

炉物理部会, 核データ部会, 「シグマ」調査専門委員会合同セッション
「JENDL-5 の完成と数値解析への適用の展望」

(3) 熱中性子炉体系における JENDL-5 の積分ベンチマーク解析

東芝エネルギーシステムズ (株)
エネルギーシステム技術開発センター
吉岡 研一
kenichi.yoshioka@toshiba.co.jp

1. はじめに

東芝臨界実験装置 NCA は UO_2 燃料棒を用いた軽水減速型の臨界実験集合体であり、多種類の濃縮度やガドリニア入り燃料棒により種々の炉心を構成することができる特長がある。今回、NCA 実験データを用いて、熱中性子炉体系における“JENDL-5”[1]のベンチマーク解析を行ったので報告する。

2. 実験

対象とした実験は過去に行われた BWR 9×9 燃料集合体を模擬したものであり、パラメータとしてボイド率やガドリニア濃度を変化させた 22 ケースの臨界実験である[2][3]。表 1 に実験ケースを、図 1 に実験体系を示す。数字はウラン濃縮度、W はウォーターロッドを示す。ボイド率は燃料棒間に配置された中空アルミ管で調整する。ボイド模擬なし (Cold)、運転時 0%ボイド時の水密度を模擬したケース (Hot0%Void 時)、運転時 40%ボイド時の水密度を模擬したケース (Hot40%Void 時) の 3 パターンを実施している。ドライバー領域は 2wt% UO_2 燃料棒で構成し、臨界調整のためケースにより大きさを変更し、ボイド模擬はしていない。

3. 解析

解析は“MCNP6.2”[4]を用いた。核データライブラリは JENDL-5 の他、“JENDL-3.3”、“JENDL-4.0”、“ENDF/B-VII.1”、“ENDF-B/VIII.0”、“JEFF-3.3”[5]-[9]を“FRENDY”[10]により MCNP 用ライブラリに処理されたものを用いた。ヒストリは JENDL-4.0、JENDL-5 は 10000/バッチ×20000、捨てバッチ 1000 (統計誤差~0.01%dk)、その他のライブラリは 10000/バッチ×6000 バッチ、捨てバッチ 100 (統計誤差~0.005%dk) とした。図 2 に実効

増倍率(k_{eff})の結果を示す。

図 2 より JENDL-5 は JENDL-4.0 と比べると 0.2%dk 程度高めの k_{eff} を示すが、ENDF/B-VIII.0 とほぼ同程度である。ケース 1~ケース 3、ケース 4~ケース 6 等の差はボイド模擬によるものである。ボイド依存性は各ライブラリとも同様の傾向である。なお、上述のように、ボイド率変更による臨界調整のため、ドライバー領域の大きさを変更している。ドライバー領域はボイド模擬なし(Cold)であるので、ボイド依存は必ずしも炉心全体のボイドを変更しているわけではない。

MCNP6.2 の KSEN オプションを用いて感度解析を行った。以降の議論では、学会発表時の質疑を反映し、発表時には示していなかった核反応の感度についても新たに追加している。ここで、感度 (sensitivity) は以下のように核種 i の断面積変化率 $d\sigma_i/\sigma_i$ に関する実効増倍率 k_{eff} の変化率 dk/k として定義される。

$$\text{Sensitivity} = (dk/k) / (d\sigma_i/\sigma_i) = (d(\ln k)) / (d\sigma_i) \times \sigma_i \quad (1)$$

図 3 は表 1 および図 1 に示したケース 1 およびケース 4 における JENDL-5 の感度を示している。ウランや水素だけでなく、酸素やアルミの散乱断面積にも感度があることがわかる。ケース 4 はガドリニアを含む体系であるが、大きな断面積を持つ ^{155}Gd や ^{157}Gd の感度は必ずしも大きくない。これは感度の定義が断面積変化に対する k_{eff} の変化であるためと考えられる。ガドリニアの熱中性子吸収断面積が大きすぎるため、ガドリニアの濃度変化に対する吸収反応率変化がほぼ飽和しており、断面積変化に対する吸収反応率の変化が小さく、結果として感度が小さくなっていると考えられる。ガドリニアの感度をみるには、ガドリニアの反応度価値測定実験等の解析が有効と考えられる。

