

「シグマ」特別専門委員会、核データ部会、炉物理部会合同セッション  
「ベンチマーク問題や積分実験を用いた JENDL 及び核計算コードの V&V の  
現状と今後の展望」

### (3) JENDL 委員会リアクタ積分テスト WG 活動紹介

北海道大学  
原子炉工学研究室  
千葉 豪

[go\\_chiba@eng.hokudai.ac.jp](mailto:go_chiba@eng.hokudai.ac.jp)

#### 1. はじめに

リアクタ積分テスト WG は、旧シグマ委員会の WG として、JENDL-3.2 の公開直後である 1994 年にそれまでの LWR 積分テスト WG と FBR 積分テスト WG を統合して設置された。これらの WG の上部組織である「炉定数専門部会」の 1990 年頃の状況を調べてみると、これら 2 つの WG に加えて、Fusion neutronics 積分テスト WG、Shielding 積分テスト WG、Dosimetry 積分テスト WG、標準炉定数検討 WG が設置されており、現在とはだいぶ様相が異なっているのが興味深い。なお、LWR 積分テスト WG と FBR 積分テスト WG の統合は「予算の都合上」とのことであった[1]。WG 統合後は JENDL-3.2 のベンチマークを中心に活動し、その後、対象を JENDL-3.3、-4.0 に移しながら継続して活動した。2011 年度からは、JENDL-4.0 の軽水炉核特性に対する性能の評価に重点を置いた活動を行い、得られた成果は、核データ研究会での発表[2]や核データニュースへの投稿[3]、OECD/NEA の核データ評価国際協力 WP (WPEC) の年会での報告[4]等を通じ、積極的に外部に発信した。

さて、JENDL の V&V においては、利用する積分データの整備が重要となる。本 WG においても、2012 年度の会合での「ICSBEP ハンドブックや IRPhEP ハンドブックといった公開のデータベースから核データの積分検証に役立つ良質なデータを評価してピックアップできないか」という提案が契機となり、核データの積分検証のためのベンチマークデータ集の整備を始めた。ベンチマークデータの対象としては、軽水減速の低濃縮ウラン格子系及び MOX 格子系とし、後述する整備方針に則ってデータ集の整備を進めた。約 4 年に亘る作業を経て、このデータ集は最近、JAEA の報告書として公開された[5]。本稿では、ベンチマークデータの整備の方針や検討手順、データの概要について紹介を行う。

## 2. ベンチマークデータ整備の方針と検討手順

ベンチマークデータの整備は、公開性、説明責任、透明性、追跡可能性をキーワードとして、以下に示す方針、検討手順に則って行った。

- ① 国際的な評価が行われて、その品質がある程度保証されており、さらに実験の詳細情報が公開されている OECD/NEA の ICSBEP および IRPhEP 公開データベースの中から、過去の汎用ライブラリに使用されたベンチマークデータを参考にして、ベンチマークデータの候補を選定する。
- ② 個々の選定した候補について、ICSBEP、IRPhEP の書類及び関連文献を詳細に調査する。ここで重視するのは、実験体系情報の詳細度及び信頼度、不確かさ評価の品質の 2 点に対して、技術的に妥当な評価がなされているかどうかである。
- ③ 選定した候補について、連続エネルギーモンテカルロコード MVP のための入力データを整備し、JENDL-4.0 による解析を行う。
- ④ 上記②の調査結果と③で得られた C/E 値の傾向などから対象データ毎に取捨選択を行い、軽水減速低濃縮ウラン格子系および軽水減速 MOX 格子系の中性子実効増倍率に対するベンチマークデータ集を作成する。
- ⑤ ユーザーの便宜を図るため、③で整備した MVP 入力データ、JENDL-4.0 による解析結果等を CD-R に格納して報告書に付する。

また、評価済み核データファイルのベンチマーク計算を行う際には、異なるファイルを用いたときの C/E 値の差異の要因 (C/E 値の差異がどの核種・反応のどのエネルギー領域の差異に起因しているか) を知ることが有益である場合が往々にしてある。このような C/E 値の結果を検討する方法論の雛形として、JENDL-4.0、ENDF/B-VII.1、JEFF-3.2 を用いて幾つかのベンチマークデータを計算し、結果におけるライブラリ間の差異を感度解析手法によって分析することも行った。この過程で計算した中性子実効増倍率の核データに対する感度係数及び関連データも、上記⑤で述べた CD-R に格納することとした (感度解析に関しては本稿では省略しているので、興味がある読者は報告書を参照していただきたい)。

