

JAEA-Research 2017-021 DOI:10.11484/jaea-research-2017-021

# SWAT4.0 を用いた BWR 燃料の照射後試験解析

Analysis of Post Irradiation Examination of Used BWR Fuel with SWAT4.0

菊地 丈夫 多田 健一 崎野 孝夫 須山 賢也

Takeo KIKUCHI, Kenichi TADA, Takao SAKINO and Kenya SUYAMA

原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター 核工学・炉工学ディビジョン

Nuclear Data and Reactor Engineering Division Nuclear Science and Engineering Center Sector of Nuclear Science Research

**March 2018** 

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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, 2018

JAEA-Research 2017-021

## SWAT4.0 を用いた BWR 燃料の照射後試験解析

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター

核工学・炉工学ディビジョン

菊地 丈夫\*1、多田 健一、崎野 孝夫\*1、須山 賢也

(2017年12月26日 受理)

東京電力福島第一原子力発電所事故の対策において、燃料デブリの臨界管理は最も重要な研究課題の一つである。現在の我が国の使用済燃料の臨界管理では、新燃料の組成を仮定している。この仮定を燃料デブリに適用した場合、燃料デブリ中の含水を考慮し、Gd などの中性子吸収材を含まない体系においては、多くの条件において実効増倍率が1.0を超える可能性がある。そのため、燃焼度クレジットの適用が現在検討されている。燃焼度クレジットを燃料デブリの臨界管理に適用するためには、使用済燃料の同位体組成の計算精度と同位体組成の計算値と測定値の差異が実効増倍率に与える影響について検証する必要がある。日本原子力研究開発機構では使用済燃料の同位体組成の参照解を得ることを目的として燃焼計算コード SWAT4.0 を開発した。SWAT4.0 の計算精度を検証するため、東京電力福島第二原子力発電所2号機の8×8BWR燃料集合体(2F2DN23)のPIE 解析を実施した。また、PIEの計算値と測定値の差異が無限ピンセル体系において実効増倍率に与える影響について調査した。その結果、<sup>237</sup>Np、<sup>238</sup>Pu 及び Sm 同位体以外の核種については測定値とよく一致する結果となった。また、SWAT4.0 の核種組成と PIE によって得られた核種組成を使用して評価された中性子増倍率の差異は最大で約2%であることが分かった。

原子力科学研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4 ※1 技術開発協力員

#### Analysis of Post Irradiation Examination of Used BWR Fuel with SWAT4.0

Takeo KIKUCHI<sup>\*\*1</sup>, Kenichi TADA, Takao SAKINO<sup>\*\*1</sup> and Kenya SUYAMA

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

(Received December 26, 2017)

The criticality management of the fuel debris is one of the most important research issues in the countermeasure of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. The current criticality management of used nuclear fuel (UNF) in Japan uses the fresh fuel assumption. This assumption is difficult to be applied because the  $k_{eff}$  of the fuel debris could exceed 1.0 in most of cases which the fuel debris contains water and does not contain such neutron absorbers as gadolinium. Therefore, the adoption of the burnup credit is considered. The prediction accuracy of the isotopic composition of UNF and its impact on the keff calculation must be validated. Japan Atomic Energy Agency developed a burnup calculation code SWAT4.0 to obtain reference calculation results of the isotopic composition of UNF. In order to investigate the prediction accuracy of SWAT4.0, we analyzed the post-irradiation examinations (PIE) of boiling water reactor fuel (BWR) obtained from 2F2DN23 assembly, which is an  $8 \times 8$  STEP-I BWR fuel assembly irradiated in the Fukushima Daini Nuclear Power Station Unit 2. The impact of the difference of the isotopic composition on the keff calculation is also investigated in infinite pin-cell geometry. These results revealed that the number density of many heavy nuclides and fission products show good agreement with the experimental data, except for those of <sup>237</sup>Np, <sup>238</sup>Pu, and samarium isotopes, and the difference between keff evaluated by using experimental results and SWAT4.0 calculation is 2%. Today we cannot ignore the risk of health and/or environment by energy production such as power generation since the risk has been made large enough. In this report an information survey has been done in order to know the outline and points of risk assessment.

Keywords: Fuel Debris, SWAT4.0, Post Irradiation Examination, 2F2DN23, Burnup Credit

<sup>%1</sup> Collaborating Engineer

# 目 次

1.	序論	1
2.	BWR 燃料集合体(2F2DN23)の照射後試験	2
3.	SWAT4.0 による燃焼計算の条件	4
4.	SWAT4.0 による解析の結果	.17
	4.1 SF98 及び SF99 の計算値と測定値の比較	.17
	4.2 Gd 同位体比の計算値と測定値の比較	.17
	4.3 SF98 及び SF99 の計算値と測定値の差異の大きい核種の要因調査	.17
5.	SWAT4.0の不確かさが実効増倍率に与える影響評価	.38
6.	結論	.41
謝	辞	.42
参	考文献	.42
付	録	.45

## Contents

1.	Introduction	1
2.	Post Irraddiation Examination of BWR Fuel (2F2DN23)	2
3.	Calculation Conditions of SWAT4.0	4
4.	Calculation Results of SWAT4.0	17
	4.1 Comparison of the Isotopic Composition of SF98 and SF99	17
	4.2 Comparison of the Isotopic Ratio of Gd	17
	4.3 Investigation of the Causes of the Difference of Isotopic Composition	17
5.	Investigation of Impact of Prediction Accuracy of SWAT4.0 on k-eff	38
6.	Conclusions	41
Ac	knowledgments	42
Re	ferences	42
Ap	pendix	45

# 表リスト

表 2.1	2F2DN23 の各燃料棒の濃縮度 <sup>7)</sup>	3
表 2.2	燃料サンプルの軸方向取得位置 <sup>7)</sup>	3
表 3.1	UO2-Gd2O3燃料棒の等面積 12 分割半径	8
表 3.2	燃料サンプルの軸方向取得位置における冷却材温度 <sup>7)</sup>	8
表 3.3	燃料サンプルの軸方向取得位置における冷却材のボイド率 <sup>7)</sup>	9
表 3.4	SF98 の軸方向サンプル取得位置における各燃料棒の <sup>235</sup> U 濃縮度[wt%] <sup>7)</sup>	9
表 3.5	SF99 の軸方向サンプル取得位置における各燃料棒の <sup>235</sup> U濃縮度[wt%] <sup>7)</sup>	9
表 3.6	軸方向サンプル取得位置における UO2-Gd2O3 燃料中の Gd2O3 濃度[wt%] <sup>7)</sup>	.10
表 3.7	SF98 の軸方向サンプル取得位置における各燃料棒の原子数密度[10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> ]	.11
表 3.8	SF99 の軸方向サンプル取得位置における各燃料棒の原子数密度[10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> ]	.12
表 3.9	冷却材の原子数密度[10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> ]、温度及びボイド率	.13
表 3.10	被覆管・チャンネルボックス原子数密度(SF98、SF99 共通) <sup>12)</sup>	.13
表 3.11	SF98 の照射履歴 <sup>7)</sup>	.14
表 3.12	SF99の照射履歴(1/2) <sup>7)</sup>	.15
表 3.13	SF99の照射履歴(2/2) <sup>7)</sup>	.16
表 4.1	SF98 における SWAT4.0 の計算値と測定値の比較	.21
表 4.2	SF99 における SWAT4.0 の計算値と測定値の比較	.23
表 4.3	SF99 における Gd 同位体比の SWAT4.0 の計算値と測定値 <sup>7)</sup> の比較	.23
表 4.4	SF98-4 及び SF98-6 のボイド率変化に対する C/E 値への影響	.26
表 4.5	SF98-4 及び SF98-6 の <sup>236</sup> Uの核データライブラリ変更による C/E 値への影響	.31
表 4.6	SF98-4 及び SF98-6 の <sup>238</sup> Uの核データライブラリ変更による C/E 値への影響	.34
表 4.7	SF98-4 及び SF98-6 の <sup>237</sup> Np の核データライブラリ変更による C/E 値への影響	.37
表 5.1	SF98 の核種組成の差異が実効増倍率に与える影響	.39
表 5.2	SF99の核種組成の差異が実効増倍率に与える影響	.40
表 A.1	SF98 における核種生成量の測定値[g/tHM] <sup>7)</sup>	.47
表 A.2	SF99 における核種生成量の測定値[g/tHM] <sup>7)</sup>	.48
表 A.3	SF98 における核種生成量の SWAT4.0 の計算値[g/tHM]	.49
表 A.4	SF99 における核種生成量の SWAT4.0 の計算値[g/tHM]	.50
表 A.5	SF99 の Gd 同位体比の SWAT4.0 の計算値	.50
表 A.6	SF98-4及びSF98-6のボイド率変化に対する核種生成量のSWAT4.0の計算値[g/tH	M]
		.51
表 A.7	SF98-4 及び SF98-6 の <sup>236</sup> Uの核データライブラリを変更した SWAT4.0 の計算値[g/tH	M]
		.52

3 SF98-4 及び SF98-6 の <sup>238</sup> Uの核データライブラリを変更した SWAT4.0 の計算値[g/tHM]	表 A.8
SF98-4及びSF98-6の <sup>237</sup> Npの核データライブラリを変更したSWAT4.0の計算値[g/tHM]	表A.9
10 SF98の核種組成を測定値から SWAT4.0の計算値に変更した場合の実効増倍率55	表 A.10

表 A.11 SF99の核種組成を測定値から SWAT4.0の計算値に変更した場合の実効増倍率....56

図リスト

図 2.1	2F2DN23の燃料棒と水ロッドの配置及びサンプル取得燃料棒位置 <sup>7)</sup>	2
図 3.1	集合体幾何形状・寸法[mm] <sup>7)</sup>	6
図 3.2	UO2燃料棒及び UO2-Gd2O3燃料棒の外径、内径[mm] <sup>7)</sup>	6
図 3.3	水ロッドの外径、内径[mm] <sup>7)</sup>	7
図 3.4	UO2-Gd2O3燃料棒の等面積 12 分割の例	7
図 3.5	軸方向ボイド率分布(BWR の典型的なボイド率分布) <sup>7)</sup>	7
図 4.1	SF98 における SWAT4.0 の計算値と測定値の比較	
図 4.2	SF99 における SWAT4.0 の計算値と測定値の比較	
図 4.3	SF98-4 のボイド率変化に対する C/E 値への影響	
図 4.4	SF98-6 のボイド率変化に対する C/E 値への影響	
図 4.5	JENDL-4.0 と ENDF-B/VII.1 の <sup>236</sup> U の (n, γ) 断面積の比較	
図 4.6	JENDL-4.0 と ENDF-B/VII.1 の <sup>238</sup> U の (n,2n) 断面積の比較	
図 4.7	JENDL-4.0 と ENDF-B/VII.1 の <sup>237</sup> Np の (n, γ) 断面積の比較	
図 4.8	SF98-4 の <sup>236</sup> Uの核データライブラリ変更による C/E 値への影響	
図 4.9	SF98-6 の <sup>236</sup> Uの核データライブラリ変更による C/E 値への影響	
図 4.10	SF98-4 の <sup>238</sup> U の核データライブラリ変更による C/E 値への影響	
図 4.11	SF98-6 の <sup>238</sup> Uの核データライブラリ変更による C/E 値への影響	
図 4.12	SF98-4 の <sup>237</sup> Np の核データライブラリ変更による C/E 値への影響	
図 4.13	SF98-6 の <sup>237</sup> Np の核データライブラリ変更による C/E 値への影響	
図 5.1	ピンセル計算の体系	

## 1. 序論

東京電力福島第一原子力発電所の1号機から3号機の炉内には、2011年3月11日に発生 した東日本大震災に起因する事故により、燃料デブリが堆積していると考えられている<sup>1)</sup>。 堆積している燃料デブリの正確な性状は明らかではなく、燃料デブリを取り出す際はその 性状の不確かさゆえに慎重な臨界管理を必要とする。しかしながら、構造材などを含む燃料 デブリは大量であり、燃料デブリの臨界安全評価においては、安全裕度を適切に合理化する 観点から、燃焼度クレジット<sup>2)</sup>を適用することが望まれている。燃焼度クレジットを燃料デ ブリの臨界安全評価に適用するためには、燃焼燃料の同位体組成評価に対する精度検証が 必要である。

日本原子力研究開発機構では、照射後試験解析、核変換処理評価、あるいは燃焼度クレジ ットの適用性評価を目的とした統合燃焼計算コードシステム SWAT コード<sup>3)</sup>を開発してお り、使用済燃料の同位体組成の参照解を与えるコードとしての利用が期待されており、燃料 デブリの臨界安全評価で用いる標準的な同位体組成導出に使用されていることから、SWAT コードの解析精度の検証は重要である。これまでも SWAT コードを用いた照射後試験(Post Irradiation Examination : PIE)解析を実施し、その解析精度が検証されてきた<sup>46</sup>。しかし、 BWR 燃料を対象とした SWAT コードの解析精度の検証については十分に実施していない。 そこで、日本原子力研究開発機構では平成 26 年度及び平成 27 年度に SWAT コードの最新 版である SWAT4.0 の解析精度の検証を目的として、東京電力福島第二原子力発電所 2 号機 の BWR 燃料集合体(2F2DN23)の PIE で得られた使用済燃料の同位体組成測定データ<sup>7</sup>の 解析を実施した。

本報告書の構成は次の通りである。第2章では、解析の対象である 2F2DN23 で用いられ ている燃料集合体の概要を説明する。第3章では、2F2DN23 を対象とした SWAT4.0 による 燃焼計算の計算条件について説明する。第4章では、使用済燃料に対する SWAT4.0 の計算 結果と照射後試験の測定値との比較の結果を示す。第5章では、測定値と SWAT4.0 の計算 値の差異(不確かさ)が実効増倍率に与える影響を評価するため、単一ピンセル計算による 実効増倍率の差異を示す。最後に第6章で本報告書の成果をまとめる。

## 2. BWR 燃料集合体(2F2DN23)の照射後試験

本研究の解析対象は東京電力福島第二原子力発電所 2 号機で使用された BWR 燃料集合体 (2F2DN23)の PIE で得られた同位体組成測定データとした。2F2DN23 は旧日本原子力 研究所で 1990 年代に実施された PIE において測定された燃料集合体である<sup>7)</sup>。2F2DN23 は 8×8の STEP1 燃料であり、その平均燃焼度は 33.4 [GWd/t]である。

2F2DN23 の燃料棒と水ロッドの配置及び測定対象となった燃料棒の径方向位置を図 2.1 に、各燃料棒の濃縮度を表 2.1 に示す。2F2DN23 は図 2.1、表 2.1 に示すように、濃縮度の 異なる 5 種類の UO<sub>2</sub>燃料棒及び 1 種類の UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>燃料棒で構成しており、中心部に 2 本 の太径水ロッドが配置されている。測定対象の燃料棒は図 2.1 に示すように集合体の左上に 位置する濃縮度の最も高い UO<sub>2</sub>燃料棒とその隣の UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>燃料棒である。これらの燃料 棒には、それぞれ SF98、SF99 という名称が付けられている。測定試験では表 2.2 に示すよ うに、SF98 から 8 サンプル、SF99 から 10 サンプルが取得された。UO<sub>2</sub>燃料棒及び UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>燃料棒の有効長約 3710 [mm] (24 ノード)の内、上下約 155 [mm] (1 ノード)は天然 ウラン領域である。取得されたサンプルの内、SF98-1 は天然ウラン領域に含まれており、 SF99-1 と SF99-10 は天然ウランの近接領域に位置している。



 Rod ID (1~5: UO2燃料棒、G: UO2-Gd2O3燃料棒、W: 水ロッド)

 図 2.1 2F2DN23の燃料棒と水ロッドの配置及びサンプル取得燃料棒位置<sup>7)</sup>

	DedID	Bad ID 軸方向平均测	
	Kou ID	<sup>235</sup> U	$Gd_2O_3$
	1	3.63	
	2	3.22	
UO2燃料棒	3	3.18	_
	4	2.72	
	5	1.89	
UO2-Gd2O3燃料棒	G	3.18	3.94
水ロッド	W		_

表 2.1 2F2DN23 の各燃料棒の濃縮度<sup>7)</sup>

表 2.2 燃料サンプルの軸方向取得位置 7)

サンプル	燃料下端からの	サンプル	燃料下端からの
	距離[mm]	距離[mm] 距離[m	
SF98-1	39	SF99-1	134
SF98-2	167	SF99-2	286
SF98-3	423	SF99-3	502
SF98-4	692	SF99-4	686
SF98-5	1214	SF99-5	1189
SF98-6	2050	SF99-6	2061
SF98-7	2757	SF99-7	2744
SF98-8	3397	SF99-8 3388	
		SF99-9	3540
		SF99-10	3676

#### 3. SWAT4.0 による燃焼計算の条件

本解析では、燃焼計算コードとして SWAT4.0 を使用し、計算条件は参考文献 7 を参考に 設定した。なお、SWAT4.0 は中性子輸送計算コードとして、MVP<sup>8)</sup>、SRAC2006<sup>9)</sup>及び MCNP5<sup>10)</sup> を使用することが出来るが、本研究では中性子輸送計算コードとして MVP を用いた。核デ ータライブラリは JENDL-4.0 を使用したが、<sup>156</sup>Eu については JENDL-4.0ul を使用した。こ れは、JENDL-4.0 の<sup>156</sup>Eu の (n, $\gamma$ ) 断面積は過大評価であると指摘されており、JENDL-4.0ul で修正されているためである。<sup>156</sup>Eu の (n, $\gamma$ ) 断面積は <sup>157</sup>Gd と <sup>158</sup>Gd の生成量評価に大きく 影響することから、<sup>157</sup>Gd と <sup>158</sup>Gd の生成量評価の高精度化のため、JENDL-4.0ul を用いた。

燃料デブリの燃料組成は、燃料のどの領域が溶けているかが分からないため、2次元単一 燃料集合体体系の計算で得られた燃料組成の内、最も実効増倍率が高くなる組成を用いる ことが考えられる。このように、燃料デブリの臨界評価で2次元単一燃料集合体体系を用い ていることを踏まえ、SWAT4.0の解析精度の検証でも、2次元単一燃料集合体体系の解析を 行うこととした。ただし、SF98-1とSF98-2及びSF99-1とSF99-10は計算から除外した。 これらの燃料サンプルは前章で述べた通り、天然ウラン及びその近接領域に位置する燃料 サンプルであり、軸方向の中性子束分布の変化が大きく、今回のような2次元単一燃料集合 体体系では十分な解析精度は得られないためである。なお、天然ウラン領域やその近接領域 の燃料集合体は、濃縮度が低く、これらの領域が臨界安全性の評価上で最も厳しい条件には なることはない。このため、これらの領域を除外しても、SWAT4.0 コードの解析精度の評価 上は問題ない。

集合体のチャンネルボックス、水ギャップ及び燃料棒ピッチの寸法は図 3.1 に示す値を使用した。また、UO2燃料棒と UO2-Gd2O3燃料棒における被覆管及び水ロッドの外径、内径は図 3.2、図 3.3 に示す値を使用した。

UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>燃料棒内部の中性子束は<sup>155</sup>Gd、<sup>157</sup>Gdの高い吸収断面積のため、燃料棒の内部 に行くほど中性子束が減少し、下に凸の形状となることから、Gdの原子数密度は中性子束 の高い外周部から減少していく。そのため、燃料棒内部を分割しなければ計算精度が悪化す ることが知られている。本研究では、Gdの減少を適切に評価するため、図 3.4 及び表 3.1 に 示すように燃料領域を等面積で12 分割した。

燃料及び被覆管の温度はそれぞれ 900.0 [K]と 600.0 [K]とした<sup>7)</sup>。また、冷却材の温度は表 3.2 に示す軸方向の温度分布を考慮した値を使用した。軸方向のボイド率分布は参考文献 7 で与えられている、BWR 燃料集合体の典型的なボイド率分布を使用することとした。その データを図 3.5 及び表 3.3 に示す。なお、径方向のボイド率分布は原子炉の炉心解析と同様 に一定と仮定した。

<sup>235</sup>Uの初期濃縮度分布は参考文献7では、集合体平均濃縮度と、軸方向平均濃縮度、各軸 方向位置での径方向平均濃縮度のみが記載されている。本解析では、表 3.4 及び表 3.5 に示 すように、参考文献7 で与えられている各平均濃縮度を保存するように各燃料棒の濃縮度 を設定した。なお、UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>燃料中のGd濃縮度については、径方向で異なる値が入っていることは考えにくいことから、表 3.6 に示す通り、参考文献 7 の各軸方向での径方向平均 濃縮度をそのまま適用した。