また、 ^1H 弾性散乱の感度は他の断面積に比べ、ケース 1 とケース 4 で差が大きいこともわかる。図 4 は ^1H 弾性散乱の感度のエネルギー分布について、ケース 1 とケース 4 を比較したものを示しており、高エネルギー部分に差が見られる。高エネルギー部分の弾性散乱断面積が大きくなると減速が促進され、中性子スペクトルは低エネルギー側にシフトすると考えられるが、核分裂の増加や Gd による中性子吸収等、正負の因子が存在することや、前述のように、ドライバー領域はケース毎に変更しているため、炉心の大きさにより反射体の影響が異なること等が差の原因として考えられる。 ^1H 散乱断面積の感度はケース依存性が高いと考えられる。

図 5 は JENDL-5 と JENDL-4.0 の感度の差分を示している。図中の誤差棒は MCNP の統計誤差に起因するものである。 k_{eff} は中性子の生成と消滅の比であるので、断面積が大きくなれば k_{eff} の変化も大きくなり、感度も高くなる。そこで、感度は断面積の大きさにほぼ比例すると考えられるので、JENDL-5 の感度と JENDL-4.0 の感度の差を取ることで、JENDL-4.0 から JENDL-5 への断面積改訂の影響が k_{eff} に与える影響を調べた。図 5 より、 $^{235}\text{U}(n,\gamma)$ 、 $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ 、 ^{235}U の ν の他にも水素や酸素の散乱断面積の改訂も k_{eff} に影響を与えていると考えられる。なお、断面積が同じでも、中性子スペクトルが変化すれば、中性子

生成率や中性子吸収率も変化し、感度も変化するので、核分裂スペクトルの変化等も感度差に影響を与えている可能性がある。

図5では水素や酸素の散乱断面積の k_{eff} への影響は差分に伴う誤差も大きい。そこで、断面積を変更し直接 k_{eff} を計算することで、これらの断面積の影響を調べた。表2に結果を示す。 ^1H (水) の $S(\alpha,\beta)$ を JENDL-5 から JENDL-4.0 に変えると、 k_{eff} は 0.3~0.4%dk 程度低くなり、 ^{16}O を JENDL-5 から JENDL-4.0 に変更すると、 k_{eff} は 0.2%dk 程度高くなる。なお、 ^{16}O の場合は散乱断面積と (n,α) を含めた効果となる。これらの結果は図3の感度差と整合しており、これらの核種の改訂が、 k_{eff} に影響を与えていることがわかる。

図6は JENDL-5 でのケース3 (40%ボイド模擬) とケース1 (Cold) との感度差を示している。ボイド率が高くなることで、 ^{238}U の捕獲が増える負の反応度効果や水素の捕獲が減ることによる正の反応度効果など、ボイド効果を特徴的に表していると言える。

4. まとめ

JENDL-5 は JENDL-4.0 と比べると 0.2%dk 程度高めの k_{eff} を示すが、ENDF/B-VIII.0 とほぼ同程度である。JENDL-5 と JENDL-4.0 の k_{eff} の差には ν や ^{235}U 、 ^{238}U の捕獲の他、水素や酸素の散乱、 $S(\alpha,\beta)$ も影響している。今後、出力分布の実験解析も進めていく予定である。

参考文献

- [1] 岩本修, JENDL-5 の概要, 2021 年度核データ研究会, <https://conference-indico.kek.jp/event/136/>.
- [2] Kenichi Yoshioka, Takuya Umamo, Mitsuaki Yamaoka, Yoshiji Karino, Juan J. Casal, Mohamed Ouisloumen, "Critical experiments for BWR fuel assemblies with cluster of gadolinia rods", Proceedings of PHYSOR 2014, Kyoto, Japan, 2014
- [3] Satoshi Wada, Kenichi Yoshioka, Tsukasa Sugita, "Benchmark study of nuclear processed systems with NCA data", Proceedings of the Reactor Physics Asia 2019 (RPHA19), Osaka, Japan, 2019.
- [4] C.J. Werner, et al., "MCNP6.2 release notes", Los Alamos National Laboratory, report LA-UR-18-20808 (2018).
- [5] K. Shibata, et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3", J. Nucl. Sci. Technol., **39**, pp. 1125-1136 (2002).
- [6] K. Shibata, et al., "JENDL-4.0: A new library for nuclear science and engineering", J. Nucl. Sci. Technol., **48**, pp. 1-30 (2011).
- [7] M.B. Chadwick, et al., "ENDF/B-VII.1 nuclear data for science and technology: Cross section, covariances, fission yields and decay data," Nuclear Data Sheets, **112**, pp. 2887-2996 (2011).