## 3. 軽水減速低濃縮ウラン格子系ベンチマークの整備

今回整備した軽水減速低濃縮ウラン格子系のベンチマークデータについて、データの取りうる物理パラメータの範囲を以下に示す。幅広い積分データが採用されていることが分かるであろう。

- ・ H/U 原子個数比 : 1.47~16.7
- ・ 軽水中のボロン濃度 [ppm] : 0~1511

- ・軽水中のガドリニウム濃度[gGd/L]：0～1.48
- ・炉心温度：常温～高温（280℃）
- ・反射体：軽水、鉛、減損ウラン、鉄
- ・燃料ペレット間への Rh 箔装荷：無し or 有り

図1に、検討の対象とした積分データの JENDL-4.0 の解析結果（解析／実験（C/E）値）を示す。ウラン濃縮度に対して C/E 値をプロットしているが、明らかに傾向が異なるデータがあることが分かるであろう。例えば、図中に「LCT-005」と示されているデータの中で、格子ピッチが 1.598cm と狭い実験ケースは、格子の製作公差の影響で実験値の不確かさが大きいと ICSBEP で報告されている。また、一連の Kurchatov の実験データは、同じ実験シリーズ内での C/E 値のばらつきが大きく、実験技術の信頼性に疑義がある。こういったデータは、今回整備するベンチマークデータ集には採用しないこととした。

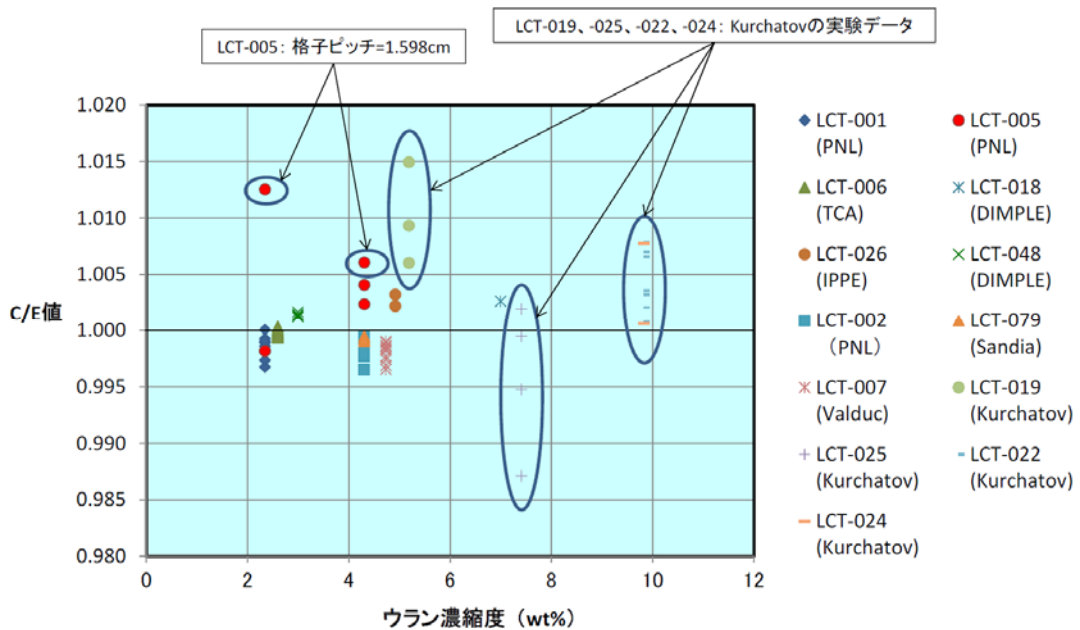


図1：軽水減速低濃縮ウラン格子系ベンチマークデータの JENDL-4.0 の解析結果

軽水減速低濃縮ウラン格子系のベンチマークデータのうち、「U-235、U-238 基本ベンチマークデータ」として整備したものについて、JENDL-4.0 を用いて得た C/E 値を燃料のウラン濃縮度について整理したものを図2に示す。JENDL-4.0 の積分ベンチマークに関する論文[6]では、軽水減速低濃縮ウラン格子系の実効増倍率に対して、JENDL-4.0 では予測精度のウラン濃縮度依存性が観察される旨の記載があったが、この図ではその傾向は幾分緩和して見える。この違いは、文献[6]では LCT-002、-007、-079 のデータが採用されていないことによって説明できる。このことは、ベンチマークにおいて採用するデー