表 3.4 から表 3.6 に示した濃縮度、UO<sub>2</sub>燃料の密度 10.26 [g/cm<sup>3</sup>]、UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>燃料の密度 10.12 [g/cm<sup>3</sup>]及び原子量を用いて計算した UO<sub>2</sub>燃料及び UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>燃料に考慮した核種と 原子数密度を表 3.7 及び表 3.8 に示す。

チャンネルボックス内の冷却水、水ギャップ及び水ロッド内冷却水の原子数密度は表 3.9 に示す値を設定した。ここで、冷却水の密度は圧力 70.0 [kg/cm<sup>2</sup>]<sup>7)</sup>であり、ボイド率、冷却 水温度をパラメータとして、参考文献 11 の付録プログラムを使用し、比体積の逆数から求 めた。

被覆管及びチャンネルボックスに使われるジルカロイ2の原子数密度は参考文献12に記載されている STEP3 燃料の被覆管、水チャンネル及びチャンネルボックスの原子数密度である表3.10の値を使用した。参考文献12では、天然元素の原子数密度が記載されていたため、存在比を用いて同位体核種毎の原子数密度を算出した。

SF98 及び SF99 に対する照射履歴は表 3.11 から表 3.13 に示す評価値を使用した。UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>燃料棒は、燃焼が進むにつれて吸収断面積の大きい<sup>155</sup>Gd 及び<sup>157</sup>Gd から吸収断面積 の小さい<sup>156</sup>Gd 及び<sup>158</sup>Gd に変換される。BWR 燃料集合体の燃焼計算では燃料棒中の<sup>155</sup>Gd 及び<sup>157</sup>Gd の変化を詳細に追わなければ計算精度が悪化することが知られており<sup>13)、155</sup>Gd 及び<sup>157</sup>Gd が変換されて無くなるまでは燃焼ステップを細かくとる必要がある。そこで本解 析では、<sup>155</sup>Gd 及び<sup>157</sup>Gd が変換されて無くなる 15 [GWd/t]まで、燃焼ステップの刻み幅を 約 0.5 [GWd/t]に設定した。15 [GWd/t]以降は燃焼ステップの刻み幅を約 1.0 [GWd/t]に設定し た。また、サイクル初期の数ステップは約 0.1 [GWd/t]とした。

SWAT4.0 の各燃焼ステップにおける MVP の計算では、1 バッチ当たりのヒストリ数を 10,000、バッチ数を 1,100 とし、初期 100 バッチを捨てバッチとして統計から除外した。

- 5 -



図 3.1 集合体幾何形状·寸法[mm]<sup>7)</sup>



図 3.2 UO2燃料棒及び UO2-Gd2O3燃料棒の外径、内径[mm]7)



図 3.5 軸方向ボイド率分布 (BWR の典型的なボイド率分布) 7)

Gd 領域番号	半径[mm]
1	1.53
2	2.16
3	2.65
4	3.05
5	3.41
6	3.74
7	4.04
8	4.32
9	4.58
10	4.83
11	5.06
12	5.29

表 3.1 UO2-Gd2O3燃料棒の等面積 12 分割半径

表 3.2 燃料サンプルの軸方向取得位置における冷却材温度 7)

サンプル	温度[K]	サンプル	温度[K]
SF98-3	556.00	SF99-2	554.95
SF98-4	559.15	SF99-3	556.91
SF98-5	559.15	SF99-4	559.15
SF98-6	559.15	SF99-5	559.15
SF98-7	559.15	SF99-6	559.15
SF98-8	559.15	SF99-7	559.15
		SF99-8	559.15
		SF99-9	559.15

サンプル	ボイド率[%]	サンプル	ボイド率[%]
SF98-3	3.0	SF99-2	1.4
SF98-4	17.5	SF99-3	5.8
SF98-5	42.0	SF99-4	16.8
SF98-6	62.5	SF99-5	41.0
SF98-7	68.0	SF99-6	62.8
SF98-8	73.0	SF99-7	67.7
		SF99-8	72.9
		SF99-9	73.7

表 3.3 燃料サンプルの軸方向取得位置における冷却材のボイド率<sup>7)</sup>

表 3.4 SF98 の軸方向サンプル取得位置における各燃料棒の<sup>235</sup>U濃縮度[wt%]<sup>7)</sup>

サンプル	Rod ID								
9 2 9 70	1	2	3	4	5	G			
SF98-3	3.9	2.9	3.4	2.9	2.0	3.4			
SF98-4	3.9	2.9	3.4	2.9	2.0	3.4			
SF98-5	3.9	2.9	3.4	2.9	2.0	3.4			
SF98-6	3.9	3.9	3.4	2.9	2.0	3.4			
SF98-7	3.9	3.9	3.4	2.9	2.0	3.4			
SF98-8	3.9	2.9	3.4	2.9	2.0	3.4			

表 3.5 SF99 の軸方向サンプル取得位置における各燃料棒の<sup>235</sup>U濃縮度[wt%]<sup>7)</sup>

サンプル			Roc	l ID		
9 2 9 77	1	2	3	4	5	G
SF99-2	3.9	2.9	3.4	2.9	2.0	3.4
SF99-3	3.9	2.9	3.4	2.9	2.0	3.4
SF99-4	3.9	2.9	3.4	2.9	2.0	3.4
SF99-5	3.9	2.9	3.4	2.9	2.0	3.4
SF99-6	3.9	3.9	3.4	2.9	2.0	3.4
SF99-7	3.9	3.9	3.4	2.9	2.0	3.4
SF99-8	3.9	2.9	3.4	2.9	2.0	3.4
SF99-9	3.9	2.9	3.4	2.9	2.0	3.4

サンプル	Rod ID	サンプル	Rod ID
9 2 7 12	G	9 2 7 10	G
SF98-3	4.5	SF99-2	4.5
SF98-4	4.5	SF99-3	4.5
SF98-5	4.5	SF99-4	4.5
SF98-6	4.5	SF99-5	4.5
SF98-7	4.5	SF99-6	4.5
SF98-8	3.0	SF99-7	4.5
		SF99-8	3.0
		SF99-9	3.0

表 3.6 軸方向サンプル取得位置における UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>燃料中の Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>濃度[wt%]<sup>7)</sup>

Rod ID	核種	SF98-3	SF98-4	SF98-5	SF98-6	SF98-7	SF98-8
	<sup>234</sup> U	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06
1	<sup>235</sup> U	9.02E-04	9.02E-04	9.02E-04	9.02E-04	9.02E-04	9.02E-04
1	<sup>238</sup> U	2.20E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.20E-02
	<sup>16</sup> O	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02
	<sup>234</sup> U	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06
2	<sup>235</sup> U	6.71E-04	6.71E-04	6.71E-04	9.02E-04	9.02E-04	6.71E-04
2	<sup>238</sup> U	2.22E-02	2.22E-02	2.22E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.22E-02
	<sup>16</sup> O	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02
	<sup>234</sup> U	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06
3	<sup>235</sup> U	7.87E-04	7.87E-04	7.87E-04	7.87E-04	7.87E-04	7.87E-04
5	<sup>238</sup> U	2.21E-02	2.21E-02	2.21E-02	2.21E-02	2.21E-02	2.21E-02
	<sup>16</sup> O	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02
	<sup>234</sup> U	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06
4	<sup>235</sup> U	6.71E-04	6.71E-04	6.71E-04	6.71E-04	6.71E-04	6.71E-04
4	<sup>238</sup> U	2.22E-02	2.22E-02	2.22E-02	2.22E-02	2.22E-02	2.22E-02
	<sup>16</sup> O	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02
	<sup>234</sup> U	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06	9.29E-06
5	<sup>235</sup> U	4.63E-04	4.63E-04	4.63E-04	4.63E-04	4.63E-04	4.63E-04
5	<sup>238</sup> U	2.24E-02	2.24E-02	2.24E-02	2.24E-02	2.24E-02	2.24E-02
	<sup>16</sup> O	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02	4.58E-02
	<sup>234</sup> U	6.56E-06	6.56E-06	6.56E-06	6.56E-06	6.56E-06	6.70E-06
	<sup>235</sup> U	7.41E-04	7.41E-04	7.41E-04	7.41E-04	7.41E-04	7.56E-04
	<sup>238</sup> U	2.08E-02	2.08E-02	2.08E-02	2.08E-02	2.08E-02	2.12E-02
	<sup>154</sup> Gd	3.02E-06	3.02E-06	3.02E-06	3.02E-06	3.02E-06	2.03E-06
G	<sup>155</sup> Gd	3.30E-05	3.30E-05	3.30E-05	3.30E-05	3.30E-05	2.21E-05
U	<sup>156</sup> Gd	2.24E-04	2.24E-04	2.24E-04	2.24E-04	2.24E-04	1.50E-04
	<sup>157</sup> Gd	3.10E-04	3.10E-04	3.10E-04	3.10E-04	3.10E-04	2.07E-04
	<sup>158</sup> Gd	2.37E-04	2.37E-04	2.37E-04	2.37E-04	2.37E-04	1.59E-04
	$^{160}$ Gd	3.76E-04	3.76E-04	3.76E-04	3.76E-04	3.76E-04	2.52E-04
	<sup>16</sup> O	3.31E-04	3.31E-04	3.31E-04	3.31E-04	3.31E-04	2.21E-04

表 3.7 SF98 の軸方向サンプル取得位置における各燃料棒の原子数密度[10<sup>24</sup>個/cm<sup>3</sup>]

Rod ID	核種	SF99-2	SF99-3	SF99-4	SF99-5	SF99-6	SF99-7	SF99-8	SF99-9
	<sup>234</sup> U	9.29E-06							
1	<sup>235</sup> U	9.02E-04							
1	<sup>238</sup> U	2.20E-02							
	<sup>16</sup> O	4.58E-02							
	<sup>234</sup> U	9.29E-06							
2	<sup>235</sup> U	6.71E-04	6.71E-04	6.71E-04	6.71E-04	9.02E-04	9.02E-04	6.71E-04	6.71E-04
2	<sup>238</sup> U	2.22E-02	2.22E-02	2.22E-02	2.22E-02	2.20E-02	2.20E-02	2.22E-02	2.22E-02
Rod ID 1 2 3 4 5 G	<sup>16</sup> O	4.58E-02							
	<sup>234</sup> U	9.29E-06							
2	<sup>235</sup> U	7.87E-04							
5	<sup>238</sup> U	2.21E-02							
	<sup>16</sup> O	4.58E-02							
	<sup>234</sup> U	9.29E-06							
4	<sup>235</sup> U	6.71E-04							
	<sup>238</sup> U	2.22E-02							
	<sup>16</sup> O	4.58E-02							
	<sup>234</sup> U	9.29E-06							
4	<sup>235</sup> U	4.63E-04							
5	<sup>238</sup> U	2.24E-02							
	<sup>16</sup> O	4.58E-02							
	<sup>234</sup> U	6.56E-06	6.56E-06	6.56E-06	6.56E-06	6.56E-06	6.56E-06	6.70E-06	6.70E-06
	<sup>235</sup> U	7.41E-04	7.41E-04	7.41E-04	7.41E-04	7.41E-04	7.41E-04	7.56E-04	7.56E-04
	<sup>238</sup> U	2.08E-02	2.08E-02	2.08E-02	2.08E-02	2.08E-02	2.08E-02	2.12E-02	2.12E-02
	<sup>154</sup> Gd	3.02E-06	3.02E-06	3.02E-06	3.02E-06	3.02E-06	3.02E-06	2.03E-06	2.03E-06
G	<sup>155</sup> Gd	3.30E-05	3.30E-05	3.30E-05	3.30E-05	3.30E-05	3.30E-05	2.21E-05	2.21E-05
0	<sup>156</sup> Gd	2.24E-04	2.24E-04	2.24E-04	2.24E-04	2.24E-04	2.24E-04	1.50E-04	1.50E-04
	<sup>157</sup> Gd	3.10E-04	3.10E-04	3.10E-04	3.10E-04	3.10E-04	3.10E-04	2.07E-04	2.07E-04
	<sup>158</sup> Gd	2.37E-04	2.37E-04	2.37E-04	2.37E-04	2.37E-04	2.37E-04	1.59E-04	1.59E-04
	<sup>160</sup> Gd	3.76E-04	3.76E-04	3.76E-04	3.76E-04	3.76E-04	3.76E-04	2.52E-04	2.52E-04
	<sup>16</sup> O	3.31E-04	3.31E-04	3.31E-04	3.31E-04	3.31E-04	3.31E-04	2.21E-04	2.21E-04

表 3.8 SF99 の軸方向サンプル取得位置における各燃料棒の原子数密度[10<sup>24</sup>個/cm<sup>3</sup>]

	チャンクル	ボックフ内	チャンネル	ボックス外		
	ノインイル	ホックス内	(ボイド	率 0 [%])		
	Н	0	Н	Ο	温度[K]	ボイド率[%]
SF98-3	4.84E-02	2.42E-02	4.98E-02	2.49E-02	556.00	3.0
SF98-4	4.13E-02	2.07E-02	4.96E-02	2.48E-02	559.15	17.5
SF98-5	2.98E-02	1.49E-02	4.96E-02	2.48E-02	559.15	42.0
SF98-6	2.01E-02	1.00E-02	4.96E-02	2.48E-02	559.15	62.5
SF98-7	1.75E-02	8.74E-03	4.96E-02	2.48E-02	559.15	68.0
SF98-8	1.51E-02	7.56E-03	4.96E-02	2.48E-02	559.15	73.0
SF99-2	4.93E-02	2.47E-02	5.00E-02	2.50E-02	554.95	1.4
SF99-3	4.70E-02	2.35E-02	4.97E-02	2.49E-02	556.91	5.8
SF99-4	4.17E-02	2.08E-02	4.96E-02	2.48E-02	559.15	16.8
SF99-5	3.02E-02	1.51E-02	4.96E-02	2.48E-02	559.15	41.0
SF99-6	1.99E-02	9.97E-03	4.96E-02	2.48E-02	559.15	62.8
SF99-7	1.76E-02	8.81E-03	4.96E-02	2.48E-02	559.15	67.7
SF99-8	1.52E-02	7.59E-03	4.96E-02	2.48E-02	559.15	72.9
SF99-9	1.48E-02	7.40E-03	4.96E-02	2.48E-02	559.15	73.7

表 3.9 冷却材の原子数密度[10<sup>24</sup>個/cm<sup>3</sup>]、温度及びボイド率

表 3.10 被覆管・チャンネルボックス原子数密度(SF98、SF99 共通)<sup>12)</sup>

长话	原子数密度	拉话	原子数密度
修悝	[10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> ]	修悝	[10 <sup>24</sup> 個/cm <sup>3</sup> ]
<sup>112</sup> Sn	4.83E-06	<sup>50</sup> Cr	3.30E-06
<sup>114</sup> Sn	3.24E-06	<sup>52</sup> Cr	6.36E-05
<sup>115</sup> Sn	1.69E-06	<sup>53</sup> Cr	7.21E-06
<sup>116</sup> Sn	7.24E-05	<sup>54</sup> Cr	1.79E-06
<sup>117</sup> Sn	3.82E-05	<sup>58</sup> Ni	2.74E-05
<sup>118</sup> Sn	1.21E-04	<sup>60</sup> Ni	1.06E-05
<sup>119</sup> Sn	4.28E-05	<sup>61</sup> Ni	4.60E-07
<sup>120</sup> Sn	1.62E-04	<sup>62</sup> Ni	1.47E-06
<sup>122</sup> Sn	2.31E-05	<sup>64</sup> Ni	3.73E-07
<sup>124</sup> Sn	2.88E-05	<sup>90</sup> Zr	2.18E-02
<sup>54</sup> Fe	5.32E-06	<sup>91</sup> Zr	4.76E-03
<sup>56</sup> Fe	8.42E-05	<sup>92</sup> Zr	7.28E-03
<sup>57</sup> Fe	2.02E-06	<sup>94</sup> Zr	7.38E-03
<sup>58</sup> Fe	2.57E-07	<sup>96</sup> Zr	1.19E-03

日数	比出力[MW/t]									
[d]	SF98-3	SF98-4	SF98-5	SF98-6	SF98-7	SF98-8				
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
6	11.29	12.95	13.45	12.21	12.05	8.31				
3	28.50	32.68	33.95	30.81	30.41	20.98				
132	35.14	40.29	41.84	37.98	37.49	25.86				
21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
5	12.73	14.59	15.16	13.76	13.58	9.37				
244	30.65	35.15	36.51	33.13	32.70	22.56				
8	35.49	40.70	42.27	38.36	37.87	26.12				
117	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
5	12.73	14.59	15.16	13.76	13.58	9.37				
317	30.65	35.15	36.51	33.13	32.70	22.56				
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
4	13.27	15.21	15.80	14.34	14.15	9.76				
72	31.19	35.76	37.15	33.71	33.28	22.95				
10	35.14	40.29	41.84	37.98	37.49	25.86				
81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
3	14.52	16.65	17.29	15.69	15.49	10.69				
365	32.45	37.20	38.64	35.07	34.62	23.88				

表 3.11 SF98 の照射履歴<sup>7)</sup>

日数		比出力	[MW/t]	
[d]	SF99-2	SF99-3	SF99-4	SF99-5
0	0.00	0.00	0.00	0.00
6	6.92	9.92	10.83	11.44
3	17.46	25.03	27.33	28.87
132	21.53	30.86	33.69	35.58
21	0.00	0.00	0.00	0.00
5	7.80	11.18	12.21	12.89
244	18.78	26.92	29.40	31.05
8	21.75	31.17	34.04	35.95
117	0.00	0.00	0.00	0.00
5	7.80	11.18	12.21	12.89
317	18.78	26.92	29.40	31.05
9	0.00	0.00	0.00	0.00
4	8.13	11.65	12.72	13.44
72	19.11	27.39	29.91	31.59
10	21.53	30.86	33.69	35.58
81	0.00	0.00	0.00	0.00
3	8.90	12.75	13.92	14.71
365	19.88	28.50	31.11	32.86

表 3.12 SF99 の照射履歴 (1/2)<sup>7)</sup>

日数		比出力	[MW/t]	
[d]	SF99-6	SF99-7	SF99-8	SF99-9
0	0.00	0.00	0.00	0.00
6	9.89	9.82	6.67	5.09
3	24.97	24.79	16.84	12.85
132	30.78	30.56	20.76	15.84
21	0.00	0.00	0.00	0.00
5	11.15	11.07	7.52	5.74
244	26.85	26.66	18.12	13.82
8	31.09	30.87	20.98	16.00
117	0.00	0.00	0.00	0.00
5	11.15	11.07	7.52	5.74
317	26.85	26.66	18.12	13.82
9	0.00	0.00	0.00	0.00
4	11.62	11.54	7.84	5.98
72	27.33	27.13	18.43	14.06
10	30.78	30.56	20.76	15.84
81	0.00	0.00	0.00	0.00
3	12.72	12.63	8.58	6.54
365	28.42	28.22	19.17	14.62

表 3.13 SF99 の照射履歴 (2/2)<sup>7)</sup>

#### 4. SWAT4.0 による解析の結果

4.1 SF98 及び SF99 の計算値と測定値の比較

SF98 における SWAT4.0 の計算値と測定値の比 (C/E 値) を図 4.1 及び表 4.1 に示す。主 な重核種である <sup>235</sup>U、<sup>238</sup>U、<sup>239</sup>Pu、<sup>240</sup>Pu、<sup>241</sup>Pu の計算値と測定値の燃料棒平均の差異は最大 4.8%、標準偏差は最大 4.4%となった。一方、<sup>237</sup>Np、<sup>238</sup>Pu の燃料棒平均の差異はどちらも 2% 程度であるが、標準偏差は約 10%と大きく、サンプル間でばらつく結果となった。また、 <sup>241</sup>Am の燃料棒平均の差異は-12.1%と過小評価となった。核分裂生成物 (FP) を見ると、Sm 同位体を過小評価していることが分かった。特に <sup>149</sup>Sm の差異の平均値は-15.6%と他の Sm 同位体に比べて差異が大きく、標準偏差も 12.9%と大きな値となった。

