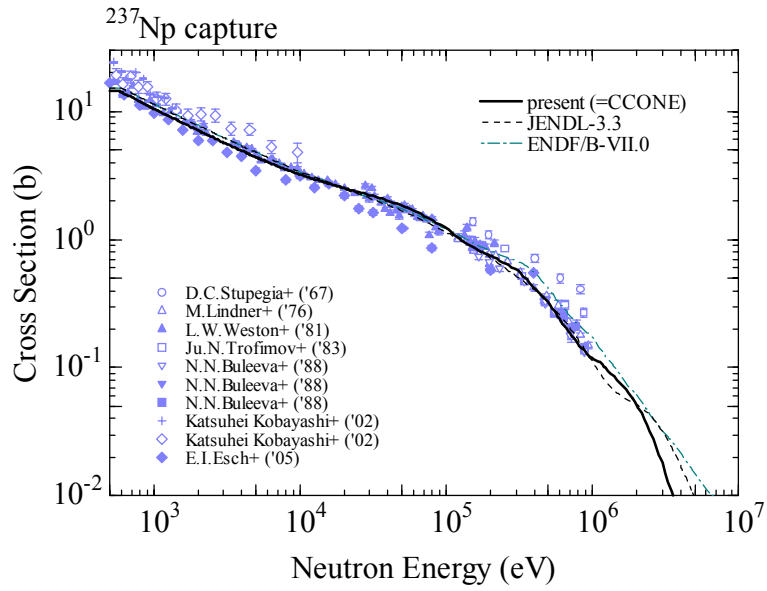


図 2. ²³⁷Np 捕獲断面積

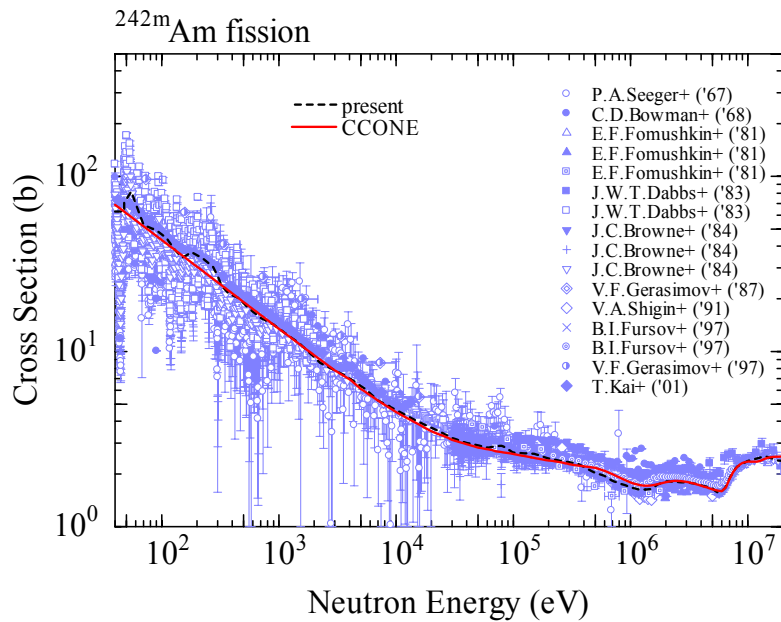


図 3. ^{242m}Am 核分裂断面積

図4に14 MeV中性子による ^{238}U の2次中性子スペクトルを示します。CCONEによる計算値を色々な成分に分けてプロットしています。トータルのスペクトルは測定データを良く再現しています。この図から2次中性子スペクトルを再現するためには、色々な反応からの寄与を精度よく見積もることが必要であることが分かります。