タを充実させることの重要性を示している。

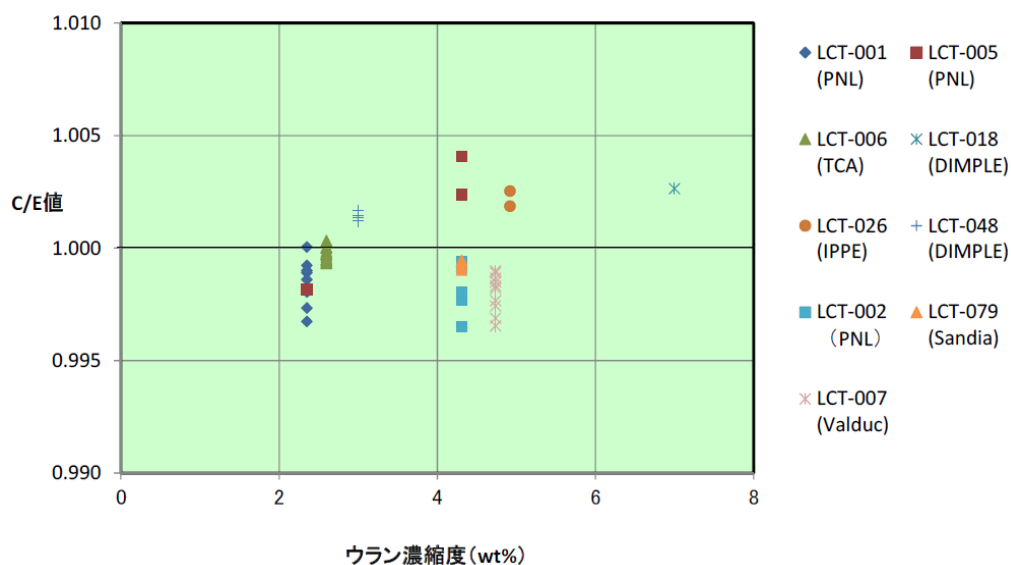


図 2 : U-235、U-238 基本ベンチマークデータにおける JENDL-4.0 の解析結果

また、反射体を有する体系のベンチマークデータの解析例として、図 3 に鉛反射体を有する体系の JENDL-4.0 の解析結果を示す。鉛反射体と燃料クラスタ間の距離に対して C/E 値が強い依存性を示しており、JENDL-4.0 の鉛の核データに改善の余地があることを示唆している。ちなみに鉄反射体、減損ウラン反射体を有する体系については、このような大きな問題は観察されていない。