SF99 における SWAT4.0 計算値と測定値の比較を図 4.2 及び表 4.2 に示す。この結果では、 SF99-2、SF99-4、及び SF99-6 に対する Sm 同位体の C/E 値が空欄となっているが、これは 測定値が存在しないためである。主な重核種である <sup>235</sup>U、<sup>238</sup>U、<sup>239</sup>Pu、<sup>240</sup>Pu、<sup>241</sup>Pu の燃料棒 平均の差異は最大 3.2%、標準偏差は最大 3.6%となった。一方、<sup>237</sup>Np、<sup>238</sup>Pu の燃料棒平均 の差異は <sup>237</sup>Np が-11.4%、<sup>238</sup>Pu が 16.0%と大きく、標準偏差は <sup>238</sup>Pu が 11.5%と大きく、サ ンプル間でばらつく結果となった。また、<sup>241</sup>Am の燃料棒平均の差異は-0.6%であるが、標準 偏差は 14.7%と大きいことが分かった。FP については SF98 と同様に、<sup>149</sup>Sm を含む Sm 同 位体を過小評価していることが分かった。

4.2 Gd 同位体比の計算値と測定値の比較

SF99 では、残存 Gd の同位体比の測定も行われている。Gd の減少量は臨界性評価に大き な影響を与えることから、Gd の減少量の適切な評価は非常に重要である。そこで SF99 の 測定値を用いて SWAT4.0 の Gd 減少量の予測精度を評価した。SF99 における Gd 同位体比 の SWAT4.0 の計算値と測定値の比較を表 4.3 に示す。<sup>156</sup>Gd、<sup>158</sup>Gd、<sup>160</sup>Gd については差異が 1%以内となった。しかし、<sup>154</sup>Gd、<sup>155</sup>Gd、<sup>157</sup>Gd については差異が大きく、特に <sup>155</sup>Gd、<sup>157</sup>Gd についてはサンプル毎に差異が大きく異なる結果となった。<sup>154</sup>Gd は元々の天然存在比が低 いこと、また <sup>155</sup>Gd、<sup>157</sup>Gd は捕獲断面積が大きく、燃焼期間中に変換されることから、これ らの核種は他の核種に比べて絶対量が少なくなっている。また、Gd と Eu は同じ希土類元 素であるため化学的に分離することが難しい。そのため、<sup>154</sup>Gd と <sup>155</sup>Gd にはその親核種と なる <sup>154</sup>Eu と <sup>155</sup>Eu を完全に分離しきれずに混合している可能性を否定できない。<sup>156</sup>Gd と <sup>158</sup>Gd に関しては、それらは捕獲断面積が小さく、大きな中性子吸収反応断面積を持つ <sup>155</sup>Gd と <sup>157</sup>Gd からの生成量を含んでいる。<sup>156</sup>Gd と <sup>158</sup>Gd の差異が 1%以内であることから、 SWAT4.0 は <sup>155</sup>Gd と <sup>157</sup>Gd の減少を適切に計算していることが分かる。

4.3 SF98 及び SF99 の計算値と測定値の差異の大きい核種の要因調査

計算値と測定値の差異が大きい核種について、その差異の要因について考察する。

<sup>241</sup>Am の差異が大きい要因として、<sup>241</sup>Am の測定値の不確かさが適切ではない可能性が考 えられる。<sup>241</sup>Am の測定値の不確かさは 2%以内 <sup>7)</sup>であるが、過去に実施された解析 <sup>14)</sup>でも 今回の解析と同様に <sup>241</sup>Am の計算値と測定値の差異が大きいことから、実際の測定の不確 かさは 2%より大きい可能性がある。

Sm 同位体の差異が大きい要因として、燃焼度とボイド率が適切ではない可能性が考えられる。PIE では、燃焼度の測定に<sup>148</sup>Nd の原子数密度を用いる Nd-148 法<sup>15)</sup>を用いている。 図 4.1 を見ると、<sup>148</sup>Nd の計算値は測定値とはほぼ一致していることから、燃焼度について は適切に設定されているものと考えられる。このことから、Sm 同位体の差異が大きい原因 の一つにボイド率が適切に設定できていないことが考えられる。そこで、SF98-4 及び SF98-6 のボイド率を元の値から±10%変化させた場合の計算を実施し、C/E 値に対する影響を評 価した。その結果を図 4.3、図 4.4 及び表 4.4 に示す。この結果から、<sup>149</sup>Sm の C/E 値はボイ ド率の±10%の変化に対して最大で約 5%変化することが分かった。本解析では、BWR の典 型的な軸方向ボイド率分布を使用しており、またボイド率は燃焼期間中一定であると仮定 している。しかし、実際のボイド率分布は仮定したボイド率とは限らず、また燃焼期間中も 一定ではなく、原子炉の運転に伴って変化している。図 4.3、図 4.4 及び表 4.4 の結果を考慮 すると、本解析で仮定したボイド率は適切ではない可能性がある。このことから、Sm 同位 体の解析精度を向上させるためにはプロセスコンピュータのボイド率データなど、より確 からしいボイド率の履歴情報が必要であると考えられる。

<sup>237</sup>Np と <sup>238</sup>Pu の差異が大きい要因として、生成パス上の核種に対する断面積が適切では ない可能性が考えられる。そこで、核データライブラリの変更に対する SWAT4.0 燃焼計算 の結果への影響を調べた。<sup>237</sup>Np と <sup>238</sup>Pu の主な生成パスは次の通りである <sup>16</sup>。

 $^{236}$  U(n,  $\gamma$ ) $^{237}$  U $\xrightarrow{6.75d}$  $^{237}$  Np(n,  $\gamma$ ) $^{238}$  Np $\xrightarrow{2.117d}$  $^{238}$  Pu

 $^{238}$  U(n, 2n) $^{237}$  U  $\xrightarrow{6.75d}$   $^{237}$  Np(n,  $\gamma$ ) $^{238}$  Np  $\xrightarrow{2.117d}$   $^{238}$  Pu

 $^{242}Cm \xrightarrow{162.94d} ^{238}Pu$ 

これらの生成パスのうち、<sup>242</sup>Cm から <sup>238</sup>Pu の生成パスは <sup>242</sup>Cm の測定値が非常に小さく、 <sup>238</sup>Pu の生成に有意な影響を与えないと考えられる。JENDL-4.0 と ENDF/B-VII.1 の <sup>236</sup>U の (n,γ) 断面積、<sup>238</sup>U の (n,2n) 断面積及び <sup>237</sup>Np の (n,γ) 断面積の比較を図 4.5~図 4.7 に示 す。これらの図から、JENDL-4.0 と ENDF/B-VII.1 の <sup>236</sup>U の (n,γ) 断面積、<sup>238</sup>U の (n,2n) 断面積及び <sup>237</sup>Np の (n,γ) 断面積は差異があることが分かる。そこで <sup>236</sup>U、<sup>238</sup>U 及び <sup>237</sup>Np について核データライブラリの影響を調べるため、<sup>236</sup>U、<sup>238</sup>U 及び <sup>237</sup>Np を一核種ずつ JENDL-4.0 から ENDF/B-VII.1 に変更して SWAT4.0 燃焼計算を実施した。サンプルは SF98-4 及び SF98-6 を対象とした。

SF98-4 及び SF98-6 の <sup>236</sup>U の  $(n,\gamma)$  断面積を JENDL-4.0 から ENDF/B-VII.1 に変更した結 果を図 4.8、図 4.9 及び表 4.5 に示す。<sup>237</sup>Np と <sup>238</sup>Pu の C/E 値の変化量は約 2%である。しか し、<sup>237</sup>Np と <sup>238</sup>Pu はどちらも C/E 値が小さくなる方向に変化しており、どちらの核データ ライブラリが適切かどうかを判断することは難しい。

SF98-4 及び SF98-6 の<sup>238</sup>U の (n,2n) 断面積を JENDL-4.0 から ENDF/B-VII.1 に変更した 結果を図 4.10、図 4.11 及び表 4.6 に示す。図 4.10、図 4.11 及び表 4.6 に示す通り、<sup>237</sup>Np と <sup>238</sup>Pu の C/E 値の変化量は約 2%である。しかし、<sup>237</sup>Np と <sup>238</sup>Pu はどちらも C/E 値が大きく なる方向に変化しており、どちらの核データライブラリが適切かどうかを判断することは 難しい。

SF98-4 及び SF98-6 の <sup>237</sup>Np の  $(n,\gamma)$  断面積を JENDL-4.0 から ENDF/B-VII.1 に変更した 結果を図 4.12、図 4.13 及び表 4.7 に示す。<sup>237</sup>Np と <sup>238</sup>Pu の C/E 値の変化量は約 1%と約-2% である。<sup>236</sup>U や <sup>238</sup>U の場合と異なり、JENDL-4.0 から ENDF/B-VII.1 に変更することで <sup>237</sup>Np と <sup>238</sup>Pu の C/E 値は同時に改善した。このことから、JENDL-4.0 の <sup>237</sup>Np の  $(n,\gamma)$  断面積が 過大評価されている可能性が考えられる。



Tastana				C/	E			
Isotope	SF98-3	SF98-4	SF98-5	SF98-6	SF98-7	SF98-8	Ave.	1σ
<sup>235</sup> U	1.020	1.044	0.998	0.962	0.976	1.003	1.000	0.027
<sup>236</sup> U	0.984	0.984	0.994	0.988	0.984	0.965	0.983	0.009
<sup>238</sup> U	1.000	1.000	1.000	1.001	1.002	1.001	1.001	0.001
<sup>237</sup> Np	1.022	0.984	1.220	0.885	0.999	0.990	1.017	0.101
<sup>238</sup> Pu	1.007	1.042	1.103	1.156	0.944	0.880	1.022	0.092
<sup>239</sup> Pu	0.990	1.013	1.012	0.943	0.924	0.934	0.969	0.037
<sup>240</sup> Pu	0.984	0.969	0.993	0.964	0.956	0.958	0.971	0.013
<sup>241</sup> Pu	0.969	1.007	1.002	0.931	0.900	0.901	0.952	0.044
<sup>242</sup> Pu	0.960	0.956	0.988	0.985	0.946	0.932	0.961	0.020
<sup>241</sup> Am	0.820	0.827	0.854	0.917	0.883	0.975	0.879	0.054
<sup>143</sup> Nd	1.016	1.032	1.006	0.997	1.000	1.009	1.010	0.012
<sup>144</sup> Nd	0.973	0.988	1.015	0.997	1.035	1.058	1.011	0.029
<sup>145</sup> Nd	1.009	1.012	1.006	1.014	1.015	1.019	1.013	0.004
<sup>146</sup> Nd	1.018	1.017	1.017	1.009	1.008	1.008	1.013	0.005
<sup>148</sup> Nd	1.003	1.002	1.002	1.001	1.001	1.003	1.002	0.001
<sup>150</sup> Nd	1.011	1.007	1.013	1.003	1.000	0.999	1.006	0.005
<sup>134</sup> Cs	1.007	0.974	1.005	0.960	0.917	1.037	0.983	0.039
<sup>137</sup> Cs	1.097	1.084	1.117	0.983	0.908	1.018	1.035	0.073
<sup>154</sup> Eu	1.018	1.003	1.084	0.940	0.958	0.906	0.985	0.058
<sup>147</sup> Sm	0.908	0.905	0.968	0.972	0.981	0.936	0.945	0.031
$^{148}$ Sm	0.938	0.958	1.026	0.975	0.965	0.889	0.959	0.041
<sup>149</sup> Sm	0.932	1.054	0.776	0.894	0.733	0.675	0.844	0.129
<sup>150</sup> Sm	0.872	0.875	0.937	0.914	0.912	0.897	0.901	0.023
<sup>151</sup> Sm	0.846	0.868	0.916	0.832	0.838	0.827	0.854	0.030
<sup>152</sup> Sm	0.895	0.875	0.929	0.965	0.952	0.924	0.923	0.031
<sup>154</sup> Sm	0.870	0.874	0.925	0.926	0.895	0.832	0.887	0.033

表 4.1 SF98 における SWAT4.0 の計算値と測定値の比較



(SF99-2,4,6 は Sm 同位体の測定値が無いため C/E 値をプロットしていない。) (誤差棒は平均値の標準偏差 1 σ)

<b>T</b> (					C/I	Ξ				
Isotope	SF99-2	SF99-3	SF99-4	SF99-5	SF99-6	SF99-7	SF99-8	SF99-9	Ave.	1σ
<sup>235</sup> U	1.035	1.018	1.103	1.031	1.022	1.002	1.023	1.024	1.032	0.028
<sup>236</sup> U	0.974	0.990	0.979	0.992	0.978	0.987	0.967	0.979	0.981	0.008
<sup>238</sup> U	1.000	1.000	0.999	1.000	1.001	1.001	1.000	0.999	1.000	0.000
<sup>237</sup> Np	0.889	0.855	0.975	0.886	0.908	0.849	0.864	0.864	0.886	0.038
<sup>238</sup> Pu	1.202	1.117	1.209	1.426	1.098	1.113	1.027	1.085	1.160	0.115
<sup>239</sup> Pu	0.981	0.984	1.056	1.021	0.970	0.938	0.969	1.030	0.994	0.036
<sup>240</sup> Pu	0.998	0.989	1.003	0.994	0.982	0.973	0.987	1.025	0.994	0.014
<sup>241</sup> Pu	0.948	0.970	1.013	0.993	0.946	0.920	0.939	1.030	0.970	0.036
<sup>242</sup> Pu	0.962	1.000	0.964	0.988	0.988	0.989	0.974	1.056	0.990	0.028
<sup>241</sup> Am	1.358	0.832	1.006	0.896	0.997	0.959	0.968	0.936	0.994	0.147
<sup>143</sup> Nd	1.008	1.002	1.026	1.004	1.005	0.993	1.004	0.995	1.005	0.009
<sup>144</sup> Nd	0.999	0.777	0.947	1.017	1.021	1.148	1.083	0.998	0.999	0.101
<sup>145</sup> Nd	1.014	1.006	1.006	1.001	1.018	1.012	1.014	1.003	1.009	0.006
<sup>146</sup> Nd	1.015	1.013	1.010	1.010	1.005	1.003	1.005	1.007	1.009	0.004
<sup>148</sup> Nd	1.005	1.003	1.002	1.002	1.003	1.002	1.004	1.006	1.003	0.001
<sup>150</sup> Nd	1.009	1.014	1.018	1.017	1.003	1.005	1.005	1.018	1.011	0.006
<sup>134</sup> Cs	0.963	0.956	0.955	0.952	0.940	0.921	0.948	0.952	0.948	0.012
<sup>137</sup> Cs	0.925	0.999	0.984	0.995	0.913	0.868	0.873	0.910	0.933	0.049
<sup>154</sup> Eu	1.394	1.290	1.335	1.274	1.188	1.163	1.170	1.291	1.263	0.078
<sup>147</sup> Sm		1.018		0.989		1.025	1.004	1.005	1.008	0.012
<sup>148</sup> Sm		1.033		1.031		0.990	0.939	1.002	0.999	0.034
<sup>149</sup> Sm		0.926		1.000		0.870	0.903	0.933	0.926	0.043
<sup>150</sup> Sm		0.955		0.932		0.939	0.951	0.988	0.953	0.019
<sup>151</sup> Sm		0.919		0.922		0.864	0.893	0.981	0.916	0.039
<sup>152</sup> Sm		0.987		0.943		0.997	0.994	0.999	0.984	0.021
<sup>154</sup> Sm		0.958		0.951		0.948	0.934	0.968	0.952	0.011

表 4.2 SF99 における SWAT4.0 の計算値と測定値の比較

表 4.3 SF99 における Gd 同位体比の SWAT4.0 の計算値と測定値 <sup>7)</sup>の比較

		SF99-3 SF99-5 SF		SF99-7 SF99-9			Average								
	Exp	).		Exp	<b>)</b> .		Exp	Exp. Ex		Exp	ъp.		Exp.		
	Isotopic ratio	Error	C/E	Isotopic ratio	Error	C/E	Isotopic ratio	Error	C/E	Isotopic ratio	Error	C/E	Isotopic ratio	Error	C/E
<sup>154</sup> Gd	1.81%	0.12%	0.926	1.72%	0.17%	0.916	1.75%	0.15%	0.934	1.98%	0.18%	0.951	1.82%	0.15%	0.932
<sup>155</sup> Gd	0.02%	5.17%	0.805	0.03%	4.41%	0.799	0.02%	0.47%	1.048	0.02%	1.60%	0.944	0.03%	2.91%	0.899
<sup>156</sup> Gd	34.84%	0.04%	1.000	34.62%	0.03%	0.997	34.35%	0.02%	1.001	34.91%	0.03%	0.996	34.68%	0.03%	0.999
<sup>157</sup> Gd	0.01%	4.16%	0.399	0.01%	1.52%	1.004	0.01%	0.82%	0.858	0.01%	1.18%	0.945	0.01%	1.92%	0.802
<sup>158</sup> Gd	41.45%	0.02%	1.000	41.77%	0.02%	1.001	41.93%	0.02%	0.999	41.19%	0.03%	1.002	41.58%	0.02%	1.000
<sup>160</sup> Gd	21.82%	0.02%	1.008	21.82%	0.01%	1.009	21.88%	0.01%	1.007	21.78%	0.02%	1.009	21.82%	0.01%	1.008





		SF98-4			SF98-6	
Isotope	-10%	base	+10%	-10%	base	+10%
	(7.5%)	(17.5%)	(27.5%)	(52.5%)	(62.5%)	(72.5%)
<sup>235</sup> U	1.000	1.044	1.088	0.924	0.962	1.001
<sup>236</sup> U	0.986	0.984	0.985	0.988	0.988	0.990
<sup>238</sup> U	1.001	1.000	1.000	1.002	1.001	1.000
<sup>237</sup> Np	0.953	0.984	1.007	0.854	0.885	0.915
<sup>238</sup> Pu	0.996	1.042	1.091	1.087	1.156	1.234
<sup>239</sup> Pu	0.965	1.013	1.056	0.883	0.943	1.012
<sup>240</sup> Pu	0.957	0.969	0.982	0.941	0.964	0.997
<sup>241</sup> Pu	0.962	1.007	1.045	0.887	0.931	0.973
<sup>242</sup> Pu	0.958	0.956	0.958	0.997	0.985	0.965
<sup>241</sup> Am	0.777	0.827	0.873	0.862	0.917	0.970
<sup>143</sup> Nd	1.017	1.032	1.045	0.984	0.997	1.009
<sup>144</sup> Nd	1.000	0.988	0.977	1.011	0.997	0.983
<sup>145</sup> Nd	1.013	1.012	1.010	1.017	1.014	1.010
<sup>146</sup> Nd	1.018	1.017	1.018	1.008	1.009	1.012
<sup>148</sup> Nd	1.002	1.002	1.003	1.001	1.001	1.002
<sup>150</sup> Nd	1.004	1.007	1.010	0.999	1.003	1.008
<sup>134</sup> Cs	0.974	0.974	0.974	0.960	0.960	0.960
<sup>137</sup> Cs	1.076	1.084	1.111	0.958	0.983	1.007
<sup>154</sup> Eu	0.962	1.003	1.036	0.888	0.940	1.001
$^{147}$ Sm	0.911	0.905	0.899	0.984	0.972	0.961
<sup>148</sup> Sm	0.949	0.958	0.968	0.957	0.975	0.993
<sup>149</sup> Sm	1.027	1.054	1.080	0.851	0.894	0.935
$^{150}$ Sm	0.871	0.875	0.880	0.908	0.914	0.919
<sup>151</sup> Sm	0.834	0.868	0.905	0.782	0.832	0.888
<sup>152</sup> Sm	0.894	0.875	0.863	0.990	0.965	0.939
<sup>154</sup> Sm	0.868	0.874	0.881	0.916	0.926	0.935

