



JENDL-4.0 を用いた核変換システムの解析

Analysis of Transmutation Systems Using JENDL-4.0

岩元 大樹 西原 健司 辻本 和文 杉野 和輝
沼田 一幸

Hiroki IWAMOTO, Kenji NISHIHARA, Kazufumi TSUJIMOTO, Kazuteru SUGINO
and Kazuyuki NUMATA

原子力基礎工学研究部門
核工学・炉工学ユニット

Division of Nuclear Data and Reactor Engineering
Nuclear Science and Engineering Directorate

January 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

JENDL-4.0 を用いた核変換システムの解析

日本原子力研究開発機構

原子力基礎工学研究部門 核工学・炉工学ユニット

岩元 大樹、西原 健司、辻本 和文、杉野 和輝、沼田 一幸*

(2011 年 10 月 24 日受理)

汎用評価済核データライブラリ JENDL の最新版 JENDL-4.0 と旧版 JENDL-3.3 を用いて、核変換システムの積分核特性 (臨界性、冷却材ボイド反応度、ドップラー反応度) およびそれらの解析値に対する核データ起因誤差の解析を実施した。解析は、鉛ビスマス冷却加速器駆動未臨界システム (ADS) とマイナーアクチノイド (MA) 添加型ナトリウム冷却高速炉 (FR) を対象とした。

JENDL-4.0 と JENDL-3.3 による核特性値の差は、ADS と FR の両方で見られ、特に ADS の核特性値で相違が顕著であることがわかった。例えば、JENDL-3.3 による ADS の実効増倍率は 0.971 であるのに対し、JENDL-4.0 では 1.000 と算出された。この原因を把握するために核特性差を核種毎、反応毎、エネルギー毎に比較したところ、ADS 核特性値の差は、主に Pb 同位体の非弾性散乱断面積および ^{241}Am の各核反応断面積に起因すること等がわかった。

次に、JENDL 共分散データを用いて、核データライブラリの不確かさに起因する核特性値の誤差 (核データ起因誤差) を評価した。FR の冷却材ボイド反応度については JENDL の改訂によって核特性値誤差の増加が認められた。FR の冷却材ボイド反応度の誤差の相違は、主に ^{23}Na の非弾性散乱断面積に関する共分散に評価値の差に起因することが明らかになった。

Analysis of Transmutation Systems Using JENDL-4.0

Hiroki IWAMOTO, Kenji NISHIHARA, Kazufumi TSUJIMOTO, Kazuteru SUGINO and
Kazuyuki NUMATA*

Division of Nuclear Data and Reactor Engineering
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 24, 2011)

An analytical study of the nuclear transmutation systems was conducted using the latest version of JENDL, JENDL-4.0, with a comparison to the former one, JENDL-3.3 in terms of reactor physics parameters (criticality, void reactivity and the Doppler reactivity) and those uncertainties. As objects of the analyses, Accelerator Driven System (ADS) and MA loaded Fast Reactor (FR) were assumed.

As results, it was found that there were considerable changes in the reactor physics parameters of ADS. For example, the criticality was 0.971 by JENDL-3.3 and 1.000 by JENDL-4.0. To investigate the causes of these differences, contributions of each nuclide, reaction, and energy group of the parameters were investigated by the sensitivity analysis. It was revealed that the difference of the reactor physics parameters of ADS is mainly due to the inelastic scattering cross sections of lead isotopes and several reactions of ^{241}Am .

In the uncertainty analysis, we calculated the uncertainties of the reactor physics parameters for the two systems by using their sensitivity coefficients and JENDL covariance data. It was found that the uncertainty evaluated by JENDL-4.0 is larger than that by JENDL-3.3 for the coolant void reactivity for both systems. For FR, a large increase of the uncertainty of the void reactivity was due primarily to the covariance data of the inelastic cross section of ^{23}Na .

Keywords: JENDL-4.0, Covariance, Minor Actinide (MA), Transmutation System, Accelerator Driven System (ADS), Fast Reactor (FR), Sensitivity Analysis, Uncertainty Analysis

* NESI Inc.

目次

1. 緒言	1
2. 核変換システムの核特性解析	2
2.1 解析手法	2
2.2 解析条件	5
2.3 解析結果	6
2.4 評価済み核データの比較	20
3. 核変換システムの誤差解析	23
3.1 JENDL 共分散データの整備状況	23
3.2 解析条件	23
3.3 解析結果	27
3.4 考察	34
4. 結言	37
謝辞	39
参考文献	40
付録A 核変換システム構成物質の組成	42
付録B 核変換システムの核データ起因誤差の核種・反応別内訳	47
付録C SAGEP に関する考察	59
C.1 直接計算と SAGEP による計算結果の比較	59
C.2 線形性の確認	60
C.3 反応別比較	62

Contents

1. Introduction	1
2. Analysis of Reactor Physics Parameters for Transmutation Systems	2
2.1 Calculation Method	2
2.2 Analytical Condition	5
2.3 Result of Analysis	6
2.4 Comparison of Evaluated Nuclear Data	20
3. Uncertainty Analysis of Transmutation Systems	23
3.1 Present Status of JENDL Covariance Data	23
3.2 Analytical Condition	23
3.3 Result of Analysis	27
3.4 Discussion	34
4. Conclusion	37
Acknowledgment	39
References	40
Appendix A Composition of Transmutation Systems	42
Appendix B Breakdown of Uncertainty of Transmutation Systems	47
Appendix C Discussion on SAGEP code	59
C.1 Comparison of Results by Direct Calculation and Sensitivity Analysis with SAGEP	59
C.2 Confirmation of Linearity	60
C.3 Comparison of Breakdown Results	62

List of Tables

表 2.2.1	各ケースの MA 組成	6
表 2.3.1	核変換システムの実効増倍率	7
表 2.3.2	核変換システムの冷却材ボイド反応度価値	7
表 2.3.3	核変換システムのドップラー反応度価値	7
表 2.3.4	ADS の核特性変化に寄与する注意すべき核種の反応別内訳 †	12
表 2.3.5	FR-E の核特性変化に寄与する注意すべき核種の反応別内訳 †	13
表 3.1.1	JENDL-3.3 共分散データの整備状況 ³⁾	24
表 3.1.2	JENDL-4.0 共分散データの整備状況	25
表 3.2.1	誤差評価の対象とする核種・反応	26
表 3.3.1	核変換システムの実効増倍率 †	27
表 3.3.2	核変換システムの冷却材ボイド反応度価値 †	27
表 3.3.3	核変換システムのドップラー反応度価値 †	27
表 A.1.1	ADS 炉心物質の原子数密度 ($\times 10^{24}$ atoms/cm ³)	43
表 A.1.2	ADS 構成物質の原子数密度 ($\times 10^{24}$ atoms/cm ³)	44
表 A.1.3	FR-T, FR-E 炉心物質の原子数密度 ($\times 10^{24}$ atoms/cm ³)	45
表 A.1.4	FR-T, FR-E 構成物質の原子数密度 ($\times 10^{24}$ atoms/cm ³)	46
表 B.1.1	ADS の臨界性に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)	47
表 B.1.2	ADS の臨界性に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)	48
表 B.1.3	ADS の冷却材ボイド反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)	49
表 B.1.4	ADS の冷却材ボイド反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)	50
表 B.1.5	ADS のドップラー反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)	51
表 B.1.6	ADS のドップラー反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)	52
表 B.1.7	FR-T の臨界性に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)	53
表 B.1.8	FR-T の臨界性に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)	53
表 B.1.9	FR-T の冷却材ボイド反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)	54

表 B.1.10	FR-T の冷却材ボイド反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)	54
表 B.1.11	FR-T のドップラー反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)	55
表 B.1.12	FR-T のドップラー反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)	55
表 B.1.13	FR-E の臨界性に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)	56
表 B.1.14	FR-E の臨界性に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)	56
表 B.1.15	FR-E の冷却材ボイド反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)	57
表 B.1.16	FR-E の冷却材ボイド反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)	57
表 B.1.17	FR-E のドップラー反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)	58
表 B.1.18	FR-E のドップラー反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)	58
表 C.1.1	各核変換システムの核特性値に対する核特性変化量	59

List of Figures

図 2.2.1	対象 ADS (a) と対象 FR (b) の二次元円筒 (RZ) 計算モデル	5
図 2.3.1	ADS の臨界性に対する核特性変化量の核種毎の寄与 (カットオフ: ±10 pcm)	9
図 2.3.2	ADS の冷却材ボイド反応度に対する核特性変化量の核種毎の寄与 (カットオフ: ±10 pcm)	9
図 2.3.3	ADS のドップラー反応度に対する核特性変化量の核種毎の寄与 (カットオフ: ±0.05 pcm)	10
図 2.3.4	FR の臨界性に対する核特性変化量の核種毎の寄与 (カットオフ: ±10 pcm)	10
図 2.3.5	FR の冷却材ボイド反応度に対する核特性変化量の核種毎の寄与 (カットオフ: ±1 pcm)	11
図 2.3.6	FR のドップラー反応度に対する核特性変化量の核種毎の寄与 (カットオフ: ±0.2 pcm)	11
図 2.3.7	ADS の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する ^{241}Am の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウン、および断面積差	14
図 2.3.8	ADS の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する ^{206}Pb の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウン、および断面積差	15
図 2.3.9	ADS の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する ^{207}Pb の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウン、および断面積差	16
図 2.3.10	FR-E の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する ^{238}U の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウン、および断面積差	17
図 2.3.11	FR-E の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する ^{239}Pu の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウン、および断面積差	18
図 2.3.12	FR-E の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する ^{241}Am の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウン、および断面積差	19
図 2.4.1	^{206}Pb の非弾性散乱断面積	21
図 2.4.2	^{207}Pb の非弾性散乱断面積	21
図 2.4.3	^{241}Am の捕獲断面積	22

図 2.4.4	^{238}U の非弾性散乱断面積	22
図 3.3.1	ADS の臨界性に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：100 pcm)	28
図 3.3.2	ADS のボイド反応度に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：40 pcm)	29
図 3.3.3	ADS のドップラー反応度に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：0.1 pcm)	29
図 3.3.4	FR-T の臨界性に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：100 pcm)	30
図 3.3.5	FR-T のボイド反応度に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：10 pcm)	31
図 3.3.6	FR-T のドップラー反応度に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：1.0 pcm)	31
図 3.3.7	FR-E の臨界性に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：100 pcm)	32
図 3.3.8	FR-E のボイド反応度に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：10 pcm)	32
図 3.3.9	FR-E のドップラー反応度に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：1.0 pcm)	33
図 3.4.1	核データ起因誤差のライブラリ差に寄与する主な核種の感度係数	35
図 3.4.2	核データ起因誤差のライブラリ差に寄与する主な核種の標準偏差	35
図 3.4.3	^{23}Na の非弾性散乱断面積	36
図 3.4.4	^{23}Na の非弾性散乱断面積 (拡大図)	36
図 C.1.1	ADS の臨界性に対する核特性変化量の直接計算と感度解析による比較	60
図 C.1.2	ADS の冷却材ボイド反応度に対する核特性変化量の直接計算と感度解析による比較	61
図 C.1.3	ADS のドップラー反応度に対する核特性変化量の直接計算と感度解析による比較	61
図 C.2.1	^{206}Pb の各核反応断面積変化に対する ADS 臨界性の変化	62
図 C.3.1	ADS の臨界性に対する核特性変化量の主要核分裂性核種の反応別内訳の直接計算と感度解析による比較	63

1. 緒言

原子力の安全性および経済性の向上、医療や天体核物理等の基礎科学分野への応用等を目的として汎用評価済み核データライブラリ JENDL-4.0 が 2010 年 5 月に公開された¹⁾。JENDL-4.0 は、加速器駆動未臨界システム (ADS) 等の核変換システムをはじめとした革新的原子力システムの研究開発に十分対応できるものとするのが最重点項目の一つとして挙げられ、この目的を達成するために、マイナーアクチノイド (MA) をはじめとするデータが誤差データとともに大幅に拡充された。ベンチマーク解析の結果では、JENDL-4.0 は質と量ともに現時点で最も信頼度の高い汎用ライブラリであることが示された²⁾。

本検討では、ADS および MA 添加型高速炉 (FR) を対象とし、JENDL-4.0 を使用した場合の核変換システムの核特性値および核データの不確かさに起因する核特性値の誤差が、旧版 JENDL-3.3 による値と比較して、どの程度変更されるかを感度解析と誤差解析によって定量的に把握することを目的とする。

第 2 章では、まず、本検討で用いる解析方法と解析条件についてまとめる。次に、JENDL-4.0 および JENDL-3.3 を用いた場合の核変換システムの感度解析を行ない、ライブラリ変更による核特性値の変化とそれに対する核種・反応の寄与について議論する。

第 3 章では、JENDL-4.0 および JENDL-3.3 の共分散データを用いて核変換システムの核データ起因誤差解析を行ない、ライブラリ変更による核設計精度評価の変化について検討を行なう。

第 4 章で、本検討で得られた成果をまとめ、今後の課題を摘出して結言とする。

2. 核変換システムの核特性解析

2.1 解析手法

本検討では、核変換システムの核特性解析を JENDL-3.3 と JENDL-4.0 を用いて行ない、両者の結果を比較する。解析手法および計算体系は文献³⁾の手法に従った。

本解析では、MA 核変換システムとして ADS と FR を対象とする。対象とする核特性は、最も基本的な炉物理量である実効増倍率、冷却材ボイド反応度、ドップラー反応度とした。冷却材ボイド反応度の計算については、燃料領域のみをボイド化 (冷却材の数密度について 100% から 0% に変化) するとして計算した。ドップラー反応度の計算については、燃料領域の物質 (燃料、被覆管、および冷却材) の温度が 500°C 上昇するとして計算を行なった。

本検討では、ライブラリの相違による各核特性の変化に対する核種・反応の寄与を調べるために、誤差伝播を考慮した感度解析を行なった。解析は従来から使用されている高速炉用標準コードを用いた。すなわち、格子均質化計算に SLAROM-UF⁴⁾、体系計算に CITATION-FBR⁵⁾、厳密摂動計算および感度係数計算に SAGEP⁶⁾ を使用した。これらのコードについては、これまでの高速臨界実験装置における実験解析や高速炉の炉心計算等で標準的に使用されているコードであり、十分な使用実績のあるものである。ただし、従来の解析では核分裂に対して寄与が小さかった MA の核分裂スペクトルについては、従来コードでは感度係数を計算する仕様になっていなかった。このため、本研究では ²³⁵U と ²³⁹Pu 以外の核種の核分裂スペクトルに対する感度係数は考慮していないが、今後、これらのコードの修正が望まれる¹⁾。以下に、本検討で重要な役割を果たす感度係数を用いた評価方法について説明し、本検討の解析条件を示す。

2.1.1 感度係数を用いた核特性変化量の評価方法

感度係数は、「ある核種・反応の核断面積 σ が微小変化したときに生ずる、積分核特性 R の微小変化量」と定義される。ここでは、断面積と積分核特性の変化量を相対値として、感度係数 S を次のように定義する。

$$S \equiv \left(\frac{dR}{R} \right) / \left(\frac{d\sigma}{\sigma} \right) \quad (2.1)$$

ある核種・反応の断面積 σ の変化量 $\Delta\sigma/\sigma$ に対して積分核特性 R の変化量 $\Delta R/R$ が線形であれば、式 (2.1) は、

$$\frac{\Delta R}{R} = S \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right) \quad (2.2)$$

¹⁾付録 C を参照のこと。なお、現行の SAGEP は、²³⁹Pu および ²³⁵U 核分裂スペクトルに対してのみ感度係数が出力されるため、本報告書では核分裂スペクトルに関する数値的結果は省略している。他の反応については感度係数を精度よく計算できることを確認している。

と書ける。JENDL-3.3 の断面積 σ^{J33} から JENDL-4.0 の断面積 σ^{J40} に変更したときの断面積変化および核特性変化をそれぞれ

$$\frac{\Delta\sigma^{J33\rightarrow J40}}{\sigma^{J33}} \equiv \frac{\sigma^{J40} - \sigma^{J33}}{\sigma^{J33}} \quad (2.3)$$

$$\frac{\Delta R^{J33\rightarrow J40}}{R^{J33}} \equiv \frac{R^{J40} - R^{J33}}{R^{J33}} \quad (2.4)$$

と定義する。断面積変化に対する積分核特性変化が十分に線形であると仮定すると、積分核特性変化量 $\Delta R^{J33\rightarrow J40}/R^{J33}$ は

$$\frac{\Delta R^{J33\rightarrow J40}}{R^{J33}} = S^{J33} \cdot \frac{\Delta\sigma^{J33\rightarrow J40}}{\sigma^{J33}} \quad (2.5)$$

となる。ゆえに、核種 p ・反応 q の i 群断面積変化に対する核特性変化量は、

$$\frac{\Delta R^{J33\rightarrow J40}}{R^{J33}} = \sum_p \sum_q \sum_i s_{pqi}^{J33} \frac{\Delta\sigma_{pqij}^{J33\rightarrow J40}}{\sigma_{pqij}^{J33}} \quad (2.6)$$

より得られる。散乱行列に対しては、 i 群から j 群への群散乱断面積変化に対する核特性変化量は、

$$\frac{\Delta R^{J33\rightarrow J40}}{R^{J33}} = \sum_p \sum_q \sum_i \sum_j s_{pqij}^{J33} \frac{\Delta\sigma_{pqij}^{J33\rightarrow J40}}{\sigma_{pqij}^{J33}} \quad (2.7)$$

より得られる。すなわち、核特性変化量はライブラリ変更前の感度係数と変更前に対する変更後の断面積差の行列積より求めることができる。

2.1.2 感度係数

感度係数 S は以下に述べる一般化摂動論⁷⁾によって計算することができる。

そのために拡散方程式およびその随伴方程式を演算子法を用いて

$$\begin{aligned} \left(A - \frac{1}{k}F\right)\phi &\equiv B\phi = 0 \\ \left(A^* - \frac{1}{k}F^*\right)\phi^* &\equiv B^*\phi^* = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

と定義する。ここで、演算子 A は漏洩・吸収・散乱成分、演算子 F は核分裂成分を表わし、 k は実効増倍率である。

2.1.2.1 反応度値に対する感度係数

冷却材ボイドまたは燃料温度変化のような摂動が加わったときの反応度値

$$R_{\text{worth}} = \frac{\langle \phi^* (-\delta A + \frac{1}{k'}\delta F) \phi \rangle}{\langle \phi^* F \phi \rangle} \quad (2.9)$$

を考える。ここで $\langle \rangle$ は、全炉心および全エネルギーに対する積分記号を表わす。 δA および δF は加えられた摂動を表わし、 k' は摂動が加わった体系を見かけ上再び臨界にする実効増倍率である。上式の分子と分母の演算子を

$$H_1 = -\delta A + \frac{1}{k'} \delta F \quad (2.10)$$

$$H_2 = F \quad (2.11)$$

とおくと、反応度値は簡単に

$$R_{\text{worth}} = \frac{\langle \phi^* H_1 \phi \rangle}{\langle \phi^* H_2 \phi \rangle} \quad (2.12)$$

と書ける。断面積 σ に対する R_{worth} の感度係数 S_{worth} は、式 (2.1) より

$$S_{\text{worth}} = \left(\frac{\langle \phi^* \frac{dH_1}{d\sigma} \phi \rangle}{\langle \phi^* H_1 \phi \rangle} - \frac{\langle \phi^* \frac{dH_2}{d\sigma} \phi \rangle}{\langle \phi^* H_2 \phi \rangle} + \frac{\langle \frac{d\phi^*}{d\sigma} H_1 \phi \rangle}{\langle \phi^* H_1 \phi \rangle} - \frac{\langle \frac{d\phi^*}{d\sigma} H_2 \phi \rangle}{\langle \phi^* H_2 \phi \rangle} + \frac{\langle \phi^* H_1 \frac{d\phi}{d\sigma} \rangle}{\langle \phi^* H_1 \phi \rangle} - \frac{\langle \phi^* H_2 \frac{d\phi}{d\sigma} \rangle}{\langle \phi^* H_2 \phi \rangle} \right) \sigma \quad (2.13)$$

となる。ここで、第 1, 2 項は演算子 H_1, H_2 の変化による直接効果、第 3, 4 項は随伴中性子束 ϕ_1^*, ϕ_2^* の変動による間接効果、第 5, 6 項は中性子束 ϕ_1, ϕ_2 の変動による間接効果を表わす。一般化中性子束 Γ と随伴一般化中性子束 Γ^* を

$$B^* \Gamma^* = \frac{H_1^* \phi^*}{\langle \phi H_1^* \phi^* \rangle} - \frac{H_2^* \phi^*}{\langle \phi H_2^* \phi^* \rangle} \quad (2.14)$$

$$B \Gamma = \frac{H_1 \phi}{\langle \phi^* H_1 \phi \rangle} - \frac{H_2 \phi}{\langle \phi^* H_2 \phi \rangle} \quad (2.15)$$

とおくと、式 (2.13) は

$$S_{\text{worth}} = \left(\frac{\langle \phi^* \frac{dH_1}{d\sigma} \phi \rangle}{\langle \phi^* H_1 \phi \rangle} - \frac{\langle \phi^* \frac{dH_2}{d\sigma} \phi \rangle}{\langle \phi^* H_2 \phi \rangle} - \langle \Gamma^* \frac{dB}{d\sigma} \phi^* \rangle - \langle \Gamma^* \frac{dB^*}{d\sigma} \phi^* \rangle \right) \sigma \quad (2.16)$$

と書ける。

2.1.2.2 実効増倍率に対する感度係数

臨界性の積分核特性量 R_{cri} 、すなわち実効増倍率 k は、式 (2.8) より

$$R_{\text{cri}} (= k) = \frac{\langle \phi^* F \phi \rangle}{\langle \phi^* A \phi \rangle} \quad (2.17)$$

となり、これは式 (2.12) において $H_1 = F, H_2 = A$ としたものと等価である。したがって、式 (2.14) より、

$$\begin{aligned} B^* \Gamma^* &= \frac{F^* \phi^*}{\langle \phi F_1 \phi^* \rangle} - \frac{A \phi^*}{\langle \phi A^* \phi^* \rangle} \\ &= \frac{\langle \phi A^* \phi^* \rangle}{\langle \phi F \phi^* \rangle} \cdot \frac{F^* \phi^*}{\langle \phi A^* \phi^* \rangle} - \frac{A^* \phi^*}{\langle \phi A^* \phi^* \rangle} \\ &= \frac{\left(\frac{1}{k} F^* - A^*\right) \phi^*}{\langle \phi A \phi^* \rangle} = -\frac{B^* \phi^*}{\langle \phi A \phi^* \rangle} = 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