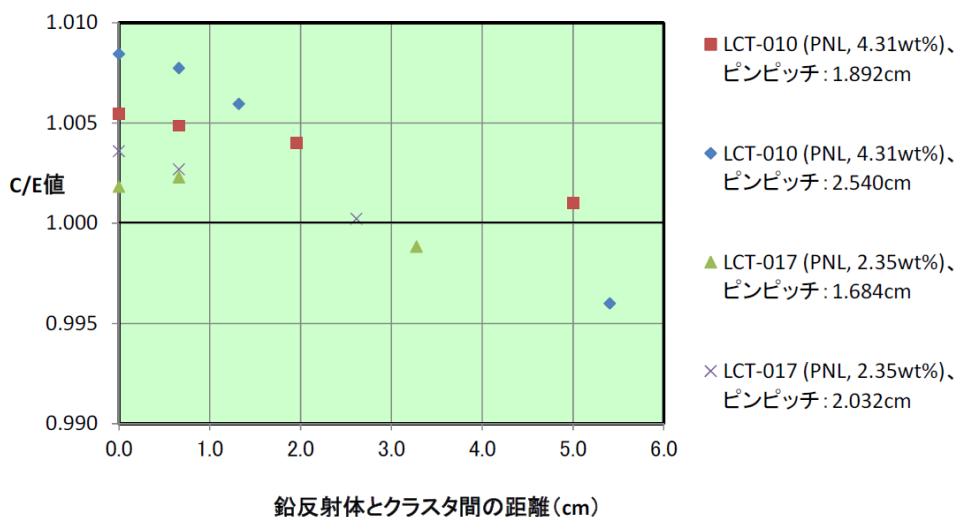


図 3 : 鉛反射体を有する軽水減速低濃縮ウラン格子系ベンチマークデータにおける JENDL-4.0 の解析結果

#### 4. 軽水減速 MOX 格子系ベンチマークの整備

軽水減速 MOX 格子系ベンチマークの整備においては、燃料中の  $\text{PuO}_2$  粒子の存在による非均質反応度効果に注意を払う必要がある。例えば、KRITZ-2:19 のデータが 2009 年に IRPhEP に登録された際、そのベンチマーク  $k_{\text{eff}}$  値が従来値 (1.000) から大きく改訂された (1.006 前後) が、この大きな要因は、 $\text{PuO}_2$  粒子が非均質に存在する MOX 燃料をベンチマークモデルでは均質として扱っている効果を補正したことにある。この例から明らかのように、軽水減速 MOX 燃料のベンチマークを行う際には、 $\text{PuO}_2$  粒子効果を見捨てることはできない。なお、この  $\text{PuO}_2$  粒子効果については、既往研究のレビューと物理メカニズムに関する数値的な検討の結果が報告書に付録として収録されているので、是非目を通していただきたい。

ICSBEP や IRPhEP のベンチマークモデルでは、MOX 燃料のミート部は全て均質とされているため、この  $\text{PuO}_2$  粒子の非均質効果が反応度に与える影響を何らかの方法で考慮する必要がある。ところが、データによっては、補正としてベンチマーク  $k_{\text{eff}}$  値に反映しているものもあれば、補正は行わず実験値の不確かさとして考慮しているものもあり、考慮の仕方に統一がとれていないのが現状である。そこで、今回のベンチマークデータの整備にあたっては、検討対象とした全てのデータについて二重格子燃料ピンモデルを構築し、MVP コードを用いて非均質反応度効果を定量的に評価した。ここで、「二重格子」と呼んでいるのは、通常燃料の格子配列に加えて、各燃料中の  $\text{PuO}_2$  粒子の分散を格子配列として考慮することに由来する。図 4 に二重格子燃料ピンモデルの概略を示す。

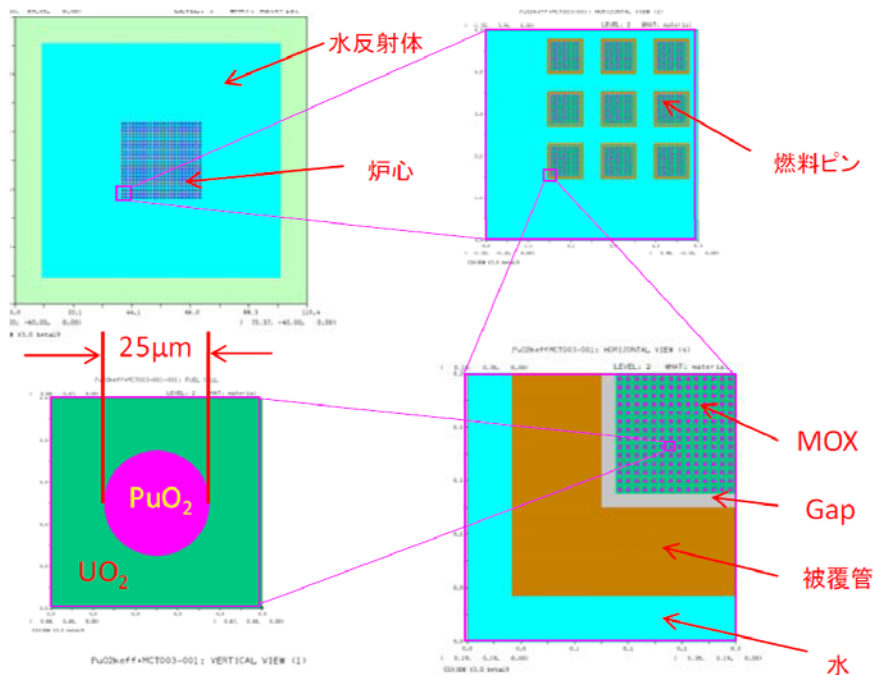


図 4 :  $\text{PuO}_2$  非均質効果評価のための二重格子燃料ピンモデルの概略

図5に、PuO<sub>2</sub>粒子の非均質反応度について、今回新たに評価したものと、ICSBEPで採用されているものを示す。今回の評価値はICSBEPで採用されているものに比べると系統的に反応度の絶対値が小さい結果となっている。今回、同一の評価手法を実験データ全てに適用し非均質反応度効果の評価することによって、より信頼性の高いベンチマークデータ集の構築を実現した。