表 4.4 SF98-4 及び SF98-6 のボイド率変化に対する C/E 値への影響



図 4.5 JENDL-4.0 と ENDF-B/VII.1 の <sup>236</sup>U の (n, γ) 断面積の比較



図 4.6 JENDL-4.0 と ENDF-B/VII.1 の<sup>238</sup>Uの (n,2n) 断面積の比較



図 4.7 JENDL-4.0 と ENDF-B/VII.1 の <sup>237</sup>Np の (n, γ) 断面積の比較



図 4.8 SF98-4 の <sup>236</sup>U の核データライブラリ変更による C/E 値への影響



図 4.9 SF98-6 の<sup>236</sup>Uの核データライブラリ変更による C/E 値への影響

		SF98-4			SF98-6	
Isotone	C	/E	dif.	C/.	E	dif.
isotope	JENDL-	ENDF/	B71 - 140	JENDL-	ENDF/	B71 - I40
	4.0	B-VII.1	D/1 - J+0	4.0	B-VII.1	D/1 - J+0
<sup>235</sup> U	1.044	1.043	-0.2%	0.962	0.962	0.0%
<sup>236</sup> U	0.984	0.986	0.2%	0.988	0.990	0.2%
<sup>238</sup> U	1.000	1.000	0.0%	1.001	1.001	0.0%
<sup>237</sup> Np	0.984	0.961	-2.3%	0.885	0.863	-2.2%
<sup>238</sup> Pu	1.042	1.024	-1.8%	1.156	1.131	-2.5%
<sup>239</sup> Pu	1.013	1.008	-0.5%	0.943	0.942	-0.1%
<sup>240</sup> Pu	0.969	0.963	-0.6%	0.964	0.966	0.1%
<sup>241</sup> Pu	1.007	1.006	-0.2%	0.931	0.931	-0.1%
<sup>242</sup> Pu	0.956	0.959	0.3%	0.985	0.984	-0.1%
<sup>241</sup> Am	0.827	0.825	-0.1%	0.917	0.915	-0.2%
<sup>143</sup> Nd	1.032	1.031	-0.1%	0.997	0.997	0.0%
<sup>144</sup> Nd	0.988	0.989	0.1%	0.997	0.997	0.0%
<sup>145</sup> Nd	1.012	1.012	0.0%	1.014	1.014	0.0%
<sup>146</sup> Nd	1.017	1.018	0.0%	1.009	1.010	0.0%
<sup>148</sup> Nd	1.002	1.002	0.0%	1.001	1.001	0.0%
<sup>150</sup> Nd	1.007	1.007	-0.1%	1.003	1.003	-0.1%
<sup>134</sup> Cs	0.974	0.974	0.0%	0.960	0.960	0.0%
<sup>137</sup> Cs	1.084	1.092	0.8%	0.983	0.981	-0.2%
<sup>154</sup> Eu	1.003	1.002	-0.1%	0.940	0.941	0.1%
$^{147}$ Sm	0.905	0.904	-0.1%	0.972	0.973	0.1%
$^{148}$ Sm	0.958	0.959	0.1%	0.975	0.974	-0.1%
<sup>149</sup> Sm	1.054	1.055	0.0%	0.894	0.893	-0.1%
$^{150}$ Sm	0.875	0.875	0.0%	0.914	0.914	0.0%
<sup>151</sup> Sm	0.868	0.866	-0.1%	0.832	0.832	0.0%
<sup>152</sup> Sm	0.875	0.875	0.0%	0.965	0.964	-0.1%
<sup>154</sup> Sm	0.874	0.873	-0.1%	0.926	0.924	-0.1%

表 4.5 SF98-4 及び SF98-6 の <sup>236</sup>U の核データライブラリ変更による C/E 値への影響 SF98-4 SF98-6



図 4.10 SF98-4 の<sup>238</sup>Uの核データライブラリ変更による C/E 値への影響



図 4.11 SF98-6 の <sup>238</sup>U の核データライブラリ変更による C/E 値への影響

		SF98-4		SF98-6				
Isotope	C	/E	dif.	C	/E	dif.		
isotope	JENDL-	ENDF/	B71 - J40	JENDL-	ENDF/	B71 - J40		
235	4.0	B-VII.1		4.0	B-VII.1			
<sup>235</sup> U 236	1.044	1.044	0.0%	0.962	0.962	0.0%		
<sup>230</sup> U	0.984	0.985	0.0%	0.988	0.989	0.0%		
<sup>238</sup> U	1.000	1.000	0.0%	1.001	1.001	0.0%		
<sup>237</sup> Np	0.984	1.004	2.0%	0.885	0.902	1.7%		
<sup>238</sup> Pu	1.042	1.065	2.3%	1.156	1.180	2.4%		
<sup>239</sup> Pu	1.013	1.011	-0.2%	0.943	0.942	-0.1%		
<sup>240</sup> Pu	0.969	0.970	0.1%	0.964	0.963	-0.1%		
<sup>241</sup> Pu	1.007	1.005	-0.2%	0.931	0.931	0.0%		
<sup>242</sup> Pu	0.956	0.957	0.1%	0.985	0.987	0.2%		
<sup>241</sup> Am	0.827	0.826	-0.1%	0.917	0.916	-0.1%		
<sup>143</sup> Nd	1.032	1.032	0.0%	0.997	0.997	0.0%		
<sup>144</sup> Nd	0.988	0.988	0.0%	0.997	0.997	0.0%		
<sup>145</sup> Nd	1.012	1.011	0.0%	1.014	1.014	0.0%		
<sup>146</sup> Nd	1.017	1.018	0.0%	1.009	1.009	0.0%		
<sup>148</sup> Nd	1.002	1.002	0.0%	1.001	1.002	0.0%		
<sup>150</sup> Nd	1.007	1.007	0.0%	1.003	1.003	0.0%		
<sup>134</sup> Cs	0.974	0.974	0.0%	0.960	0.960	0.0%		
<sup>137</sup> Cs	1.084	1.089	0.6%	0.983	0.981	-0.2%		
<sup>154</sup> Eu	1.003	0.999	-0.4%	0.940	0.940	0.0%		
$^{147}$ Sm	0.905	0.904	-0.1%	0.972	0.973	0.0%		
$^{148}$ Sm	0.958	0.960	0.1%	0.975	0.974	0.0%		
<sup>149</sup> Sm	1.054	1.056	0.2%	0.894	0.892	-0.2%		
$^{150}$ Sm	0.875	0.876	0.1%	0.914	0.914	0.0%		
<sup>151</sup> Sm	0.868	0.870	0.2%	0.832	0.831	-0.1%		
$^{152}$ Sm	0.875	0.880	0.5%	0.965	0.966	0.1%		
<sup>154</sup> Sm	0.874	0.874	0.0%	0.926	0.925	0.0%		

表 4.6 SF98-4 及び SF98-6 の <sup>238</sup>U の核データライブラリ変更による C/E 値への影響



図 4.12 SF98-4 の<sup>237</sup>Np の核データライブラリ変更による C/E 値への影響





		SF98-4			SF98-6	
Isotope	C	/E	dif.	C	/E	dif.
isotope	JENDL-	ENDF/	B71 - J40	JENDL-	ENDF/	B71 - J40
235	4.0	B-VII.1		4.0	B-VII.1	
<sup>235</sup> U	1.044	1.044	0.0%	0.962	0.962	0.0%
<sup>250</sup> U	0.984	0.985	0.1%	0.988	0.988	0.0%
<sup>238</sup> U	1.000	1.000	0.0%	1.001	1.001	0.0%
<sup>237</sup> Np	0.984	0.983	-0.1%	0.885	0.896	1.1%
<sup>238</sup> Pu	1.042	1.022	-1.9%	1.156	1.137	-1.8%
<sup>239</sup> Pu	1.013	1.013	0.1%	0.943	0.943	0.0%
<sup>240</sup> Pu	0.969	0.970	0.1%	0.964	0.965	0.1%
<sup>241</sup> Pu	1.007	1.009	0.2%	0.931	0.931	0.0%
<sup>242</sup> Pu	0.956	0.955	-0.1%	0.985	0.984	0.0%
<sup>241</sup> Am	0.827	0.826	0.0%	0.917	0.915	-0.2%
<sup>143</sup> Nd	1.032	1.032	0.0%	0.997	0.997	0.0%
<sup>144</sup> Nd	0.988	0.988	0.0%	0.997	0.997	0.0%
<sup>145</sup> Nd	1.012	1.012	0.0%	1.014	1.014	0.0%
<sup>146</sup> Nd	1.017	1.017	0.0%	1.009	1.009	0.0%
<sup>148</sup> Nd	1.002	1.002	0.0%	1.001	1.001	0.0%
<sup>150</sup> Nd	1.007	1.007	0.0%	1.003	1.003	0.0%
<sup>134</sup> Cs	0.974	0.974	0.0%	0.960	0.960	0.0%
<sup>137</sup> Cs	1.084	1.088	0.4%	0.983	0.982	-0.1%
<sup>154</sup> Eu	1.003	1.002	-0.1%	0.940	0.940	0.0%
$^{147}$ Sm	0.905	0.905	-0.1%	0.972	0.972	0.0%
$^{148}$ Sm	0.958	0.959	0.0%	0.975	0.975	0.1%
<sup>149</sup> Sm	1.054	1.054	-0.1%	0.894	0.891	-0.3%
$^{150}$ Sm	0.875	0.875	0.0%	0.914	0.914	0.0%
<sup>151</sup> Sm	0.868	0.869	0.2%	0.832	0.832	0.0%
<sup>152</sup> Sm	0.875	0.876	0.1%	0.965	0.965	0.0%
<sup>154</sup> Sm	0.874	0.874	0.0%	0.926	0.925	0.0%

表 4.7 SF98-4 及び SF98-6 の <sup>237</sup>Np の核データライブラリ変更による C/E 値への影響

5. SWAT4.0 の不確かさが実効増倍率に与える影響評価

SWAT4.0 によって得られた核種組成の臨界性評価への適用性を評価するため、PIE の測定 値と SWAT4.0 の計算値の差異が実効増倍率(keff)にどの程度影響するのかを調べた。計算 体系は図 5.1 に示すように BWR 燃料の燃料ピンが無限に並んだ単一ピンセル体系を用い た。燃料棒直径(被覆管内径)と被覆管外径は図 3.2 と同一とした。燃料棒ピッチは 2 次元 集合体体系の H/U 比を保存するため、16.30 [mm]から 18.75 [mm]に変更した。単一ピンセル 体系の計算には MVP を使用した。MVP の計算では、1 バッチ当たりのヒストリ数を 30,000、 バッチ数を 1,100 としており、その内 100 バッチを捨てバッチとして統計から除外した。核 データライブラリは JENDL-4.0 を使用した。

核種組成は SF98 及び SF99 の測定値<sup>7)</sup>を基準として使用し、核種毎に測定値から SWAT4.0 の計算値に変更した組成を使用した場合と、全ての核種を測定値から SWAT4.0 の計算値に 変更した組成を使用した場合について、それぞれ実効増倍率を評価した。

SF98 及び SF99 の C/E 値が実効増倍率に与える影響を表 5.1 及び表 5.2 に示す。表 5.1 及び表 5.2 中で斜体及び下線としたものは差異が 0.1%より大きいことを意味している。差異の最大値は表 5.2 の 2.14%となった。使用済燃料の組成を有する体系に対する臨界計算の精度は、MOX 燃料に対する臨界実験の解析より推定されてきたが、その場合、推定臨界下限 増倍率は 0.98 が得られている<sup>17)</sup>。

「この値以下であれば未臨界と判定してよい」とされる中性子増倍率の下限値である推定 臨界下限増倍率は0.98であり、臨界計算システムが持つ不確かさは約2%である。現在の臨 界安全性評価では、推定臨界下限増倍率にさらなる安全裕度として3%を考慮した0.95を未 臨界判定基準(最大許容増倍率)として採用している。SWAT4.0で求めた核種組成を用いた 場合と測定値を用いた場合とでの中性子増倍率の差は最大で2.14%であることから、燃焼計 算の不確かさに起因した実効増倍率の不確かさは安全裕度として考慮した3%以下であるこ とが期待できる。

以上のことから、SWAT4.0 で得られた燃料組成を用いた臨界性評価では、従来の推定臨 界下限増倍率 0.95 を未臨界の判定基準として利用できる可能性があり、SWAT4.0 は臨界性 評価に用いる燃焼組成を提供するための十分な予測精度を有していると言える。



図 5.1 ピンセル計算の体系

表 5.1 SF98 の核種組成の差異が実効増倍率に与える影響

		SF98-3	SF98-4	SF98-5	SF98-6	SF98-7	SF98-8	Ave.	Ave.  *	1σ
k <sub>eff</sub>	base	1.05985	1.00635	1.03143	1.12528	1.13649	1.23175			
1σ	base	0.006%	0.006%	0.006%	0.006%	0.006%	0.006%			
	<sup>235</sup> U	<u>0.33%</u>	<u>0.66%</u>	-0.03%	-0.52%	<u>-0.30%</u>	0.05%	0.03%	<u>0.32%</u>	0.39%
	<sup>236</sup> U	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%
	<sup>238</sup> U	-0.02%	-0.01%	-0.01%	-0.03%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	0.01%	0.01%
	<sup>237</sup> Np	-0.03%	0.00%	<u>-0.10%</u>	0.07%	0.00%	0.01%	-0.01%	0.04%	0.05%
	<sup>238</sup> Pu	-0.01%	-0.02%	-0.02%	-0.03%	0.01%	0.01%	-0.01%	0.02%	0.02%
	<sup>239</sup> Pu	<u>-0.15%</u>	<u>0.22%</u>	<u>0.19%</u>	<u>-0.80%</u>	<u>-1.06%</u>	<u>-0.59%</u>	<u>-0.36%</u>	<u>0.50%</u>	0.49%
	<sup>240</sup> Pu	0.09%	<u>0.16%</u>	0.05%	<u>0.19%</u>	<u>0.23%</u>	<u>0.16%</u>	<u>0.14%</u>	<u>0.14%</u>	0.06%
	<sup>241</sup> Pu	<u>-0.16%</u>	0.04%	0.02%	<u>-0.35%</u>	<u>-0.50%</u>	<u>-0.24%</u>	<u>-0.20%</u>	<u>0.22%</u>	0.19%
	<sup>242</sup> Pu	0.00%	0.01%	0.01%	-0.01%	0.01%	0.02%	0.01%	0.01%	0.01%
	<sup>241</sup> Am	0.02%	0.01%	0.04%	0.01%	0.02%	0.00%	0.02%	0.02%	0.01%
	<sup>143</sup> Nd	-0.05%	-0.07%	-0.01%	0.01%	0.01%	-0.01%	-0.02%	0.03%	0.03%
	<sup>144</sup> Nd	-0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	-0.01%	-0.01%	0.00%	0.00%	0.00%
Realative	<sup>145</sup> Nd	-0.01%	-0.01%	0.01%	0.00%	-0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
dif.	<sup>146</sup> Nd	-0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	-0.01%	0.00%	0.01%	0.01%
(k'-k)/k	<sup>148</sup> Nd	-0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	<sup>150</sup> Nd	-0.01%	-0.01%	0.00%	0.00%	-0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
	<sup>134</sup> Cs	-0.01%	-0.01%	-0.02%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
	<sup>137</sup> Cs	0.00%	-0.01%	0.00%	-0.01%	-0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
	<sup>154</sup> Eu	-0.01%	0.00%	-0.03%	0.03%	0.02%	0.01%	0.00%	0.02%	0.02%
	<sup>147</sup> Sm	0.03%	0.03%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%
	<sup>148</sup> Sm	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
	<sup>149</sup> Sm	0.10%	-0.09%	<u>0.46%</u>	<u>0.17%</u>	<u>0.51%</u>	<u>0.55%</u>	0.28%	<u>0.31%</u>	0.24%
	<sup>150</sup> Sm	0.03%	0.03%	0.01%	0.02%	0.03%	0.02%	0.02%	0.02%	0.01%
	<sup>151</sup> Sm	<u>0.12%</u>	0.12%	0.09%	<u>0.16%</u>	<u>0.16%</u>	<u>0.15%</u>	<u>0.13%</u>	0.13%	0.03%
	<sup>152</sup> Sm	0.04%	0.06%	0.02%	0.01%	0.02%	0.02%	0.03%	0.03%	0.02%
	<sup>154</sup> Sm	-0.01%	0.00%	<u>0.</u> 01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%
	All	0.45%	1.23%	0.64%	-1.05%	-0.86%	0.15%	0.09%	0.73%	0.81%

\*平均値の絶対値

		SF99-2	SF99-3	SF99-4	SF99-5	SF99-6	SF99-7	SF99-8	SF99-9	Ave.	Ave. *	1σ
k <sub>eff</sub>	hase	1.23021	1.08991	1.08114	1.07787	1.20595	1.18318	1.25271	1.29049			
1σ	buse	0.005%	0.006%	0.006%	0.006%	0.006%	0.006%	0.006%	0.005%			
	<sup>235</sup> U	<u>0.55%</u>	<u>0.29%</u>	<u>1.48%</u>	0.43%	0.25%	0.04%	<u>0.32%</u>	<u>0.37%</u>	<u>0.47%</u>	0.47%	0.41%
	<sup>236</sup> U	0.00%	0.00%	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%
	<sup>238</sup> U	-0.01%	0.00%	0.03%	0.02%	-0.02%	-0.02%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.02%
	<sup>237</sup> Np	0.02%	0.07%	0.02%	0.08%	0.04%	0.07%	0.04%	0.03%	0.04%	0.04%	0.02%
	<sup>238</sup> Pu	-0.03%	-0.02%	-0.02%	-0.05%	-0.01%	-0.03%	-0.01%	0.00%	-0.02%	0.02%	0.01%
	<sup>239</sup> Pu	<u>-0.17%</u>	-0.21%	0.82%	<u>0.33%</u>	-0.34%	<u>-0.77%</u>	-0.28%	<u>0.19%</u>	-0.05%	<u>0.39%</u>	0.45%
	<sup>240</sup> Pu	-0.01%	0.05%	-0.01%	0.05%	0.08%	<u>0.11%</u>	0.04%	-0.07%	0.03%	0.05%	0.05%
	<sup>241</sup> Pu	<u>-0.13%</u>	<u>-0.15%</u>	0.08%	-0.02%	<u>-0.22%</u>	<u>-0.33%</u>	-0.12%	0.04%	<u>-0.11%</u>	<u>0.14%</u>	0.13%
	<sup>242</sup> Pu	-0.01%	0.00%	0.03%	0.02%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%
	<sup>241</sup> Am	-0.03%	0.03%	0.01%	0.04%	-0.01%	0.01%	0.02%	0.01%	0.01%	0.02%	0.02%
	<sup>143</sup> Nd	-0.03%	-0.01%	-0.03%	0.00%	-0.01%	0.00%	-0.01%	0.00%	-0.01%	0.01%	0.01%
	<sup>144</sup> Nd	-0.02%	0.01%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
Realative	<sup>145</sup> Nd	-0.01%	0.01%	0.01%	0.02%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
dif.	<sup>146</sup> Nd	-0.01%	0.00%	0.02%	0.01%	0.00%	-0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%
(k'-k)/k	<sup>148</sup> Nd	-0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	-0.02%	-0.01%	0.00%	-0.01%	0.01%	0.01%
	<sup>150</sup> Nd	-0.01%	0.01%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	-0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
	<sup>134</sup> Cs	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%
	<sup>137</sup> Cs	-0.03%	-0.01%	0.02%	0.01%	0.00%	-0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
	<sup>154</sup> Eu	-0.06%	-0.07%	-0.10%	-0.09%	-0.06%	-0.06%	-0.04%	-0.03%	-0.06%	0.06%	0.02%
	<sup>147</sup> Sm		-0.01%		0.01%		-0.01%	0.00%	0.02%	0.00%	0.01%	0.01%
	<sup>148</sup> Sm		0.01%		0.02%		-0.01%	-0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
	<sup>149</sup> Sm		0.10%		0.01%		0.18%	<u>0.13%</u>	0.08%	0.10%	0.10%	0.06%
	<sup>150</sup> Sm		0.02%		0.02%		0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%
	<sup>151</sup> Sm		0.08%		0.08%		<u>0.11%</u>	0.07%	0.02%	0.07%	0.07%	0.03%
	<sup>152</sup> Sm		0.00%		0.04%		0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.02%
	<sup>154</sup> Sm		0.00%		0.01%		-0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%
	All	0.24%	0.18%	2.14%	0.76%	-0.24%	-0.60%	0.20%	0.63%	0.42%	0.62%	0.77%

表 5.2 SF99 の核種組成の差異が実効増倍率に与える影響

\*平均値の絶対値

#### 6. 結論

本研究では、SWAT4.0の解析精度の検証を目的とする照射後試験(PIE)解析を実施した。 解析対象には、東京電力福島第二原子力発電所2号機において使用された、BWR 燃料集合 体(2F2DN23)を用いた。2F2DN23は太径水ロッドが2本入った8×8燃料集合体で、平均 燃焼度は33.4[GWd/t]であり、UO2燃料サンプル(SF98)とUO2-Gd2O3燃料サンプル(SF99) に対する核種生成量が測定された。

SWAT4.0 の中性子輸送計算には MVP を使用し、2F2DN23 の解析体系は 2 次元単一燃料 集合体体系とした。集合体内の濃縮度分布については、参考文献 7 で与えられている集合体 平均濃縮度、軸方向平均濃縮度、径方向平均濃縮度から推定した濃縮度分布を用いた。減速 材温度やボイド率についても参考文献 7 で与えられている BWR の代表的な値を用いた。