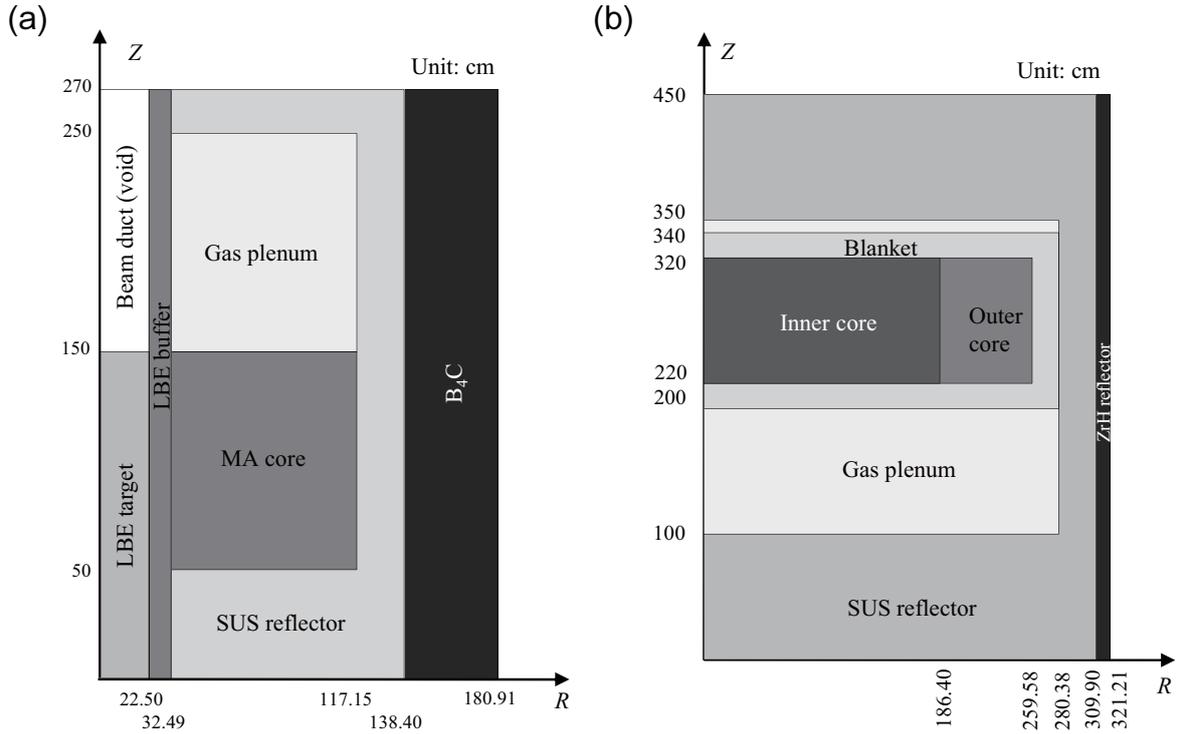


図 2.2.1 対象 ADS (a) と対象 FR (b) の二次元円筒 (RZ) 計算モデル

となる。ゆえに、恒等的に Γ^* は 0 となり、同様に Γ も恒等的に 0 である。したがって、臨界性に対する感度係数 S_k は

$$\begin{aligned}
 S_k &= \left(\frac{\langle \phi^* \frac{dF}{d\sigma} \phi \rangle}{\langle \phi^* F \phi \rangle} - \frac{\langle \phi^* \frac{dA}{d\sigma} \phi \rangle}{\langle \phi^* A \phi \rangle} \right) \sigma \\
 &= -k \frac{\langle \phi^* \frac{dB}{d\sigma} \phi \rangle}{\langle \phi^* F \phi \rangle} \sigma
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

より得られる。

感度係数計算コード SAGEP では、上の基礎方程式 (2.16) および式 (2.19) により各核種断面面積について、反応毎、エネルギー群毎に解析される。

2.2 解析条件

解析では、ADS については、文献⁹⁾で検討された MA 装荷量 63.7 wt% の鉛ビスマス (LBE) 冷却 ADS 炉心を対象とし、MA 添加型 FR の燃料組成については、文献⁸⁾に記載の MOX 燃料ナトリウム冷却大型炉を対象とした。図 2.2.1 に解析対象の ADS および FR の二次元円筒 (RZ) 計算モデルを示す。ADS については、拡散計算において真空の陽子ビーム導入管での中性子束計算が収束しないことを避けるため、文献³⁾と同様にビーム導入管部分を LBE に置換して解析を

行なった。FR については、制御棒などを詳細には考慮せず、内側・外側炉心領域は、燃料、構造材、冷却材のみの構成とした。

FR の燃料組成に関しては、軽水炉から高速炉への移行期 (FR-T: FR in Transitional phase) と軽水炉がすべて高速炉で置き換えられた平衡期 (FR-E: FR in Equilibrium phase) に分類し、それぞれの MA 組成を用いて 5.0 wt% の MA を燃料領域に均質に添加したそれぞれ 2 つの状態の炉心を考慮した。FR-T については、プルサーマル使用済み燃料を軽水炉処理施設で処理するシナリオにおいて、その使用済み燃料の貯蔵期間が長期化した場合のケースに基づく組成を用いた¹⁰⁾。すなわち、110 年冷却プルサーマル使用済み燃料 (45~49 [GWd/HMt]) から回収した TRU と、90 年冷却 LWR (軽水炉) 使用済み燃料 (45~49 [GWd/HMt]) から回収した TRU と、40 年冷却 ALWR (先進型軽水炉) 使用済み燃料 (60 [GWd/HMt]) から回収した TRU を 0.5 : 1.9 : 7.6 で混合したものを対象とした。FR-E については、文献⁸⁾ で設計標準とされている高速炉多重リサイクル TRU の組成を用いた。

以上の組成について、本検討で対象とする核変換システム (ADS, FR-T, FR-E) の MA 組成を表 2.2.1 に示し、炉心物質およびその他の構成物質の原子数密度を付録 A にまとめる。

	FR-T	FR-E	ADS
²³⁷ Np	35.4%	11.1%	50.0%
²⁴¹ Am	54.5%	44.4%	32.4%
^{242m} Am	—	—	0.06%
²⁴³ Am	9.6%	22.3%	13.1%
²⁴³ Cm	—	—	0.03%
²⁴⁴ Cm	0.5%	22.3%	3.95%
²⁴⁵ Cm	—	—	0.38%
²⁴⁶ Cm	—	—	00.4%

2.3 解析結果

2.3.1 体系計算結果

CITATION-FBR による 70 群拡散計算および SAGEP の厳密摂動計算によって得られた各核変換システムの実効増倍率、冷却材ボイド反応度価値およびドップラー反応度価値を表 2.3.1-2.3.3 に示す。各核変換システムの実効増倍率については、JENDL-3.3 を用いて行なわれた設計において FR で 1.0、ADS で 0.97 が想定されているが、FR では制御棒を考慮していない点、ADS についてはビームダクトを LBE に置換した影響により、これらの値を上回る結果となっている。表 2.3.1-2.3.3 より、核データライブラリ変更による ADS の核特性変化量は、FR のものに比べて

表 2.3.1 核変換システムの実効増倍率

	Multiplication factor		Change [pcm]
	JENDL-3.3	JENDL-4.0	
ADS	0.971	1.000	2936.0
FR-T	1.060	1.068	706.5
FR-E	1.086	1.094	676.3

表 2.3.2 核変換システムの冷却材ボイド反応度価値

	Void reactivity worth [pcm]		Change [pcm]
	JENDL-3.3	JENDL-4.0	
ADS	5331.3	3875.5	-1455.8
FR-T	2822.0	2871.4	49.4
FR-E	2697.0	2751.1	34.3

表 2.3.3 核変換システムのドップラー反応度価値

	Doppler reactivity worth [pcm]		Change [pcm]
	JENDL-3.3	JENDL-4.0	
ADS*1	-15.0(-3.44) [†]	-13.4(-3.24)	1.6
FR-T*2	-226.6(-53.6)	-225.4(-53.9)	1.3
FR-E*2	-277.7(-68.9)	-277.4(-69.7)	0.3

*1: 燃料領域で 710°C から 1210°C に温度変化 (+500 K)

*2: 燃料領域で 550°C から 1050°C に温度変化 (+500 K)

†: 括弧内はドップラー係数で、単位は ($\times 10^{-4} [T\Delta k/dT]$)

大きいことがわかる。特に、実効増倍率について FR が約 700 pcm の変化量²に対して ADS では 2936.0 pcm、冷却材ボイド反応度価値について FR が数十 pcm の変化量に対して ADS では -1455.8 pcm の変化量となっている。一方、ドップラー反応度価値については、両システムともにライブラリ変更による大きな変化は見られなかった。ADS では未臨界状態で運転することを想定しているため、実効増倍率の変化は重大な問題である。今後、JENDL-4.0 をベースにした炉心燃料の再評価が必要である。

2.3.2 感度解析結果

2.3.2.1 核種別核特性変化量

SAGEP の感度計算により得られた感度係数と、JENDL-3.3 と JENDL-4.0 の断面積を用いて、式 (2.5) (または式 (2.6) と式 (2.7)) から得られた核特性変化量の核種別内訳を核変換システム毎に図 2.3.1-2.3.6 に示す。図では、設定値 (図脚注のカットオフ) を設け、設定値を超える変化量

²pcm = $10^{-5} \Delta k/kk'$

を与えた核種を示している。

ここで、臨界性変化 (Criticality Change, CC) および反応度変化 (Reactivity Change, RC) はそれぞれ次のように定義される。

$$CC \equiv \rho^{J40} - \rho^{J33} = \frac{\Delta k^{J33 \rightarrow J40}}{k^{J33}} \cdot \frac{1}{k^{J40}} \quad (\text{unit : [pcm]}) \quad (2.20)$$

$$RC \equiv \delta\rho^{J40} - \delta\rho^{J33} = \frac{\Delta\delta\rho^{J33 \rightarrow J40}}{\delta\rho^{J33}} \cdot \delta\rho^{J33} \quad (\text{unit : [pcm]}) \quad (2.21)$$

ここで、 k は実効増倍率を表わし、 ρ および $\delta\rho$ はそれぞれ反応度および反応度値を表わす。上式中の $\Delta k^{J33 \rightarrow J40}/k^{J33}$ と $\Delta\delta\rho^{J33 \rightarrow J40}/\delta\rho^{J33}$ は式 (2.5) (または式 (2.6) と (2.7)) より得られる。

図 2.3.1-2.3.3 より、ADS では、核種別で見るとライブラリ変更による臨界性の変化量は ^{241}Am が最も大きく、次いで ^{206}Pb , ^{207}Pb と続く。冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度については、 ^{206}Pb と ^{207}Pb による寄与が著しく大きい。

次に図 2.3.4-2.3.6 より、FR-T と FR-E よりを比較すると、いずれのパラメータについても FR-E の方が ^{244}Cm と ^{243}Am による核特性変化の寄与が大きくなっている。この違いは、表 2.2.1 に示すように燃料に含まれる MA 組成の相違によるものである。すなわち、FR-T では ^{244}Cm と ^{243}Am の量が FR-E に比べて少ないため、核特性変化の寄与も小さい。一方、 ^{241}Am および ^{237}Np の量は FR-T の方が多いため、核特性変化の寄与は FR-T の方が大きくなっている。この点を除けば、FR-T と FR-E の間で核特性変化量に関する顕著な違いは見られない。パラメータ別に見ると、FR の臨界性については主に ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Am が核特性変化に大きく寄与する。冷却材ボイド反応度については、主に ^{239}Pu 、 ^{238}U 、 ^{241}Am 、 ^{240}Pu 等の多くの核種が核特性変化に寄与し、ドップラー反応度については主に ^{241}Am 、 ^{238}U 、 ^{16}O 、 ^{57}Fe が核特性変化に寄与する。

ここで、核変換システムの核特性変化量は、核種間あるいは以降で述べる反応間・エネルギー群間で相殺するために小さく見えてしまう恐れがあることに注意を要する。例えば図 2.3.6 より、FR-T のドップラー反応度変化量を核種毎に見ると ^{241}Am と ^{16}O がそれぞれ -2.9 pcm および -2.4 pcm、 ^{238}U と ^{57}Fe がそれぞれ 2.7 pcm および 1.8 pcm であるのに対し、その絶対値は FR-T のドップラー反応度変化量 1.3 pcm (表 2.3.3) よりも大きい。そのため、核特性変化の原因調査においては、核種・反応・エネルギー群毎に分解して見ていくことが重要である。

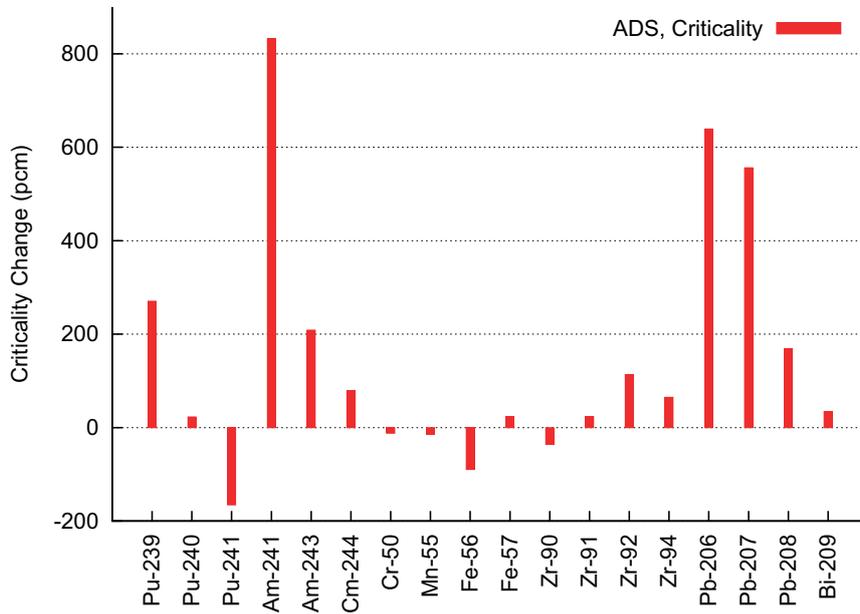


図 2.3.1 ADS の臨界性に対する核特性変化量の核種毎の寄与 (カットオフ：±10 pcm)

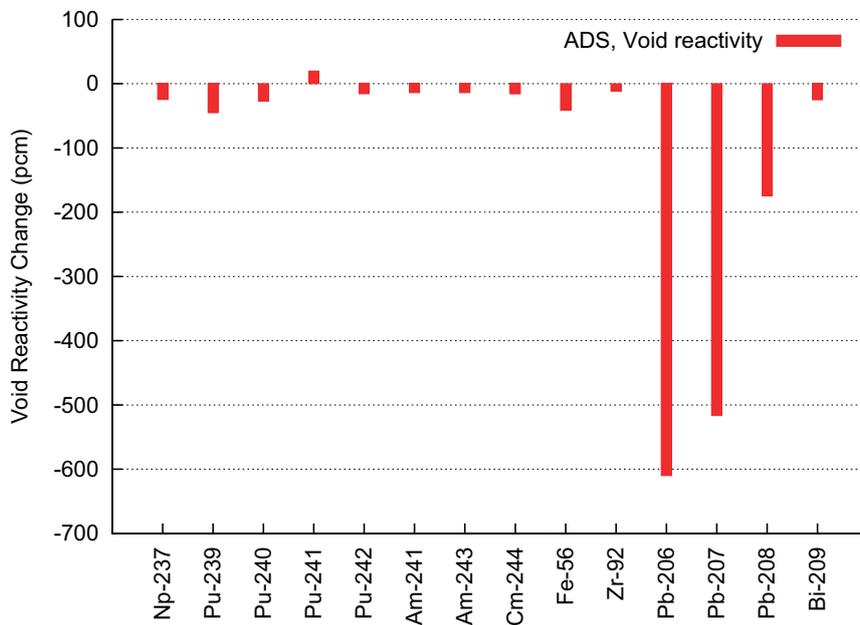


図 2.3.2 ADS の冷却材ボイド反応度に対する核特性変化量の核種毎の寄与 (カットオフ：±10 pcm)

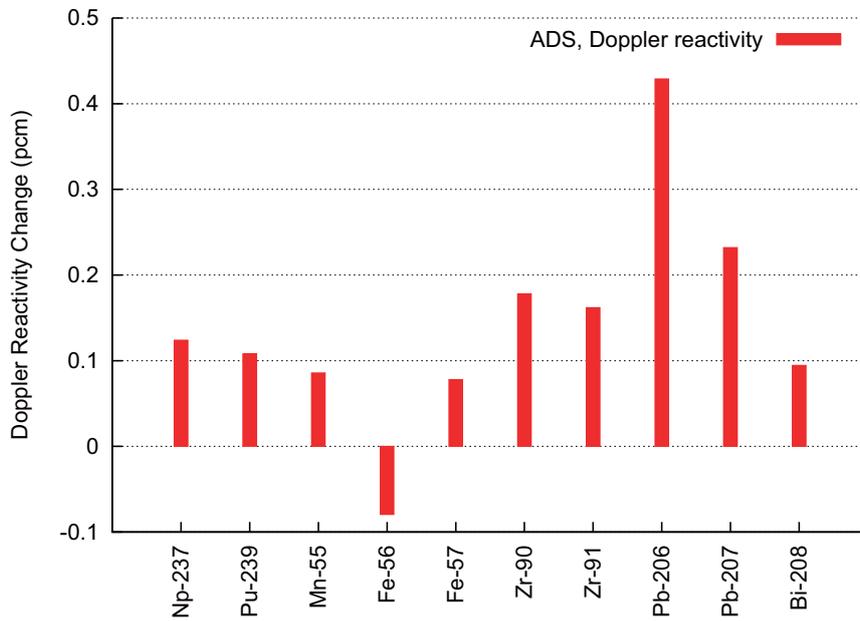


図 2.3.3 ADS のドップラー反応度に対する核特性変化量の核種毎の寄与 (カットオフ：±0.05 pcm)

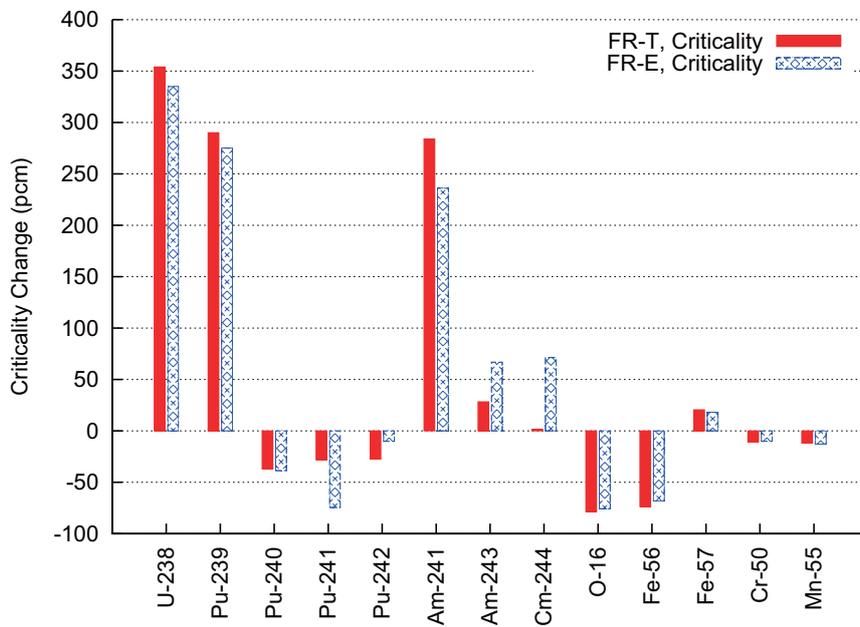


図 2.3.4 FR の臨界性に対する核特性変化量の核種毎の寄与 (カットオフ：±10 pcm)

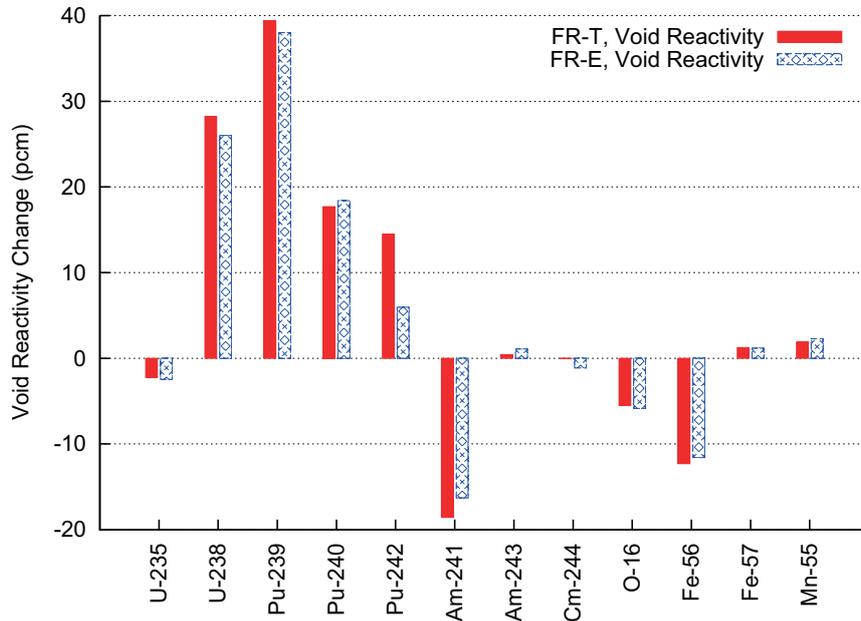


図 2.3.5 FR の冷却材ボイド反応度に対する核特性変化量の核種毎の寄与 (カットオフ：±1 pcm)

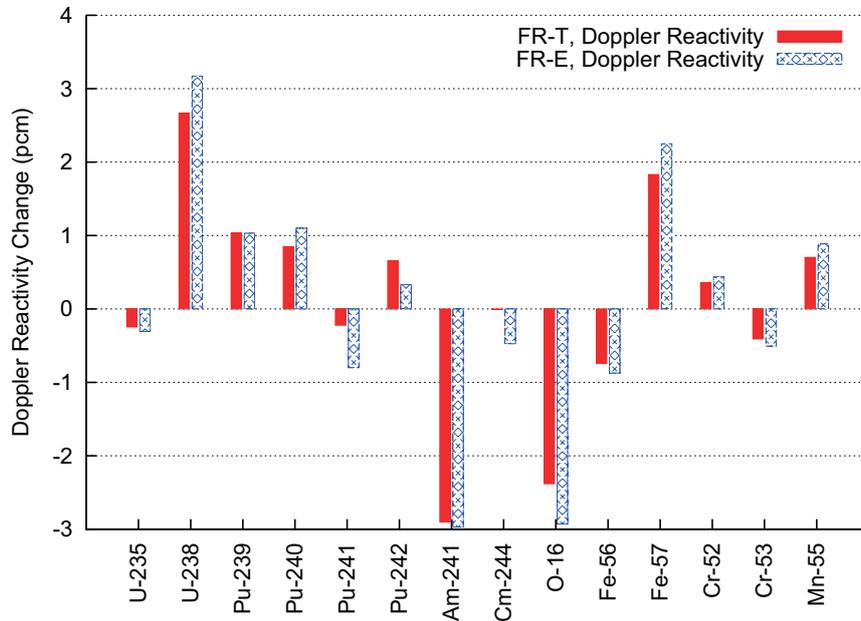


図 2.3.6 FR のドップラー反応度に対する核特性変化量の核種毎の寄与 (カットオフ：±0.2 pcm)

2.3.2.2 ADS に対する反応別核特性変化量

ADS に対する核特性変化に寄与する注意すべき核種の反応別内訳を表 2.3.4 に示す³。ここで、ADS の臨界性については、寄与が比較的大きな ²⁴¹Am, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb の反応別内訳を示すとともに、²³⁷Np については反応間で寄与の相殺が見られたため ²³⁷Np の反応別内訳も記載した。ADS の冷却材ボイド反応度については、寄与が大きな ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb および ²⁰⁸Pb の反応別内訳を記した。ドップラー反応度については、ライブラリ変更による核特性変化は非常に小さいが、核種のなかで寄与の比較的大きな ²⁰⁶Pb と ²⁰⁷Pb の反応別内訳を記載した。

表より、全ての核特性変化に対して寄与の大きな Pb 同位体については非弾性散乱の寄与が大きく、他の反応に比べて突出していることがわかる。臨界性変化に対しては、²⁴¹Am の非弾性散乱、捕獲反応、および ν 値の寄与も大きい。また、ADS の臨界性に対して ²³⁷Np 核種全体の寄与は僅かだが、反応毎の寄与は比較的大きく、正の寄与 (ν 値と非弾性散乱) と負の寄与 (核分裂反応と捕獲反応) が互いに相殺しあっている。

表 2.3.4 ADS の核特性変化に寄与する注意すべき核種の反応別内訳[†]

	fis	ν	cap	inl	el	$\bar{\mu}$	n2n	total
Criticality								
²⁴¹ Am	76.0	207.9	254.6	293.2	1.4	-0.9	0.0	832.3
²⁰⁶ Pb	—	—	-33.7	673.9	3.3	-4.7	0.4	639.2
²⁰⁷ Pb	—	—	-14.4	559.6	14.4	-4.1	0.4	555.9
²³⁷ Np	-99.8	137.4	-163.3	127.6	0.2	1.2	0.0	3.3
Void Reactivity								
²⁰⁶ Pb	—	—	27.4	-638.8	-0.5	2.0	0.0	-609.9
²⁰⁷ Pb	—	—	11.5	-525.0	-4.9	1.9	0.0	-516.5
²⁰⁸ Pb	—	—	-16.1	-162.4	1.6	2.6	0.0	-174.2
Doppler Reactivity								
²⁰⁶ Pb	—	—	0.08	0.36	-0.01	0.00	0.00	0.43
²⁰⁷ Pb	—	—	-0.07	0.30	0.00	0.00	0.00	0.23

†: 単位は [pcm]