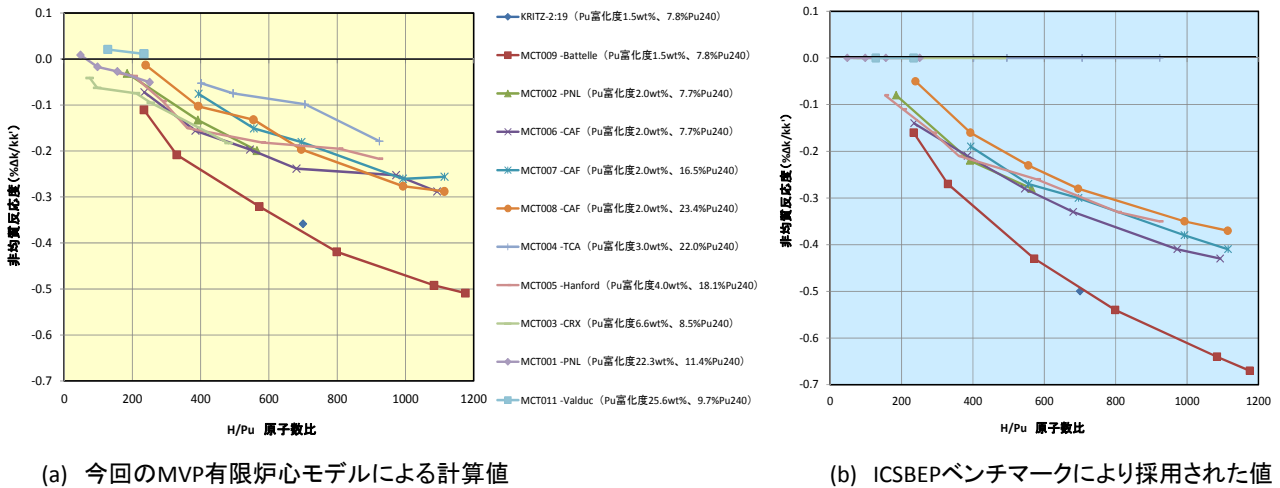


図5：PuO<sub>2</sub>非均質効果の評価結果

今回整備した軽水減速MOX格子系のベンチマークデータについて、データが取りうる物理パラメータの範囲を以下に示す。

- H/Pu 原子個数比：75～1176
- Pu 富化度[wt%]：1.5～25.6
- 燃料ピンピッチ[cm]：0.9525～4.318
- 燃料ピン本数：121～1487
- 軽水中のボロン濃度[ppm]：0～1090.4
- 炉心温度：常温～高温（240℃）

これらのベンチマークデータにおけるJENDL-4.0の解析結果を図6に示す。C/E値はH/Pu原子数比に依存せず、計算値は実験値を概ね±0.4%以内で再現していることが分かる。