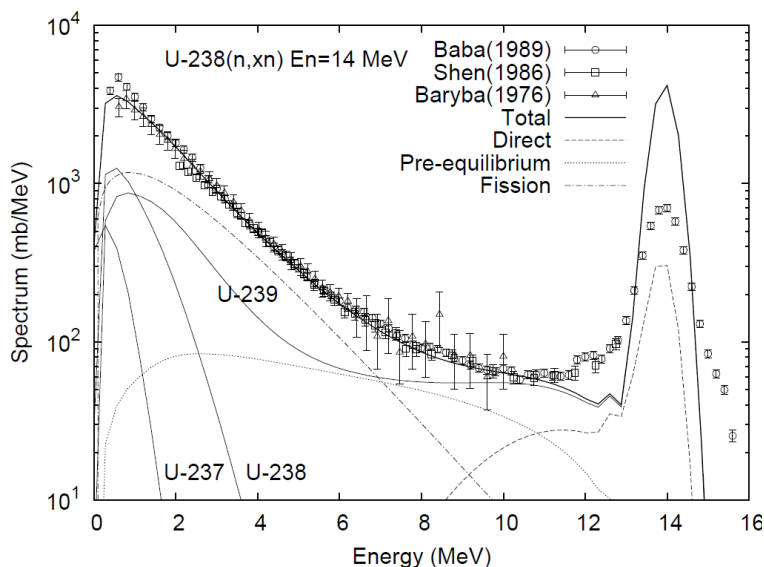


図4. 14 MeV 中性子による ^{238}U の2次中性子スペクトル

4. GMAコードを用いた核分裂断面積評価

次のセクションで述べる重要核種の核分裂断面積を除いて、測定データが十分に存在する25核種の核分裂断面積は、最少二乗フィッティングコードGMAを用いて評価を行いました。実験データは主にEXFORデータベースから得ました。 ^{235}U や ^{239}Pu の核分裂断面積との比の測定データはJENDL-3.3のデータを用いて断面積に変換して解析を行いました。

図5に $^{242\text{m}}\text{Am}$ の核分裂断面積核分裂断面積を示します。実線が今回の評価値で破線が標準偏差による上限と下限を表しています。測定データには幾分ばらつきがあります。Fursov等(1997)のデータが一番新しいのですが、他のデータと比較すると高めの値となっています。今回の評価結果はFursov等のデータより低めですが、Browne等(1984)と同程度で、JENDL-3.3とは標準偏差内で一致しています。

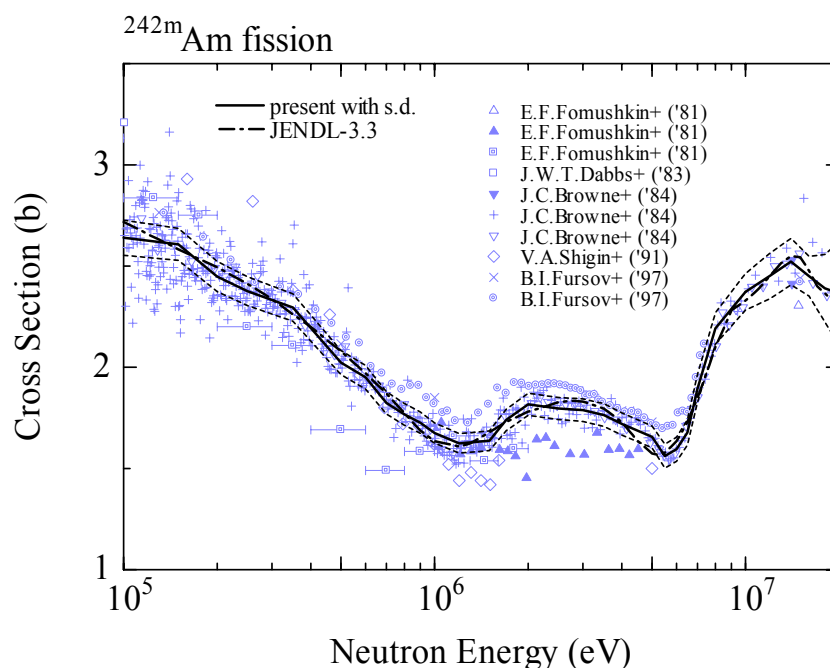


図 5. ^{242m}Am 核分裂断面積

5. 核分裂断面積の同時評価

アクチノイドの核分裂断面積は ^{235}U などの他の核種に対する断面積の比として測定されているものも多く存在します。これらの測定データを用いて統計的に正しく評価を行うためには、比のデータも考慮して、複数核種の断面積を同時に評価する事が必要となります。JENDL-3.3 の評価で同時評価のために SOK コードが開発され、 ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu の 6 核種の核分裂断面積に対して同時評価が行われました。今回の評価ではこの SOK コードを用いて、エネルギー領域を拡張すると共に、JENDL-3.3 の評価に用いた測定データを再度検討し、信頼性が高いと考えられるデータを選びつつ、新たな測定データを追加することにより、再評価を行いました。表 2 に同時評価で使用したデータセットの数を示します。

表 2. 同時評価に使用したデータセット数

Reaction	sets	Reaction	sets
^{233}U	13	$^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$	9
^{235}U	17	$^{238}\text{U}/^{233}\text{U}$	1
^{238}U	9	$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	18
^{239}Pu	16	$^{239}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	14