2.3.2.3 FR-E に対する反応別核特性変化量

FR-E に対する核特性変化に寄与する注意すべき核種の反応別内訳を表 2.3.5 に示す。ここで、FR-E の臨界性に対しては寄与が大きな ²³⁸U, ²³⁹Pu, ²⁴¹Am を記載した。冷却材ボイド反応度に対しては寄与が比較的大きく、臨界性に対しても寄与が大きな ²³⁹Pu, ²³⁸U, ²⁴¹Am を記した。ドップラー反応度については、ADS と同様にライブラリ変更による核特性変化は非常に小さいが、寄与が比較的大きく、他の核特性変化にも寄与する ²³⁸U, ²⁴¹Am, ²³⁹Pu の反応別内訳を記載した。

³ fis: 核分裂断面積、 ν : ν 値、cap: 捕獲断面積、inl: 非弾性散乱断面積、el: 弾性散乱断面積、 $\bar{\mu}$: 平均散乱角余弦、n2n: ($n, 2n$) 反応断面積

表より、ADS に比べて、反応毎の変化量は小さいが、多くの反応が核特性変化に寄与している。なかでも、全ての核特性変化に対して ^{238}U の非弾性散乱と ^{241}Am の捕獲反応の寄与が大きい。ここで、同じ反応でも、対象とする核特性によって寄与の割合が異なることに注意を要する。例えば、 ^{239}Pu の核分裂反応と ν 値を比較すると、FR の臨界性に対しては核分裂反応の方が ν 値よりも圧倒的に寄与量が多いが、冷却材ボイド反応度とドップラー反応度に対しては両者に臨界性ほどの大きな差異はない。このことは、 ^{239}Pu の核分裂反応断面積が FR の臨界性に強く影響していることを示す証拠である。

表 2.3.5 FR-E の核特性変化に寄与する注意すべき核種の反応別内訳 †

	fis	ν	cap	inl	el	$\bar{\mu}$	n2n	total
Criticality								
^{238}U	-36.7	42.0	17.7	270.7	-12.0	51.6	1.6	334.9
^{239}Pu	100.4	1.4	133.4	4.3	1.5	-0.8	0.0	274.7
^{241}Am	16.4	45.3	137.1	37.4	0.2	-0.4	0.0	236.1
Void Reactivity								
^{239}Pu	26.2	15.2	-7.2	4.8	0.1	-0.1	0.0	38.0
^{238}U	-0.6	2.0	-5.8	25.1	-6.2	11.2	0.3	26.0
^{241}Am	0.3	0.8	-22.6	5.2	0.0	0.0	0.0	-16.3
Doppler Reactivity								
^{238}U	-0.28	0.26	0.19	3.37	-0.69	0.31	0.01	3.17
^{241}Am	0.11	0.27	-3.84	0.48	0.0	0.0	0.0	-2.97
^{239}Pu	1.50	1.20	-2.31	0.42	-0.07	-0.01	0.0	1.03

†: 単位は [pcm]

2.3.2.4 主要核種・主要反応の核特性変化量の群構造

● ADS

図 2.3.7-2.3.9 に、ADS の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する主要 3 核種 (^{241}Am 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb) の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウンおよび断面積差を示す。 ν 値および非弾性散乱による核特性変化は、MeV 領域で見られ、捕獲断面積による核特性変化は 1 keV 付近から数百 keV の領域で確認できる。

● FR-E

図 2.3.10-2.3.12 に、FR-E の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する主要 3 核種 (^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Am) の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウンおよび断面積差を示す。FR の臨界性では、 ^{239}Pu の核分裂反応の感度が最も高いが、JENDL-3.3 に対する JENDL-4.0 の断面積差が小さいため、

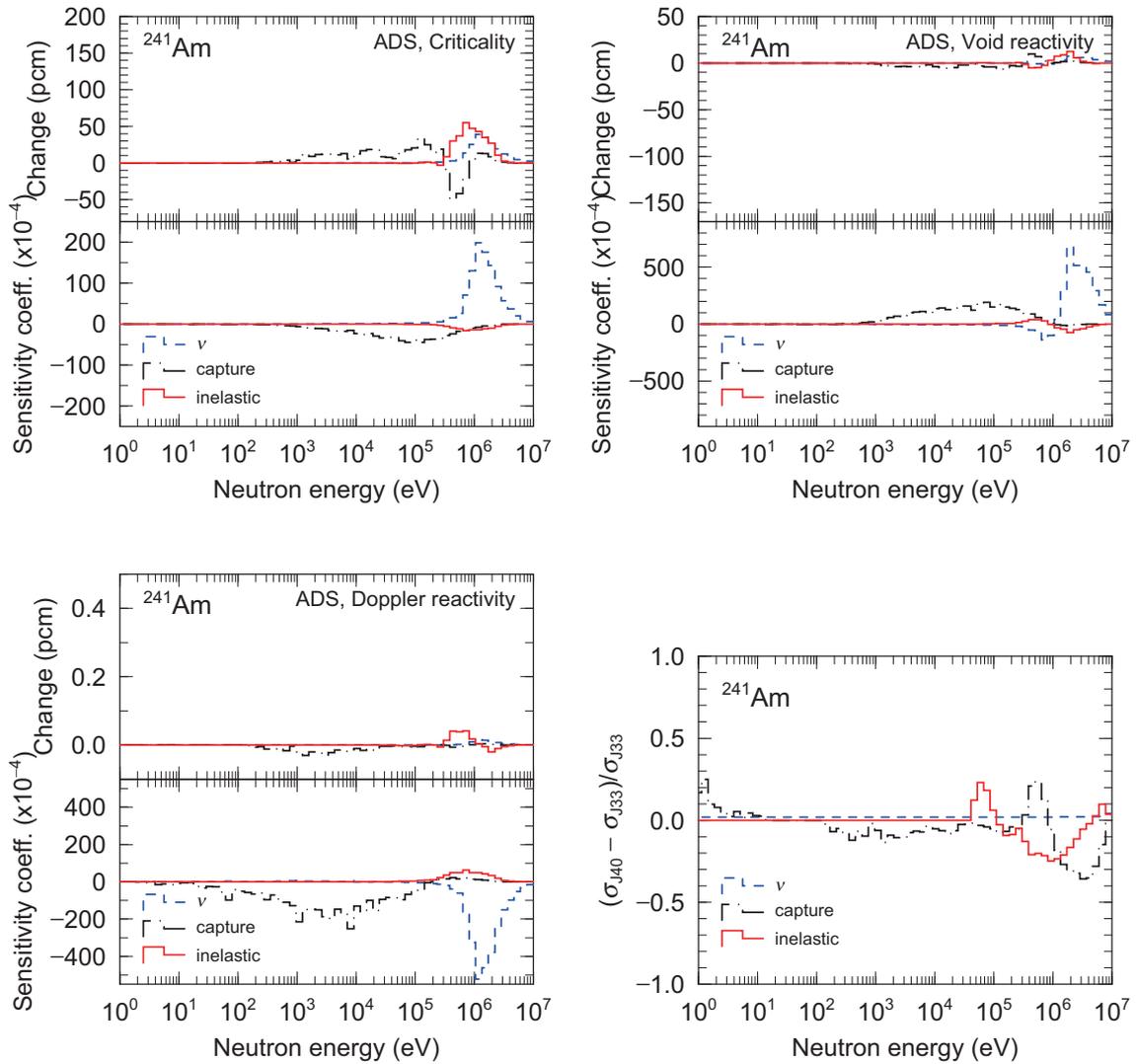


図 2.3.7 ADS の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する ^{241}Am の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウン、および断面積差

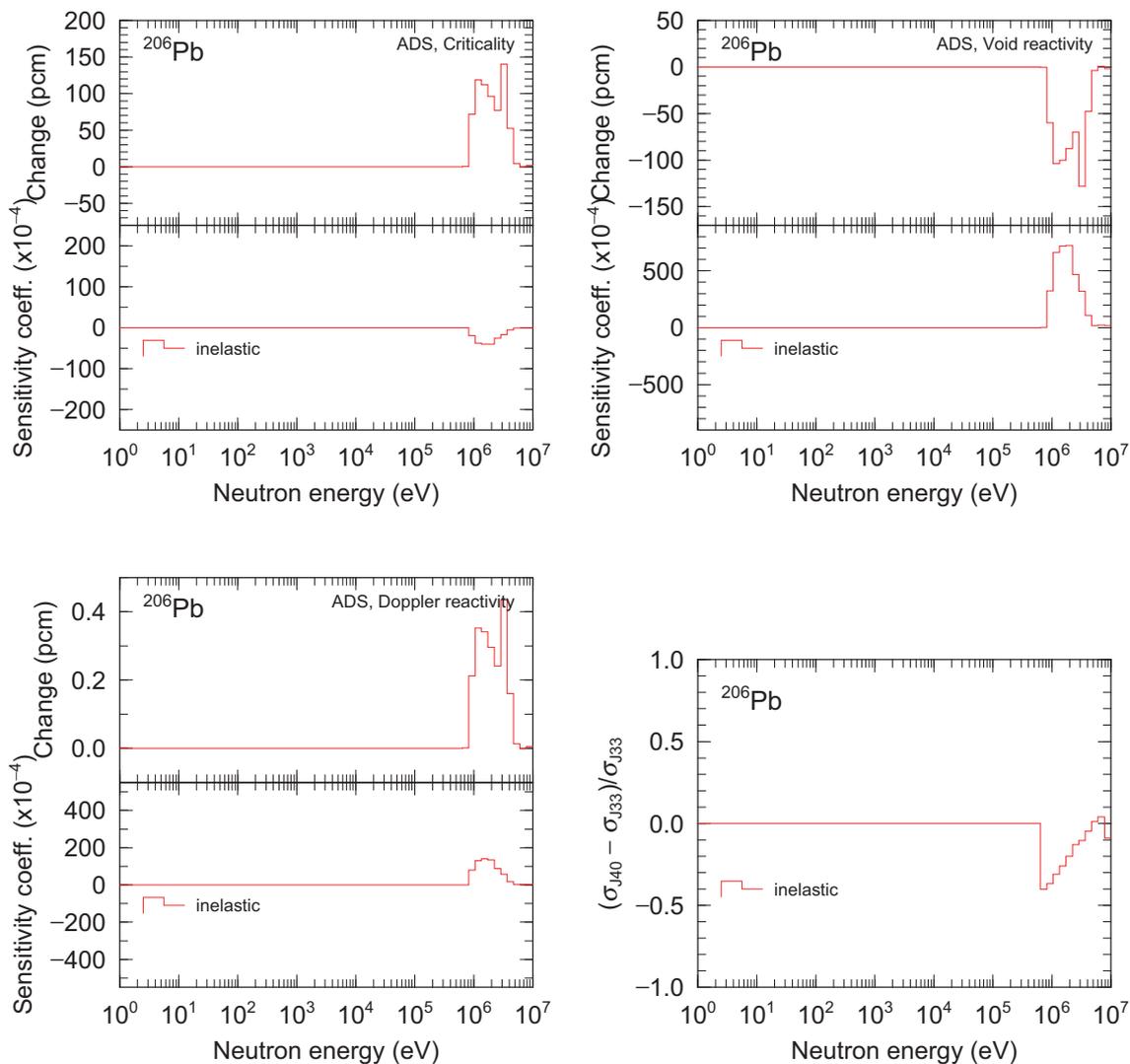


図 2.3.8 ADS の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する ^{206}Pb の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウン、および断面積差

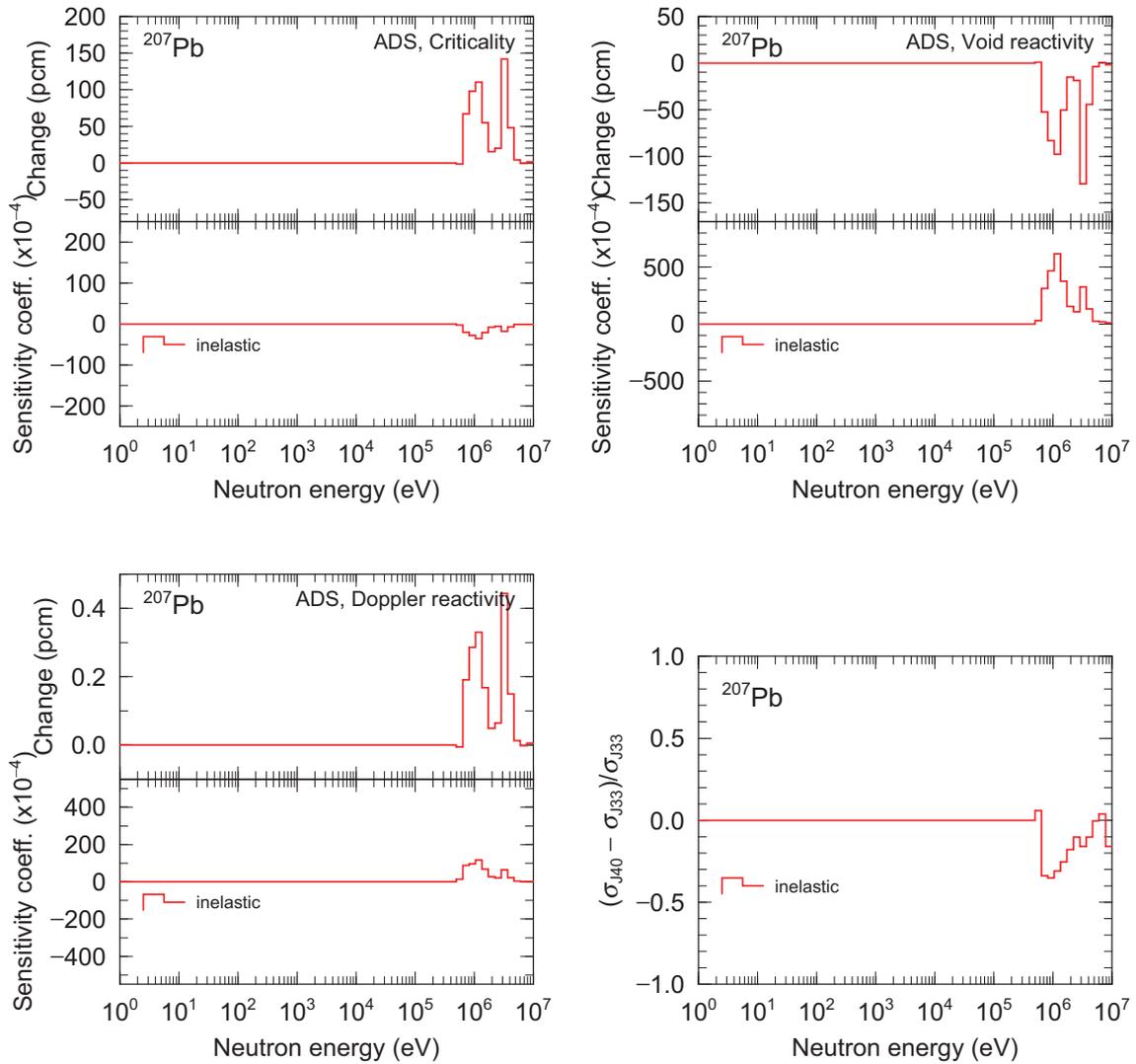


図 2.3.9 ADS の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する ^{207}Pb の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウン、および断面積差

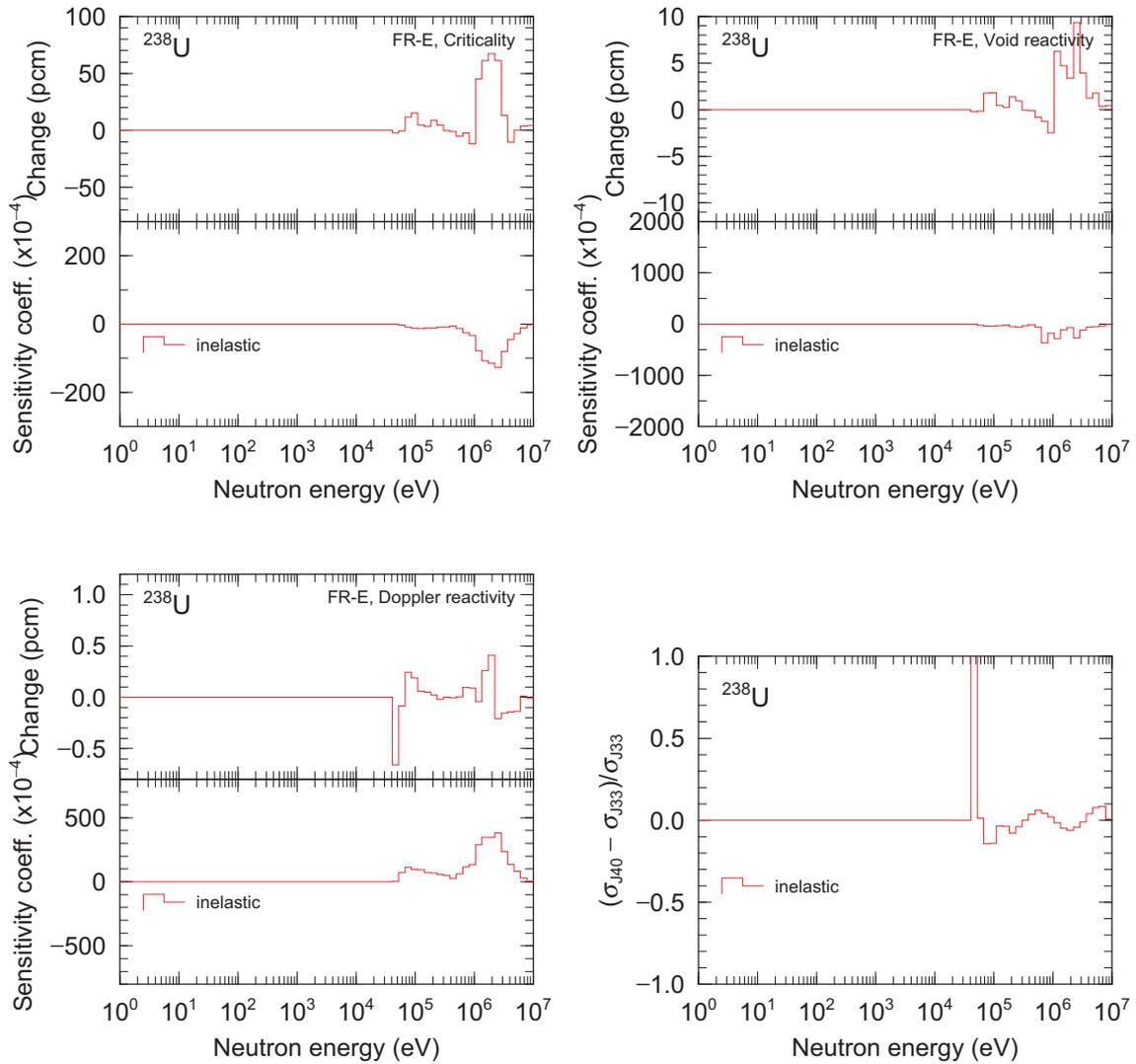


図 2.3.10 FR-E の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する ^{238}U の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウン、および断面積差

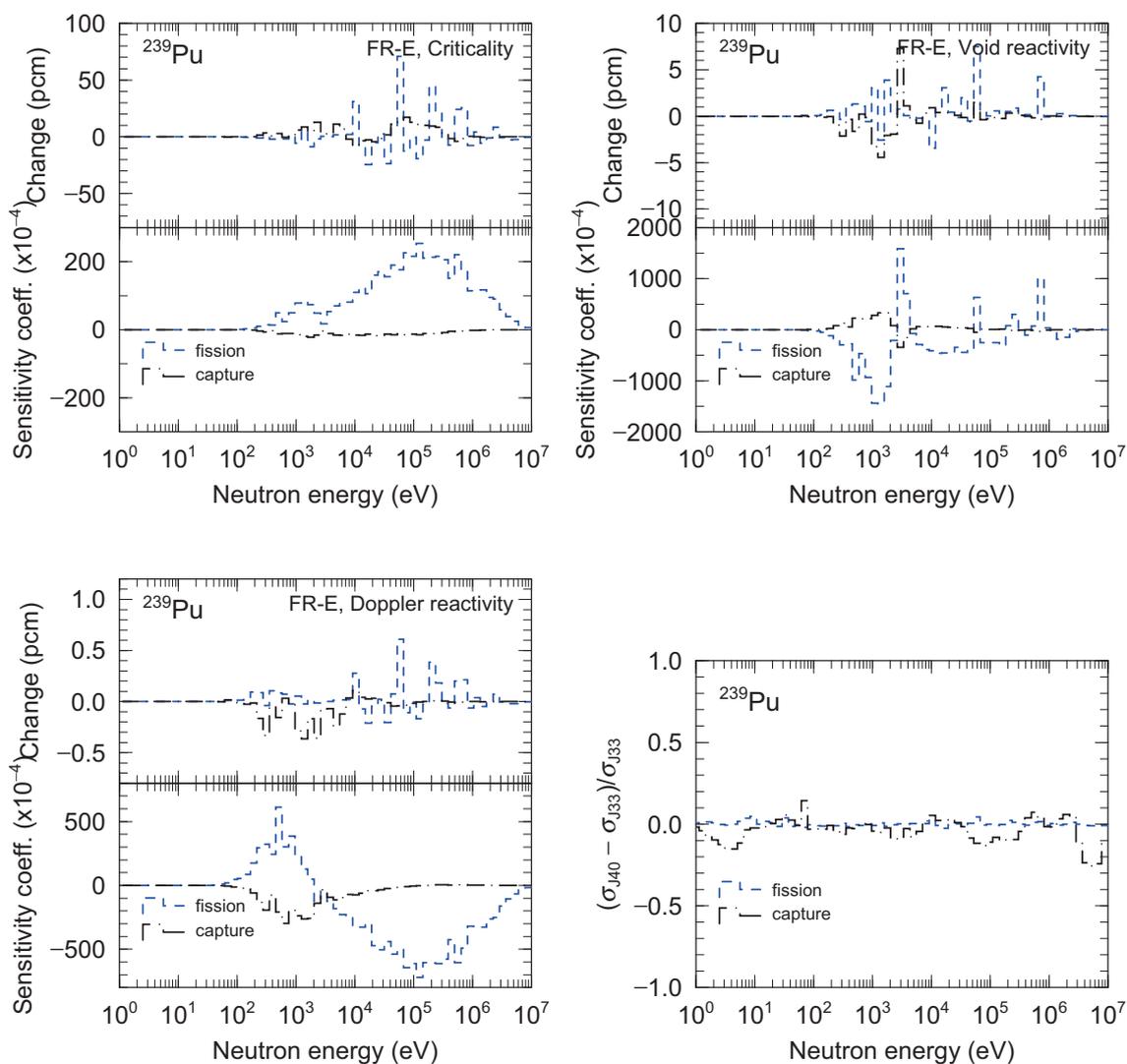


図 2.3.11 FR-E の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する ^{239}Pu の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウン、および断面積差