- [8] D.A. Brown, M.B. Chadwick, R. Capote, et al., "ENDF/B-VIII.0: The 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards and thermal scattering data", Nuclear Data Sheets, **148**, pp. 1-142 (2018).
- [9] A. Plompen, Announcing JEFF-3.3 Release, JEF/DOC (2017), p. 1864.
- [10] K. Tada, et al., "Development and verification of a new nuclear data processing system FRENDY", J. Nucl. Sci. Technol., **54**, pp. 806-817 (2017).

表1 実験ケース

Case ID	Void fraction	Gadolinia condition	Critical water level (mm)
1	Cold	No gadolinia rod	1,137.9
2	Hot 0% Void	No gadolinia rod	907.4
3	Hot 40% Void	No gadolinia rod	1,019.3
4	Cold	With 5wt% gadolinia rod	949.6
5	Hot 0% Void	With 5wt% gadolinia rod	1,071.5
6	Hot 40% Void	With 5wt% gadolinia rod	951.8
7	Hot 0% Void	With 5wt% gadolinia rod	877.5
8	Hot 40% Void	With 5wt% gadolinia rod	968.9
9	Cold	With 10wt% gadolinia rod	966.1
10	Hot 0% Void	With 10wt% gadolinia rod	874.1
11	Hot 40% Void	With 10wt% gadolinia rod	1,182.4
12	Hot 40% Void	With 5wt% gadolinia rod	925.7
13	Cold	With 10wt% gadolinia rod	838.4
14	Hot 0% Void	With 10wt% gadolinia rod	935.9
15	Hot 40% Void	With 10wt% gadolinia rod	1,079.9
16	Cold	With 5, 15wt% gadolinia rod	1,026.1
17	Hot 0% Void	With 5, 15wt% gadolinia rod	1,176.9
18	Hot 40% Void	With 5, 15wt% gadolinia rod	1,060.0
19	Hot 40% Void	With 5, 15wt% gadolinia rod	969.8
20	Cold	With 10wt% gadolinia rod	963.8
21	Hot 0% Void	With 10wt% gadolinia rod	1,055.1
22	Hot 40% Void	With 10wt% gadolinia rod	1,195.8

表2 水の $S(\alpha,\beta)$ と酸素 16 の影響

ライブラリ	k_{eff}		
	ケース 1(Cold)	ケース 3(40%V)	ケース 4(Cold,Gd)
JENDL-5	1.00225±0.00005	1.00379±0.00005	1.00273±0.00005
JENDL-5+S(α,β)のみ J4	0.99838±0.00009	1.00042±0.00009	0.99967±0.00009
JENDL-5+O16 のみ J4	1.00427±0.00005	1.00574±0.00009	1.00428±0.00008
JENDL-4.0	0.99988±0.00009	1.00160±0.00009	1.00081±0.00009