^{240}Pu	4	$^{240}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	12
^{241}Pu	6	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	1
		$^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	4

図 6 に ^{235}U の評価結果を示します。図中、評価に使用したデータを黒い点で、使用していないデータをグレーの点で表しています。今回の評価結果は小型炉心の中性子実効増倍率に高い感度を持つ部分で、JENDL-3.3 と比較し数%小さい値となりました。

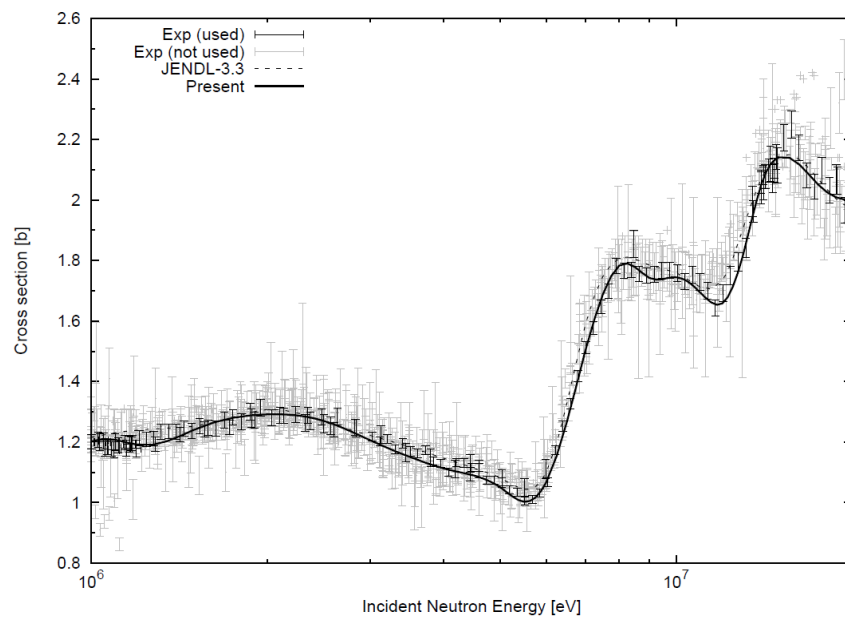


図 6. ^{235}U の核分裂断面積

6. その他のデータ

断面積以外のデータについても改訂を行っています。 ^{241}Am の捕獲反応によるアイソマーは基底状態と異なる崩壊モードを持つため、Cm 同位体の生成量に大きく影響します。 ^{241}Am の捕獲反応による ^{242}Am 基底状態の生成比の比較を図 7 に示します。JENDL-3.3 と比較して、高エネルギー側で大きくなっています。