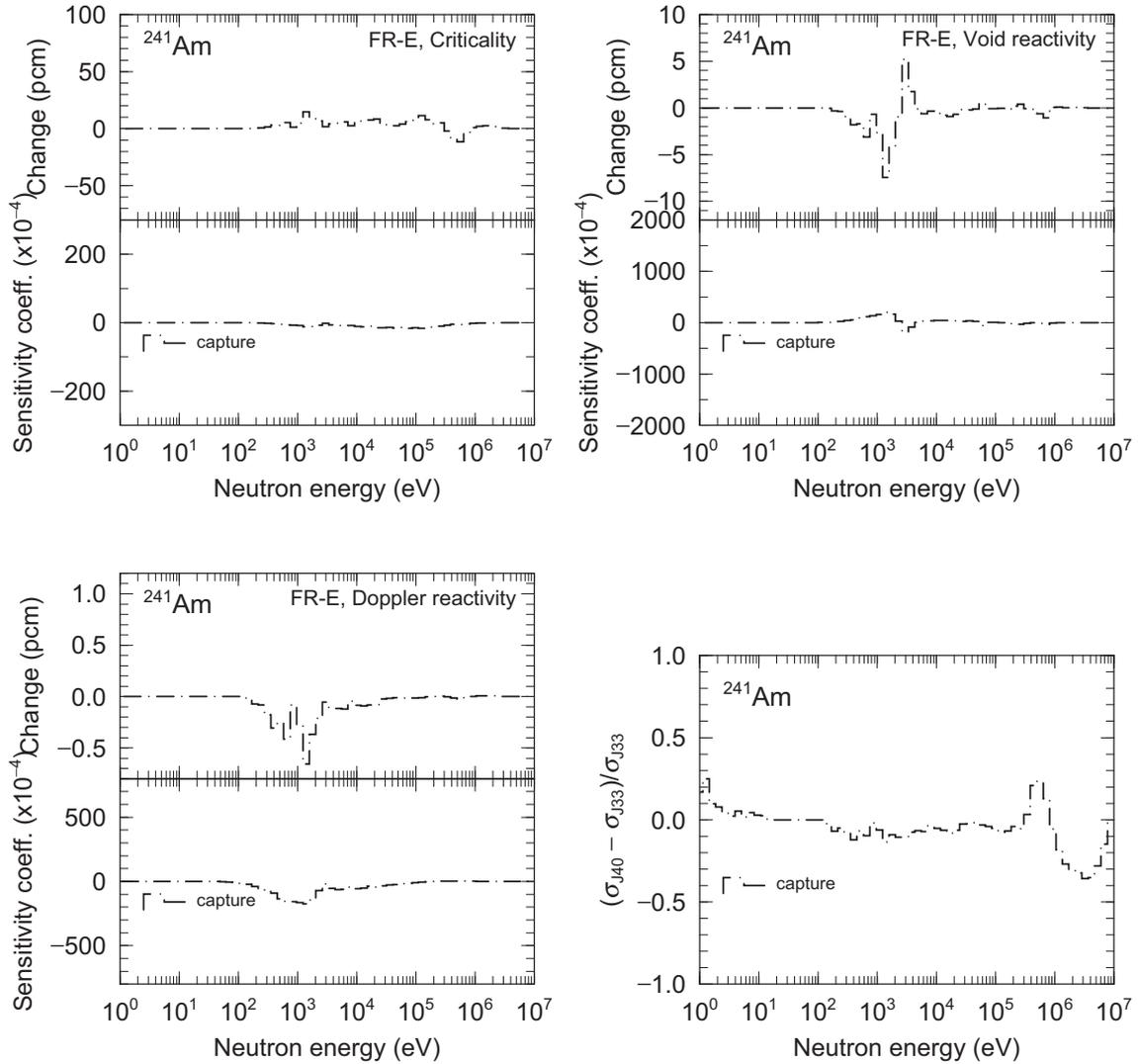


図 2.3.12 FR-E の臨界性、冷却材ボイド反応度およびドップラー反応度に対する核特性変化に寄与する ^{241}Am の主要反応の核特性変化量と感度係数のエネルギーブレイクダウン、および断面積差

この反応による核特性変化は ^{238}U の非弾性散乱によるものよりも小さくなっている。

2.4 評価済み核データの比較

核特性変化に寄与する核種・反応のうち、 ^{206}Pb および ^{207}Pb の非弾性散乱断面積、 ^{241}Am の捕獲断面積、および ^{238}U の非弾性散乱断面積を図 2.4.1-2.4.4 に示す。参考のために JEFF-3.1.1¹¹⁾ および ENDF/B-VII.0¹²⁾ の評価済みデータも示している。図中の MT = 51 と MT = 52 は、それぞれ第 1 および第 2 励起準位の断面積を表わす。図 2.4.1-2.4.4 の薄い色の帯は評価値の標準偏差 (1σ) を表わしている。

● ^{206}Pb および ^{207}Pb の非弾性散乱断面積

ADS の核特性変化に大きく寄与する ^{206}Pb および ^{207}Pb の非弾性散乱断面積については、JENDL-4.0 は第 1 と第 2 励起準位の実験値とよく一致していることがわかる。図 2.3.8 と図 2.3.9 より、 ^{206}Pb と ^{207}Pb の非弾性散乱による核特性変化は、非弾性散乱が生じ始める 1 MeV 付近から認められる。図 2.4.1 と図 2.4.2 より、JENDL-4.0 は、JENDL-3.3 の評価値より 3 MeV 以下の領域で低く評価され、3 MeV を超える領域では高く評価されている。この評価の差が核特性変化に起因している。測定点が不十分なため、未測定のエネルギ領域は核理論モデルに頼らざるを得ないが、現時点においては JENDL-4.0 が最良の評価値と考えられる。

● ^{241}Am の捕獲断面積

図 2.3.7 より、 ^{241}Am の捕獲反応については、ADS ではいずれの核特性値においても 1 keV ~ 数百 keV 領域で感度が高い。図 2.4.3 より、JENDL-4.0 は断面積をスムーズに評価し、かつ 300 keV 以下の領域で、JENDL-3.3 よりやや低めに評価している。核特性変化は、この評価のわずかな差に起因している。共分散を含めると JENDL-4.0 の評価値は実験値とよく一致している。

● ^{238}U の非弾性散乱断面積

^{238}U の非弾性散乱は、FR の臨界性変化に最も大きく寄与する核種・反応である。JENDL-4.0 は JENDL-3.3 と比較して第 1 および第 2 励起準位の断面積を低く評価している。断面積評価値からどちらが優れているかという議論は難しいが、共分散を含めると JENDL-4.0 の評価値は実験値をよく再現していると言える。

以上の結果から、核特性変化に寄与する主な核種・反応について、JENDL-4.0 の評価値はいずれも微分実験データをよく再現している。 ^{206}Pb と ^{207}Pb の非弾性散乱断面積に関しては JENDL-3.3 よりも精度が向上していると言える。ただし、Pb 同位体については未測定のエネルギ領域が存在し、 ^{241}Am や ^{238}U についても測定データの質と量は十分とは言えない。今後取得される測定値によっては、評価値が変更することが予想される。信頼性の高い核データ評価値のために、精度の高い実験データの取得が強く望まれる。

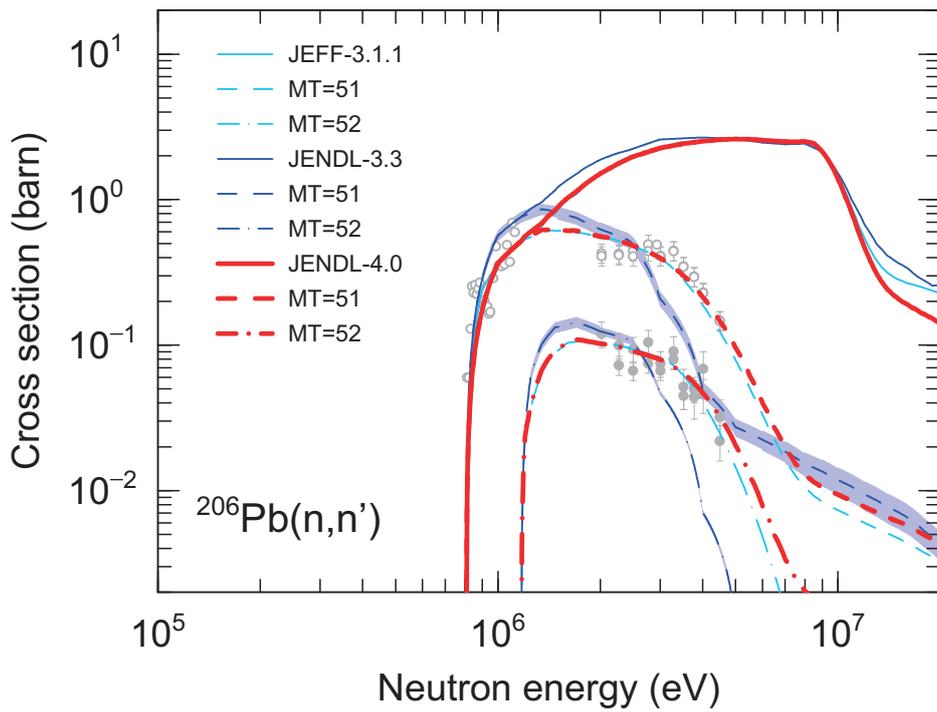


図 2.4.1 ^{206}Pb の非弾性散乱断面積

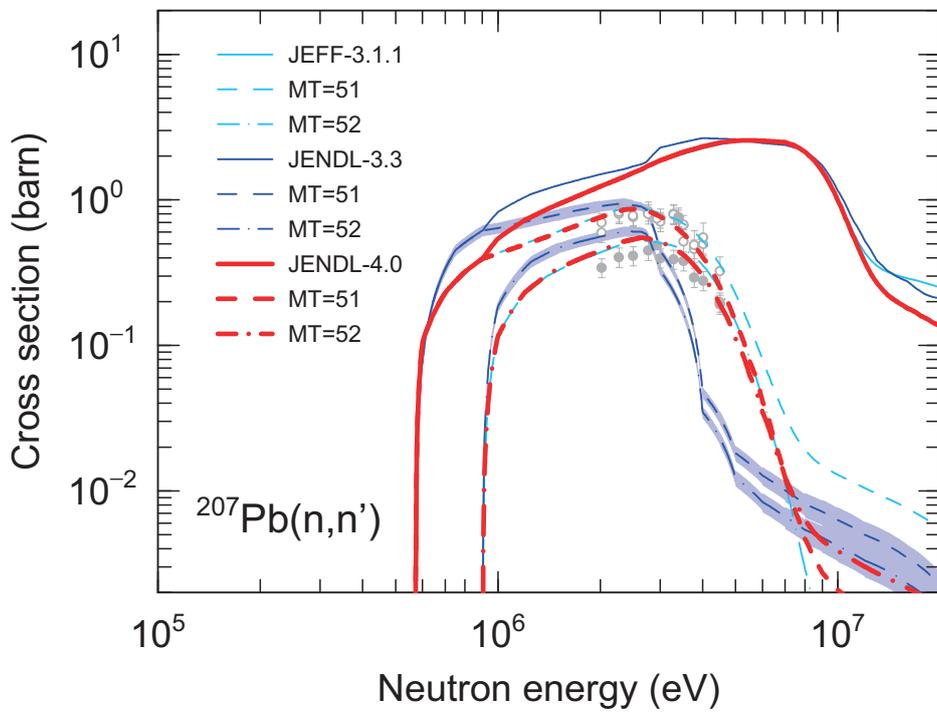


図 2.4.2 ^{207}Pb の非弾性散乱断面積

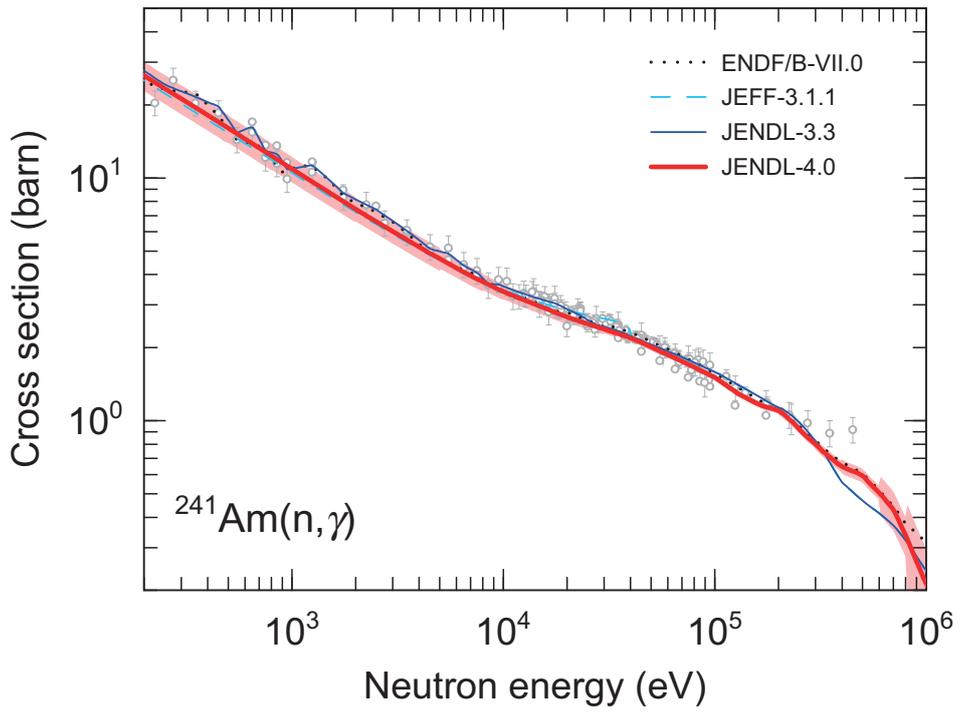


図 2.4.3 ^{241}Am の捕獲断面積

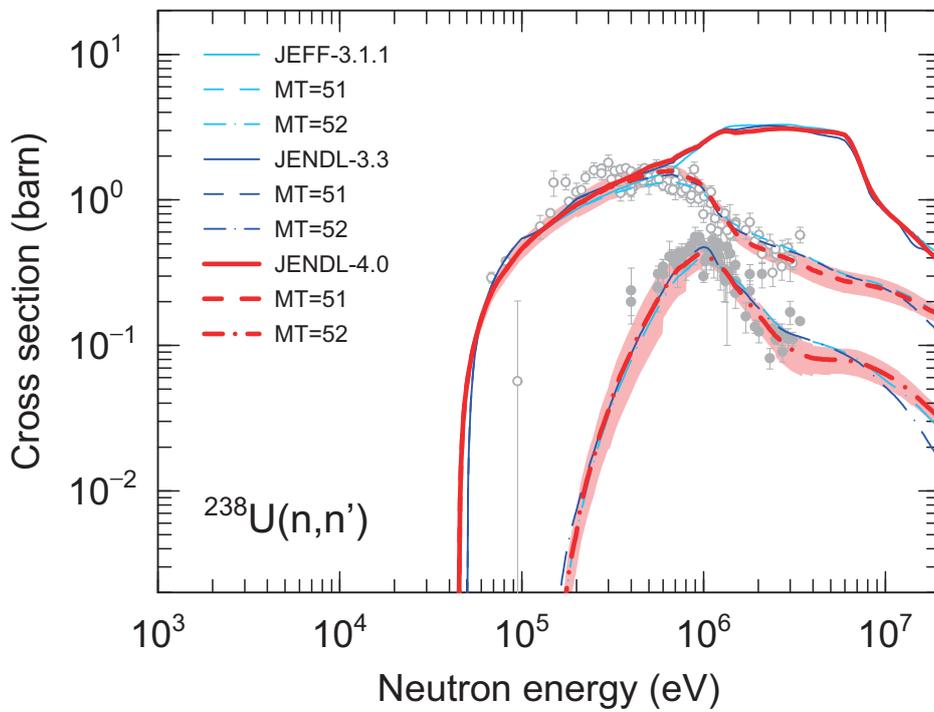


図 2.4.4 ^{238}U の非弾性散乱断面積

3. 核変換システムの誤差解析

本章では、JENDL-4.0 共分散データに基づく核変換システムの核設計精度を把握することを目的に、核変換システムの誤差解析を行なう。対象とする核変換システムは、前章に引き続き ADS と FR とし、前章の解析で得られた感度係数と JENDL-4.0 で整備された共分散データを用いて核データ起因誤差を計算し、JENDL-3.3 と JENDL-4.0 による核変換システムの核設計精度を調査する。

3.1 JENDL 共分散データの整備状況

表 3.1.1 と表 3.1.2 に、それぞれ MA 核変換システムにおける重要核種の JENDL-4.0 および JENDL-3.3 共分散データの整備状況を示す。ここで、表の暫定値 (Prov.) とは、文献³⁾で核変換システムの核設計精度の検討を目的として核データ評価研究グループが暫定的に定めた共分散を示す¹³⁾。JENDL-3.3 は表 3.1.1 に挙げた核種・反応を網羅していない。一方、JENDL-4.0 は多くの核種・反応の共分散データが整備され、特に MA に関して全ての核種・反応を網羅しているが、燃料の希釈材に使用される Zr 同位体および冷却材の Pb 同位体と ²⁰⁹Bi についてはデータが未整備のままである¹⁾。いずれも ADS の構成要素として重要な核種であるため、これらの共分散データの整備が強く望まれる。

3.2 解析条件

解析は、前章と同じ条件で 18 群拡散計算によって得られた感度係数を用いて行なった。共分散については、米国ロスアラモス国立研究所の NJOY システム¹⁴⁾内の共分散処理コード ERRORJ¹⁵⁾により 18 群に処理されたものを使用した。

評価済み核データに整備されている共分散データは、核データ評価値に対する誤差を表わしているため、積分核特性の誤差評価では、共分散データは核データ評価値とセットで使用すべきである。しかしながら上述のように、現状の共分散データは対象とする全ての核種・反応を網羅していない。また、前章で指摘したように、SAGEP は ²³⁵U、²³⁹Pu 以外の核種の核分裂スペクトルに対する感度係数を計算することができない。そこで本検討では表 3.2.1 に示す核種・反応を誤差評価の対象とし、JENDL-4.0 で整備されていない核種・反応の共分散データは、文献³⁾で用いた JENDL-3.3 の共分散データ (表 3.1.1 の評価済共分散または暫定共分散) を用いて解析を行なった。したがって、今後の整備状況や対象核種・反応の変更によって核特性の誤差値は変わりうることに注意を要する。

核データ起因誤差計算には炉定数調整計算コード ABLE¹⁶⁾を使用した。一般に、ある核特性に

¹⁾この他に、構成量としては少ないが、²³⁴U、²³⁶U、および Mo 同位体も未整備である。

表 3.1.1 JENDL-3.3 共分散データの整備状況 ³⁾

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²³⁸ U	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²³⁸ Pu	✓	✓	Prov.	Prov.	Prov.	x	x	x
²³⁹ Pu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴⁰ Pu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x
²⁴¹ Pu	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x
²⁴² Pu	✓	✓	Prov.	Prov.	Prov.	x	x	x
²³⁷ Np	✓	✓	Prov.	Prov.	Prov.	x	x	x
²⁴¹ Am	✓	✓	✓	Prov.	Prov.	x	x	x
^{242m} Am	✓	✓	Prov.	Prov.	Prov.	x	x	x
²⁴³ Am	✓	✓	✓	Prov.	Prov.	x	x	x
²⁴² Cm	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	x	x	x	x
²⁴³ Cm	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	x	x	x
²⁴⁴ Cm	✓	✓	Prov.	Prov.	Prov.	x	x	x
²⁴⁵ Cm	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	x	x	x
²⁴⁶ Cm	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	x	x	x
¹⁵ N	Prov.	—	—	✓	Prov.	—	x	—
¹⁶ O	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
²³ Na	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
^{nat} Cr	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
⁵⁵ Mn	x	—	—	x	x	—	x	—
^{nat} Fe	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
^{nat} Ni	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
⁹⁰ Zr	✓	—	—	Prov.	✓	—	x	—
⁹¹ Zr	Prov.	—	—	Prov.	Prov.	—	x	—
⁹² Zr	Prov.	—	—	Prov.	Prov.	—	x	—
⁹⁴ Zr	Prov.	—	—	Prov.	Prov.	—	x	—
⁹⁶ Zr	Prov.	—	—	Prov.	Prov.	—	x	—
²⁰⁴ Pb	Prov.	—	—	Prov.	Prov.	—	x	—
²⁰⁶ Pb	Prov.	—	—	Prov.	✓	—	x	—
²⁰⁷ Pb	Prov.	—	—	Prov.	✓	—	x	—
²⁰⁸ Pb	Prov.	—	—	Prov.	✓	—	x	—
²⁰⁹ Bi	Prov.	—	—	Prov.	✓	—	x	—

† ✓は整備済み、xは未整備、Prov.は暫定値³⁾(Provisional data)。

表 3.1.2 JENDL-4.0 共分散データの整備状況

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²³⁸ U	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²³⁸ Pu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²³⁹ Pu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴⁰ Pu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴¹ Pu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴² Pu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²³⁷ Np	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴¹ Am	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
^{242m} Am	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴³ Am	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴² Cm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴³ Cm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴⁴ Cm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴⁵ Cm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴⁶ Cm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
¹⁵ N	✓	—	—	✓	✓	—	x	—
¹⁶ O	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
²³ Na	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
⁵² Cr	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
⁵⁵ Mn	✓	—	—	✓	✓	—	x	—
⁵⁶ Fe	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
⁵⁸ Ni	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
⁶⁰ Ni	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
⁹⁰ Zr	x	—	—	x	x	—	x	—
⁹¹ Zr	x	—	—	x	x	—	x	—
⁹² Zr	x	—	—	x	x	—	x	—
⁹⁴ Zr	x	—	—	x	x	—	x	—
⁹⁶ Zr	x	—	—	x	x	—	x	—
²⁰⁴ Pb	x	—	—	x	x	—	x	—
²⁰⁶ Pb	x	—	—	x	x	—	x	—
²⁰⁷ Pb	x	—	—	x	x	—	x	—
²⁰⁸ Pb	x	—	—	x	x	—	x	—
²⁰⁹ Bi	x	—	—	x	✓	—	x	—

† ✓は整備済み。xは未整備。

表 3.2.1 誤差評価の対象とする核種・反応

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²³⁸ U	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
²³⁸ Pu	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
²³⁹ Pu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
²⁴⁰ Pu	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
²⁴¹ Pu	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
²⁴² Pu	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
²³⁷ Np	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
²⁴¹ Am	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
^{242m} Am	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
²⁴³ Am	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
²⁴² Cm	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
²⁴³ Cm	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
²⁴⁴ Cm	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
²⁴⁵ Cm	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
²⁴⁶ Cm	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
¹⁵ N	✓	—	—	✓	✓	—	—	—
¹⁶ O	✓	—	—	✓	✓	—	—	—
²³ Na	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
⁵⁶ Fe [†]	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
⁵² Cr [†]	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
⁵⁸ Ni [†]	✓	—	—	✓	✓	—	✓	—
⁹⁰ Zr	✓	—	—	✓	✓	—	—	—
⁹¹ Zr	✓	—	—	✓	✓	—	—	—
⁹² Zr	✓	—	—	✓	✓	—	—	—
⁹⁴ Zr	✓	—	—	✓	✓	—	—	—
⁹⁶ Zr	✓	—	—	✓	✓	—	—	—
²⁰⁴ Pb	✓	—	—	✓	✓	—	—	—
²⁰⁶ Pb	✓	—	—	✓	✓	—	—	—
²⁰⁷ Pb	✓	—	—	✓	✓	—	—	—
²⁰⁸ Pb	✓	—	—	✓	✓	—	—	—
²⁰⁹ Bi	✓	—	—	✓	✓	—	—	—

† JENDL-3.3 を用いた誤差解析では ⁵²Cr、⁵⁶Fe、⁵⁸Ni の共分散に ^{nat}Cr、^{nat}Fe、^{nat}Ni のデータを適用した。

対する核断面積の感度係数行列を G 、核断面積の共分散行列を M とすると、核データに起因する核特性の誤差 (標準偏差) は GMG^t の平方根で評価できる。

3.3 解析結果

3.3.1 核変換システムの核データ起因誤差

解析で得られた核変換システムの核データ起因誤差を含めた各核変換システムの核特性値を表 3.3.1-3.3.3 に示す。ADS と FR は、MA 装荷量が大きく異なるにもかかわらず、臨界性に対してともに 1% 程度の誤差で大きな相違はない。冷却材ボイド反応度とドップラー反応度に対する誤差は臨界性よりも高く、ADS は FR よりも値が大きい。FR の平衡期と移行期では両者に大きな違いはないことがわかる。JENDL-3.3 と JENDL-4.0 の結果を比較すると、ライブラリ変更により、臨界性に対して誤差減少、冷却材ボイド反応度に対しては ADS で誤差減少、FR で誤差増加が認められる。ドップラー反応度に対しては両システムでやや減少している。さらに、核特性パラメータとともに核データ起因誤差を見ると、ADS について、JENDL-3.3 と JENDL-4.0 を用いた核特性の解析結果の間に核データ起因誤差を超える大きな差異があることがわかる。

表 3.3.1 核変換システムの実効増倍率 †

	JENDL-3.3	JENDL-4.0
ADS	0.971 ± 0.013 (1.30%)*	1.000 ± 0.011 (1.09%)
FR-T	1.060 ± 0.012 (1.09%)	1.068 ± 0.011 (1.05%)
FR-E	1.086 ± 0.012 (1.12%)	1.094 ± 0.012 (1.07%)

†: 各誤差値は信頼区間 1σ

*: 括弧内は相対誤差

表 3.3.2 核変換システムの冷却材ボイド反応度値 †

	JENDL-3.3	JENDL-4.0
ADS	5331.3 ± 361.8 (6.79%)	3875.5 ± 312.4 (8.06%)
FR-T	2822.0 ± 69.3 (2.45%)	2871.4 ± 121.9 (4.24%)
FR-E	2697.0 ± 69.6 (2.58%)	2731.3 ± 116.9 (4.28%)