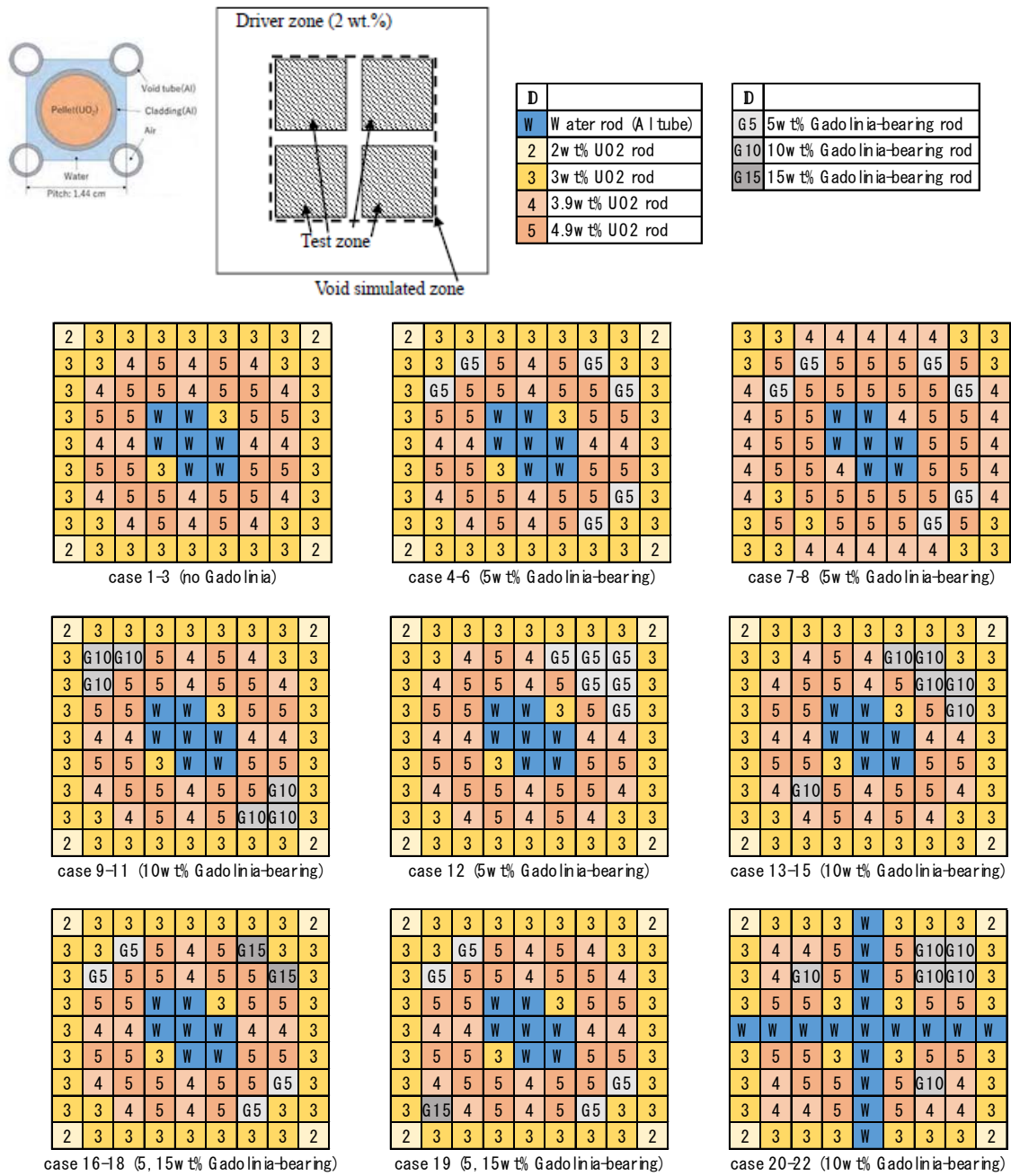


図1 実験体系

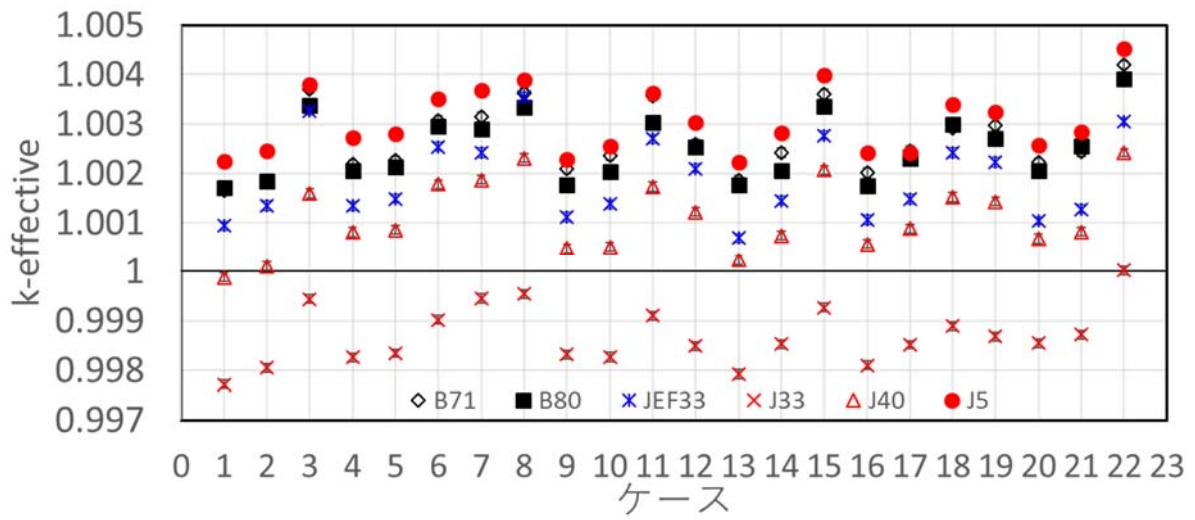


図2 実効増倍率(k_{eff})の解析結果

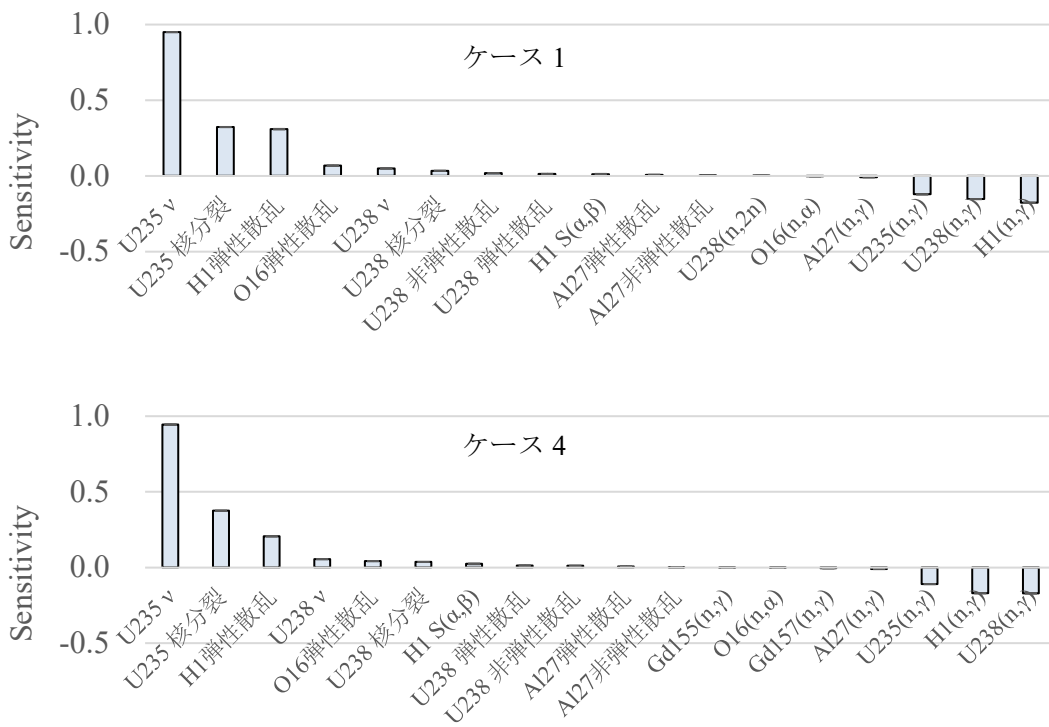