SF98 及び SF99 における核種生成量の C/E 値を比較したところ、重核も FP も多くの核種 において SWAT4.0 の計算値と測定値はよく一致した。しかし、<sup>149</sup>Sm、<sup>237</sup>Np、<sup>241</sup>Am の C/E 値は過少評価となり、<sup>238</sup>Pu の C/E 値は過大評価となった。<sup>241</sup>Am の測定値の不確かさは 2% 以内であるものの、過去に実施された解析でも C/E 値の差異が大きいことから、実際の測 定の不確かさは 2%より大きい可能性がある。

SF99 における Gd 同位体比の C/E 値を比較したところ、<sup>156</sup>Gd、<sup>158</sup>Gd、<sup>160</sup>Gd については C/E 値は 1%以内となった。しかし、<sup>154</sup>Gd、<sup>155</sup>Gd、<sup>157</sup>Gd については C/E 値の差異が大きい 結果となった。<sup>154</sup>Gd は天然存在比が他の同位体に比べて小さいため、<sup>155</sup>Gd、<sup>157</sup>Gd は捕獲 断面積が大きく、燃焼期間中にそのほとんどが中性子を吸収し、<sup>156</sup>Gd、<sup>158</sup>Gd となるため絶 対量が少ない。また、Gd と Eu は化学的に分離することが難しいことから、<sup>154</sup>Gd と <sup>155</sup>Gd はその親核種である <sup>154</sup>Eu と <sup>155</sup>Eu が分離しきれずに混合しているものと考えられる。<sup>156</sup>Gd と <sup>158</sup>Gd は捕獲断面積が小さく、同位体比には <sup>155</sup>Gd と <sup>157</sup>Gd からの変換による生成量を含 んでいる。<sup>156</sup>Gd と <sup>158</sup>Gd は C/E 値が 1%以内であることから、SWAT4.0 が <sup>155</sup>Gd と <sup>157</sup>Gd の 燃焼に伴う減少量を適切に計算していると考えられる。

<sup>149</sup>SmのC/E値の過少評価については、本解析において仮定したボイド率が適切ではない ことが影響していると考えた。そこで、SF98-4及びSF98-6においてボイド率を変えた計算 を実施した。その結果、ボイド率±10%の変化に対して<sup>149</sup>SmのC/E値は最大で約5%変化 することが分かった。このことから、本解析で仮定したボイド率は実際の運転時のボイド率 を再現していない可能性がある。そのため、<sup>149</sup>Smの解析精度を向上させるためには、詳細 なボイド履歴を設定する必要がある。

SF99 の結果の<sup>237</sup>Np と<sup>238</sup>Pu の C/E 値の差異の要因として生成パス上の核種に対する断面 積が適切ではないのではないかと考えた。そこで、<sup>237</sup>Np と<sup>238</sup>Pu の生成パスに関わる断面 積を JENDL-4.0 と ENDF/B-VII.1 とで比較したところ、<sup>236</sup>U の (n,γ) 断面積、<sup>238</sup>U の (n,2n) 断面積及び<sup>237</sup>Np の (n,γ) 断面積に差異が見られた。そのため、SF98-4 及び SF98-6 の<sup>236</sup>U、 <sup>238</sup>U 及び<sup>237</sup>Np について核データライブラリの違いが C/E 値に与える影響を調べるため、 <sup>236</sup>U、<sup>238</sup>U及び<sup>237</sup>Npを一核種ずつJENDL-4.0からENDF/B-VII.1に変更してSWAT4.0燃焼 計算を実施した。その結果、<sup>236</sup>Uと<sup>238</sup>Uの断面積ライブラリを変更した場合は<sup>237</sup>Npと<sup>238</sup>Pu のC/E値が同じ方向に変化するのに対し、<sup>237</sup>Npの断面積ライブラリを変更した場合、<sup>237</sup>Np と<sup>238</sup>PuのどちらもC/E値が改善されることが分かった。これらの結果から、JENDL-4.0の <sup>237</sup>Npの(n, γ)断面積が過大評価されている可能性があることが分かった。

SWAT4.0を用いた核種組成の臨界性評価への適用性を検討するため、PIEの測定値と計算 値の差が実効増倍率にどの程度影響するのかを MVP による単一ピンセル計算で評価した。 その結果、実効増倍率の差異は最大で2.14%となった。臨界安全評価の観点から、最大許容 増倍率として0.95を採用した場合、推定臨界下限増倍率0.98との間の安全裕度は3%であ る。これを踏まえると、SWAT4.0 は臨界性評価に用いる核種組成を適用するための十分な 予測精度を有していると言える。

今後の方針として、他の照射後試験についても解析を実施し、SWAT4.0の解析精度の検 証を進めていく予定である。

#### 謝辞

MVPの使用方法についてご助言いただいた原子力基礎工学研究センター炉物理標準コード研究グループの長家康展氏に感謝いたします。また、SWAT4.0の使用方法並びに並列計 算機の使用方法についてご助言いただいた原子力基礎工学研究センター核変換システム開 発グループの鹿島陽夫氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 東京電力ホールディングス株式会社、「炉心損傷した号機と冷温停止した号機の比較」、 http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/2\_13-j.html (参照: 2018年1月26日).
- 2) 燃料サイクル安全研究委員会、「燃焼度クレジット導入ガイド原案 (受託研究)」、JAERI-Tech 2001-055 (2001), 92p.
- K. Suyama, H. Mochizuki, T. Kiyosumi, "Revised burnup code system SWAT: Description and validation using postirradiation examination data", Nucl. Technol. 138, pp.97-110 (2002).
- K. Suyama, M. Murazaki, K. Okubo, Y. Nakahara, G. Uchiyama, "Re-evaluation of assay data of spent nuclear fuel obtained at Japan Atomic Energy Research Institute for validation of burnup calculation code systems", Annals of Nuclear Energy, 38, pp.930-941 (2011).
- 6) 山本健土、秋江拓志、須山賢也、細山田龍二、「使用済燃料直接処分の臨界安全評価ー

燃焼度クレジット評価のためのデータの整備一」、JAEA-Technology 2015-019 (2015), 110p.

- 7) 中原嘉則、須山賢也、須崎武則、「軽水炉使用済燃料の燃焼度クレジットに関する技術 開発」、JAERI-Tech 2000-071 (2000), 381p.
- Y. Nagaya, K. Okumura, T. Mori and M. Nakagawa, "MVP/GMVP II: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods," JAERI-1348 (2005), 388p.
- K. Okumura, T. Kugo, K. Kaneko, K. Tsuchihashi, "SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System," JAEA-Data/Code 2007-004 (2007), 313p.
- X-5 Monte Carlo Team. MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. USA: Los Alamos National Laboratory; 2003 LA-UR-03-1987.
- 11) 日本機械学会、「1999 日本機械学会蒸気表(第5版)」(1999).
- 12) K. Suyama, Y. Uchida, T. Kashima, T. Ito, T. Miyaji, "Burn-up Credit Criticality Safety Benchmark Phase III-C," NEA/NSC/R (2015)6 (2016).
- D. Knott and A. Yamamoto, "Lattice Physics Computations," Handbook of Nuclear Engineering, 9, pp. 1205-1207, Springer (2010).
- T. Yamamoto and M. Yamamoto, "Nuclear Analysis of PIE Data of Irradiated BWR 8×8-2 and 8×8-4 UO2 Fuel Assemblies," J. Nucl. Sci. Technol., 45, pp.1193-1214 (2012).
- K. Suyama., H. Mochizuki, "Effect on Neutron Induced Reactions of Neodymium-147 and 148 on Burnup Evaluation," J. Nucl. Sci. Technol. 42, pp.661-669 (2005).
- 16) 大泉昭人、神智之、横山賢治、石川眞、久語輝彦、「軽水炉燃焼組成の核データ感度デ ータベース」、JAEA-Data/Code 2013-019 (2014), 278p.
- 17) 日本原子力研究開発機構 安全研究センター、「臨界安全ハンドブック・データ集第2版 (受託研究)」、JAEA-Data/Code 2009-010 (2009), 175p.

This is a blank page.

## 付録

本報告書の第4章において C/E 値及び Gd 同位体原子個数比の算出に使用した測定値及び 計算値を表 A.1 から表 A.9 に示す。また、第5章において実効増倍率の差異を求めるために 使用した実効増倍率の計算値を表 A.10 及び表 A.11 に示す。 This is a blank page.

Isotope		Ex	perimental r	esults [g/tH]	[M	
Isotope	SF98-3	SF98-4	SF98-5	SF98-6	SF98-7	SF98-8
Exp [GWd/t]	36.9	42.4	44.0	39.9	39.4	27.2
<sup>235</sup> U	8.142×10 <sup>3</sup>	5.966×10 <sup>3</sup>	6.315×10 <sup>3</sup>	9.062×10 <sup>3</sup>	9.357×10 <sup>3</sup>	1.545×10 <sup>4</sup>
<sup>236</sup> U	4.994×10 <sup>3</sup>	5.284×10 <sup>3</sup>	5.307×10 <sup>3</sup>	5.140×10 <sup>3</sup>	5.140×10 <sup>3</sup>	4.291×10 <sup>3</sup>
<sup>238</sup> U	9.406×10 <sup>5</sup>	9.358×10 <sup>5</sup>	9.328×10 <sup>5</sup>	9.334×10 <sup>5</sup>	9.332×10 <sup>5</sup>	9.431×10 <sup>5</sup>
<sup>237</sup> Np	3.346×10 <sup>2</sup>	4.318×10 <sup>2</sup>	3.862×10 <sup>2</sup>	5.157×10 <sup>2</sup>	4.573×10 <sup>2</sup>	2.918×10 <sup>2</sup>
<sup>238</sup> Pu	$1.167 \times 10^{2}$	1.678×10 <sup>2</sup>	1.936×10 <sup>2</sup>	1.692×10 <sup>2</sup>	2.083×10 <sup>2</sup>	9.544×10 <sup>1</sup>
<sup>239</sup> Pu <sup>*</sup>	3.694×10 <sup>3</sup>	3.792×10 <sup>3</sup>	4.265×10 <sup>3</sup>	5.305×10 <sup>3</sup>	5.628×10 <sup>3</sup>	5.341×10 <sup>3</sup>
<sup>240</sup> Pu	2.135×10 <sup>3</sup>	2.458×10 <sup>3</sup>	2.613×10 <sup>3</sup>	2.630×10 <sup>3</sup>	$2.668 \times 10^{3}$	1.816×10 <sup>3</sup>
<sup>241</sup> Pu	8.949×10 <sup>2</sup>	$1.032 \times 10^{3}$	$1.172 \times 10^{3}$	1.292×10 <sup>3</sup>	1.355×10 <sup>3</sup>	9.079×10 <sup>2</sup>
<sup>242</sup> Pu	4.623×10 <sup>2</sup>	6.622×10 <sup>2</sup>	6.939×10 <sup>2</sup>	5.431×10 <sup>2</sup>	5.439×10 <sup>2</sup>	2.220×10 <sup>2</sup>
<sup>241</sup> Am	3.271×10 <sup>1</sup>	3.417×10 <sup>1</sup>	3.734×10 <sup>1</sup>	4.091×10 <sup>1</sup>	4.388×10 <sup>1</sup>	3.295×10 <sup>1</sup>
<sup>143</sup> Nd	8.234×10 <sup>2</sup>	8.486×10 <sup>2</sup>	9.039×10 <sup>2</sup>	9.199×10 <sup>2</sup>	9.183×10 <sup>2</sup>	7.358×10 <sup>2</sup>
<sup>144</sup> Nd	$1.275 \times 10^{3}$	1.492×10 <sup>3</sup>	1.476×10 <sup>3</sup>	1.284×10 <sup>3</sup>	$1.207 \times 10^{3}$	7.478×10 <sup>2</sup>
<sup>145</sup> Nd	7.648×10 <sup>2</sup>	8.423×10 <sup>2</sup>	8.667×10 <sup>2</sup>	7.950×10 <sup>2</sup>	7.845×10 <sup>2</sup>	5.770×10 <sup>2</sup>
<sup>146</sup> Nd	7.629×10 <sup>2</sup>	8.916×10 <sup>2</sup>	9.320×10 <sup>2</sup>	8.427×10 <sup>2</sup>	8.330×10 <sup>2</sup>	5.550×10 <sup>2</sup>
<sup>148</sup> Nd	4.058×10 <sup>2</sup>	4.662×10 <sup>2</sup>	4.850×10 <sup>2</sup>	$4.407 \times 10^{2}$	4.356×10 <sup>2</sup>	2.997×10 <sup>2</sup>
<sup>150</sup> Nd	$1.867 \times 10^{2}$	2.193×10 <sup>2</sup>	2.294×10 <sup>2</sup>	2.098×10 <sup>2</sup>	$2.080 \times 10^{2}$	1.389×10 <sup>2</sup>
<sup>134</sup> Cs	1.329×10 <sup>3</sup>	$1.577 \times 10^{3}$	1.588×10 <sup>3</sup>	1.508×10 <sup>3</sup>	1.559×10 <sup>3</sup>	9.494×10 <sup>2</sup>
<sup>137</sup> Cs	1.010×10 <sup>2</sup>	$1.407 \times 10^{2}$	$1.553 \times 10^{2}$	1.514×10 <sup>2</sup>	$1.621 \times 10^{2}$	6.979×10 <sup>1</sup>
<sup>154</sup> Eu	1.818×10 <sup>1</sup>	2.413×10 <sup>1</sup>	2.601×10 <sup>1</sup>	2.931×10 <sup>1</sup>	2.924×10 <sup>1</sup>	$1.708 \times 10^{1}$
<sup>147</sup> Sm	3.091×10 <sup>2</sup>	3.207×10 <sup>2</sup>	3.025×10 <sup>2</sup>	2.891×10 <sup>2</sup>	$2.800 \times 10^{2}$	2.454×10 <sup>2</sup>
<sup>148</sup> Sm	$1.531 \times 10^{2}$	1.971×10 <sup>2</sup>	2.022×10 <sup>2</sup>	$1.855 \times 10^{2}$	$1.852 \times 10^{2}$	$1.079 \times 10^{2}$
<sup>149</sup> Sm	$2.553 \times 10^{0}$	$2.502 \times 10^{0}$	3.701×10 <sup>0</sup>	$3.374 \times 10^{0}$	4.199×10 <sup>0</sup>	$4.082 \times 10^{0}$
<sup>150</sup> Sm	3.309×10 <sup>2</sup>	3.865×10 <sup>2</sup>	3.808×10 <sup>2</sup>	3.536×10 <sup>2</sup>	3.505×10 <sup>2</sup>	2.408×10 <sup>2</sup>
<sup>151</sup> Sm	9.192×10 <sup>0</sup>	9.738×10 <sup>0</sup>	1.039×10 <sup>1</sup>	1.272×10 <sup>1</sup>	1.310×10 <sup>1</sup>	$1.245 \times 10^{1}$
<sup>152</sup> Sm	$1.425 \times 10^{2}$	1.555×10 <sup>2</sup>	1.432×10 <sup>2</sup>	1.233×10 <sup>2</sup>	$1.222 \times 10^{2}$	9.771×10 <sup>1</sup>
$^{154}$ Sm	3.950×10 <sup>1</sup>	4.828×10 <sup>1</sup>	4.912×10 <sup>1</sup>	4.377×10 <sup>1</sup>	4.472×10 <sup>1</sup>	2.933×10 <sup>1</sup>

表 A.1 SF98 における核種生成量の測定値[g/tHM]<sup>7)</sup>

Isotope			Ex	perimental r	esults [g/tH]	M]		
	SF99-2	SF99-3	SF99-4	SF99-5	SF99-6	SF99-7	SF99-8	SF99-9
Exp [GWd/t]	22.6	32.4	35.4	37.4	32.4	32.1	21.8	16.6
<sup>235</sup> U	1.398×10 <sup>4</sup>	8.657×10 <sup>3</sup>	6.981×10 <sup>3</sup>	7.381×10 <sup>3</sup>	$1.046 \times 10^{4}$	$1.092 \times 10^{4}$	$1.575 \times 10^{4}$	1.906×10 <sup>4</sup>
<sup>236</sup> U	3.467×10 <sup>3</sup>	4.251×10 <sup>3</sup>	4.480×10 <sup>3</sup>	4.522×10 <sup>3</sup>	4.295×10 <sup>3</sup>	4.251×10 <sup>3</sup>	3.458×10 <sup>3</sup>	2.833×10 <sup>3</sup>
<sup>238</sup> U	9.522×10 <sup>5</sup>	9.452×10 <sup>5</sup>	9.432×10 <sup>5</sup>	9.394×10 <sup>5</sup>	9.409×10 <sup>5</sup>	9.403×10 <sup>5</sup>	9.493×10 <sup>5</sup>	9.538×10 <sup>5</sup>
<sup>237</sup> Np	$2.177 \times 10^{2}$	$3.632 \times 10^{2}$	3.666×10 <sup>2</sup>	4.617×10 <sup>2</sup>	4.146×10 <sup>2</sup>	4.464×10 <sup>2</sup>	$2.758 \times 10^{2}$	1.975×10 <sup>2</sup>
<sup>238</sup> Pu	3.961×10 <sup>1</sup>	9.696×10 <sup>1</sup>	1.145×10 <sup>2</sup>	$1.234 \times 10^{2}$	$1.374 \times 10^{2}$	$1.377 \times 10^{2}$	6.476×10 <sup>1</sup>	3.427×10 <sup>1</sup>
<sup>239</sup> Pu <sup>*</sup>	3.907×10 <sup>3</sup>	3.980×10 <sup>3</sup>	$3.865 \times 10^{3}$	4.549×10 <sup>3</sup>	5.633×10 <sup>3</sup>	6.036×10 <sup>3</sup>	5.448×10 <sup>3</sup>	4.731×10 <sup>3</sup>
<sup>240</sup> Pu	1.519×10 <sup>3</sup>	2.131×10 <sup>3</sup>	2.293×10 <sup>3</sup>	2.535×10 <sup>3</sup>	2.445×10 <sup>3</sup>	$2.487 \times 10^{3}$	1.647×10 <sup>3</sup>	1.182×10 <sup>3</sup>
<sup>241</sup> Pu	6.763×10 <sup>2</sup>	9.452×10 <sup>2</sup>	1.010×10 <sup>3</sup>	1.196×10 <sup>3</sup>	1.263×10 <sup>3</sup>	1.313×10 <sup>3</sup>	8.332×10 <sup>2</sup>	5.372×10 <sup>2</sup>
<sup>242</sup> Pu	1.896×10 <sup>2</sup>	4.374×10 <sup>2</sup>	5.573×10 <sup>2</sup>	6.073×10 <sup>2</sup>	4.334×10 <sup>2</sup>	4.215×10 <sup>2</sup>	$1.723 \times 10^{2}$	8.334×10 <sup>1</sup>
<sup>241</sup> Am	2.110×10 <sup>1</sup>	3.950×10 <sup>1</sup>	3.410×10 <sup>1</sup>	4.363×10 <sup>1</sup>	4.558×10 <sup>1</sup>	4.848×10 <sup>1</sup>	3.619×10 <sup>1</sup>	2.885×10 <sup>1</sup>
<sup>143</sup> Nd	6.136×10 <sup>2</sup>	7.627×10 <sup>2</sup>	7.808×10 <sup>2</sup>	8.397×10 <sup>2</sup>	7.984×10 <sup>2</sup>	8.089×10 <sup>2</sup>	6.143×10 <sup>2</sup>	5.007×10 <sup>2</sup>
<sup>144</sup> Nd	6.537×10 <sup>2</sup>	1.321×10 <sup>3</sup>	1.203×10 <sup>3</sup>	1.166×10 <sup>3</sup>	9.321×10 <sup>2</sup>	8.171×10 <sup>2</sup>	5.531×10 <sup>2</sup>	4.406×10 <sup>2</sup>
<sup>145</sup> Nd	4.917×10 <sup>2</sup>	6.728×10 <sup>2</sup>	7.198×10 <sup>2</sup>	7.511×10 <sup>2</sup>	6.519×10 <sup>2</sup>	6.509×10 <sup>2</sup>	4.671×10 <sup>2</sup>	3.705×10 <sup>2</sup>
<sup>146</sup> Nd	4.476×10 <sup>2</sup>	6.610×10 <sup>2</sup>	7.314×10 <sup>2</sup>	7.774×10 <sup>2</sup>	6.671×10 <sup>2</sup>	6.645×10 <sup>2</sup>	4.397×10 <sup>2</sup>	3.307×10 <sup>2</sup>
<sup>148</sup> Nd	2.486×10 <sup>2</sup>	$3.570 \times 10^{2}$	3.903×10 <sup>2</sup>	4.130×10 <sup>2</sup>	$3.575 \times 10^{2}$	3.556×10 <sup>2</sup>	$2.411 \times 10^{2}$	1.837×10 <sup>2</sup>
<sup>150</sup> Nd	$1.142 \times 10^{2}$	$1.674 \times 10^{2}$	$1.844 \times 10^{2}$	1.979×10 <sup>2</sup>	$1.735 \times 10^{2}$	$1.724 \times 10^{2}$	1.136×10 <sup>2</sup>	8.436×10 <sup>1</sup>
<sup>134</sup> Cs	8.515×10 <sup>2</sup>	1.231×10 <sup>3</sup>	1.346×10 <sup>3</sup>	$1.427 \times 10^{3}$	1.249×10 <sup>3</sup>	1.266×10 <sup>3</sup>	8.343×10 <sup>2</sup>	6.329×10 <sup>2</sup>
<sup>137</sup> Cs	4.643×10 <sup>1</sup>	9.117×10 <sup>1</sup>	1.126×10 <sup>2</sup>	1.306×10 <sup>2</sup>	1.137×10 <sup>2</sup>	1.193×10 <sup>2</sup>	5.684×10 <sup>1</sup>	3.213×10 <sup>1</sup>
<sup>154</sup> Eu	$1.022 \times 10^{1}$	1.792×10 <sup>1</sup>	1.992×10 <sup>1</sup>	2.465×10 <sup>1</sup>	2.549×10 <sup>1</sup>	2.659×10 <sup>1</sup>	$1.404 \times 10^{1}$	8.215×10 <sup>0</sup>
<sup>147</sup> Sm	NoData	2.609×10 <sup>2</sup>	NoData	2.770×10 <sup>2</sup>	NoData	2.436×10 <sup>2</sup>	1.965×10 <sup>2</sup>	1.633×10 <sup>2</sup>
<sup>148</sup> Sm	NoData	$1.167 \times 10^{2}$	NoData	1.579×10 <sup>2</sup>	NoData	1.343×10 <sup>2</sup>	$7.545 \times 10^{1}$	4.483×10 <sup>1</sup>
<sup>149</sup> Sm	NoData	2.469×10 <sup>0</sup>	NoData	$2.723 \times 10^{0}$	NoData	3.426×10 <sup>0</sup>	$2.959 \times 10^{0}$	2.600×10 <sup>0</sup>
<sup>150</sup> Sm	NoData	2.676×10 <sup>2</sup>	NoData	3.246×10 <sup>2</sup>	NoData	2.778×10 <sup>2</sup>	1.830×10 <sup>2</sup>	1.313×10 <sup>2</sup>
<sup>151</sup> Sm	NoData	8.490×10 <sup>0</sup>	NoData	$1.025 \times 10^{1}$	NoData	1.294×10 <sup>1</sup>	1.155×10 <sup>1</sup>	9.999×10 <sup>0</sup>
<sup>152</sup> Sm	NoData	1.179×10 <sup>2</sup>	NoData	$1.272 \times 10^{2}$	NoData	$1.024 \times 10^{2}$	7.730×10 <sup>1</sup>	6.172×10 <sup>1</sup>
<sup>154</sup> Sm	NoData	3.353×10 <sup>1</sup>	NoData	4.215×10 <sup>1</sup>	NoData	3.579×10 <sup>1</sup>	2.211×10 <sup>1</sup>	1.540×10 <sup>1</sup>