†: 各誤差値は信頼区間 1σ で、単位は [pcm]

表 3.3.3 核変換システムのドップラー反応度値 †

	JENDL-3.3	JENDL-4.0
ADS	-15.0 ± 1.0 (6.65%)	-13.4 ± 0.8 (6.30%)
FR-T	-226.6 ± 8.9 (3.95%)	-225.4 ± 8.6 (3.79%)
FR-E	-277.7 ± 10.8 (3.89%)	-277.4 ± 9.9 (3.56%)

3.3.2 ADS に対する核種・反応毎の核データ起因誤差

ADS の解析値に対する核データ起因誤差について主要な核種・反応の寄与を図 3.3.1-3.3.3 に示す。全ての核種・反応の核データ起因誤差については付録 B にまとめる。図では、寄与割合の設定値 (図脚注のカットオフ) を設け、設定値を超える誤差を与えた核種・反応を示している。ADS については、MA は全ての核特性値に対して一定の寄与をなしているが、JENDL-4.0 による MA の核特性誤差は ^{237}Np の捕獲反応を除く多くの反応で JENDL-3.3 のものより減少している。また、MA の捕獲反応は依然として主要な誤差要因として占めていることがわかる。臨界性に対しては ^{237}Np と ^{241}Am の捕獲反応、 ^{56}Fe の非弾性散乱等が核特性の誤差に起因している。冷却材ボイド反応度に対しては ^{209}Bi 、Pb 同位体、 ^{56}Fe の弾性および非弾性散乱、および MA の捕獲反応の寄与が大きい。ドップラー反応度に対しては捕獲反応が大きく寄与している。ただし、JENDL-4.0 では ^{209}Bi と Pb 同位体および Zr 同位体の共分散に JENDL-3.3 評価値または暫定値を用いているため、今後の整備状況によってこれらの誤差は変更される可能性がある。

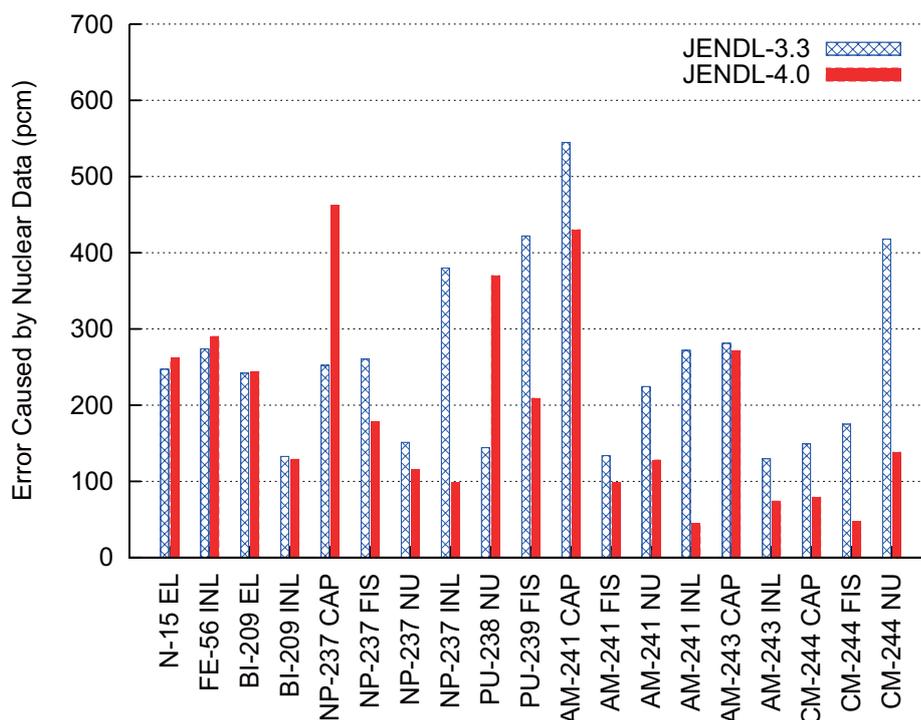


図 3.3.1 ADS の臨界性に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：100 pcm)

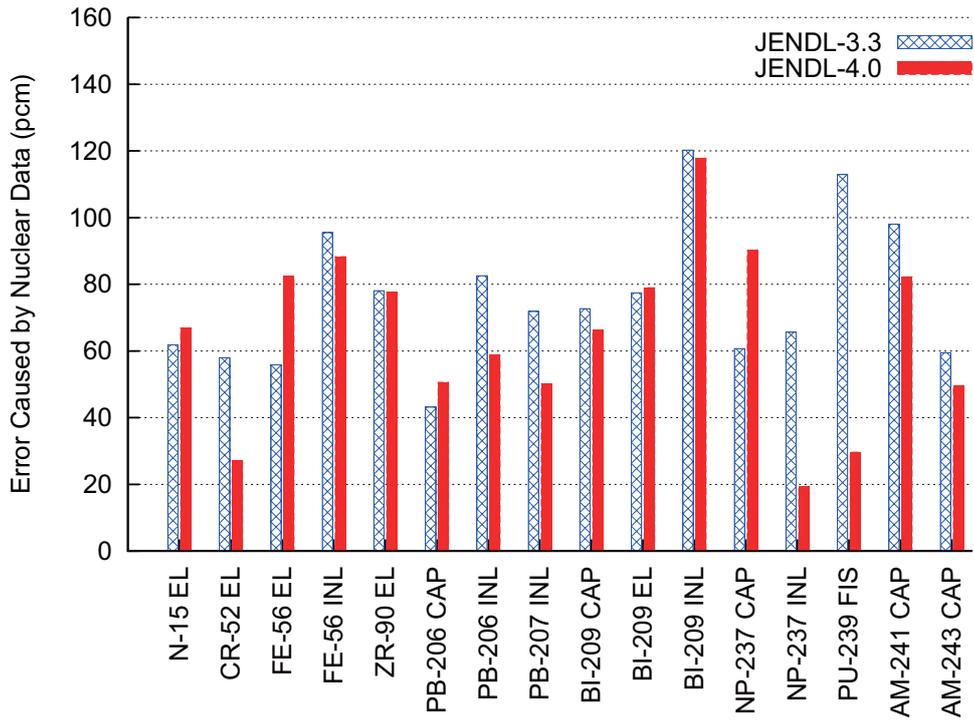


図 3.3.2 ADS のボイド反応度に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ: 40 pcm)

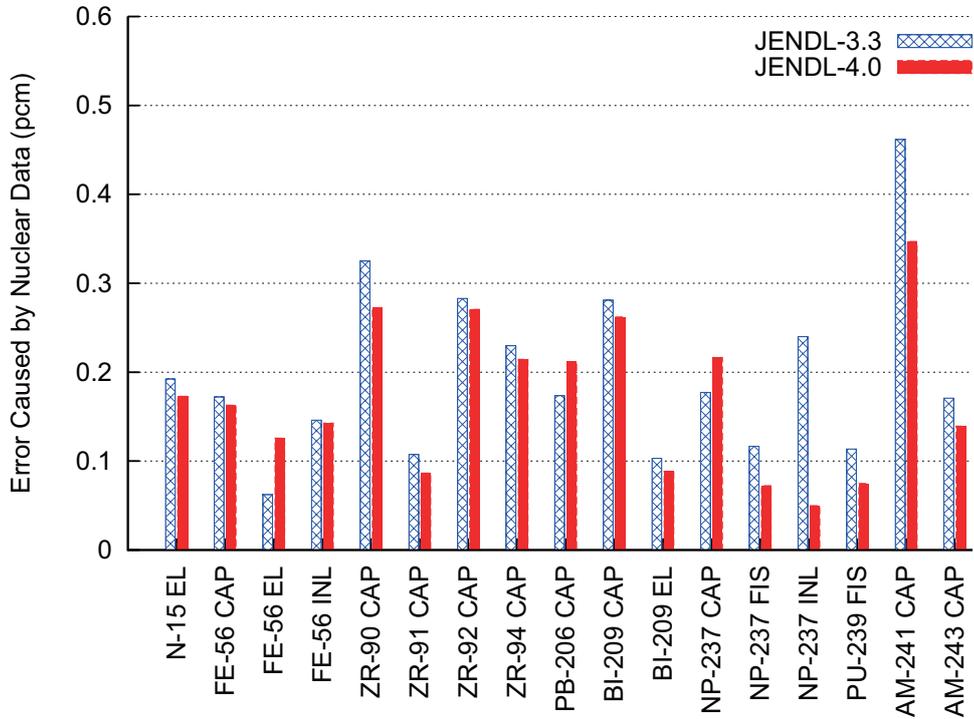


図 3.3.3 ADS のドップラー反応度に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ: 0.1 pcm)

3.3.3 FR に対する核種・反応毎の核データ起因誤差

FR の解析値に対する核データ起因誤差の寄与について主要な核種・反応の寄与を図 3.3.4-3.3.9 に示す。全ての核種・反応の核データ起因誤差については付録 B にまとめる。FR については全体的には ^{238}U と ^{239}Pu の寄与が大きく、寄与する核種・反応の数は ADS に比べて限定的である。MA の捕獲反応を除く反応と ^{239}Pu の核分裂反応で誤差減少、 ^{23}Na の非弾性散乱および ^{238}U の捕獲反応で誤差の増加が見られる。臨界性に対しては ^{238}U の捕獲反応および非弾性散乱の寄与が大きい。冷却材ボイド反応度に対しては、ライブラリ変更により ^{23}Na の非弾性散乱による誤差が大幅に増加しており、この反応がボイド反応度誤差の主要な要因となっている。ドップラー反応度に対しては ^{241}Am の捕獲反応および ^{238}U の非弾性散乱の寄与が大きい。

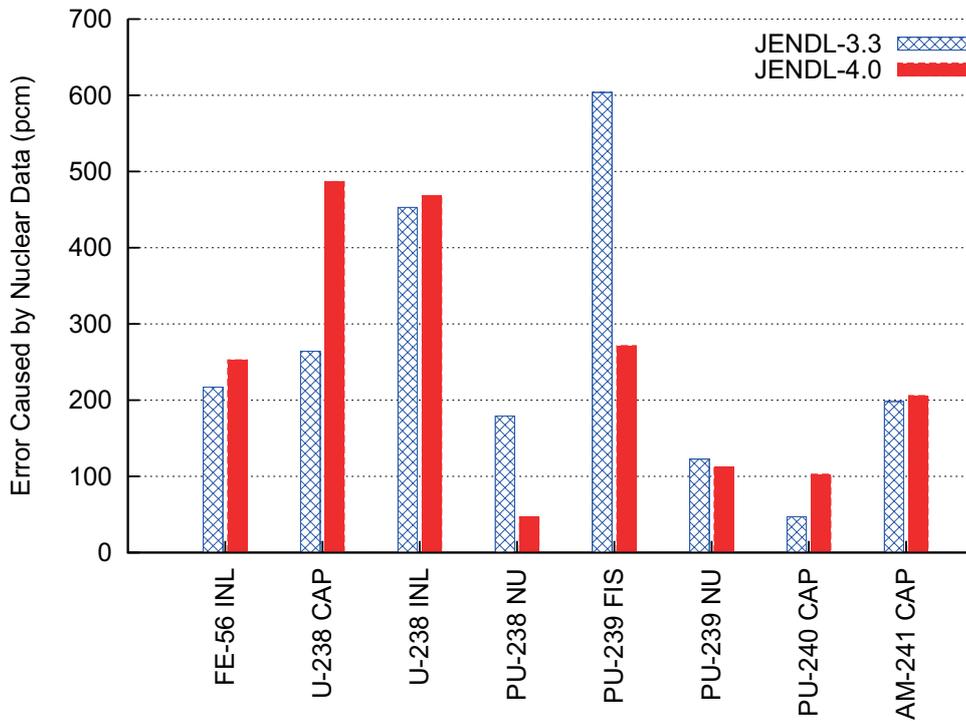


図 3.3.4 FR-T の臨界性に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：100 pcm)

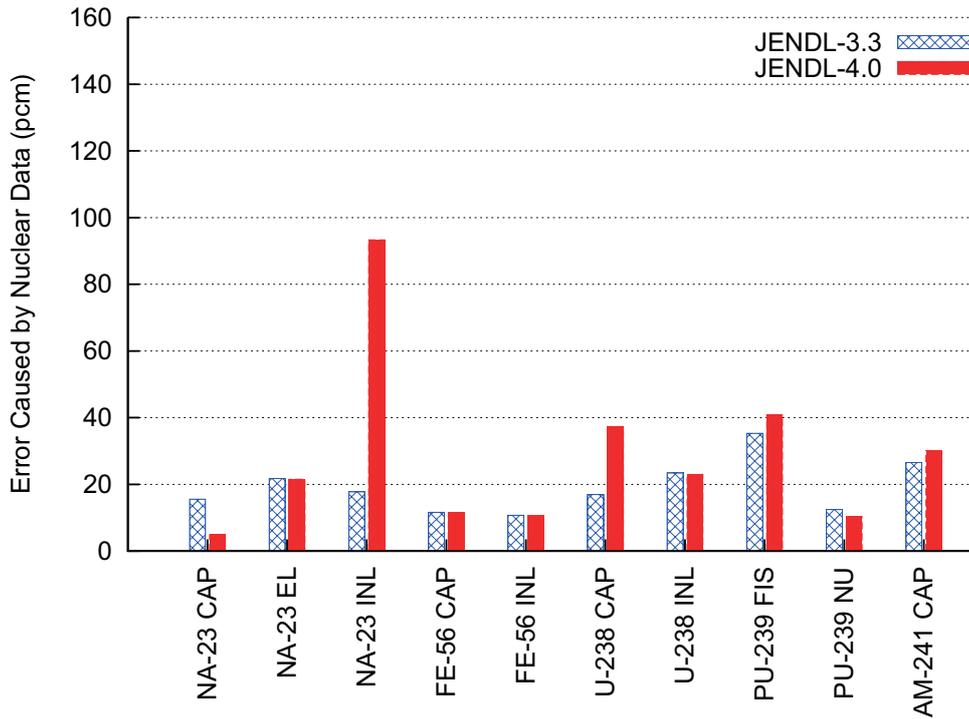


図 3.3.5 FR-T のボイド反応度に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：10 pcm)

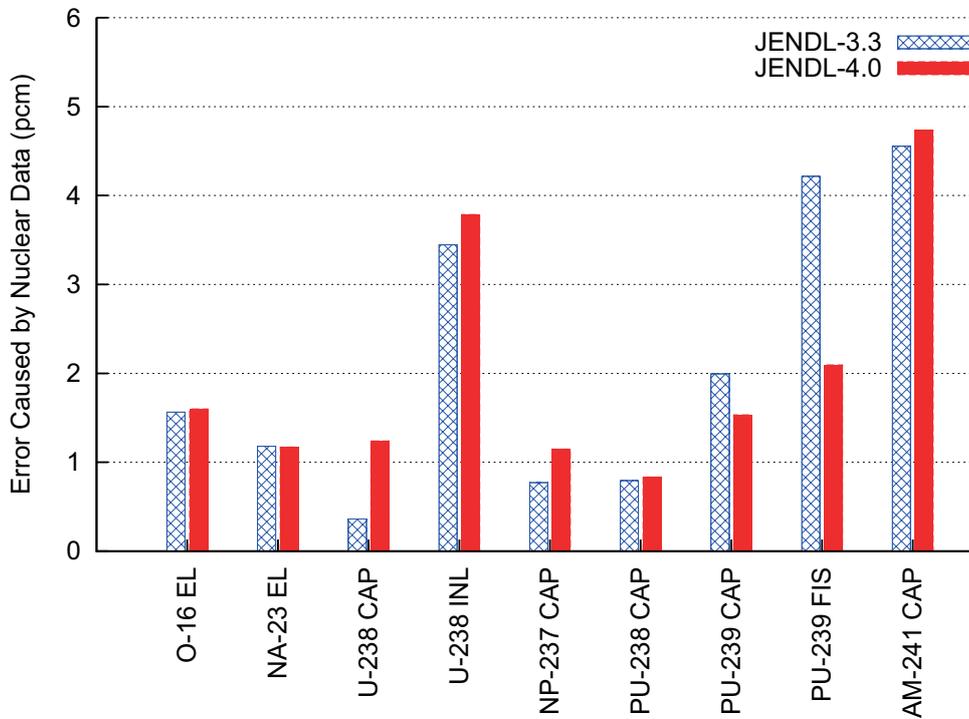


図 3.3.6 FR-T のドップラー反応度に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：1.0 pcm)

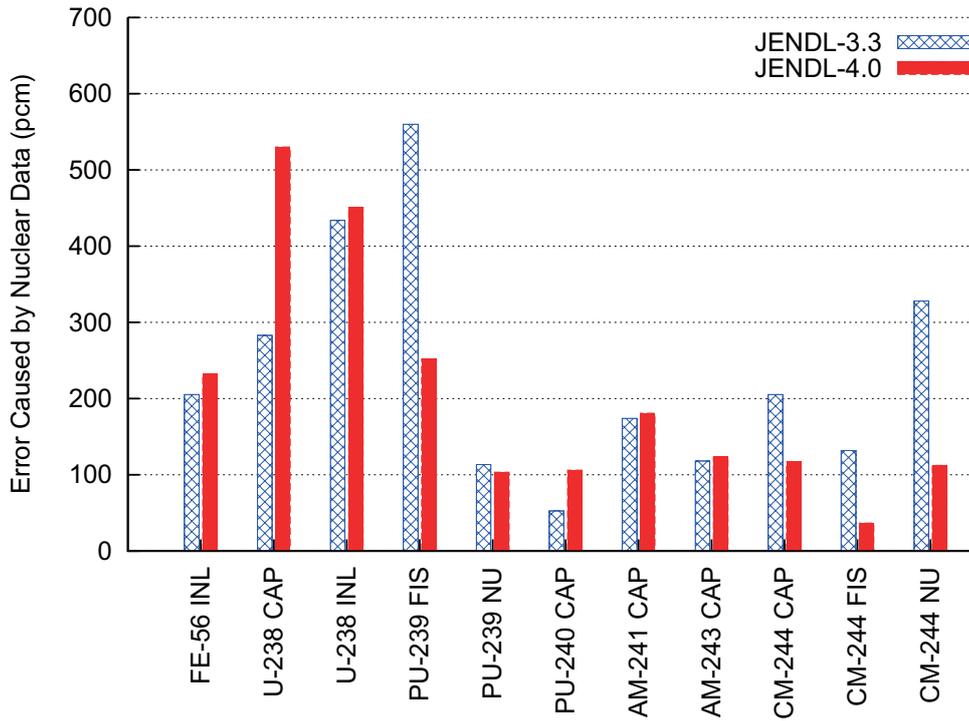


図 3.3.7 FR-E の臨界性に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：100 pcm)

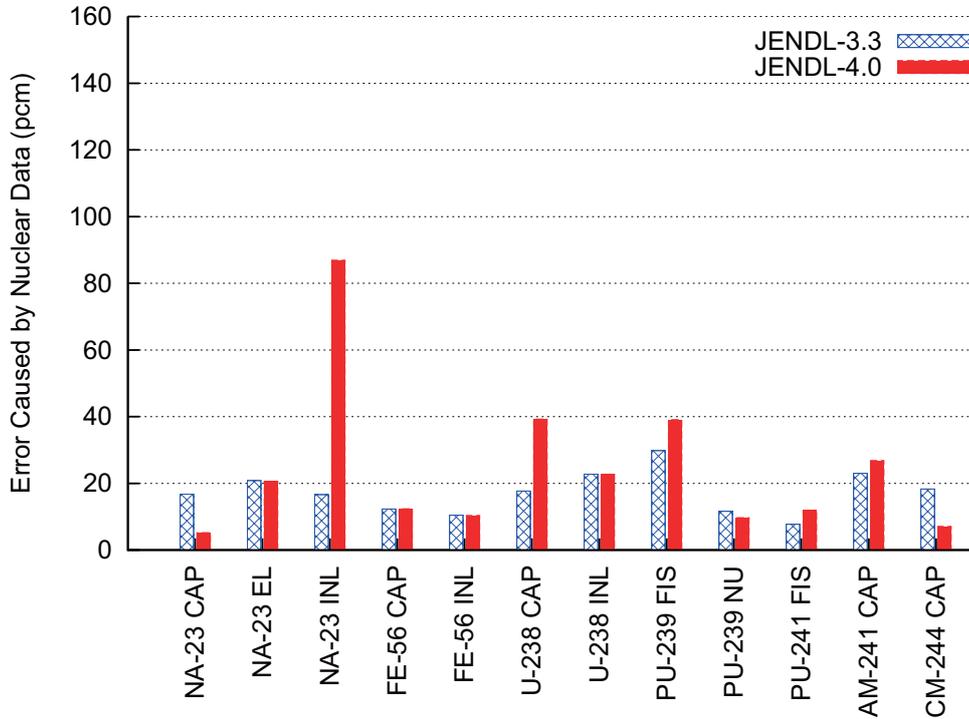


図 3.3.8 FR-E のボイド反応度に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：10 pcm)

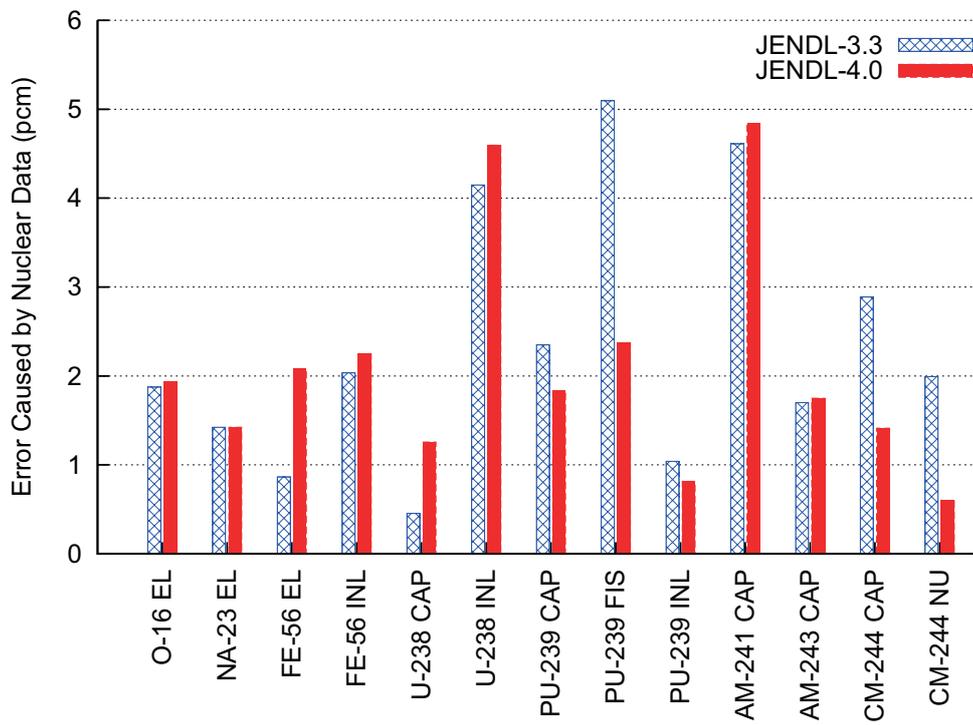


図 3.3.9 FR-E のドップラー反応度に対する核種・反応毎の核データ起因誤差 (カットオフ：1.0 pcm)

3.4 考察

各核変換システムの核特性に対する核データ起因誤差について、ライブラリ間での評価値の異なる主な核種の感度係数および共分散 (図中では標準偏差) をそれぞれ図 3.4.1 と図 3.4.2 に示す。ここで、図 3.4.1 および図 3.4.2 では、各核種・反応のグラフ位置がそれぞれ対応するように載せている。

これらの図より、感度係数は JENDL-3.3 と JENDL-4.0 の場合で大きな相違はないが、共分散が大きく異なっていることがわかる。図中の ^{237}Np の非弾性散乱断面積と ^{244}Cm の ν 値の共分散は、文献³⁾で暫定値が与えられていたが、JENDL の改訂によって大幅に小さく評価されている。一方、JENDL-4.0 による ^{23}Na の非弾性散乱断面積や ^{238}U の捕獲断面積に対する共分散評価値は JENDL-3.3 のものに比べて大きい。このことから、各システムの核データ起因誤差変化は、主に共分散データの評価値の差に起因していることがわかる。例えば ^{23}Na 非弾性散乱は、FR のナトリウムボイド反応度に対して極めて高い感度を示すものの、感度係数のライブラリ差はほとんどない。一方、共分散はライブラリ間で最大 8 倍近い差が認められる。