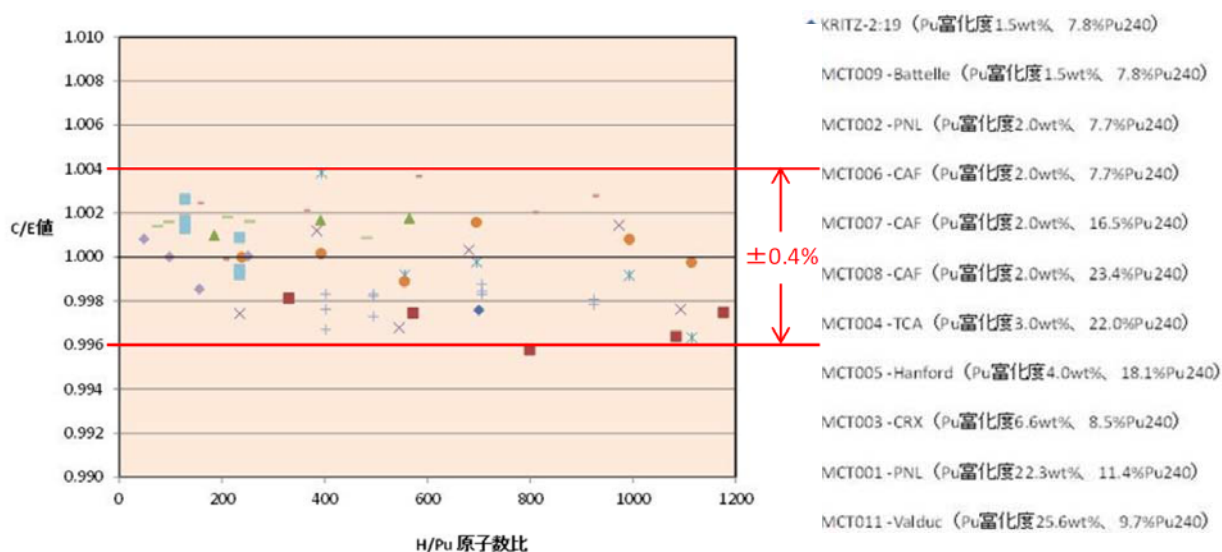


図 6：軽水減速 MOX 燃料格子ベンチマークデータにおける JENDL-4.0 の解析結果  
(高温のデータや軽水に大量にボロンが添加されているデータ等、異質データは排除している)

## 5. 結言

次期 JENDL の原子炉核特性に対する性能を評価・検証するためのベンチマークデータ集について解説を行った。今回のデータ集の作成では、軽水炉の臨界特性（中性子実効増倍率）に着目し、公開データベースである ICSBEP ハンドブック及び IRPhEP ハンドブックに収納されている炉物理実験データを活用した。今回整備したベンチマークデータ集は、これまでの種々の評価済み核データライブラリの積分検証に利用されてきたものと比べても高い信頼性を有するものとする。このベンチマークデータ集は、次期 JENDL のみならず、汎用核データライブラリの積分検証をする上で極めて有用であり、長い将来に亘って広く活用されるであろう。

なお、今回のベンチマークデータ集の整備は、作業に充てられる時間が限られていたことから、既存の公開データベースのごく一部について検討を行ったものである。従って、中性子実効増倍率の H/U 原子個数比等の種々の物理パラメータに対する依存性を網羅する観点から、さらに追加すべき公開データが存在する可能性が大いに考えられる。この点については、今回整備したベンチマークデータ集を運用しながら、適宜、有益なデータを追加していく作業が重要となるであろう。また、主要な重核種や水素、酸素等の軽核に加えて軽中重核に感度を有するデータや、溶液系等といった格子系以外のデータについても網羅できるように、ベンチマークデータ集の拡張を継続的に行う必要がある。

原子力エネルギーの活用には核データの利用が必須である。また、より高い信頼度に基づいた原子力エネルギーの活用を実現するためには、核データの精度検証は避けては

通れず、そのためには信頼性の高い検証用のデータベースが必要となる。今回整備した軽水炉ベンチマークデータ集がそのための出発点となることを、強く期待するものである。

このベンチマークデータの整備作業はリアクタ積分 WG として実施したものである。ここに、全ての WG メンバーのベンチマークデータ整備の実作業や内容の改善への貢献に深い謝意を示す。また、日本原子力研究開発機構の長家康展氏、森貴正氏、多田健一氏、(株) NESI の沼田一幸氏にも多大な貢献をいただいたことを付記する。なお、森氏には、燃料ピンセルの非均質効果のメカニズムについて四因子公式を用いた分析結果をまとめていただいた。この検討は燃料ピンピッチが大きくなると非均質反応度が負になる結果が得られたことが契機となって行われたものである。

最後に、これは著者個人の見解として述べるが、このベンチマークデータ集の整備は、日本原子力研究開発機構の石川眞氏の強い実行力に負うところが大きい。石川氏が高速炉の炉物理データベースの整備に長年尽力されたことは良く知られているが、今回のデータ集の整備はそれに負けない価値があるものとする。JENDL が今後も発展していくとするならば、このデータ集はその大きな基礎の一つになるであろう。

## 参考文献

- [1] 高野秀機：「リアクタ積分テストWG」、核データニュース、No. 54、p. 110(1996)。
- [2] G. Chiba: "Validation of JENDL-4.0 and future: reactor integral test working group," JAEA-Conf 2013-002, p.65 (2013).
- [3] 千葉豪：「Gd-157 熱中性子捕獲断面積に関する最近の検討状況」、核データニュース No.108、p. 61 (2016)
- [4] <https://www.oecd-nea.org/science/wpec/meeting2016/>など。
- [5] JENDL 委員会リアクター積分テストワーキンググループ：「JENDL 開発のための軽水炉ベンチマークに関するデータ集の整備 -公開データベース ICSBEP 及び IRPhEP における実効増倍率データの活用-」、JAEA-Data/Code 2017-006 (2017 年 5 月)
- [6] G. Chiba et al.: "JENDL-4.0 benchmarking for fission reactor applications," J. Nucl. Sci. Technol., 48[2], p.172 (2011).