核分裂中性子数についても見直しを行いました。例えば ^{242}Pu では JENDL-3.3 から大きく改訂されています (図 8)。

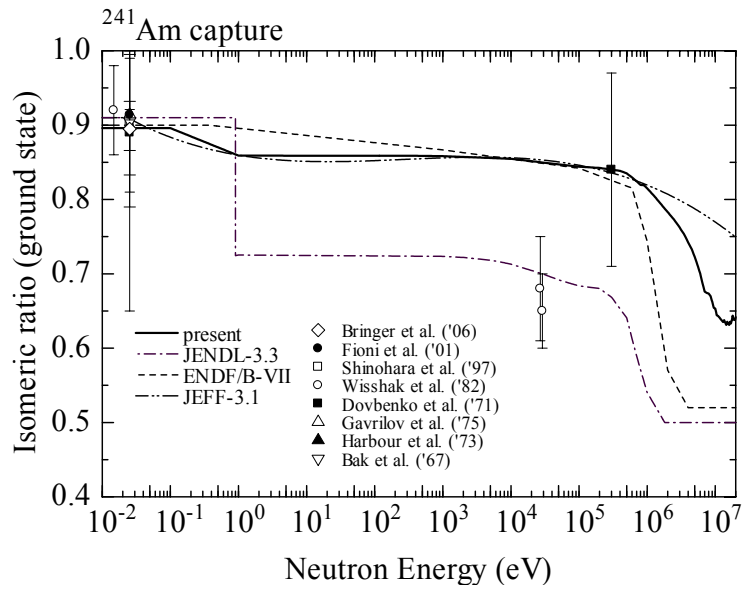


図 7. ^{241}Am の捕獲反応による ^{242}Am 基底状態の生成比

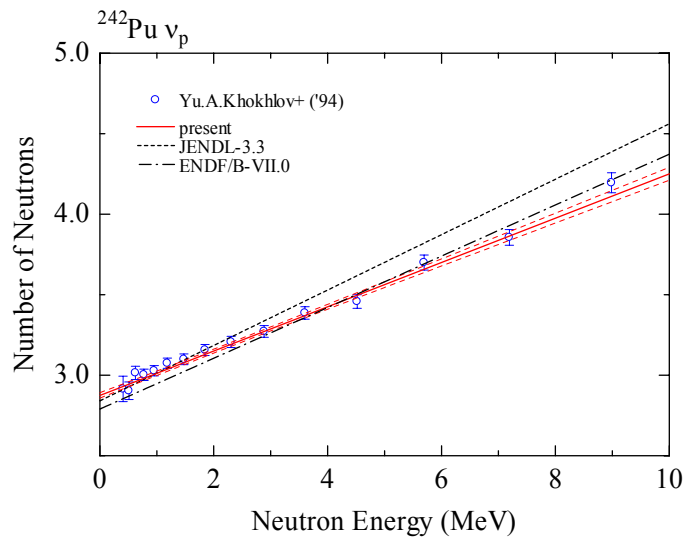


図 8. ^{242}Pu の核分裂中性子数

7. データ補正

JENDL/AC-2008 では Godiva, Jezebel, Jezebel-233, -240, Flattop-U, -233, -Pu, Big-10, SMF008 等の臨界性や反応率比などの積分量を考慮して、微分データの評価精度の範囲内で僅かな補正を行いました。これにより、小型炉心の臨界性の予測精度が大幅に改善されました。

8. 積分ベンチマークテスト

JENDL/AC-2008 は臨界性やボイド反応度、MA の照射後試験解析等について、ベンチマークテストを行いました。ベンチマークテストの典型的な結果について図 9 から図 12 に示します。図からわかるように、ウラン燃料高速炉の臨界性やナトリウムボイド反応度で大きな改善がみられました。また照射後試験解析では Cm 同位体について予測精度が向上しています。