^{23}Na の非弾性散乱断面積を図 3.4.3 に示す。ここで、MT = 51, 52 はそれぞれ第 1, 2 励起準位の断面積を表わす。線は JENDL-4.0 の評価値、薄い色の帯はその標準偏差を表わしている。図 3.4.1 より、 ^{23}Na の非弾性散乱はボイド反応度に対して 500 keV 付近から数 MeV にかけて非常に高い感度を示しており、この領域における共分散が核特性値の誤差に効いている。

ここで、図 3.4.4 は、図 3.4.3 の 0.8 MeV から 1.0 MeV の領域を拡大したものである。JENDL-4.0 では、 ^{23}Na 非弾性散乱断面積の評価値は JENDL-3.3 のものと同じ値で、共分散のみ変更された。図 3.4.4 からわかるように、JENDL-4.0 の評価値は、共分散を含めて測定値とおおむねよく一致していることから、JENDL-3.3 の共分散評価値は小さすぎると言える。しかしながら、将来取得される測定データによっては評価値と共分散は変更される可能性がある。断面積データの信頼性を向上するためには、系統的でより精度のよい実験が不可欠である。

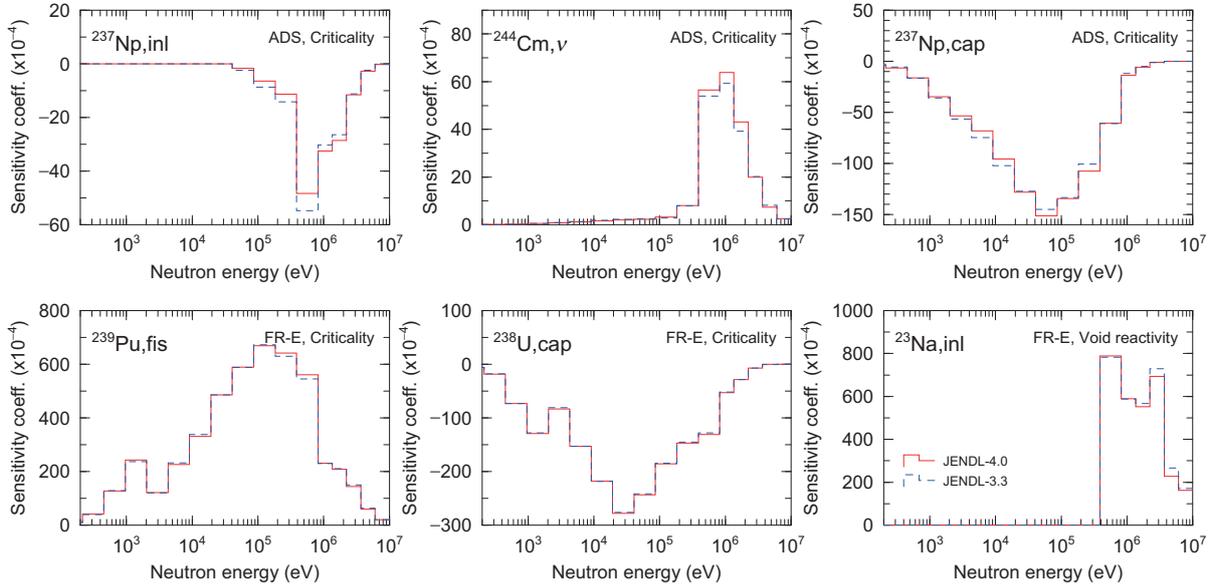


図 3.4.1 核データ起因誤差のライブラリ差に寄与する主な核種の感度係数

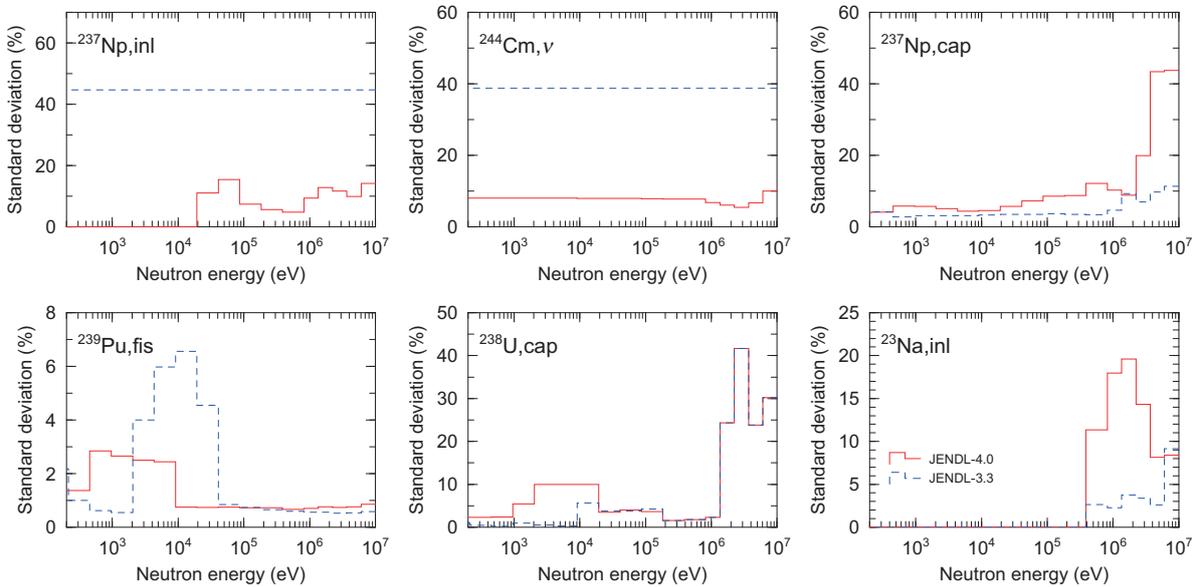


図 3.4.2 核データ起因誤差のライブラリ差に寄与する主な核種の標準偏差

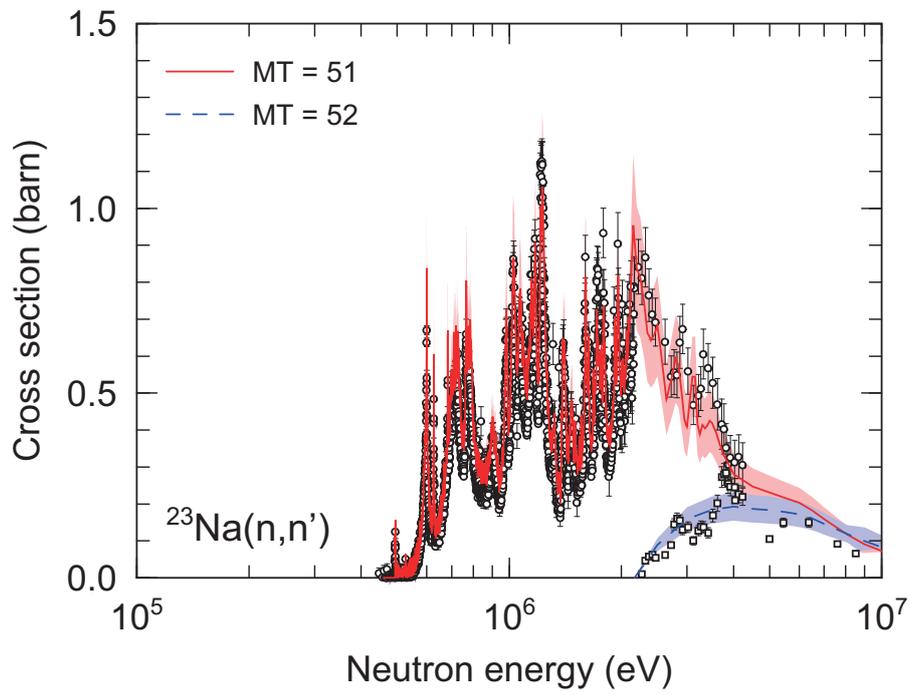


図 3.4.3 ^{23}Na の非弾性散乱断面積

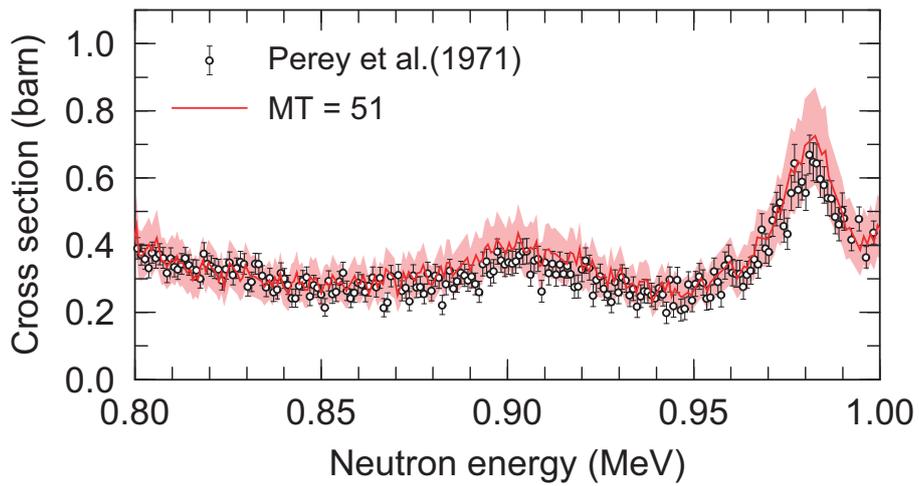


図 3.4.4 ^{23}Na の非弾性散乱断面積 (拡大図)

4. 結言

本検討では、MA 核変換を目的とした ADS および FR を対象とし、JENDL-4.0 を使用した場合の核変換システムの核特性値および核データに起因する誤差が、旧版 JENDL-3.3 による値と比較して、どの程度変更されるかを感度解析および誤差解析によって定量的に検討を行なった。

第 2 章では、ADS と MA5% を均質に添加した FR を対象に JENDL-4.0 および JENDL-3.3 を用いた場合の核変換システムの核特性解析を行なった。対象とする核特性値のパラメータは、実効増倍率、冷却材ボイド反応度、ドップラー反応度とした。解析の結果、JENDL-3.3 による実効増倍率は、ADS および FR 平衡期についてそれぞれ 0.971 および 1.085 であったのに対し、JENDL-4.0 による解析値はそれぞれ 1.000 および 1.094 となり、両システムで実効増倍率の増加が認められた。特に、ADS の臨界性と冷却材ボイド反応度について大きく変化することがわかった。感度解析の結果、ADS に対する核特性の変化は、主に Pb 同位体 (^{206}Pb および ^{207}Pb) の非弾性散乱断面積の変更に起因することが明らかとなった。これらの結果から、今後、JENDL-4.0 を用いて核変換システムに対する核設計を再評価する必要があることがわかった。

第 3 章では、核変換システムの感度係数と JENDL-4.0 および JENDL-3.3 の共分散データを用いて核変換システムの誤差解析を行なった。JENDL-4.0 では、MA 核種の共分散データが整備され、核変換システムで対象となる MA 核種はすべて網羅しているが、冷却材核種である Pb 同位体および ^{209}Bi 、希釈材として用いられる Zr 同位体の共分散データが整備されていない。今後、これらの核種に関する共分散データの整備が強く望まれる。

誤差解析に必要な共分散データが未整備の核種については、JENDL-3.3 評価値または暫定値³⁾を使用して誤差解析を行なった。その結果、核変換システムの臨界性については、両システムともに 1% 程度の誤差で、JENDL-4.0 と JENDL-3.3 による大きな相違は見られなかった。冷却材ボイド反応度についてはライブラリ改訂によって誤差の変化が認められた。さらに、JENDL-3.3 と JENDL-4.0 を用いた核特性の解析結果の間には、共分散データから推定した核データ起因誤差を超える差異があることがわかった。

核種・反応別に見ると、ADS に対する核データ起因誤差について ^{237}Np の捕獲断面積を除く多くの MA 核種・反応で誤差が減少した。このことは、これらの核種の共分散データが、ライブラリ改訂によって小さく評価されたことに因るものであることがわかった。ライブラリ改訂による FR の冷却材ボイド反応度に対する誤差増加は、主に ^{23}Na の非弾性散乱断面積の共分散に起因していることが判明した。 ^{23}Na 非弾性散乱の断面積・共分散評価値と実験値との比較の結果、まだ多くの実験データが必要とされているものの、その共分散は評価値を含めて妥当であると考えられる。

これらの結果を踏まえ、今後の課題を以下にまとめる。

- JENDL-4.0 を用いた ADS 核設計の再評価
- Pb 同位体、²⁰⁹Bi、Zr 同位体共分散データの整備
- 系統的でより精度のよい測定データの取得

さらに上記に加え、根本的な課題として核設計精度そのものについても議論を行なっていく必要がある。核設計計算値の核データ起因誤差を、核データの共分散データを用いて定量化する方法は合理的ではある。しかしながら、設計精度を含めた核特性値が、ライブラリが更新されるたびに、あるいは異なるライブラリ毎に設計精度を超える差異が生じれば、設計精度の信頼性に疑問が残る。実験データの少ない MA を用いた体系に対しては積分実験による検証も必要であろう。

最後に、付録 C の考察により明らかになった課題を以下に記す。

- 感度係数計算コード SAGEP の改良（核分裂スペクトルに対する感度係数計算の見直し）

謝辞

本研究を行なうにあたり、原子力基礎工学研究部門 核工学・炉工学ユニット 核データ評価研究グループの岩本修氏、柴田恵一氏には、データの提供および有意義なコメントをいただきました。心より感謝いたします。

原子力基礎工学研究部門 核工学・炉工学ユニット 炉物理研究グループの石川真氏には多くの有意義なコメントを頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa *et al.*, “JENDL-4.0: A New Library for Innovative Nuclear Energy Systems,” *J. Nucl. Sci. and Technol.*, **48**(1), p.1 (2011).
- 2) G. Chiba, K. Okumura, K. Sugino *et al.*, “JENDL-4.0 Benchmarking for Fission Reactor Applications,” *J. Nucl. Sci. and Technol.*, **48**(2), p.172 (2011).
- 3) 菅原隆徳、佐々敏信、大井川宏之、辻本和文、西原健司、“核変換システムの核設計精度検討と MA 装荷実験の効果,” JAEA-Research 2009-033 (2009).
- 4) T. Hazama *et al.*, “SLAROM-UF: Ultra Fine Group Cell Calculation Code for Fast Reactor - Version 20090113 - (Translated Document),” JAEA-Review 2009-003 (2009).
- 5) T. B. Flower *et al.*, “Nuclear reactor core analysis code : Citation,” ORNL-TM-2496, Rev. 2 (1969).
- 6) 原 昭浩、竹田敏一、菊池康之、“SAGEP : 一般化摂動論に基づく二次元感度解析コード,” JAERI-M 84-027 (1984).
- 7) 小林啓祐、“原子炉物理,” コロナ社 (1996).
- 8) FBR システムユニット、FBR 信頼性技術ユニット、FBR 安全・先進技術ユニット、FBR サイクル統括ユニット、革新的水冷却炉設計グループ、原子力基礎工学研究部門、“高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ II 技術検討書- (1) 原子炉プラントシステム -, ” JAEA-Research 2006-042 (2006).
- 9) K. Nishihara, K. Iwanaga, K. Tsujimoto *et al.*, “Neutronics Design of Accelerator-Driven System for Power Flattening and Beam Current Reduction,” *J. Nucl. Sci. and Technol.*, **45**, p.812 (2008).
- 10) 羽様平、千葉豪、沼田一幸、佐藤若英、“高速炉用統合炉定数 ADJ2000R の作成,” JNC TN9400 2002-064 (2002).
- 11) A. Koning, R. Forrest, M. Kellett *et al.* (Eds.), *The JEFF-3.1 Nuclear Data Library*, JEFF Report 21, OECD/NEA (2006).
- 12) M. B. Chadwick, P. Oblozinsky, M. Herman *et al.*, “ENDF/B-VII.0: Next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology,” *Nucl. Data Sheets*, **107**, p.2931 (2006).

- 13) T. Sugawara, private communications.
- 14) S. Kahler, “NJOY 99: Nuclear Data Processing System,”
<http://t2.lanl.gov/codes/njoy99/>, LANL (2011).
- 15) G. Chiba, “ERRORJ: A Code to Process Neutron-nuclide Reaction Cross Section Covariance, Version 2.3,” JAEA-Data/Code 2007-007 (2007).
- 16) 石川眞、山下芳興、池上哲雄、他、私信.

付録 A 核変換システム構成物質の組成

各核変換システムの構成物質の組成を以下にまとめる。計算に用いたジオメトリは、本文を参照のこと。

表 A.1.1 ADS 炉心物質の原子数密度 ($\times 10^{24}$ atoms/cm³)

ADS			
	Fuel		Others
²³⁴ U	3.91884E-07	⁵⁴ Fe	3.22512E-04
²³⁶ U	9.71389E-07	⁵⁶ Fe	5.10015E-03
²³⁷ Np	8.43325E-04	⁵⁷ Fe	1.22332E-04
²³⁸ Pu	2.29244E-05	⁵⁸ Fe	1.55696E-05
²³⁹ Pu	5.22460E-04	⁵⁰ Cr	6.53558E-05
²⁴⁰ Pu	2.36423E-04	⁵² Cr	1.26032E-03
²⁴¹ Pu	1.03205E-04	⁵³ Cr	1.42910E-04
²⁴² Pu	6.59292E-05	⁵⁴ Cr	3.55734E-05
²⁴¹ Am	5.46530E-04	⁵⁸ Ni	6.40372E-04
^{242m} Am	9.98022E-07	⁶⁰ Ni	2.46669E-04
²⁴³ Am	2.21476E-04	⁶¹ Ni	1.07235E-05
²⁴³ Cm	4.96956E-07	⁶² Ni	3.41835E-05
²⁴⁴ Cm	6.66487E-05	⁶⁴ Ni	8.71050E-06
²⁴⁵ Cm	6.40758E-06	⁹² Mo	1.77905E-05
²⁴⁶ Cm	6.54511E-07	⁹⁴ Mo	1.10891E-05
¹⁵ N	8.87333E-03	⁹⁵ Mo	1.90852E-05
		⁹⁶ Mo	1.99963E-05
		⁹⁷ Mo	1.14487E-05
		⁹⁸ Mo	2.89275E-05
		¹⁰⁰ Mo	1.15446E-05
		⁵⁵ Mn	8.37417E-05
		⁹⁰ Zr	3.20809E-03
		⁹¹ Zr	6.99607E-04
		⁹² Zr	1.06936E-03
		⁹⁴ Zr	1.08371E-03
		⁹⁶ Zr	1.74590E-04
		²⁰⁴ Pb	1.10404E-04
		²⁰⁶ Pb	1.90053E-03
		²⁰⁷ Pb	1.74281E-03
		²⁰⁸ Pb	4.13238E-03
		²⁰⁹ Bi	9.75155E-03

表 A.1.2 ADS 構成物質の原子数密度 ($\times 10^{24}$ atoms/cm³)

	LBE target	Gas plenum	SUS reflector	LBE buffer	B ₄ C shield
⁵⁰ Cr		7.75656E-05	4.64515E-04	1.32718E-04	1.32718E-04
⁵² Cr		1.49578E-03	8.95771E-03	2.55934E-03	2.55934E-03
⁵³ Cr		1.49578E-04	1.01573E-03	2.90208E-04	2.90208E-04
⁵⁴ Cr		4.22193E-05	2.52837E-04	7.22389E-05	7.22389E-05
⁵⁵ Mn		9.93869E-05	5.95192E-04	1.70055E-04	1.70055E-04
⁵⁴ Fe		3.82766E-04	2.29225E-03	6.54930E-04	6.54930E-04
⁵⁶ Fe		6.05299E-03	3.62491E-02	1.03569E-02	1.03569E-02
⁵⁷ Fe		1.45187E-04	8.69473E-04	2.48422E-04	2.48422E-04
⁵⁸ Fe		1.84784E-05	1.10660E-04	3.16173E-05	3.16173E-05
⁵⁸ Ni		7.60012E-04	4.55142E-03	1.30041E-03	1.30041E-03
⁶⁰ Ni		2.92754E-04	1.75319E-03	5.00912E-04	5.00912E-04
⁶¹ Ni		1.27270E-05	7.62170E-05	2.17763E-05	2.17763E-05
⁶² Ni		4.05700E-05	2.42958E-04	6.94167E-05	6.94167E-05
⁶⁴ Ni		1.03379E-05	6.19096E-05	1.76885E-05	1.76885E-05
⁹² Mo		2.11144E-05	1.26446E-04	3.61274E-04	3.61274E-04
⁹⁴ Mo		1.31609E-05	7.88156E-05	2.25188E-05	2.25188E-05
⁹⁵ Mo		2.26510E-05	1.35648E-04	3.87566E-05	3.87566E-05
⁹⁶ Mo		2.37323E-05	1.42124E-04	4.06068E-05	4.06068E-05
⁹⁷ Mo		1.35877E-05	8.13718E-05	2.32491E-05	2.32491E-05
⁹⁸ Mo		3.43322E-05	2.05602E-04	5.87435E-05	5.87435E-05
¹⁰⁰ Mo		1.37016E-05	8.20535E-05	2.34438E-05	2.34438E-05
²⁰⁴ Pb	1.84951E-04	1.09660E-04	5.58587E-05	1.48956E-05	3.72392E-05
²⁰⁶ Pb	3.18380E-03	1.88772E-03	9.61568E-04	2.56417E-04	6.41046E-04
²⁰⁷ Pb	2.91959E-03	1.73106E-03	8.81770E-04	2.35137E-04	5.87847E-04
²⁰⁸ Pb	6.92246E-03	4.10442E-03	2.09071E-03	5.57520E-04	1.39381E-03
²⁰⁹ Bi	1.63360E-02	9.68586E-03	4.93378E-03	1.31567E-02	3.28919E-03
¹⁰ B					1.18037E-02
¹¹ B					4.75113E-02
¹² C					1.48288E-02

表 A.1.3 FR-T, FR-E 炉心物質の原子数密度 ($\times 10^{24}$ atoms/cm³)

	FR-T		FR-E	
	Inner	Outer	Inner	Outer
²³⁵ U	2.30692E-05	2.24629E-05	2.37396E-05	2.29355E-05
²³⁸ U	7.74333E-03	7.38134E-03	7.78611E-03	7.53662E-03
²³⁷ Np	1.79321E-04	1.79321E-04	5.60600E-05	5.63375E-05
²³⁸ Pu	4.82014E-05	5.78417E-05	2.03917E-05	2.33087E-04
²³⁹ Pu	9.91985E-04	1.19038E-03	9.99920E-04	1.14108E-03
²⁴⁰ Pu	5.53103E-04	6.63723E-04	5.90799E-04	6.74252E-04
²⁴¹ Pu	2.72001E-05	3.26401E-05	7.87845E-05	8.98899E-05
²⁴² Pu	1.82840E-04	2.19409E-04	7.12224E-05	8.12613E-05
²⁴¹ Am	2.71657E-04	2.71657E-04	2.21137E-04	2.21025E-04
²⁴³ Am	4.72661E-05	4.72661E-05	1.09967E-04	1.09887E-04
²⁴⁴ Cm	2.35361E-06	2.35361E-06	1.09516E-04	1.09437E-04
¹⁶ O	1.99403E-02	1.99403E-02	1.99339E-02	1.99308E-02
⁵⁴ Fe	8.44857E-04	8.44857E-04	8.44857E-04	8.44857E-04
⁵⁶ Fe	1.33604E-02	1.33604E-04	1.33604E-02	1.33604E-04
⁵⁷ Fe	3.20463E-04	3.20463E-04	3.20463E-04	3.20463E-04
⁵⁸ Fe	4.07862E-05	4.07862E-05	4.07862E-05	4.07862E-05
⁵⁰ Cr	1.71206E-04	1.71206E-04	1.71206E-04	1.71206E-04
⁵² Cr	3.30155E-03	3.30155E-03	3.30155E-03	3.30155E-03
⁵³ Cr	3.74369E-04	3.74369E-04	3.74369E-04	3.74369E-04
⁵⁴ Cr	9.31883E-05	9.31883E-05	9.31883E-05	9.31883E-05
⁵⁸ Ni	1.67753E-03	1.67753E-03	1.67753E-03	1.67753E-03
⁶⁰ Ni	6.46177E-04	6.46177E-04	6.46177E-04	6.46177E-04
⁶² Ni	2.80914E-05	2.80914E-05	2.80914E-05	2.80914E-05
⁶³ Ni	8.95476E-05	8.95476E-05	8.95476E-05	8.95476E-05
⁶⁴ Ni	2.28181E-05	2.28181E-05	2.28181E-05	2.28181E-05
⁹² Mo	4.66043E-04	4.66043E-04	4.66043E-04	4.66043E-04
⁹⁴ Mo	2.90492E-05	2.90492E-05	2.90492E-05	2.90492E-05
⁹⁵ Mo	4.99960E-05	4.99960E-05	4.99960E-05	4.99960E-05
⁹⁶ Mo	5.23827E-04	5.23827E-04	5.23827E-04	5.23827E-04
⁹⁷ Mo	2.99913E-03	2.99913E-03	2.99913E-03	2.99913E-03
⁹⁸ Mo	7.57791E-04	7.57791E-04	7.57791E-04	7.57791E-04
¹⁰⁰ Mo	3.02425E-05	3.02425E-05	3.02425E-05	3.02425E-05
⁵⁵ Mn	2.19371E-04	2.19371E-04	2.19371E-04	2.19371E-04
²³ Na	7.31002E-03	7.31002E-03	7.31002E-03	7.31002E-03