図3 JENDL-5 の主要な核反応の k_{eff} に対する感度

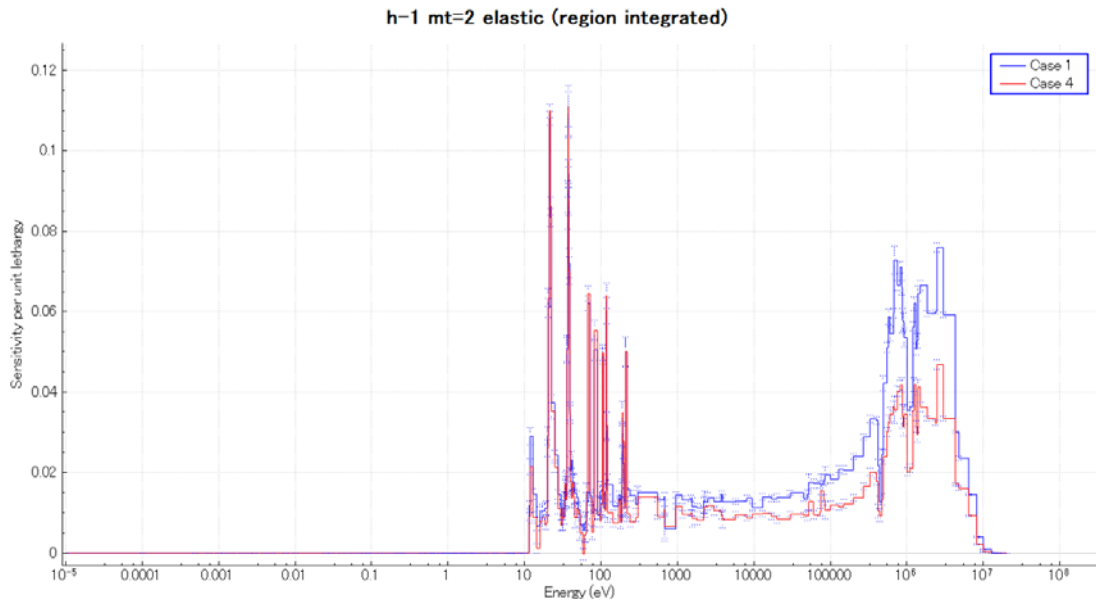


図4 H1 弾性散乱のケース1とケース4の比較

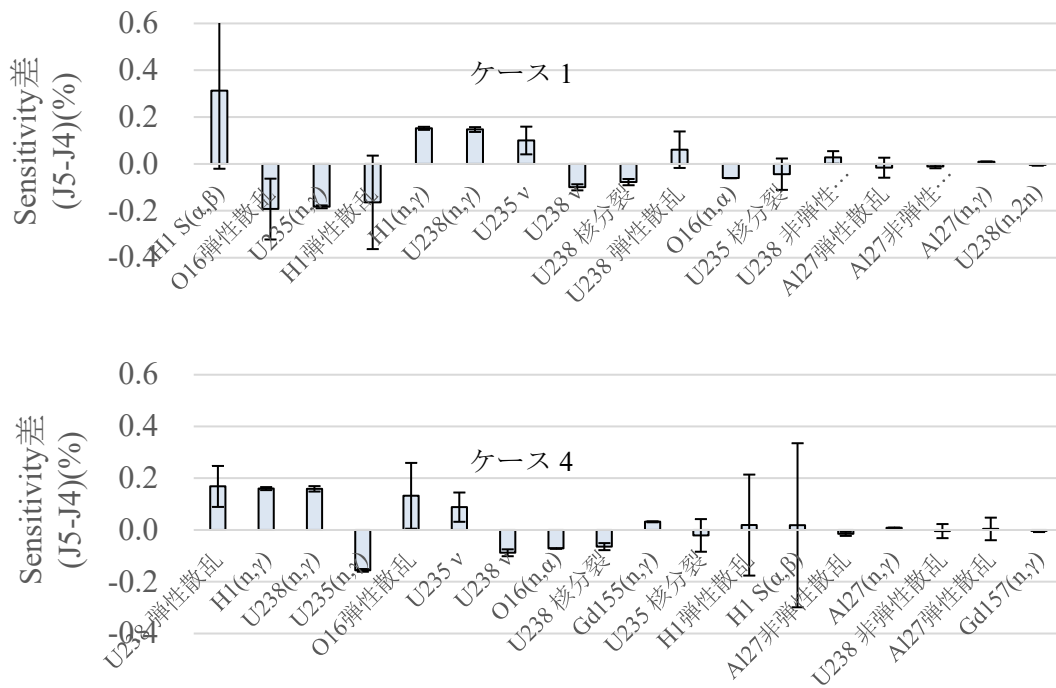


図5 主要な核反応の k_{eff} に対する感度の JENDL-5 と JENDL-4.0 の差

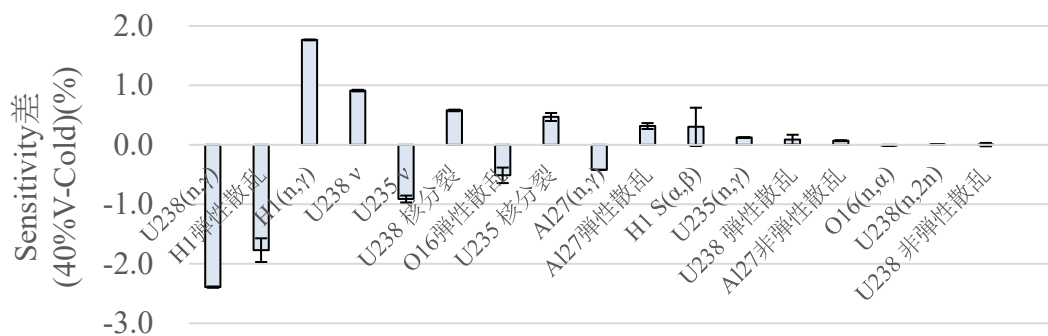


図6 主要な核反応の k_{eff} に対する感度の 40%ボイド模擬と Cold の差

本論文に掲載の商品の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。