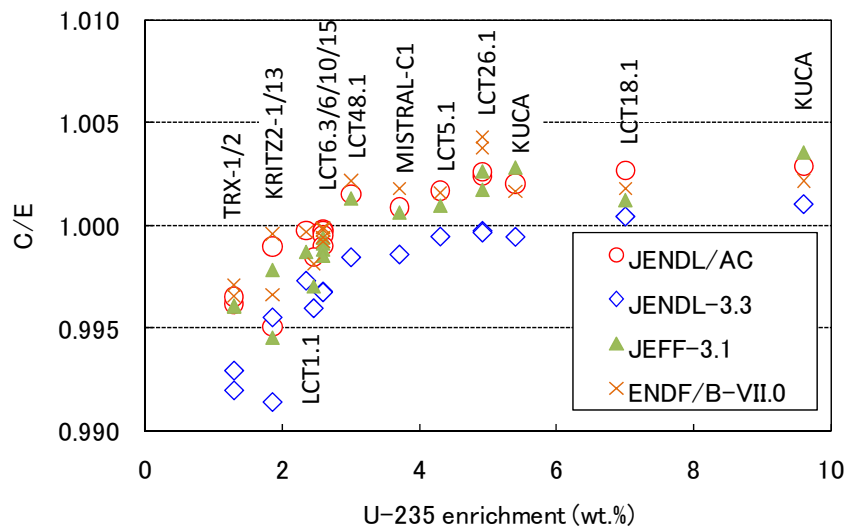


図 9. 低濃縮 ^{235}U 燃料熱中性子炉の臨界性

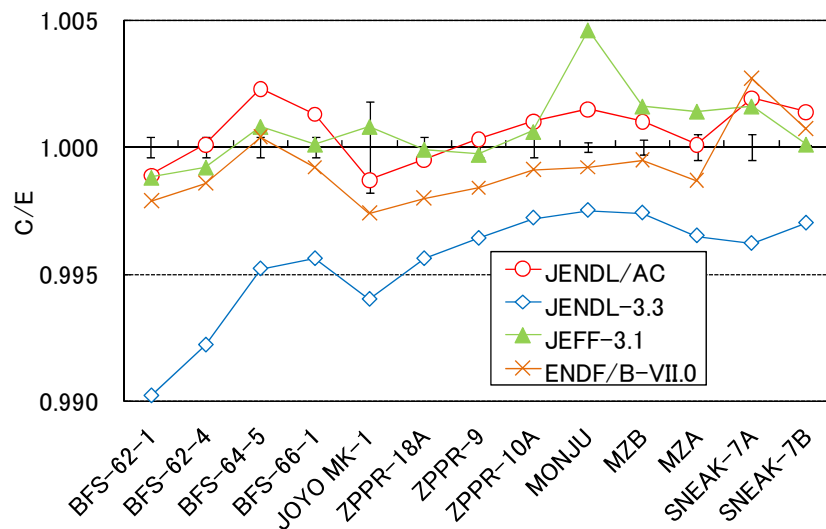


図 10. 中大型高速炉の臨界性

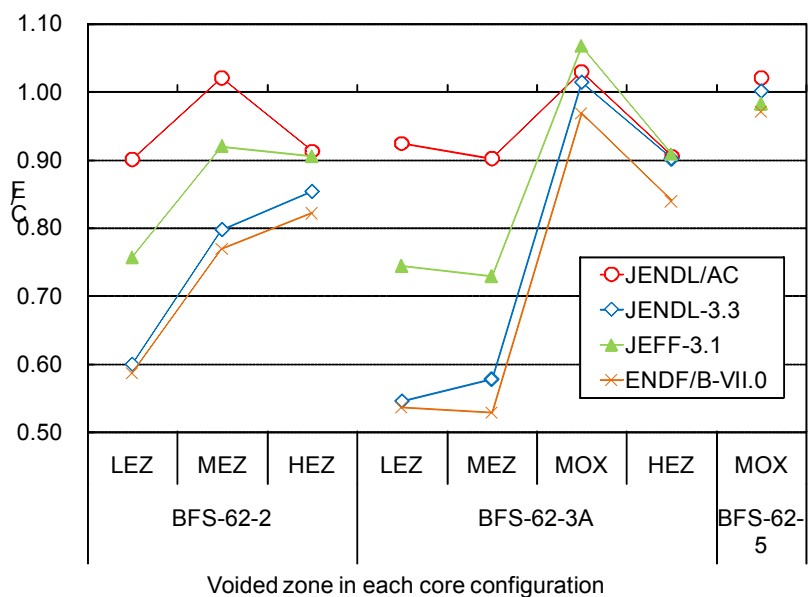


図 11. ウラン燃料高速炉のナトリウムボイド反応度

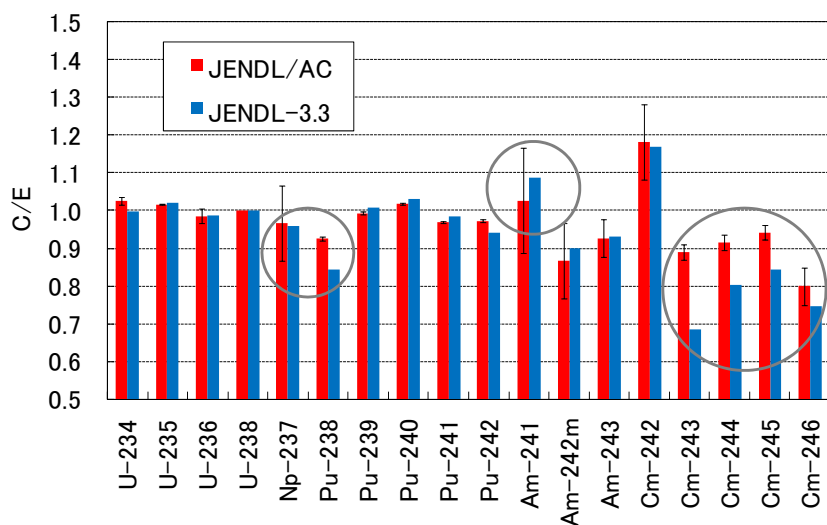


図 12. 高浜 3 号炉の照射後試験解析のベンチマーク結果

9. 結び

JENDL/AC-2008 の評価手法や評価結果について簡単に説明しました。JENDL-3.3 から大幅な改訂を行い、ベンチマークテストの結果も改善されています。今後、JENDL/AC-2008 の共分散についても、評価を行っていく予定です。JENDL/AC-2008 は誰でも使えるように公開されています。JENDL/AC-2008 について何か気付いた点があれば、お知らせいただくと幸いです。