表 A.2 SF99 における核種生成量の測定値[g/tHM]<sup>7)</sup>

Isotopa			Calculation re	sults [g/tHM]		
Isotope	SF98-3	SF98-4	SF98-5	SF98-6	SF98-7	SF98-8
Exp [GWd/t]	36.9	42.4	44.0	39.9	39.4	27.2
<sup>235</sup> U	$8.301 \times 10^{3}$	6.229×10 <sup>3</sup>	$6.300 \times 10^{3}$	8.716×10 <sup>3</sup>	9.133×10 <sup>3</sup>	$1.550 \times 10^{4}$
<sup>236</sup> U	4.916×10 <sup>3</sup>	5.202×10 <sup>3</sup>	$5.273 \times 10^{3}$	5.080×10 <sup>3</sup>	5.059×10 <sup>3</sup>	4.139×10 <sup>3</sup>
<sup>238</sup> U	9.407×10 <sup>5</sup>	9.360×10 <sup>5</sup>	9.332×10 <sup>5</sup>	9.347×10 <sup>5</sup>	9.346×10 <sup>5</sup>	9.438×10 <sup>5</sup>
<sup>237</sup> Np	3.420×10 <sup>2</sup>	4.249×10 <sup>2</sup>	$4.713 \times 10^{2}$	4.565×10 <sup>2</sup>	4.569×10 <sup>2</sup>	2.888×10 <sup>2</sup>
<sup>238</sup> Pu	1.175×10 <sup>2</sup>	$1.748 \times 10^{2}$	$2.135 \times 10^{2}$	1.955×10 <sup>2</sup>	1.967×10 <sup>2</sup>	8.399×10 <sup>1</sup>
<sup>239</sup> Pu <sup>*</sup>	3.659×10 <sup>3</sup>	$3.840 \times 10^{3}$	4.315×10 <sup>3</sup>	5.002×10 <sup>3</sup>	5.203×10 <sup>3</sup>	4.988×10 <sup>3</sup>
<sup>240</sup> Pu	2.100×10 <sup>3</sup>	2.383×10 <sup>3</sup>	2.594×10 <sup>3</sup>	2.536×10 <sup>3</sup>	2.550×10 <sup>3</sup>	1.741×10 <sup>3</sup>
<sup>241</sup> Pu	8.671×10 <sup>2</sup>	1.039×10 <sup>3</sup>	$1.175 \times 10^{3}$	1.203×10 <sup>3</sup>	1.220×10 <sup>3</sup>	8.179×10 <sup>2</sup>
<sup>242</sup> Pu	4.439×10 <sup>2</sup>	6.330×10 <sup>2</sup>	$6.853 \times 10^{2}$	5.347×10 <sup>2</sup>	5.146×10 <sup>2</sup>	2.069×10 <sup>2</sup>
<sup>241</sup> Am	2.682×10 <sup>1</sup>	$2.824 \times 10^{1}$	3.189×10 <sup>1</sup>	3.751×10 <sup>1</sup>	3.875×10 <sup>1</sup>	3.211×10 <sup>1</sup>
<sup>143</sup> Nd	8.366×10 <sup>2</sup>	$8.755 \times 10^{2}$	9.089×10 <sup>2</sup>	9.171×10 <sup>2</sup>	9.183×10 <sup>2</sup>	7.421×10 <sup>2</sup>
<sup>144</sup> Nd	1.241×10 <sup>3</sup>	$1.474 \times 10^{3}$	$1.499 \times 10^{3}$	1.280×10 <sup>3</sup>	1.249×10 <sup>3</sup>	7.911×10 <sup>2</sup>
<sup>145</sup> Nd	7.714×10 <sup>2</sup>	8.522×10 <sup>2</sup>	$8.723 \times 10^{2}$	8.064×10 <sup>2</sup>	7.966×10 <sup>2</sup>	5.878×10 <sup>2</sup>
<sup>146</sup> Nd	7.768×10 <sup>2</sup>	9.072×10 <sup>2</sup>	9.482×10 <sup>2</sup>	8.504×10 <sup>2</sup>	8.395×10 <sup>2</sup>	5.597×10 <sup>2</sup>
<sup>148</sup> Nd	4.072×10 <sup>2</sup>	$4.673 \times 10^{2}$	$4.861 \times 10^{2}$	4.414×10 <sup>2</sup>	4.359×10 <sup>2</sup>	3.005×10 <sup>2</sup>
<sup>150</sup> Nd	$1.888 \times 10^{2}$	$2.209 \times 10^{2}$	$2.324 \times 10^{2}$	$2.105 \times 10^{2}$	2.080×10 <sup>2</sup>	$1.387 \times 10^{2}$
<sup>134</sup> Cs	1.108×10 <sup>2</sup>	$1.525 \times 10^{2}$	$1.735 \times 10^{2}$	1.488×10 <sup>2</sup>	1.471×10 <sup>2</sup>	7.107×10 <sup>1</sup>
<sup>137</sup> Cs	1.339×10 <sup>3</sup>	1.536×10 <sup>3</sup>	$1.597 \times 10^{3}$	1.448×10 <sup>3</sup>	1.429×10 <sup>3</sup>	9.842×10 <sup>2</sup>
<sup>154</sup> Eu	$1.850 \times 10^{1}$	$2.420 \times 10^{1}$	$2.820 \times 10^{1}$	$2.756 \times 10^{1}$	2.802×10 <sup>1</sup>	1.548×10 <sup>1</sup>
<sup>147</sup> Sm	2.805×10 <sup>2</sup>	2.903×10 <sup>2</sup>	$2.927 \times 10^{2}$	2.811×10 <sup>2</sup>	2.747×10 <sup>2</sup>	2.296×10 <sup>2</sup>
<sup>148</sup> Sm	1.435×10 <sup>2</sup>	$1.889 \times 10^{2}$	$2.075 \times 10^{2}$	1.808×10 <sup>2</sup>	$1.788 \times 10^{2}$	9.591×10 <sup>1</sup>
<sup>149</sup> Sm	$2.379 \times 10^{0}$	$2.638 \times 10^{0}$	$2.873 \times 10^{0}$	$3.017 \times 10^{0}$	3.076×10 <sup>0</sup>	$2.754 \times 10^{0}$
<sup>150</sup> Sm	2.885×10 <sup>2</sup>	3.382×10 <sup>2</sup>	$3.568 \times 10^{2}$	3.231×10 <sup>2</sup>	3.196×10 <sup>2</sup>	2.160×10 <sup>2</sup>
<sup>151</sup> Sm	7.774×10 <sup>0</sup>	8.448×10 <sup>0</sup>	9.517×10 <sup>0</sup>	1.058×10 <sup>1</sup>	1.098×10 <sup>1</sup>	1.030×10 <sup>1</sup>
<sup>152</sup> Sm	1.275×10 <sup>2</sup>	1.361×10 <sup>2</sup>	1.330×10 <sup>2</sup>	1.190×10 <sup>2</sup>	1.164×10 <sup>2</sup>	9.027×10 <sup>1</sup>
<sup>154</sup> Sm	3.437×10 <sup>1</sup>	$4.221 \times 10^{1}$	4.544×10 <sup>1</sup>	$4.051 \times 10^{1}$	$4.004 \times 10^{1}$	$2.441 \times 10^{1}$

表 A.3 SF98 における核種生成量の SWAT4.0 の計算値[g/tHM]

Isotope				Calculation re	sults [g/tHM]			
Isotope	SF99-2	SF99-3	SF99-4	SF99-5	SF99-6	SF99-7	SF99-8	SF99-9
Exp [GWd/t]	22.6	32.4	35.4	37.4	32.4	32.1	21.8	16.6
<sup>235</sup> U	$1.447 \times 10^{4}$	$8.814 \times 10^{3}$	$7.701 \times 10^{3}$	$7.610 \times 10^{3}$	$1.069 \times 10^{4}$	$1.094 \times 10^{4}$	$1.612 \times 10^{4}$	$1.952 \times 10^{4}$
<sup>236</sup> U	$3.378 \times 10^{3}$	4.210×10 <sup>3</sup>	4.387×10 <sup>3</sup>	$4.488 \times 10^{3}$	$4.202 \times 10^{3}$	4.195×10 <sup>3</sup>	3.345×10 <sup>3</sup>	$2.773 \times 10^{3}$
<sup>238</sup> U	9.521×10 <sup>5</sup>	9.454×10 <sup>5</sup>	9.426×10 <sup>5</sup>	9.395×10 <sup>5</sup>	9.414×10 <sup>5</sup>	9.412×10 <sup>5</sup>	9.496×10 <sup>5</sup>	9.533×10 <sup>5</sup>
<sup>237</sup> Np	1.935×10 <sup>2</sup>	3.105×10 <sup>2</sup>	3.573×10 <sup>2</sup>	4.093×10 <sup>2</sup>	3.766×10 <sup>2</sup>	3.791×10 <sup>2</sup>	2.384×10 <sup>2</sup>	$1.707 \times 10^{2}$
<sup>238</sup> Pu	4.760×10 <sup>1</sup>	1.083×10 <sup>2</sup>	1.384×10 <sup>2</sup>	1.760×10 <sup>2</sup>	1.509×10 <sup>2</sup>	1.533×10 <sup>2</sup>	6.648×10 <sup>1</sup>	3.719×10 <sup>1</sup>
<sup>239</sup> Pu <sup>*</sup>	$3.831 \times 10^{3}$	3.918×10 <sup>3</sup>	4.082×10 <sup>3</sup>	4.643×10 <sup>3</sup>	5.466×10 <sup>3</sup>	5.662×10 <sup>3</sup>	5.277×10 <sup>3</sup>	$4.874 \times 10^{3}$
<sup>240</sup> Pu	1.516×10 <sup>3</sup>	2.108×10 <sup>3</sup>	2.300×10 <sup>3</sup>	2.520×10 <sup>3</sup>	2.402×10 <sup>3</sup>	2.421×10 <sup>3</sup>	1.626×10 <sup>3</sup>	1.211×10 <sup>3</sup>
<sup>241</sup> Pu	6.415×10 <sup>2</sup>	9.172×10 <sup>2</sup>	1.023×10 <sup>3</sup>	1.187×10 <sup>3</sup>	1.194×10 <sup>3</sup>	1.208×10 <sup>3</sup>	7.827×10 <sup>2</sup>	5.533×10 <sup>2</sup>
<sup>242</sup> Pu	$1.824 \times 10^{2}$	4.376×10 <sup>2</sup>	5.373×10 <sup>2</sup>	5.999×10 <sup>2</sup>	4.280×10 <sup>2</sup>	4.168×10 <sup>2</sup>	1.679×10 <sup>2</sup>	8.803×10 <sup>1</sup>
<sup>241</sup> Am	$2.865 \times 10^{1}$	3.285×10 <sup>1</sup>	3.429×10 <sup>1</sup>	3.909×10 <sup>1</sup>	4.546×10 <sup>1</sup>	4.648×10 <sup>1</sup>	3.504×10 <sup>1</sup>	2.701×10 <sup>1</sup>
<sup>143</sup> Nd	6.186×10 <sup>2</sup>	7.644×10 <sup>2</sup>	8.009×10 <sup>2</sup>	8.429×10 <sup>2</sup>	8.024×10 <sup>2</sup>	8.031×10 <sup>2</sup>	6.170×10 <sup>2</sup>	$4.982 \times 10^{2}$
<sup>144</sup> Nd	6.530×10 <sup>2</sup>	$1.027 \times 10^{3}$	1.139×10 <sup>3</sup>	$1.186 \times 10^{3}$	9.513×10 <sup>2</sup>	9.377×10 <sup>2</sup>	5.988×10 <sup>2</sup>	4.397×10 <sup>2</sup>
<sup>145</sup> Nd	4.987×10 <sup>2</sup>	6.769×10 <sup>2</sup>	7.244×10 <sup>2</sup>	7.519×10 <sup>2</sup>	6.638×10 <sup>2</sup>	6.587×10 <sup>2</sup>	4.737×10 <sup>2</sup>	3.715×10 <sup>2</sup>
<sup>146</sup> Nd	4.543×10 <sup>2</sup>	6.697×10 <sup>2</sup>	7.384×10 <sup>2</sup>	7.853×10 <sup>2</sup>	6.706×10 <sup>2</sup>	6.663×10 <sup>2</sup>	4.421×10 <sup>2</sup>	3.330×10 <sup>2</sup>
<sup>148</sup> Nd	2.498×10 <sup>2</sup>	3.580×10 <sup>2</sup>	3.912×10 <sup>2</sup>	4.138×10 <sup>2</sup>	3.585×10 <sup>2</sup>	3.561×10 <sup>2</sup>	2.421×10 <sup>2</sup>	$1.848 \times 10^{2}$
<sup>150</sup> Nd	1.153×10 <sup>2</sup>	1.698×10 <sup>2</sup>	1.877×10 <sup>2</sup>	2.012×10 <sup>2</sup>	1.741×10 <sup>2</sup>	1.732×10 <sup>2</sup>	$1.142 \times 10^{2}$	8.591×10 <sup>1</sup>
<sup>134</sup> Cs	4.295×10 <sup>1</sup>	9.108×10 <sup>1</sup>	1.108×10 <sup>2</sup>	1.299×10 <sup>2</sup>	1.038×10 <sup>2</sup>	1.035×10 <sup>2</sup>	4.964×10 <sup>1</sup>	2.924×10 <sup>1</sup>
<sup>137</sup> Cs	8.199×10 <sup>2</sup>	1.177×10 <sup>3</sup>	1.285×10 <sup>3</sup>	1.358×10 <sup>3</sup>	1.174×10 <sup>3</sup>	1.166×10 <sup>3</sup>	7.909×10 <sup>2</sup>	6.026×10 <sup>2</sup>
<sup>154</sup> Eu	$1.425 \times 10^{1}$	2.312×10 <sup>1</sup>	2.660×10 <sup>1</sup>	3.141×10 <sup>1</sup>	3.027×10 <sup>1</sup>	3.092×10 <sup>1</sup>	$1.642 \times 10^{1}$	$1.061 \times 10^{1}$
<sup>147</sup> Sm	NoData	2.656×10 <sup>2</sup>	NoData	2.741×10 <sup>2</sup>	NoData	2.497×10 <sup>2</sup>	$1.972 \times 10^{2}$	$1.641 \times 10^{2}$
<sup>148</sup> Sm	NoData	$1.205 \times 10^{2}$	NoData	$1.627 \times 10^{2}$	NoData	1.330×10 <sup>2</sup>	$7.088 \times 10^{1}$	4.493×10 <sup>1</sup>
<sup>149</sup> Sm	NoData	2.286×10 <sup>0</sup>	NoData	2.724×10 <sup>0</sup>	NoData	2.980×10 <sup>0</sup>	2.673×10 <sup>0</sup>	2.426×10 <sup>0</sup>
<sup>150</sup> Sm	NoData	2.556×10 <sup>2</sup>	NoData	3.026×10 <sup>2</sup>	NoData	2.608×10 <sup>2</sup>	$1.740 \times 10^{2}$	$1.297 \times 10^{2}$
<sup>151</sup> Sm	NoData	$7.800 \times 10^{0}$	NoData	9.451×10 <sup>0</sup>	NoData	1.118×10 <sup>1</sup>	$1.032 \times 10^{1}$	9.806×10 <sup>0</sup>
<sup>152</sup> Sm	NoData	1.163×10 <sup>2</sup>	NoData	1.200×10 <sup>2</sup>	NoData	1.021×10 <sup>2</sup>	$7.682 \times 10^{1}$	6.168×10 <sup>1</sup>
<sup>154</sup> Sm	NoData	3.212×10 <sup>1</sup>	NoData	4.008×10 <sup>1</sup>	NoData	3.394×10 <sup>1</sup>	2.066×10 <sup>1</sup>	1.491×10 <sup>1</sup>

表 A.4 SF99 における核種生成量の SWAT4.0 の計算値[g/tHM]

表 A.5 SF99 の Gd 同位体比の SWAT4.0 の計算値

	SF99-3	SF99-5	SF99-7	SF99-9
<sup>154</sup> Gd	1.67%	1.58%	1.64%	1.88%
<sup>155</sup> Gd	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%
<sup>156</sup> Gd	34.85%	34.53%	34.37%	34.77%
<sup>157</sup> Gd	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%
<sup>158</sup> Gd	41.43%	41.81%	41.88%	41.25%
<sup>160</sup> Gd	21.99%	22.02%	22.03%	21.97%