表 A.1.4 FR-T, FR-E 構成物質の原子数密度 ($\times 10^{24}$ atoms/cm³)

	Blanket	SUS shield	ZrH shield	Gas plenum
²³⁵ U	3.32854E-05			
²³⁸ U	1.09318E-02			
¹⁶ O	2.19301E-02			
⁵⁰ Cr	1.71206E-04	4.62521E-04	1.71206E-04	1.71206E-04
⁵² Cr	3.30155E-03	8.91926E-03	3.30155E-03	3.30155E-03
⁵³ Cr	3.74369E-04	1.01137E-03	3.74369E-04	3.74369E-04
⁵⁴ Cr	9.31883E-05	2.51752E-04	9.31883E-05	9.31883E-05
⁵⁵ Mn	2.19371E-04	5.92641E-04	2.19371E-04	2.19371E-04
⁵⁴ Fe	8.44857E-04	2.28242E-03	8.44857E-04	8.44857E-04
⁵⁶ Fe	1.33604E-02	3.60937E-02	1.33604E-02	1.33604E-02
⁵⁷ Fe	3.20463E-04	8.65746E-04	3.20463E-04	3.20463E-04
⁵⁸ Fe	4.07862E-05	1.10186E-04	4.07862E-05	4.07862E-05
⁵⁸ Ni	1.67753E-03	4.53192E-04	1.67753E-03	1.67753E-03
⁶⁰ Ni	6.46177E-04	1.25904E-04	6.46177E-04	6.46177E-04
⁶¹ Ni	2.80914E-05	7.58904E-05	2.80914E-05	2.80914E-05
⁶² Ni	8.95476E-05	2.41917E-04	8.95476E-05	8.95476E-05
⁶⁴ Ni	2.28181E-05	6.16443E-05	2.28181E-05	2.28181E-05
⁹² Mo	4.66043E-05	1.25904E-04	4.66043E-04	4.66043E-04
⁹⁴ Mo	2.90492E-05	7.84778E-05	2.90492E-05	2.90492E-05
⁹⁵ Mo	4.99960E-05	1.35067E-04	4.99960E-05	4.99960E-05
⁹⁶ Mo	5.23827E-05	1.41515E-04	5.23827E-05	5.23827E-05
⁹⁷ Mo	2.99913E-05	8.10231E-05	2.99913E-05	2.99913E-05
⁹⁸ Mo	7.57791E-05	2.04721E-04	7.57791E-05	7.57791E-05
¹⁰⁰ Mo	3.02425E-05	8.17018E-05	3.02425E-05	3.02425E-05
²³ Na	7.31002E-03	7.31002E-03	7.31002E-03	7.31002E-03
¹ H			2.83019E-02	
⁹⁰ Zr			8.18055E-03	
⁹¹ Zr			1.78398E-03	
⁹² Zr			2.72685E-03	
⁹⁴ Zr			2.76342E-03	
⁹⁶ Zr			4.45200E-04	

付録B 核変換システムの核データ起因誤差の核種・反応別内訳

各核変換システムの核データ起因誤差の核種・反応別内訳を以下に示す¹。

表 B.1.1 ADS の臨界性に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁸ Pu	14	38	(144)	(0)	(3)	—	—	—
²³⁹ Pu	-91	422	82	4	31	450	1	0
²⁴⁰ Pu	34	41	67	2	7	—	0	—
²⁴¹ Pu	20	94	36	2	20	—	0	—
²⁴² Pu	13	31	(112)	(1)	(15)	—	—	—
²³⁷ Np	252	261	151	(6)	(380)	—	—	—
²⁴¹ Am	545	134	224	(6)	(272)	—	—	—
^{242m} Am	0	9	(11)	(0)	(1)	—	—	—
²⁴³ Am	281	86	22	(2)	(130)	—	—	—
²⁴³ Cm	(1)	(10)	(5)	(0)	(0)	—	—	—
²⁴⁴ Cm	149	175	(418)	(1)	(12)	—	—	—
²⁴⁵ Cm	(7)	(82)	(66)	(0)	(2)	—	—	—
²⁴⁶ Cm	(1)	(1)	(4)	(0)	(0)	—	—	—
¹⁵ N	(0)	—	—	247	(2)	—	—	—
nat Fe	43	—	—	56	274	—	28	—
nat Cr	11	—	—	28	12	—	3	—
nat Ni	19	—	—	3	9	—	3	—
⁹⁰ Zr	26	—	—	(28)	27	—	—	—
⁹¹ Zr	(49)	—	—	(4)	(28)	—	—	—
⁹² Zr	(86)	—	—	(7)	(78)	—	—	—
⁹⁴ Zr	(59)	—	—	(10)	(77)	—	—	—
⁹⁶ Zr	(4)	—	—	(2)	(6)	—	—	—
²⁰⁴ Pb	(13)	—	—	(2)	(10)	—	—	—
²⁰⁶ Pb	(54)	—	—	(36)	89	—	—	—
²⁰⁷ Pb	(33)	—	—	(31)	78	—	—	—
²⁰⁸ Pb	(14)	—	—	(90)	29	—	—	—
²⁰⁹ Bi	(97)	—	—	(242)	133	—	—	—

† 括弧内は JENDL-3.3 暫定共分散を用いた結果。

¹表中の負号は、分散と共分散の項（対角及び非対角項）の和が負であることを表わす。

表 B.1.2 ADS の臨界性に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁸ Pu	27	23	37	0	3	—	0	0
²³⁹ Pu	89	209	79	2	38	457	1	0
²⁴⁰ Pu	46	54	11	1	18	—	0	0
²⁴¹ Pu	34	106	63	1	22	—	1	0
²⁴² Pu	31	16	10	1	7	—	0	0
²³⁷ Np	462	178	115	2	98	—	5	0
²⁴¹ Am	430	98	128	2	45	—	1	0
^{242^m} Am	2	4	2	0	0	—	0	0
²⁴³ Am	271	57	36	2	74	—	1	0
²⁴³ Cm	1	2	2	0	0	—	0	0
²⁴⁴ Cm	79	47	138	0	9	—	0	0
²⁴⁵ Cm	11	24	33	0	2	—	0	0
²⁴⁶ Cm	0	0	0	0	0	—	0	0
¹⁵ N	1	—	—	262	2	—	—	—
^{nat} Fe	41	—	—	76	290	—	32	—
^{nat} Cr	2	—	—	14	13	—	8	—
^{nat} Ni	18	—	—	3	9	—	4	—
⁹⁰ Zr	[26]	—	—	(25)	[28]	—	—	—
⁹¹ Zr	(45)	—	—	(4)	(30)	—	—	—
⁹² Zr	(51)	—	—	(7)	(82)	—	—	—
⁹⁴ Zr	(38)	—	—	(9)	(82)	—	—	—
⁹⁶ Zr	(5)	—	—	(2)	(6)	—	—	—
²⁰⁴ Pb	(21)	—	—	(2)	(8)	—	—	—
²⁰⁶ Pb	(63)	—	—	(37)	[54]	—	—	—
²⁰⁷ Pb	(36)	—	—	(31)	[78]	—	—	—
²⁰⁸ Pb	(9)	—	—	(88)	[22]	—	—	—
²⁰⁹ Bi	(88)	—	—	(244)	[129]	—	—	—

† 丸括弧内は JENDL-3.3 暫定共分散データを用いた結果。

角括弧内は JENDL-3.3 共分散データを用いた結果。

表 B.1.3 ADS の冷却材ボイド反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁸ Pu	3	7	21	0	1	—	—	—
²³⁹ Pu	-30	113	17	5	19	120	1	1
²⁴⁰ Pu	4	3	5	1	3	—	0	—
²⁴¹ Pu	-2	23	6	2	6	—	0	—
²⁴² Pu	5	1	18	2	3	—	—	—
²³⁷ Np	61	12	4	13	66	—	—	—
²⁴¹ Am	98	17	29	(10)	(45)	—	—	—
^{242m} Am	0	2	(2)	(0)	(1)	—	—	—
²⁴³ Am	60	8	3	(4)	(23)	—	—	—
²⁴³ Cm	(0)	(2)	(1)	(0)	(0)	—	—	—
²⁴⁴ Cm	27	10	(53)	(2)	(3)	—	—	—
²⁴⁵ Cm	(2)	(17)	(14)	(0)	(1)	—	—	—
²⁴⁶ Cm	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	—	—	—
¹⁵ N	(0)	—	—	62	(3)	—	—	—
nat Fe	4	—	—	56	95	—	27	—
nat Cr	1	—	—	58	7	—	3	—
nat Ni	12	—	—	3	6	—	4	—
⁹⁰ Zr	8	—	—	(78)	20	—	—	—
⁹¹ Zr	(10)	—	—	(15)	(18)	—	—	—
⁹² Zr	(15)	—	—	(21)	(30)	—	—	—
⁹⁴ Zr	(11)	—	—	(22)	(32)	—	—	—
⁹⁶ Zr	(1)	—	—	(4)	(4)	—	—	—
²⁰⁴ Pb	(11)	—	—	(1)	(10)	—	—	—
²⁰⁶ Pb	(43)	—	—	(11)	83	—	—	—
²⁰⁷ Pb	(26)	—	—	(8)	72	—	—	—
²⁰⁸ Pb	(12)	—	—	(24)	28	—	—	—
²⁰⁹ Bi	(73)	—	—	(77)	120	—	—	—

† 括弧内は JENDL-3.3 暫定共分散を用いた結果。

表 B.1.4 ADS の冷却材ボイド反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁸ Pu	5	3	4	0	1	—	0	0
²³⁹ Pu	17	30	12	4	10	104	1	0
²⁴⁰ Pu	8	3	1	2	4	—	1	0
²⁴¹ Pu	5	22	9	1	6	—	1	0
²⁴² Pu	4	1	1	1	2	—	0	0
²³⁷ Np	90	12	6	3	19	—	4	0
²⁴¹ Am	82	11	12	3	10	—	2	0
^{242m} Am	0	1	0	0	0	—	0	0
²⁴³ Am	50	8	5	2	10	—	1	0
²⁴³ Cm	0	0	0	0	0	—	0	0
²⁴⁴ Cm	14	4	10	1	2	—	0	0
²⁴⁵ Cm	2	4	5	0	2	—	0	0
²⁴⁶ Cm	0	0	0	0	0	—	0	0
¹⁵ N	0	—	—	62	4	—	—	—
^{nat} Fe	5	—	—	82	88	—	28	—
^{nat} Cr	1	—	—	27	6	—	8	—
^{nat} Ni	12	—	—	3	5	—	4	—
⁹⁰ Zr	[7]	—	—	(78)	[18]	—	—	—
⁹¹ Zr	(8)	—	—	(15)	(16)	—	—	—
⁹² Zr	(10)	—	—	(21)	(25)	—	—	—
⁹⁴ Zr	(8)	—	—	(22)	(27)	—	—	—
⁹⁶ Zr	(1)	—	—	(4)	(4)	—	—	—
²⁰⁴ Pb	(17)	—	—	(1)	(8)	—	—	—
²⁰⁶ Pb	(51)	—	—	(11)	[59]	—	—	—
²⁰⁷ Pb	(28)	—	—	(8)	[70]	—	—	—
²⁰⁸ Pb	(8)	—	—	(23)	[23]	—	—	—
²⁰⁹ Bi	(66)	—	—	(79)	[118]	—	—	—

† 丸括弧内は JENDL-3.3 暫定共分散データを用いた結果。

角括弧内は JENDL-3.3 共分散データを用いた結果。

表 B.1.5 ADS のドップラー反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁸ Pu	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	—	—	—
²³⁹ Pu	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
²⁴⁰ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	—
²⁴¹ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	—
²⁴² Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—
²³⁷ Np	0.2	0.1	0.1	0.0	0.2	—	—	—
²⁴¹ Am	0.5	0.1	0.1	0.0	0.2	—	—	—
^{242m} Am	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	—	—
²⁴³ Am	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	—	—	—
²⁴³ Cm	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	—	—	—
²⁴⁴ Cm	(0.1)	(0.1)	(0.2)	(0.0)	(0.0)	—	—	—
²⁴⁵ Cm	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	—	—	—
²⁴⁶ Cm	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	(0.0)	—	—	—
¹⁵ N	(0.0)	—	—	0.2	(0.0)	—	—	—
^{nat} Fe	0.2	—	—	0.1	0.2	—	0.0	—
^{nat} Cr	0.0	—	—	0.0	0.0	—	0.0	—
^{nat} Ni	0.0	—	—	0.0	0.0	—	0.0	—
⁹⁰ Zr	0.3	—	—	(0.1)	0.0	—	—	—
⁹¹ Zr	(0.1)	—	—	(0.0)	(0.0)	—	—	—
⁹² Zr	(0.3)	—	—	(0.0)	(0.0)	—	—	—
⁹⁴ Zr	(0.2)	—	—	(0.0)	(0.0)	—	—	—
⁹⁶ Zr	(0.0)	—	—	(0.0)	(0.0)	—	—	—
²⁰⁴ Pb	(0.0)	—	—	(0.0)	(0.0)	—	—	—
²⁰⁶ Pb	(0.2)	—	—	(0.0)	0.1	—	—	—
²⁰⁷ Pb	(0.1)	—	—	(0.0)	0.0	—	—	—
²⁰⁸ Pb	(0.0)	—	—	(0.0)	0.0	—	—	—
²⁰⁹ Bi	(0.3)	—	—	(0.1)	0.1	—	—	—

† 括弧内は JENDL-3.3 暫定共分散を用いた結果。

表 B.1.6 ADS のドップラー反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁸ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²³⁹ Pu	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
²⁴⁰ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²⁴¹ Pu	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²⁴² Pu	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²³⁷ Np	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	—	0.0	0.0
²⁴¹ Am	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
^{242^m} Am	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²⁴³ Am	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²⁴³ Cm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²⁴⁴ Cm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²⁴⁵ Cm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²⁴⁶ Cm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
¹⁵ N	0.0	—	—	0.2	0.0	—	—	—
^{nat} Fe	0.2	—	—	0.1	0.1	—	0.01	—
^{nat} Cr	0.0	—	—	0.0	0.0	—	0.00	—
^{nat} Ni	0.0	—	—	0.0	0.0	—	0.00	—
⁹⁰ Zr	[0.3]	—	—	(0.1)	[0.0]	—	—	—
⁹¹ Zr	(0.1)	—	—	(0.1)	(0.0)	—	—	—
⁹² Zr	(0.3)	—	—	(0.0)	(0.0)	—	—	—
⁹⁴ Zr	(0.2)	—	—	(0.0)	(0.0)	—	—	—
⁹⁶ Zr	(0.0)	—	—	(0.0)	(0.0)	—	—	—
²⁰⁴ Pb	(0.0)	—	—	(0.0)	(0.0)	—	—	—
²⁰⁶ Pb	(0.2)	—	—	(0.0)	[0.0]	—	—	—
²⁰⁷ Pb	(0.1)	—	—	(0.0)	[0.0]	—	—	—
²⁰⁸ Pb	(0.0)	—	—	(0.0)	[0.0]	—	—	—
²⁰⁹ Bi	(0.3)	—	—	(0.1)	[0.1]	—	—	—

† 丸括弧内は JENDL-3.3 暫定共分散データを用いた結果。

角括弧内は JENDL-3.3 共分散データを用いた結果。

表 B.1.7 FR-T の臨界性に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	2	14	2	0	2	13	0	0
²³⁸ U	266	34	67	51	452	—	5	0
²³⁸ Pu	33	55	(179)	(1)	(4)	—	—	—
²³⁹ Pu	-159	602	120	11	58	463	1	0
²⁴⁰ Pu	51	52	90	3	12	—	1	—
²⁴¹ Pu	3	27	7	0	3	—	0	—
²⁴² Pu	42	46	(174)	(3)	(20)	—	—	—
²³⁷ Np	50	26	16	(2)	(30)	—	—	—
²⁴¹ Am	202	35	58	(3)	(46)	—	—	—
²⁴³ Am	48	9	3	(1)	(9)	—	—	—
²⁴⁴ Cm	4	3	(8)	(0)	(0)	—	—	—
¹⁶ O	70	—	—	65	3	—	7	—
²³ Na	16	—	—	20	18	—	6	—
nat Fe	56	—	—	24	222	—	14	—
nat Cr	15	—	—	5	17	—	2	—
nat Ni	37	—	—	2	14	—	2	—

† 括弧内は JENDL-3.3 暫定共分散を用いた結果。

表 B.1.8 FR-T の臨界性に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	2	24	2	0	2	13	0	0
²³⁸ U	488	67	65	31	469	—	22	2
²³⁸ Pu	60	31	52	0	4	—	0	0
²³⁹ Pu	159	270	110	6	39	455	1	0
²⁴⁰ Pu	100	69	16	2	23	—	1	0
²⁴¹ Pu	7	38	13	0	3	—	0	0
²⁴² Pu	67	25	15	3	12	—	0	0
²³⁷ Np	89	20	13	1	8	—	0	0
²⁴¹ Am	207	25	32	1	9	—	0	0
²⁴³ Am	51	7	4	0	6	—	0	0
²⁴⁴ Cm	3	1	3	0	0	—	0	0
¹⁶ O	73	—	—	67	3	—	7	—
²³ Na	6	—	—	20	94	—	6	—
nat Fe	54	—	—	30	248	—	15	—
nat Cr	3	—	—	2	14	—	4	—
nat Ni	36	—	—	2	14	—	2	—

表 B.1.9 FR-T の冷却材ボイド反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	0	0	0	0	0	0	0	0
²³⁸ U	17	0	1	5	23	—	1	0
²³⁸ Pu	6	4	(11)	(0)	(0)	—	—	—
²³⁹ Pu	-8	35	13	1	3	11	0	0
²⁴⁰ Pu	2	1	2	0	1	—	0	—
²⁴¹ Pu	0	3	0	0	0	—	0	—
²⁴² Pu	4	1	(8)	(1)	(1)	—	—	—
²³⁷ Np	5	1	1	(0)	(3)	—	—	—
²⁴¹ Am	27	1	1	(1)	(5)	—	—	—
²⁴³ Am	4	0	0	(1)	(0)	—	—	—
²⁴⁴ Cm	0	0	(0)	(0)	(0)	—	—	—
¹⁶ O	4	—	—	6	0	—	2	—
²³ Na	16	—	—	22	18	—	4	—
nat Fe	11	—	—	4	11	—	2	—
nat Cr	3	—	—	4	1	—	0	—
nat Ni	2	—	—	0	1	—	0	—

† 括弧内は JENDL-3.3 暫定共分散を用いた結果。

表 B.1.10 FR-T の冷却材ボイド反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	1	2	0	0	0	0	0	0
²³⁸ U	37	1	1	4	23	—	3	0
²³⁸ Pu	6	2	1	0	0	—	0	0
²³⁹ Pu	16	41	10	1	2	11	0	0
²⁴⁰ Pu	10	1	0	0	2	—	0	0
²⁴¹ Pu	1	5	1	0	0	—	0	0
²⁴² Pu	4	1	0	0	0	—	0	0
²³⁷ Np	89	20	13	1	8	—	0	0
²⁴¹ Am	30	0	1	0	1	—	0	0
²⁴³ Am	3	0	0	0	0	—	0	0
²⁴⁴ Cm	0	0	0	0	0	—	0	0
¹⁶ O	4	—	—	6	0	—	2	—
²³ Na	5	—	—	22	93	—	4	—
nat Fe	11	—	—	6	11	—	3	—
nat Cr	0	—	—	1	0	—	1	—
nat Ni	2	—	—	0	1	—	0	—

表 B.1.11 FR-T のドップラー反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
²³⁸ U	0.4	0.2	0.3	0.4	3.4	—	0.0	0.0
²³⁸ Pu	0.8	0.3	(0.9)	(0.0)	(0.0)	—	—	—
²³⁹ Pu	2.0	4.2	0.4	-0.2	0.9	3.3	0.0	0.0
²⁴⁰ Pu	0.1	0.3	0.4	0.0	0.1	—	0.0	—
²⁴¹ Pu	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	—	0.0	—
²⁴² Pu	0.6	0.3	(0.9)	(0.1)	(0.2)	—	—	—
²³⁷ Np	0.8	0.2	0.1	(0.0)	(0.3)	—	—	—
²⁴¹ Am	4.5	0.2	0.3	(0.1)	(0.5)	—	—	—
²⁴³ Am	0.6	0.1	0.0	(0.0)	(0.1)	—	—	—
²⁴⁴ Cm	0.1	0.0	(0.0)	(0.0)	(0.0)	—	—	—
¹⁶ O	0.2	—	—	1.6	0.0	—	0.0	—
²³ Na	0.4	—	—	1.2	0.1	—	0.0	—
^{nat} Fe	0.8	—	—	0.7	1.8	—	0.1	—
^{nat} Cr	0.1	—	—	0.2	0.1	—	0.0	—
^{nat} Ni	0.1	—	—	0.2	0.1	—	0.0	—

† 括弧内は JENDL-3.3 暫定共分散を用いた結果。

表 B.1.12 FR-T のドップラー反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
²³⁸ U	1.2	0.6	0.3	0.4	3.8	—	1.0	0.0
²³⁸ Pu	0.8	0.2	0.2	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²³⁹ Pu	1.5	2.1	0.6	0.1	0.7	3.3	0.0	0.0
²⁴⁰ Pu	0.9	0.5	0.1	0.0	0.3	—	0.0	0.0
²⁴¹ Pu	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²⁴² Pu	0.5	0.2	0.1	0.0	0.1	—	0.0	0.0
²³⁷ Np	1.1	0.1	0.1	0.0	0.1	—	0.0	0.0
²⁴¹ Am	4.7	0.2	0.1	0.0	0.1	—	0.0	0.0
²⁴³ Am	0.6	0.0	0.0	0.0	0.1	—	0.0	0.0
²⁴⁴ Cm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
¹⁶ O	0.2	—	—	1.6	0.0	—	0.0	—
²³ Na	0.1	—	—	1.2	0.7	—	0.0	—
^{nat} Fe	0.8	—	—	1.7	1.9	—	0.1	—
^{nat} Cr	0.0	—	—	0.0	0.1	—	0.0	—
^{nat} Ni	0.1	—	—	0.2	0.1	—	0.0	—

表 B.1.13 FR-E の臨界性に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	2	14	2	0	2	13	0	0
²³⁸ U	283	33	65	43	434	—	5	0
²³⁸ Pu	15	21	(70)	(0)	(1)	—	—	—
²³⁹ Pu	-153	560	113	10	52	434	1	0
²⁴⁰ Pu	52	50	87	3	12	—	1	—
²⁴¹ Pu	6	60	19	1	6	—	0	—
²⁴² Pu	17	17	(62)	(1)	(6)	—	—	—
²³⁷ Np	50	26	16	(2)	(30)	—	—	—
²⁴¹ Am	174	27	45	(2)	(35)	—	—	—
²⁴³ Am	118	21	6	(1)	(21)	—	—	—
²⁴⁴ Cm	205	132	(328)	(1)	(9)	—	—	—
¹⁶ O	69	—	—	63	3	—	6	—
²³ Na	18	—	—	19	17	—	5	—
nat Fe	59	—	—	18	205	—	14	—
nat Cr	16	—	—	3	17	—	2	—
nat Ni	37	—	—	2	14	—	2	—