		SF98-4			SF98-6	
Isotope	-10%	base	+10%	-10%	base	+10%
	(7.5%)	(17.5%)	(27.5%)	(52.5%)	(62.5%)	(72.5%)
<sup>235</sup> U	5.964×10 <sup>3</sup>	$6.229 \times 10^{3}$	$6.492 \times 10^{3}$	$8.370 \times 10^{3}$	8.716×10 <sup>3</sup>	$9.071 \times 10^{3}$
<sup>236</sup> U	5.212×10 <sup>3</sup>	$5.202 \times 10^{3}$	5.203×10 <sup>3</sup>	$5.077 \times 10^{3}$	$5.080 \times 10^{3}$	$5.091 \times 10^{3}$
<sup>238</sup> U	9.365×10 <sup>5</sup>	9.360×10 <sup>5</sup>	9.355×10 <sup>5</sup>	9.355×10 <sup>5</sup>	9.347×10 <sup>5</sup>	9.338×10 <sup>5</sup>
<sup>237</sup> Np	4.114×10 <sup>2</sup>	4.249×10 <sup>2</sup>	4.347×10 <sup>2</sup>	$4.405 \times 10^{2}$	$4.565 \times 10^{2}$	4.717×10 <sup>2</sup>
<sup>238</sup> Pu	$1.671 \times 10^{2}$	$1.748 \times 10^{2}$	1.831×10 <sup>2</sup>	$1.838 \times 10^{2}$	$1.955 \times 10^{2}$	$2.088 \times 10^{2}$
<sup>239</sup> Pu <sup>*</sup>	3.658×10 <sup>3</sup>	3.840×10 <sup>3</sup>	4.004×10 <sup>3</sup>	$4.685 \times 10^{3}$	5.002×10 <sup>3</sup>	5.369×10 <sup>3</sup>
<sup>240</sup> Pu	2.352×10 <sup>3</sup>	2.383×10 <sup>3</sup>	2.414×10 <sup>3</sup>	$2.475 \times 10^{3}$	2.536×10 <sup>3</sup>	$2.623 \times 10^{3}$
<sup>241</sup> Pu	9.932×10 <sup>2</sup>	1.039×10 <sup>3</sup>	1.079×10 <sup>3</sup>	$1.147 \times 10^{3}$	1.203×10 <sup>3</sup>	$1.258 \times 10^{3}$
<sup>242</sup> Pu	6.346×10 <sup>2</sup>	6.330×10 <sup>2</sup>	6.342×10 <sup>2</sup>	5.413×10 <sup>2</sup>	5.347×10 <sup>2</sup>	5.240×10 <sup>2</sup>
<sup>241</sup> Am	2.656×10 <sup>1</sup>	2.824×10 <sup>1</sup>	2.985×10 <sup>1</sup>	3.526×10 <sup>1</sup>	3.751×10 <sup>1</sup>	3.968×10 <sup>1</sup>
<sup>143</sup> Nd	8.630×10 <sup>2</sup>	8.755×10 <sup>2</sup>	8.869×10 <sup>2</sup>	9.056×10 <sup>2</sup>	9.171×10 <sup>2</sup>	9.284×10 <sup>2</sup>
<sup>144</sup> Nd	1.492×10 <sup>3</sup>	1.474×10 <sup>3</sup>	1.458×10 <sup>3</sup>	1.298×10 <sup>3</sup>	$1.280 \times 10^{3}$	$1.262 \times 10^{3}$
<sup>145</sup> Nd	8.532×10 <sup>2</sup>	8.522×10 <sup>2</sup>	8.509×10 <sup>2</sup>	8.088×10 <sup>2</sup>	8.064×10 <sup>2</sup>	8.030×10 <sup>2</sup>
<sup>146</sup> Nd	9.075×10 <sup>2</sup>	9.072×10 <sup>2</sup>	9.073×10 <sup>2</sup>	8.494×10 <sup>2</sup>	8.504×10 <sup>2</sup>	8.525×10 <sup>2</sup>
<sup>148</sup> Nd	4.671×10 <sup>2</sup>	4.673×10 <sup>2</sup>	4.675×10 <sup>2</sup>	4.411×10 <sup>2</sup>	4.414×10 <sup>2</sup>	4.417×10 <sup>2</sup>
<sup>150</sup> Nd	2.202×10 <sup>2</sup>	2.209×10 <sup>2</sup>	2.216×10 <sup>2</sup>	2.096×10 <sup>2</sup>	2.105×10 <sup>2</sup>	2.114×10 <sup>2</sup>
$^{134}$ Cs	1.513×10 <sup>2</sup>	$1.525 \times 10^{2}$	1.563×10 <sup>2</sup>	$1.451 \times 10^{2}$	1.488×10 <sup>2</sup>	$1.525 \times 10^{2}$
<sup>137</sup> Cs	1.536×10 <sup>3</sup>	1.536×10 <sup>3</sup>	1.536×10 <sup>3</sup>	1.448×10 <sup>3</sup>	1.448×10 <sup>3</sup>	$1.448 \times 10^{3}$
<sup>154</sup> Eu	2.321×10 <sup>1</sup>	2.420×10 <sup>1</sup>	2.501×10 <sup>1</sup>	2.603×10 <sup>1</sup>	2.756×10 <sup>1</sup>	2.934×10 <sup>1</sup>
<sup>147</sup> Sm	2.920×10 <sup>2</sup>	2.903×10 <sup>2</sup>	2.884×10 <sup>2</sup>	$2.845 \times 10^{2}$	2.811×10 <sup>2</sup>	$2.777 \times 10^{2}$
<sup>148</sup> Sm	$1.870 \times 10^{2}$	$1.889 \times 10^{2}$	$1.907 \times 10^{2}$	$1.775 \times 10^{2}$	$1.808 \times 10^{2}$	$1.843 \times 10^{2}$
<sup>149</sup> Sm	$2.570 \times 10^{0}$	$2.638 \times 10^{0}$	$2.703 \times 10^{0}$	$2.871 \times 10^{0}$	$3.017 \times 10^{0}$	$3.156 \times 10^{0}$
$^{150}$ Sm	3.366×10 <sup>2</sup>	3.382×10 <sup>2</sup>	3.400×10 <sup>2</sup>	3.212×10 <sup>2</sup>	3.231×10 <sup>2</sup>	$3.250 \times 10^{2}$
<sup>151</sup> Sm	8.126×10 <sup>0</sup>	$8.448 \times 10^{0}$	8.818×10 <sup>0</sup>	9.948×10 <sup>0</sup>	1.058×10 <sup>1</sup>	1.130×10 <sup>1</sup>
<sup>152</sup> Sm	$1.391 \times 10^{2}$	$1.361 \times 10^{2}$	$1.343 \times 10^{2}$	$1.221 \times 10^{2}$	$1.190 \times 10^{2}$	$1.158 \times 10^{2}$
<sup>154</sup> Sm	$4.189 \times 10^{1}$	$4.221 \times 10^{1}$	$4.252 \times 10^{1}$	$4.011 \times 10^{1}$	$4.051 \times 10^{1}$	$4.092 \times 10^{1}$

表 A.6 SF98-4 及び SF98-6 のボイド率変化に対する核種生成量の SWAT4.0 の計算値 [g/tHM]

		SF98-4			SF98-6	
	Calculation	on results	dif	Calculati	on results	dif
Isotope	[g/t]	HM]	un.	[g/tl	HM]	un.
	JENDL-	ENDF/	B71 - J40	JENDL-	ENDF/	B71 - J40
	4.0	B-VII.1	2,1 0.0	4.0	B-VII.1	
<sup>235</sup> U	6.229×10 <sup>3</sup>	6.220×10 <sup>3</sup>	$-9.030 \times 10^{0}$	8.716×10 <sup>3</sup>	8.716×10 <sup>3</sup>	-8.000×10 <sup>-2</sup>
<sup>236</sup> U	$5.202 \times 10^{3}$	$5.212 \times 10^{3}$	$1.005 \times 10^{1}$	$5.080 \times 10^{3}$	$5.089 \times 10^{3}$	$9.410 \times 10^{0}$
<sup>238</sup> U	9.360×10 <sup>5</sup>	9.360×10 <sup>5</sup>	$4.700 \times 10^{1}$	9.347×10 <sup>5</sup>	9.347×10 <sup>5</sup>	$9.000 \times 10^{0}$
<sup>237</sup> Np	$4.249 \times 10^{2}$	$4.148 \times 10^{2}$	$-1.007 \times 10^{1}$	$4.565 \times 10^{2}$	$4.451 \times 10^{2}$	$-1.136 \times 10^{1}$
<sup>238</sup> Pu	$1.748 \times 10^{2}$	$1.718 \times 10^{2}$	$-3.044 \times 10^{0}$	$1.955 \times 10^{2}$	1.913×10 <sup>2</sup>	$-4.223 \times 10^{0}$
<sup>239</sup> Pu <sup>*</sup>	$3.840 \times 10^{3}$	$3.822 \times 10^{3}$	-1.844×10 <sup>1</sup>	$5.002 \times 10^{3}$	4.998×10 <sup>3</sup>	$-4.075 \times 10^{0}$
<sup>240</sup> Pu	$2.383 \times 10^{3}$	2.367×10 <sup>3</sup>	-1.561×10 <sup>1</sup>	$2.536 \times 10^{3}$	$2.540 \times 10^{3}$	$3.870 \times 10^{0}$
<sup>241</sup> Pu	$1.039 \times 10^{3}$	1.038×10 <sup>3</sup>	-1.680×10 <sup>0</sup>	$1.203 \times 10^{3}$	$1.202 \times 10^{3}$	-9.400×10 <sup>-1</sup>
<sup>242</sup> Pu	6.330×10 <sup>2</sup>	6.350×10 <sup>2</sup>	$1.959 \times 10^{0}$	5.347×10 <sup>2</sup>	5.342×10 <sup>2</sup>	-5.420×10 <sup>-1</sup>
<sup>241</sup> Am	$2.824 \times 10^{1}$	2.821×10 <sup>1</sup>	-3.510×10 <sup>-2</sup>	3.751×10 <sup>1</sup>	$3.742 \times 10^{1}$	-8.970×10 <sup>-2</sup>
<sup>143</sup> Nd	8.755×10 <sup>2</sup>	8.750×10 <sup>2</sup>	-5.280×10 <sup>-1</sup>	9.171×10 <sup>2</sup>	9.173×10 <sup>2</sup>	2.860×10 <sup>-1</sup>
<sup>144</sup> Nd	$1.474 \times 10^{3}$	1.475×10 <sup>3</sup>	$1.010 \times 10^{0}$	$1.280 \times 10^{3}$	$1.280 \times 10^{3}$	3.900×10 <sup>-1</sup>
<sup>145</sup> Nd	8.522×10 <sup>2</sup>	8.522×10 <sup>2</sup>	-2.400×10 <sup>-2</sup>	8.064×10 <sup>2</sup>	8.064×10 <sup>2</sup>	3.700×10 <sup>-2</sup>
<sup>146</sup> Nd	$9.072 \times 10^{2}$	9.075×10 <sup>2</sup>	3.420×10 <sup>-1</sup>	8.504×10 <sup>2</sup>	8.508×10 <sup>2</sup>	3.700×10 <sup>-1</sup>
<sup>148</sup> Nd	4.673×10 <sup>2</sup>	4.673×10 <sup>2</sup>	-4.200×10 <sup>-2</sup>	4.414×10 <sup>2</sup>	4.413×10 <sup>2</sup>	-7.000×10 <sup>-3</sup>
<sup>150</sup> Nd	2.209×10 <sup>2</sup>	2.208×10 <sup>2</sup>	-1.310×10 <sup>-1</sup>	2.105×10 <sup>2</sup>	2.103×10 <sup>2</sup>	-1.090×10 <sup>-1</sup>
<sup>134</sup> Cs	$1.525 \times 10^{2}$	1.536×10 <sup>2</sup>	$1.110 \times 10^{0}$	1.488×10 <sup>2</sup>	$1.486 \times 10^{2}$	-2.480×10 <sup>-1</sup>
<sup>137</sup> Cs	1.536×10 <sup>3</sup>	1.536×10 <sup>3</sup>	-2.900×10 <sup>-1</sup>	1.448×10 <sup>3</sup>	1.448×10 <sup>3</sup>	-1.500×10 <sup>-1</sup>
<sup>154</sup> Eu	2.420×10 <sup>1</sup>	2.417×10 <sup>1</sup>	-3.350×10 <sup>-2</sup>	2.756×10 <sup>1</sup>	$2.757 \times 10^{1}$	1.530×10 <sup>-2</sup>
<sup>147</sup> Sm	2.903×10 <sup>2</sup>	2.900×10 <sup>2</sup>	-2.750×10 <sup>-1</sup>	2.811×10 <sup>2</sup>	2.813×10 <sup>2</sup>	1.830×10 <sup>-1</sup>
$^{148}$ Sm	$1.889 \times 10^{2}$	1.891×10 <sup>2</sup>	1.900×10 <sup>-1</sup>	$1.808 \times 10^{2}$	$1.807 \times 10^{2}$	-9.500×10 <sup>-2</sup>
<sup>149</sup> Sm	$2.638 \times 10^{0}$	2.639×10 <sup>0</sup>	$7.500 \times 10^{-4}$	3.017×10 <sup>0</sup>	3.011×10 <sup>0</sup>	-5.060×10 <sup>-3</sup>
$^{150}$ Sm	3.382×10 <sup>2</sup>	3.382×10 <sup>2</sup>	-5.400×10 <sup>-2</sup>	3.231×10 <sup>2</sup>	3.230×10 <sup>2</sup>	-1.090×10 <sup>-1</sup>
<sup>151</sup> Sm	8.448×10 <sup>0</sup>	8.434×10 <sup>0</sup>	-1.424×10 <sup>-2</sup>	1.058×10 <sup>1</sup>	1.059×10 <sup>1</sup>	4.100×10 <sup>-3</sup>
$^{152}$ Sm	$1.361 \times 10^{2}$	1.361×10 <sup>2</sup>	3.100×10 <sup>-2</sup>	1.190×10 <sup>2</sup>	1.188×10 <sup>2</sup>	-1.130×10 <sup>-1</sup>
<sup>154</sup> Sm	4.221×10 <sup>1</sup>	4.214×10 <sup>1</sup>	-6.800×10 <sup>-2</sup>	4.051×10 <sup>1</sup>	4.045×10 <sup>1</sup>	-6.170×10 <sup>-2</sup>

表 A.7 SF98-4 及び SF98-6 の<sup>236</sup>Uの核データライブラリを変更した SWAT4.0 の計算値

[g/tHM]

		SF98-4			SF98-6	
	Calculation	on results	dif	Calculati	on results	dif
Isotope	[g/tł	HM]	uii.	[g/tł	HM]	<b>G</b> 11.
	JENDL- 4.0	ENDF/ B-VII.1	B71 - J40	JENDL- 4.0	ENDF/ B-VII.1	B71 - J40
<sup>235</sup> U	6.229×10 <sup>3</sup>	6.231×10 <sup>3</sup>	2.680×10 <sup>0</sup>	8.716×10 <sup>3</sup>	8.717×10 <sup>3</sup>	$1.600 \times 10^{0}$
<sup>236</sup> U	5.202×10 <sup>3</sup>	5.202×10 <sup>3</sup>	6.700×10 <sup>-1</sup>	5.080×10 <sup>3</sup>	5.081×10 <sup>3</sup>	9.800×10 <sup>-1</sup>
<sup>238</sup> U	9.360×10 <sup>5</sup>	9.360×10 <sup>5</sup>	-1.100×10 <sup>1</sup>	9.347×10 <sup>5</sup>	9.347×10 <sup>5</sup>	-6.000×10 <sup>0</sup>
<sup>237</sup> Np	4.249×10 <sup>2</sup>	4.337×10 <sup>2</sup>	8.839×10 <sup>0</sup>	$4.565 \times 10^{2}$	4.651×10 <sup>2</sup>	8.667×10 <sup>0</sup>
<sup>238</sup> Pu	$1.748 \times 10^{2}$	$1.787 \times 10^{2}$	3.920×10 <sup>0</sup>	$1.955 \times 10^{2}$	1.997×10 <sup>2</sup>	4.124×10 <sup>0</sup>
<sup>239</sup> Pu <sup>*</sup>	$3.840 \times 10^{3}$	3.833×10 <sup>3</sup>	-7.344×10 <sup>0</sup>	$5.002 \times 10^{3}$	4.999×10 <sup>3</sup>	-3.319×10 <sup>0</sup>
<sup>240</sup> Pu	$2.383 \times 10^{3}$	2.385×10 <sup>3</sup>	$2.910 \times 10^{0}$	$2.536 \times 10^{3}$	2.532×10 <sup>3</sup>	$-3.760 \times 10^{0}$
<sup>241</sup> Pu	1.039×10 <sup>3</sup>	$1.037 \times 10^{3}$	$-2.010 \times 10^{0}$	$1.203 \times 10^{3}$	1.203×10 <sup>3</sup>	-4.600×10 <sup>-1</sup>
<sup>242</sup> Pu	6.330×10 <sup>2</sup>	6.338×10 <sup>2</sup>	8.050×10 <sup>-1</sup>	5.347×10 <sup>2</sup>	5.358×10 <sup>2</sup>	$1.092 \times 10^{0}$
<sup>241</sup> Am	$2.824 \times 10^{1}$	$2.822 \times 10^{1}$	-2.610×10 <sup>-2</sup>	3.751×10 <sup>1</sup>	3.748×10 <sup>1</sup>	-2.980×10 <sup>-2</sup>
<sup>143</sup> Nd	8.755×10 <sup>2</sup>	8.755×10 <sup>2</sup>	-1.400×10 <sup>-2</sup>	9.171×10 <sup>2</sup>	9.170×10 <sup>2</sup>	-4.100×10 <sup>-2</sup>
<sup>144</sup> Nd	$1.474 \times 10^{3}$	1.474×10 <sup>3</sup>	-2.000×10 <sup>-2</sup>	$1.280 \times 10^{3}$	1.280×10 <sup>3</sup>	4.000×10 <sup>-2</sup>
<sup>145</sup> Nd	8.522×10 <sup>2</sup>	8.519×10 <sup>2</sup>	-2.870×10 <sup>-1</sup>	8.064×10 <sup>2</sup>	8.062×10 <sup>2</sup>	-1.640×10 <sup>-1</sup>
<sup>146</sup> Nd	$9.072 \times 10^{2}$	$9.075 \times 10^{2}$	3.440×10 <sup>-1</sup>	$8.504 \times 10^{2}$	8.507×10 <sup>2</sup>	2.480×10 <sup>-1</sup>
<sup>148</sup> Nd	$4.673 \times 10^{2}$	4.673×10 <sup>2</sup>	-1.000×10 <sup>-3</sup>	4.414×10 <sup>2</sup>	4.414×10 <sup>2</sup>	2.100×10 <sup>-2</sup>
<sup>150</sup> Nd	$2.209 \times 10^{2}$	2.209×10 <sup>2</sup>	2.300×10 <sup>-2</sup>	$2.105 \times 10^{2}$	$2.105 \times 10^{2}$	2.100×10 <sup>-2</sup>
<sup>134</sup> Cs	$1.525 \times 10^{2}$	1.533×10 <sup>2</sup>	7.900×10 <sup>-1</sup>	$1.488 \times 10^{2}$	1.486×10 <sup>2</sup>	-2.480×10 <sup>-1</sup>
<sup>137</sup> Cs	$1.536 \times 10^{3}$	1.536×10 <sup>3</sup>	-2.000×10 <sup>-2</sup>	$1.448 \times 10^{3}$	1.448×10 <sup>3</sup>	-1.000×10 <sup>-2</sup>
<sup>154</sup> Eu	2.420×10 <sup>1</sup>	2.410×10 <sup>1</sup>	-9.770×10 <sup>-2</sup>	2.756×10 <sup>1</sup>	$2.757 \times 10^{1}$	1.020×10 <sup>-2</sup>
$^{147}$ Sm	$2.903 \times 10^{2}$	2.900×10 <sup>2</sup>	-3.180×10 <sup>-1</sup>	$2.811 \times 10^{2}$	2.812×10 <sup>2</sup>	1.270×10 <sup>-1</sup>
$^{148}$ Sm	$1.889 \times 10^{2}$	1.891×10 <sup>2</sup>	2.350×10 <sup>-1</sup>	$1.808 \times 10^{2}$	$1.807 \times 10^{2}$	-8.400×10 <sup>-2</sup>
<sup>149</sup> Sm	$2.638 \times 10^{0}$	2.643×10 <sup>0</sup>	4.780×10 <sup>-3</sup>	3.017×10 <sup>0</sup>	3.011×10 <sup>0</sup>	-5.460×10 <sup>-3</sup>
$^{150}$ Sm	3.382×10 <sup>2</sup>	3.385×10 <sup>2</sup>	2.050×10 <sup>-1</sup>	3.231×10 <sup>2</sup>	3.231×10 <sup>2</sup>	1.500×10 <sup>-2</sup>
<sup>151</sup> Sm	$8.448 \times 10^{0}$	8.470×10 <sup>0</sup>	2.211×10 <sup>-2</sup>	1.058×10 <sup>1</sup>	$1.057 \times 10^{1}$	-9.100×10 <sup>-3</sup>
$^{152}$ Sm	$1.361 \times 10^{2}$	1.368×10 <sup>2</sup>	7.490×10 <sup>-1</sup>	1.190×10 <sup>2</sup>	1.191×10 <sup>2</sup>	1.660×10 <sup>-1</sup>
<sup>154</sup> Sm	4.221×10 <sup>1</sup>	4.221×10 <sup>1</sup>	-1.000×10 <sup>-3</sup>	4.051×10 <sup>1</sup>	4.051×10 <sup>1</sup>	-1.100×10 <sup>-3</sup>

表 A.8 SF98-4 及び SF98-6 の<sup>238</sup>Uの核データライブラリを変更した SWAT4.0 の計算値

[g/tHM]

		SF98-4			SF98-6	
	Calculati	on results	dif	Calculati	on results	dif
Isotope	[g/tł	HM]	<b>u</b> 11.	[g/tl	HM]	<b>G</b> 11.
	JENDL- 4.0	ENDF/ B-VII.1	B71 - J40	JENDL- 4.0	ENDF/ B-VII.1	B71 - J40
<sup>235</sup> U	6.229×10 <sup>3</sup>	6.230×10 <sup>3</sup>	9.500×10 <sup>-1</sup>	8.716×10 <sup>3</sup>	8.715×10 <sup>3</sup>	-9.200×10 <sup>-1</sup>
<sup>236</sup> U	5.202×10 <sup>3</sup>	5.206×10 <sup>3</sup>	$4.550 \times 10^{0}$	5.080×10 <sup>3</sup>	5.078×10 <sup>3</sup>	$-2.410 \times 10^{0}$
<sup>238</sup> U	9.360×10 <sup>5</sup>	9.360×10 <sup>5</sup>	$-5.000 \times 10^{0}$	9.347×10 <sup>5</sup>	9.347×10 <sup>5</sup>	$-3.000 \times 10^{0}$
<sup>237</sup> Np	4.249×10 <sup>2</sup>	4.243×10 <sup>2</sup>	-5.840×10 <sup>-1</sup>	$4.565 \times 10^{2}$	4.621×10 <sup>2</sup>	5.671×10 <sup>0</sup>
<sup>238</sup> Pu	$1.748 \times 10^{2}$	1.716×10 <sup>2</sup>	$-3.255 \times 10^{0}$	$1.955 \times 10^{2}$	$1.924 \times 10^{2}$	$-3.100 \times 10^{0}$
<sup>239</sup> Pu <sup>*</sup>	3.840×10 <sup>3</sup>	3.843×10 <sup>3</sup>	$2.384 \times 10^{0}$	5.002×10 <sup>3</sup>	5.000×10 <sup>3</sup>	$-1.861 \times 10^{0}$
<sup>240</sup> Pu	2.383×10 <sup>3</sup>	2.385×10 <sup>3</sup>	$2.120 \times 10^{0}$	$2.536 \times 10^{3}$	2.539×10 <sup>3</sup>	3.120×10 <sup>0</sup>
<sup>241</sup> Pu	1.039×10 <sup>3</sup>	$1.042 \times 10^{3}$	$2.370 \times 10^{0}$	$1.203 \times 10^{3}$	1.203×10 <sup>3</sup>	-1.200×10 <sup>-1</sup>
<sup>242</sup> Pu	6.330×10 <sup>2</sup>	6.325×10 <sup>2</sup>	-4.480×10 <sup>-1</sup>	5.347×10 <sup>2</sup>	5.346×10 <sup>2</sup>	-8.100×10 <sup>-2</sup>
<sup>241</sup> Am	2.824×10 <sup>1</sup>	2.823×10 <sup>1</sup>	-8.500×10 <sup>-3</sup>	3.751×10 <sup>1</sup>	3.745×10 <sup>1</sup>	-6.330×10 <sup>-2</sup>
<sup>143</sup> Nd	8.755×10 <sup>2</sup>	8.755×10 <sup>2</sup>	-7.400×10 <sup>-2</sup>	9.171×10 <sup>2</sup>	9.169×10 <sup>2</sup>	-1.310×10 <sup>-1</sup>
<sup>144</sup> Nd	$1.474 \times 10^{3}$	1.474×10 <sup>3</sup>	1.200×10 <sup>-1</sup>	$1.280 \times 10^{3}$	1.280×10 <sup>3</sup>	1.100×10 <sup>-1</sup>
<sup>145</sup> Nd	8.522×10 <sup>2</sup>	8.524×10 <sup>2</sup>	2.250×10 <sup>-1</sup>	8.064×10 <sup>2</sup>	8.063×10 <sup>2</sup>	-7.900×10 <sup>-2</sup>
<sup>146</sup> Nd	$9.072 \times 10^{2}$	9.069×10 <sup>2</sup>	-2.470×10 <sup>-1</sup>	8.504×10 <sup>2</sup>	8.505×10 <sup>2</sup>	7.800×10 <sup>-2</sup>
<sup>148</sup> Nd	$4.673 \times 10^{2}$	4.673×10 <sup>2</sup>	-8.000×10 <sup>-3</sup>	4.414×10 <sup>2</sup>	4.414×10 <sup>2</sup>	1.000×10 <sup>-3</sup>
<sup>150</sup> Nd	$2.209 \times 10^{2}$	2.209×10 <sup>2</sup>	-2.000×10 <sup>-3</sup>	$2.105 \times 10^{2}$	$2.105 \times 10^{2}$	-3.000×10 <sup>-3</sup>
<sup>134</sup> Cs	$1.525 \times 10^{2}$	$1.531 \times 10^{2}$	6.150×10 <sup>-1</sup>	$1.488 \times 10^{2}$	$1.487 \times 10^{2}$	-9.100×10 <sup>-2</sup>
<sup>137</sup> Cs	$1.536 \times 10^{3}$	1.536×10 <sup>3</sup>	3.000×10 <sup>-2</sup>	$1.448 \times 10^{3}$	$1.448 \times 10^{3}$	1.000×10 <sup>-2</sup>
<sup>154</sup> Eu	2.420×10 <sup>1</sup>	2.417×10 <sup>1</sup>	-2.600×10 <sup>-2</sup>	2.756×10 <sup>1</sup>	$2.756 \times 10^{1}$	4.700×10 <sup>-3</sup>
<sup>147</sup> Sm	$2.903 \times 10^{2}$	2.901×10 <sup>2</sup>	-1.980×10 <sup>-1</sup>	$2.811 \times 10^{2}$	$2.809 \times 10^{2}$	-1.420×10 <sup>-1</sup>
<sup>148</sup> Sm	$1.889 \times 10^{2}$	1.890×10 <sup>2</sup>	6.800×10 <sup>-2</sup>	$1.808 \times 10^{2}$	$1.809 \times 10^{2}$	1.150×10 <sup>-1</sup>
<sup>149</sup> Sm	$2.638 \times 10^{0}$	2.637×10 <sup>0</sup>	-1.450×10 <sup>-3</sup>	3.017×10 <sup>0</sup>	3.006×10 <sup>0</sup>	-1.023×10 <sup>-2</sup>
<sup>150</sup> Sm	3.382×10 <sup>2</sup>	3.383×10 <sup>2</sup>	8.300×10 <sup>-2</sup>	3.231×10 <sup>2</sup>	3.232×10 <sup>2</sup>	7.500×10 <sup>-2</sup>
<sup>151</sup> Sm	8.448×10 <sup>0</sup>	8.465×10 <sup>0</sup>	1.630×10 <sup>-2</sup>	$1.058 \times 10^{1}$	$1.058 \times 10^{1}$	2.300×10 <sup>-3</sup>
$^{152}$ Sm	$1.361 \times 10^{2}$	$1.362 \times 10^{2}$	9.500×10 <sup>-2</sup>	$1.190 \times 10^{2}$	1.189×10 <sup>2</sup>	-2.000×10 <sup>-2</sup>
<sup>154</sup> Sm	4.221×10 <sup>1</sup>	4.221×10 <sup>1</sup>	2.000×10 <sup>-4</sup>	4.051×10 <sup>1</sup>	4.051×10 <sup>1</sup>	-1.800×10 <sup>-3</sup>

表 A.9 SF98-4 及び SF98-6 の <sup>237</sup>Np の核データライブラリを変更した SWAT4.0 の計算値 [g/tHM]

	SF98	3-3	SF98	-4	SF98	-5	SF98	-6	SF98	-7	SF98	-8
base	1.05985	0.006%	1.00635	0.006%	1.03143	0.006%	1.12528	0.006%	1.13649	0.006%	1.23175	0.006%
<sup>235</sup> U	1.06332	0.006%	1.01302	0.006%	1.03114	0.006%	1.11948	0.006%	1.13303	0.006%	1.23240	0.006%
$^{236}$ U	1.05985	0.006%	1.00643	0.006%	1.03140	0.006%	1.12536	0.006%	1.13657	0.006%	1.23187	0.006%
<sup>238</sup> U	1.05964	0.006%	1.00628	0.006%	1.03134	0.006%	1.12491	0.006%	1.13636	0.006%	1.23166	0.006%
$^{237}Np$	1.05957	0.006%	1.00638	0.006%	1.03036	0.006%	1.12608	0.006%	1.13646	0.006%	1.23183	0.006%
$^{238}$ Pu	1.05978	0.006%	1.00619	0.006%	1.03118	0.006%	1.12492	0.006%	1.13662	0.006%	1.23187	0.006%
$^{239}$ Pu	1.05831	0.006%	1.00855	0.006%	1.03337	0.006%	1.11625	0.006%	1.12449	0.006%	1.22446	0.005%
$^{240}$ Pu	1.06076	0.006%	1.00797	0.006%	1.03191	0.006%	1.12741	0.006%	1.13905	0.006%	1.23370	0.006%
$^{241}$ Pu	1.05814	0.006%	1.00672	0.006%	1.03165	0.006%	1.12133	0.006%	1.13085	0.006%	1.22876	0.006%
$^{242}$ Pu	1.05990	0.006%	1.00648	0.006%	1.03154	0.006%	1.12520	0.006%	1.13659	0.006%	1.23200	0.006%
$^{241}$ Am	1.06011	0.006%	1.00648	0.006%	1.03183	0.006%	1.12535	0.006%	1.13670	0.006%	1.23170	0.006%
<sup>143</sup> Nd	1.05935	0.006%	1.00560	0.006%	1.03131	0.006%	1.12535	0.006%	1.13659	0.006%	1.23158	0.006%
N44Nd	1.05977	0.006%	1.00630	0.006%	1.03144	0.006%	1.12530	0.006%	1.13643	0.006%	1.23165	0.006%
<sup>145</sup> Nd	1.05976	0.006%	1.00624	0.006%	1.03150	0.006%	1.12524	0.006%	1.13638	0.006%	1.23174	0.006%
$^{146}$ Nd	1.05972	0.006%	1.00631	0.006%	1.03144	0.006%	1.12530	0.006%	1.13648	0.006%	1.23162	0.006%
$^{148}$ Nd	1.05978	0.006%	1.00632	0.006%	1.03139	0.006%	1.12528	0.006%	1.13651	0.006%	1.23178	0.006%
<sup>150</sup> Nd	1.05973	0.006%	1.00626	0.006%	1.03147	0.006%	1.12530	0.006%	1.13638	0.006%	1.23177	0.006%
$^{134}$ Cs	1.05974	0.006%	1.00620	0.006%	1.03124	0.006%	1.12529	0.006%	1.13675	0.006%	1.23171	0.006%
$^{137}$ Cs	1.05988	0.006%	1.00626	0.006%	1.03148	0.006%	1.12518	0.006%	1.13642	0.006%	1.23173	0.006%
$^{154}Eu$	1.05971	0.006%	1.00635	0.006%	1.03114	0.006%	1.12557	0.006%	1.13675	0.006%	1.23190	0.006%
$^{147}$ Sm	1.06018	0.006%	1.00670	0.006%	1.03148	0.006%	1.12529	0.006%	1.13656	0.006%	1.23190	0.006%
$^{148}$ Sm	1.05984	0.006%	1.00631	0.006%	1.03143	0.006%	1.12540	0.006%	1.13658	0.006%	1.23181	0.006%
$^{149}$ Sm	1.06088	0.006%	1.00542	0.006%	1.03619	0.006%	1.12714	0.006%	1.14224	0.006%	1.23855	0.006%
$^{150}$ Sm	1.06020	0.006%	1.00667	0.006%	1.03153	0.006%	1.12553	0.006%	1.13678	0.006%	1.23196	0.005%
$^{151}$ Sm	1.06116	0.006%	1.00757	0.006%	1.03231	0.006%	1.12705	0.006%	1.13830	0.006%	1.23361	0.006%
$^{152}$ Sm	1.06031	0.006%	1.00695	0.006%	1.03166	0.006%	1.12542	0.006%	1.13668	0.006%	1.23200	0.005%
$^{154}$ Sm	1.05970	0.006%	1.00630	0.006%	1.03149	0.006%	1.12528	0.006%	1.13648	0.006%	1.23184	0.006%
All	1.06458	0.006%	1.01876	0.006%	1.03802	0.006%	1.11348	0.006%	1.12667	0.006%	1.23365	0.006%
BUC_MA	1.06147	0.006%	1.01755	0.006%	1.03364	0.006%	1.10802	0.006%	1.11795	0.006%	1.22410	0.006%
BUC_FP	1.06160	0.006%	1.00606	0.006%	1.03658	0.006%	1.12777	0.006%	1.14277	0.006%	1.23905	0.005%
BUC MA+FP	1.06343	0.006%	1.01741	0.006%	1.03887	0.006%	1.11054	0.006%	1.12443	0.006%	1.23140	0.006%

表 A.10 SF98 の核種組成を測定値から SWAT4.0 の計算値に変更した場合の実効増倍率

SF99-3	SF99-3	3	1 1	SF99	4	SF99.	-5	SF99-	-6	SF99-	7. Contract	SF99.	-8	SF99-9	
005%	-	.08991	0.006%	1.08114	0.006%	1.07787	0.006%	1.20595	0.006%	1.18318	0.006%	1.25271	0.006%	1.29049	0.005%
006% 1.09310	.09310		0.006%	1.09714	0.006%	1.08254	0.006%	1.20896	0.006%	1.18365	0.006%	1.25671	0.006%	1.29521	0.006%
006% 1.08995	.08995		0.006%	1.08137	0.006%	1.07807	0.006%	1.20600	0.006%	1.18323	0.006%	1.25289	0.006%	1.29065	0.006%
006% 1.08991	.08991		0.006%	1.08145	0.006%	1.07809	0.006%	1.20574	0.006%	1.18300	0.006%	1.25266	0.006%	1.29061	0.005%
005% 1.09063	.09063		0.006%	1.08140	0.006%	1.07868	0.006%	1.20642	0.006%	1.18395	0.006%	1.25315	0.006%	1.29085	0.006%
006% 1.08974	.08974		0.006%	1.08094	0.006%	1.07729	0.006%	1.20582	0.006%	1.18285	0.006%	1.25259	0.006%	1.29043	0.005%
006% 1.08765	.08765		0.006%	1.09000	0.006%	1.08143	0.006%	1.20186	0.006%	1.17410	0.006%	1.24923	0.006%	1.29300	0.005%
006% 1.09046	.09046		0.006%	1.08106	0.006%	1.07836	0.006%	1.20690	0.006%	1.18452	0.006%	1.25315	0.006%	1.28964	0.005%
006% 1.08830	.08830		0.006%	1.08196	0.006%	1.07765	0.006%	1.20332	0.006%	1.17926	0.006%	1.25115	0.006%	1.29098	0.006%
006% 1.08989	.08989		0.006%	1.08149	0.006%	1.07805	0.006%	1.20595	0.006%	1.18324	0.006%	1.25272	0.006%	1.29049	0.005%
005% 1.09022	.09022		0.006%	1.08128	0.006%	1.07830	0.006%	1.20588	0.006%	1.18330	0.006%	1.25290	0.006%	1.29061	0.005%
005% 1.08981	.08981		0.006%	1.08081	0.006%	1.07789	0.006%	1.20583	0.006%	1.18321	0.006%	1.25260	0.006%	1.29052	0.006%
006% 1.09006	90060.		0.006%	1.08132	0.006%	1.07800	0.006%	1.20599	0.006%	1.18316	0.006%	1.25281	0.005%	1.29050	0.005%
006% 1.08998	86680.		0.006%	1.08130	0.006%	1.07806	0.006%	1.20580	0.006%	1.18306	0.006%	1.25264	0.006%	1.29053	0.006%
006% 1.08992	.08992		0.006%	1.08131	0.006%	1.07797	0.006%	1.20595	0.006%	1.18307	0.006%	1.25274	0.006%	1.29058	0.005%
006% 1.08993	.08993		0.006%	1.08116	0.006%	1.07789	0.006%	1.20592	0.006%	1.18299	0.006%	1.25259	0.006%	1.29045	0.005%
006% 1.09005	.09005		0.006%	1.08133	0.006%	1.07800	0.006%	1.20594	0.006%	1.18313	0.006%	1.25262	0.005%	1.29045	0.006%
006% 1.08988	.08988		0.006%	1.08123	0.006%	1.07798	0.006%	1.20610	0.006%	1.18330	0.006%	1.25265	0.006%	1.29055	0.005%
006% 1.08985	.08985		0.006%	1.08132	0.006%	1.07799	0.006%	1.20599	0.006%	1.18310	0.006%	1.25267	0.005%	1.29052	0.005%
006% 1.08910	.08910		0.006%	1.08001	0.006%	1.07688	0.006%	1.20517	0.006%	1.18247	0.006%	1.25226	0.006%	1.29014	0.005%
1.08982	.08982		0.006%			1.07797	0.006%			1.18305	0.006%	1.25276	0.006%	1.29069	0.005%
1.09000	00060.		0.006%			1.07805	0.006%			1.18311	0.006%	1.25263	0.006%	1.29049	0.006%
1.09101	.09101		0.006%			1.07794	0.006%			1.18536	0.006%	1.25429	0.005%	1.29152	0.006%
1.09014	.09014		0.006%			1.07807	0.006%			1.18325	0.006%	1.25270	0.006%	1.29051	0.005%
1.09073	.09073		0.006%			1.07871	0.006%			1.18454	0.006%	1.25361	0.005%	1.29081	0.005%
1.08995	.08995		0.006%			1.07832	0.006%			1.18317	0.006%	1.25280	0.005%	1.29059	0.005%
1.08991	.08991		0.006%			1.07803	0.006%			1.18304	0.006%	1.25273	0.006%	1.29056	0.005%
006% 1.09188	.09188		0.006%	1.10432	0.006%	1.08606	0.006%	1.20306	0.006%	1.17610	0.006%	1.25521	0.006%	1.29865	0.005%
005% 1.08996	96680.		0.006%	1.10574	0.006%	1.08515	0.006%	1.20305	0.006%	1.17165	0.006%	1.25248	0.006%	1.29734	0.005%
006% 1.09110	.09110		0.006%	1.08060	0.006%	1.07833	0.006%	1.20574	0.006%	1.18562	0.006%	1.25425	0.006%	1.29154	0.005%
006% 1.09115	<u>c1160.</u>		0.006%	1.10494	0.006%	16680.1	0.006%	1.20305	0.006%	1.17428	0.006%	1.25381	0.005%	1.29841	0.005%

表 A.11 SF99 の核種組成を測定値から SWAT4.0 の計算値に変更した場合の実効増倍率

\_

表1.	SI 基本単位	<u>Ľ</u>
甘大昌	SI 基本ì	単位
本平里	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	Α
熱力学温度	ケルビン	Κ
物質量	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
AI 立長 SI 組立単位	
名称	記号
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>
体 積 立方メートル	m <sup>3</sup>
速 さ , 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 <sup>-1</sup>
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積 立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>8</sup>
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝 度 カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1
比 透 磁 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では	t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

			SI 租立单位	
組立量	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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体鱼	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 (b)	$m^2/m^2$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	-	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
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	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
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 <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

酸素活性(1) ダール kat [s<sup>1</sup> mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラ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。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告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

	S	[ 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>-3</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
誘 電 辛	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$

		表5.8	I 接頭語		
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{12}$	テラ	Т	$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f
$10^3$	+ 1	k	$10^{-18}$	アト	а
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z
$10^{1}$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	v

表 6. SIに,	属さない	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=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	۰	1°=(π/180) rad
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
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

	表記	され	る数値	が実験的に得られるもの
3	名称		記号	SI 単位で表される数値
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダル	- F	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な間径は
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	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				
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J				
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N				
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s				
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$				
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$				
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx				
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>				
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T				
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>				
(a) 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	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq	
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy	
$\scriptstyle  u$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv	
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$	
フ	T.		N	11		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m	
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg	
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa	
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa	
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J	
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)	
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$	