† 括弧内は JENDL-3.3 暫定共分散を用いた結果。

表 B.1.14 FR-E の臨界性に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	2	24	3	0	2	13	0	0
²³⁸ U	530	66	63	27	451	—	20	2
²³⁸ Pu	26	12	20	0	1	—	0	0
²³⁹ Pu	159	252	103	5	35	424	1	0
²⁴⁰ Pu	106	68	16	2	23	—	1	0
²⁴¹ Pu	23	78	35	1	8	—	0	0
²⁴² Pu	26	9	5	1	5	—	0	0
²³⁷ Np	29	5	4	0	3	—	0	0
²⁴¹ Am	181	19	25	1	7	—	0	0
²⁴³ Am	123	14	9	1	13	—	0	0
²⁴⁴ Cm	117	37	112	0	6	—	0	0
¹⁶ O	71	—	—	65	3	—	6	—
²³ Na	5	—	—	19	88	—	5	—
nat Fe	54	—	—	30	248	—	15	—
nat Cr	3	—	—	-1	14	—	4	—
nat Ni	35	—	—	1	13	—	2	—

表 B.1.15 FR-E の冷却材ボイド反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	0	0	0	0	0	0	0	0
²³⁸ U	18	0	1	5	23	—	1	0
²³⁸ Pu	3	2	(4)	(0)	(0)	—	—	—
²³⁹ Pu	-5	30	12	1	3	9	0	0
²⁴⁰ Pu	2	1	2	0	1	—	0	—
²⁴¹ Pu	-1	8	1	0	0	—	0	—
²⁴² Pu	1	1	(3)	(0)	(0)	—	—	—
²³⁷ Np	2	0	0	(0)	(1)	—	—	—
²⁴¹ Am	23	0	1	(0)	(4)	—	—	—
²⁴³ Am	10	0	0	(0)	(2)	—	—	—
²⁴⁴ Cm	18	4	(21)	(0)	(1)	—	—	—
¹⁶ O	4	—	—	6	0	—	1	—
²³ Na	17	—	—	21	17	—	3	—
nat Fe	12	—	—	4	10	—	2	—
nat Cr	0	—	—	0	0	—	0	—
nat Ni	0	—	—	0	0	—	0	—

† 括弧内は JENDL-3.3 暫定共分散を用いた結果。

表 B.1.16 FR-E の冷却材ボイド反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	1	2	0	0	0	0	0	0
²³⁸ U	37	1	1	4	23	—	3	0
²³⁸ Pu	3	1	0	0	0	—	0	0
²³⁹ Pu	17	39	10	1	2	9	0	0
²⁴⁰ Pu	12	1	0	0	2	—	0	0
²⁴¹ Pu	4	12	2	0	1	—	0	0
²⁴² Pu	2	0	0	0	0	—	0	0
²³⁷ Np	2	0	0	0	0	—	0	0
²⁴¹ Am	27	0	1	0	1	—	0	0
²⁴³ Am	8	0	0	0	1	—	0	0
²⁴⁴ Cm	7	2	4	0	0	—	0	0
¹⁶ O	4	—	—	6	0	—	2	—
²³ Na	5	—	—	22	93	—	4	—
nat Fe	12	—	—	5	10	—	2	—
nat Cr	0	—	—	1	0	—	1	—
nat Ni	2	—	—	0	1	—	0	—

表 B.1.17 FR-E のドップラー反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-3.3)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
²³⁸ U	0.5	0.3	0.4	0.4	4.1	—	0.0	0.0
²³⁸ Pu	0.4	0.1	(0.5)	(0.0)	(0.0)	—	—	—
²³⁹ Pu	2.3	5.1	0.5	-0.3	1.0	3.9	0.0	0.0
²⁴⁰ Pu	0.2	0.4	0.5	0.0	0.1	—	0.0	—
²⁴¹ Pu	0.1	0.3	0.0	0.0	0.1	—	0.0	—
²⁴² Pu	0.3	0.1	(0.4)	(0.0)	(0.1)	—	—	—
²³⁷ Np	0.3	0.1	0.0	(0.0)	(0.1)	—	—	—
²⁴¹ Am	4.6	0.2	0.3	(0.1)	(0.4)	—	—	—
²⁴³ Am	1.7	0.2	0.0	(0.0)	(0.3)	—	—	—
²⁴⁴ Cm	2.9	1.0	(2.0)	(0.0)	(0.1)	—	—	—
¹⁶ O	0.3	—	—	1.9	0.0	—	0.0	—
²³ Na	0.45	—	—	1.4	0.2	—	0.0	—
nat Fe	0.9	—	—	0.9	2.0	—	0.1	—
nat Cr	0.1	—	—	0.3	0.1	—	0.0	—
nat Ni	0.1	—	—	0.2	0.1	—	0.0	—

† 括弧内は JENDL-3.3 暫定共分散を用いた結果。

表 B.1.18 FR-E のドップラー反応度に対する核データ起因誤差の核種・反応別内訳 (JENDL-4.0)

Nuclide	Capture	Fission	ν	Elastic	Inelastic	χ	$\bar{\mu}$	$(n, 2n)$
²³⁵ U	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
²³⁸ U	1.3	0.7	0.4	0.5	4.6	—	1.0	0.0
²³⁸ Pu	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²³⁹ Pu	1.8	2.4	0.7	0.1	0.8	3.9	0.0	0.0
²⁴⁰ Pu	1.2	0.6	0.1	0.0	0.4	—	0.0	0.0
²⁴¹ Pu	0.4	0.6	0.0	0.0	0.1	—	0.0	0.0
²⁴² Pu	0.5	0.2	0.1	0.0	0.1	—	0.0	0.0
²³⁷ Np	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0
²⁴¹ Am	4.8	0.1	0.1	0.0	0.1	—	0.0	0.0
²⁴³ Am	1.8	0.1	0.1	0.0	0.2	—	0.0	0.0
²⁴⁴ Cm	1.4	0.3	0.6	0.0	0.1	—	0.0	0.0
¹⁶ O	0.3	—	—	1.9	0.0	—	0.0	—
²³ Na	0.1	—	—	1.4	0.9	—	0.0	—
nat Fe	0.9	—	—	2.1	2.2	—	0.1	—
nat Cr	0.0	—	—	0.1	0.1	—	0.0	—
nat Ni	0.1	—	—	0.2	0.1	—	0.0	—

付録C SAGEPに関する考察

核データライブラリ変更による核特性値の変化量は、核データを置換することによって算出することが可能である。以下では、この手法を直接計算と呼ぶ。本付録では、感度解析コード SAGEP により求めた核特性変化量と直接計算による核特性変化量を比較することにより、SAGEP の問題点を明らかにすることを目的とする。

C.1 直接計算と SAGEP による計算結果の比較

表 C.1.1 に、直接計算と SAGEP を用いた感度解析によって得られた各核変換システムの核特性値に対する核特性変化量を示す。感度解析による値は直接計算による値におおむね近いが、一致の精度はよいとは言えない。

表 C.1.1 各核変換システムの核特性値に対する核特性変化量

	Criticality change [pcm]	Void reactivity change [pcm]	Doppler reactivity change [pcm]
ADS			
Sensitivity analysis	2718.1	-1536.4	1.43
Direct calculation [†]	2936.0	-1455.8	1.63
FR-T			
Sensitivity analysis	731.1	66.8	1.17
Direct calculation	706.5	49.4	1.25
FR-E			
Sensitivity analysis	722.8	56.6	0.17
Direct calculation	676.3	34.3	0.28

†: 直接計算の計算値は、表 2.3.1-2.3.3 の値と同じ。

ここで、表の相違の原因が両者のどちらにあるのかを確認しておく必要がある。

直接計算では、核特性変化量を核特性値の差から算出するために、桁落ちが生じ、その差が非常に小さい場合には誤差は大きくなる。一方、感度解析では式 (2.16) からわかるように、感度係数が厳密に求められ¹、したがって、核特性変化量は式 (2.2) より精度の高い値となる²。したがって、感度解析による結果の方が核特性変化量を精度よく評価するはずである。

図 C.1.1-C.1.3 に、ADS の核特性値に対する核特性変化量の直接計算と感度解析による比較を示す。ライブラリ変更による核特性変化の小さなドップラー反応度については、直接計算と感

¹ただし、数値計算における収束条件程度の誤差は生じる。

²感度解析による手法でも断面積差を計算しているが、核特性値の差に比べれば桁落ちによる誤差は非常に小さい。

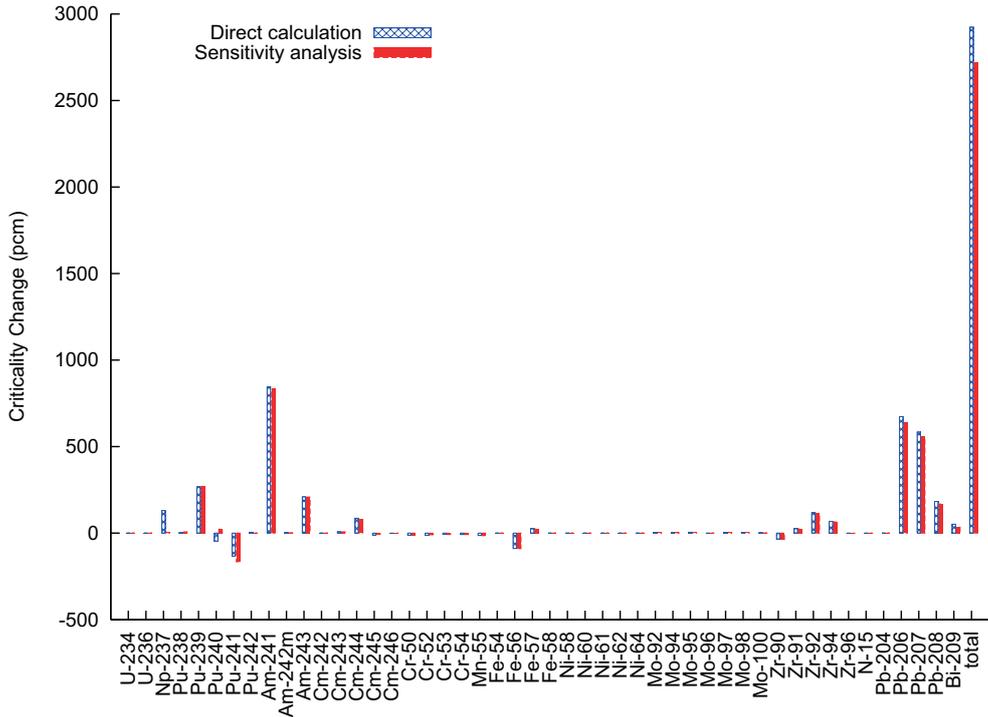


図 C.1.1 ADS の臨界性に対する核特性変化量の直接計算と感度解析による比較

度解析との間に乖離が生じていることが確認できる。一方、核特性変化の大きな臨界性変化および冷却材ボイド反応度変化については直接計算と感度解析の結果はよい一致を示す。この原因のひとつは、上で述べた直接計算の解析誤差であると考えられる。

ところが、核特性変化量が大きな臨界性変化および冷却材ボイド反応度変化に対して、 ^{237}Np や ^{240}Pu などの少数の核種では直接計算と感度解析の間で不一致が生じていることがわかる。これらの場合、この相違は直接計算ではなく、感度解析の方法あるいは感度解析で用いた SAGEP に原因があると考えられる。

C.2 線形性の確認

核特性変化量を算出する式 (2.2) は、核断面積変化に対する核特性変化量が十分小さいときに成り立つ式である。したがって、ライブラリ変更に対する核特性値の変化が十分に線形でなければ、式 (2.2) は成立しないことになり、感度解析の結果に無視できないずれが生じる可能性がある。

そこで線形性を確認するために、ADS の臨界性に対して大きな断面積変化が生じた ^{206}Pb に対して、核反応毎にライブラリの断面積を式

$$\sigma^{\text{reac}} = \sigma_{\text{J33}}^{\text{reac}} + \varepsilon(\sigma_{\text{J40}}^{\text{reac}} - \sigma_{\text{J33}}^{\text{reac}}) \quad (\text{C.1})$$

で定義する値に置換し、通常の体系計算を行なった。ここで ε は JENDL-3.3 から JENDL-4.0 へ

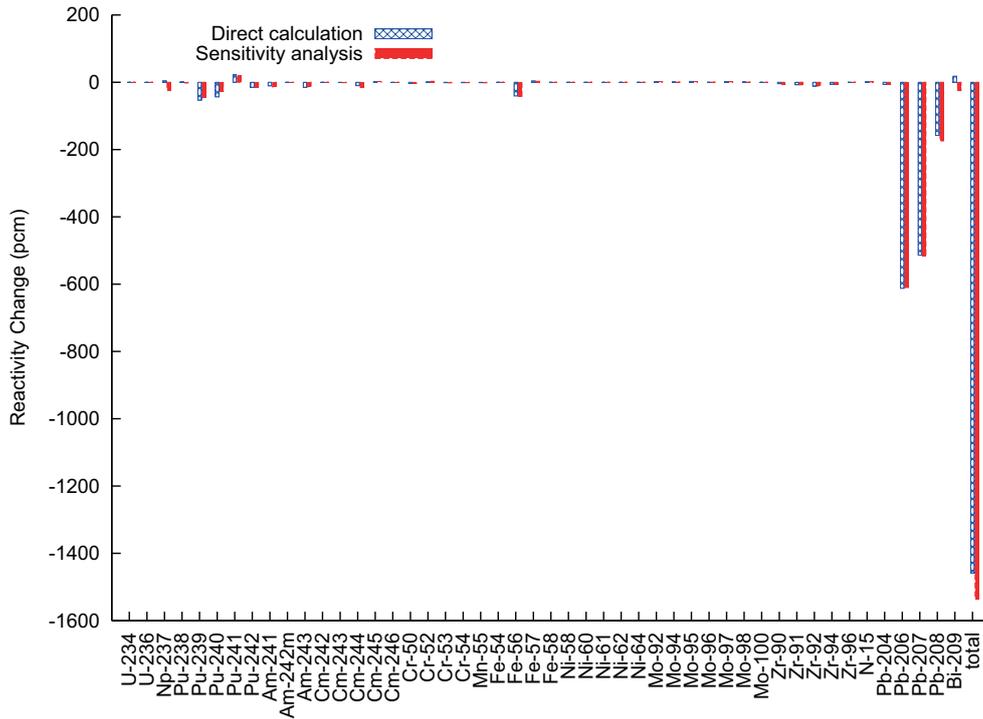


図 C.1.2 ADS の冷却材ボイド反応度に対する核特性変化量の直接計算と感度解析による比較

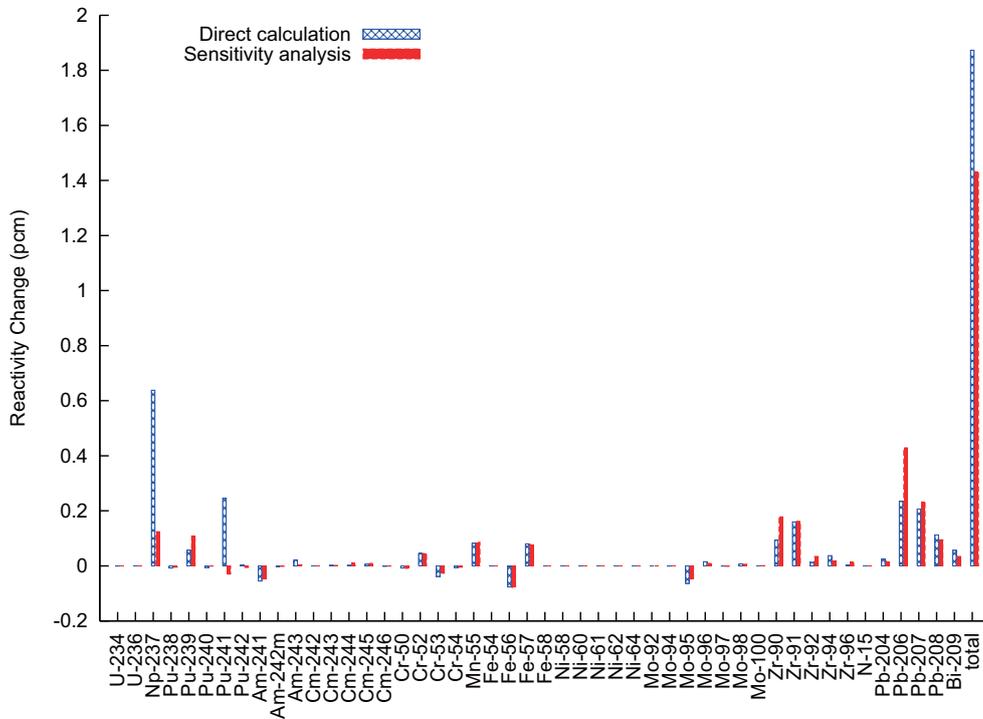


図 C.1.3 ADS のドップラー反応度に対する核特性変化量の直接計算と感度解析による比較

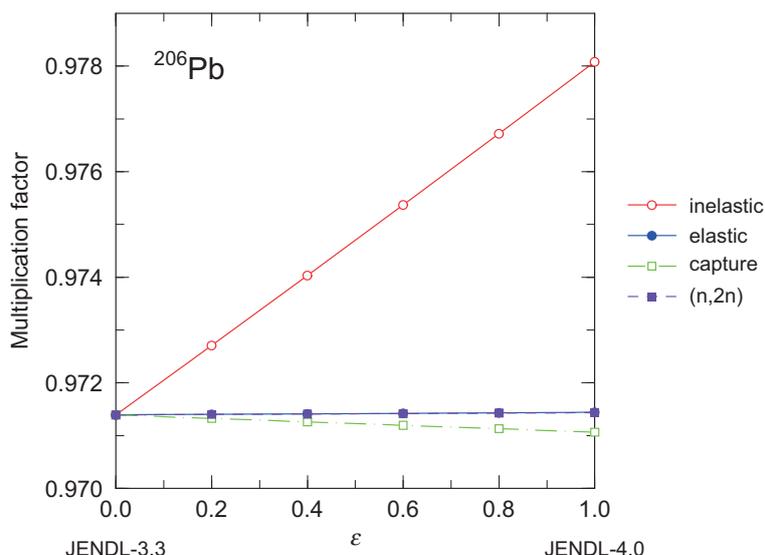


図 C.2.1 ^{206}Pb の各核反応断面積変化に対する ADS 臨界性の変化

の変更のファクターを示す。この計算により得られた結果を図 C.2.1 に示す。断面積変化の大きな ^{206}Pb 非弾性散乱に対しても、線形性は十分に保たれていることがわかる。このことから、式 (2.2) と仮定してよいことが確認できた。

C.3 反応別比較

核特性変化が大きい場合、直接計算によって生じる桁落ちは小さくなるため、直接計算による臨界性変化は解析上の真値とみなすことができる。また、上の考察により、線形性が十分に保たれていることが確認できたため、感度解析による計算誤差も非常に小さいと考えられる。したがって、感度係数が正しく計算されていれば、感度解析結果と直接計算の結果はよい精度で一致しなければならない。

そこで、核特性変化が大きい ADS の臨界性に対して、核特性変化の主要核種の反応別内訳を感度解析と直接計算を用いて算出し、両者を比較した。得られた結果を図 C.3.1 に示す³。核分裂スペクトルを除く各核反応に対して、感度解析と直接計算の結果はよい一致を示すものの、核分裂スペクトルに対しては感度解析と直接計算による結果に不一致が見られる。

現状の SAGEP コードでは、核分裂スペクトルについては ^{235}U と ^{239}Pu を除く核種に対して感度係数が考慮されず、これらの核種の感度係数はすべて 0 と出力される。感度解析と直接計算による結果が一致しないのはこのためである。特に、直接計算による ^{237}Np や ^{240}Pu の核特性変化は無視できないほど大きく (^{237}Np に対して 121 pcm、 ^{240}Pu に対して 65 pcm の差)、この違いが、表 C.1.1 のようなシステム全体の核特性変化量の相違の主たる要因となっている。

³図中の EL は、平均散乱角余弦と弾性散乱除去断面積を含む。

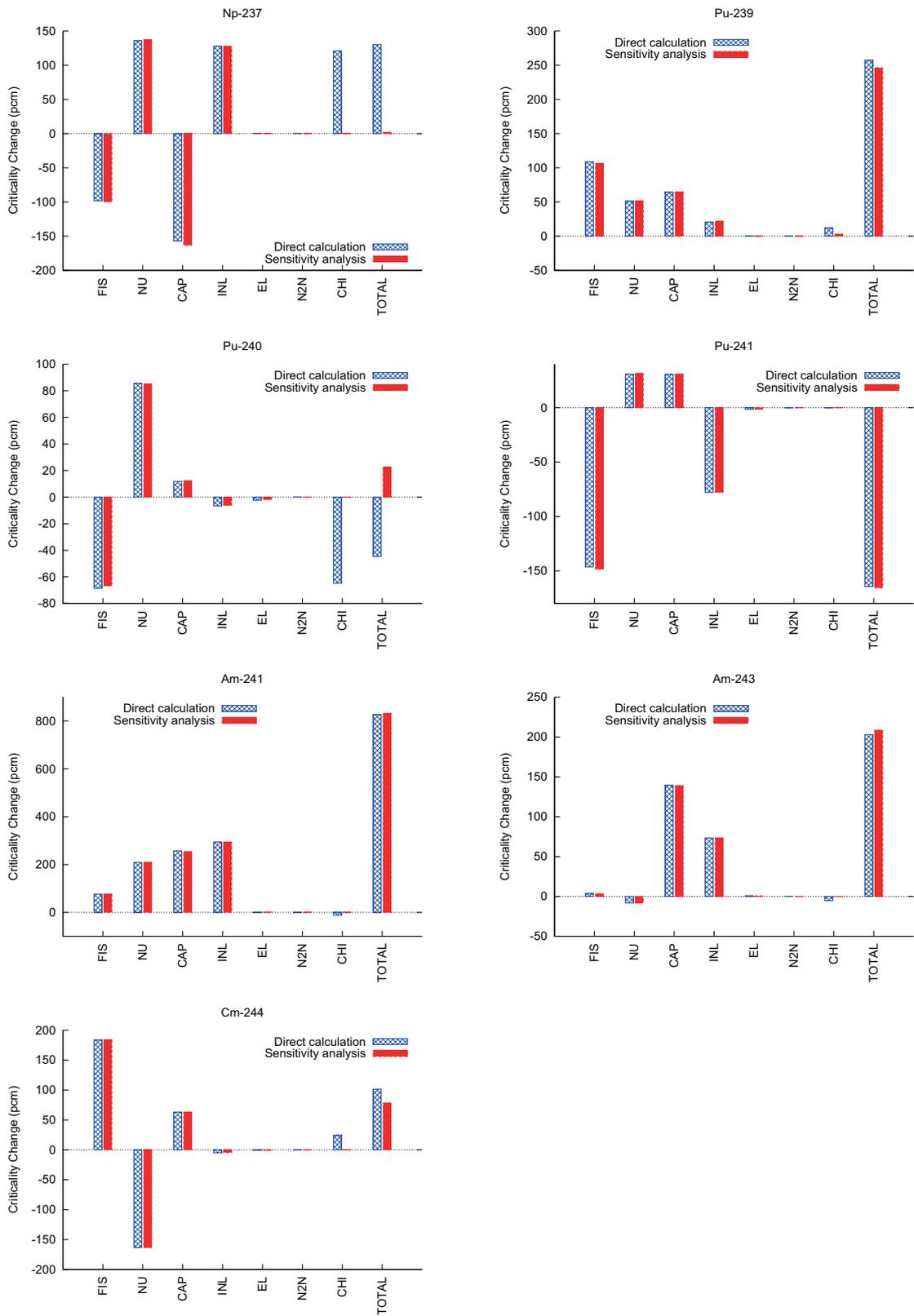


図 C.3.1 ADS の臨界性に対する核特性変化量の主要核分裂性核種の反応別内訳の直接計算と感度解析による比較

さらに ^{239}Pu に対して、直接計算と SAGEP の結果に両者の相違が確認できる。これは、現行の SAGEP が ^{239}Pu の核分裂スペクトルに対しても改良の余地があることを示している。

以上の結果を踏まえて、感度解析コード SAGEP に関して、以下の点を今後の課題として挙げる。

- 感度係数計算コード SAGEP の改良（核分裂スペクトルに対する感度係数計算の見直し）

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には1:1の関係がある。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バトン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベクレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

