JAEA-Data/Code 2017-007 DOI:10.11484/jaea-data-code-2017-007



ICSBEP ハンドブックを用いた JENDL-4.0 の U-233 体系に対する 積分ベンチマークテスト

Integral Benchmark Test of JENDL-4.0 for U-233 Systems with ICSBEP Handbook

桑垣 一紀 長家 康展

Kazuki KUWAGAKI and Yasunobu NAGAYA

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 2017

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, 2017

ICSBEP ハンドブックを用いた JENDL-4.0 の U-233 体系に対する積分ベンチマークテスト

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 桑垣 一紀*、長家 康展

(2017年2月10日 受理)

これまでJENDL-4.0のU-233体系に対する積分ベンチマークテストは、連続エネルギーモン テカルロコードMVPを使用して、国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト(ICSBEP)ハンド ブックに掲載されている金属燃料高速体系、溶液燃料体系の一部のみで行われていた。本研究で は、U-233体系に対する包括的な積分ベンチマークテストを行うため、化合物燃料熱体系(主に 格子体系)を含む MVP 入力データが未整備の体系についてその入力データを作成し、JENDL-4.0 の臨界性に対する予測精度を評価した。その結果、すべての体系において実験値に対して過小評 価する傾向があることが分かった。また、ENDF/B-VII.1のU-233熱体系に対する積分テストで は、炉特性パラメータ ATFF(Above-Thermal Fission Fraction)に対する C/E 値の依存性の問題 が指摘されており、JENDL-4.0を用いた積分ベンチマークテストにおいても ATFF を計算し、 C/E 値との依存性を調べた。その結果、JENDL-4.0に ENDF/B-VII.1 と同様の傾向があることが 確認された。

Integral Benchmark Test of JENDL-4.0 for U-233 Systems with ICSBEP Handbook

Kazuki KUWAGAKI* and Yasunobu NAGAYA

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 February 10, 2017)

The integral benchmark test of JENDL-4.0 for U-233 systems using the continuous-energy Monte Carlo code MVP was conducted. The previous benchmark test was performed only for U-233 thermal solution and fast metallic systems in the ICSBEP handbook. In this study, MVP input files were prepared for uninvestigated benchmark problems in the handbook including compound thermal systems (mainly lattice systems) and integral benchmark test was performed. The prediction accuracy of JENDL-4.0 was evaluated for effective multiplication factors (k_{eff} 's) of the U-233 systems. As a result, a trend of underestimation was observed for all the categories of U-233 systems.

In the benchmark test of ENDF/B-VII.1 for U-233 systems with the ICSBEP handbook, it is reported that a decreasing trend of calculated k_{eff} values in association with a parameter ATFF (Above-Thermal Fission Fraction) is observed. The ATFF values were also calculated in this benchmark test of JENDL-4.0 and the same trend as ENDF/B-VII.1 was observed.

Keywords: JENDL-4.0, U-233, Continuous-energy Monte Carlo Code, MVP, ICSBEP Handbook, Criticality Safety, Benchmark Calculation

^{*} Tokyo Institute of Technology

目次

1.	はじめに	1
2.	臨界性予測精度評価	2
2.1	ベンチマークテストを行った体系と MVP の計算条件	2
2.2	ベンチマークテスト計算モデル	4
2.3	計算結果と実験値との比較	10
2.4	前回ベンチマークとの比較	14
3.	C/E 値と ATFF の依存性	18
4.	まとめ	26
謝辞		26
参考文	* 献	27
付録 C	CD	

Contents

1.	Introduction	1
2.	The Prediction Accuracy of JENDL-4.0 for Effective Multiplication Factors	2
2.1	U-233 Systems Adopted to the Benchmark Test and Calculation Conditions of MVP	. 2
2.2	Caluculation Models of the Benchmark Test	4
2.3	Comparison of Calculated and Experimental keff Values	10
2.4	Differences from Previous Benchmark Test	14
3.	Dependence of C/E Values on ATFF	18
4.	Summary	26
Ackno	wledgment	26
Refere	ences	27
Apper	ndix CD	

This is a blank page.

1. はじめに

2010年5月末、日本の評価済み核データライブラリーJENDLの最新版であるJENDL・4.0¹⁾ が公開された。これまでJENDLの妥当性評価は、連続エネルギーモデルに基づく中性子及び光 子のモンテカルロ輸送計算コード MVP²⁾を使用し、様々な実験解析を通して行われてきた。特に 臨界性予測精度評価には、世界各国の臨界実験データが集約された国際臨界安全ベンチマーク評 価プロジェクト(ICSBEP)ハンドブック³⁾が用いられてきた。JENDL・4.0 では、ICSBEP ハンド ブックに掲載されている約 1,000 ケースの実験データについて積分ベンチマークテストが実施さ れている⁴⁾。そのうち、核種 U-233 に対する解析は少なく、ICSBEP の金属燃料高速体系、溶液 燃料熱体系、溶液燃料中速体系、溶液燃料混合体系の 86 ケースについて行われているだけであっ た。本ベンチマークテストでは、溶液燃料熱体系の 66 ケース、溶液燃料混合体系の5 ケース、化 合物燃料熱体系の9 ケースについて新たに MVP 入力データを整備し、全 166 ケースによる包括 的な解析を行った。計算を行った全てのケースについて、MVP による実効増倍率の計算結果(C 値)と ICSBEP ハンドブックで評価された実験値(E値 = ベンチマークモデル実効増倍率)を 比較した。

また、2011年12月には米国の評価済み核データ ENDF/B-VII.1⁵が公開された。ENDF/B-VII.1 に対する積分テストとして、モンテカルロ粒子輸送計算コード MCNP⁶を用いて ICSBEP に記載 されている 1,000 ケース近くの臨界実験についての計算が実施された⁷⁷。その積分テストでは、 U-233 熱体系に対して、実効増倍率の C/E 値が炉特性パラメータ ATFF(Above-Thermal Fission Fraction)に伴って徐々に減少していくという問題点が報告されている。JENDL-4.0 にも同様の 傾向が見られるか調べるために、MVP によって実効増倍率とともに ATFF を計算し、C/E 値の ATFF に対する依存性を評価した。

2. 臨界性予測精度評価

ICSBEP ハンドブックに掲載されている U-233 体系について、MVP を利用して JENDL-4.0 の積分ベンチマークテストを行った。以下では、ベンチマークテストを行った体系と MVP の計 算条件、計算結果と実験値の比較について述べる。

2.1 ベンチマークテストを行った体系と MVP の計算条件

本ベンチマークテストでは ICSBEP ハンドブック 2013 年度版を使用した。前回ベンチマーク 4) で使用された ICSBEP ハンドブック 2010 年度版と比較すると収納実験数が 516 から 558 まで増 え、U-233 体系では化合物燃料熱体系に新たに 5 ケースの実験データが追加されている。

それぞれの実験は、以下に示す ICSBEP が定めるガイドラインに沿って記述されている。

- 1 Detailed Description
- 2 Evaluation of Experimental Data
- 3 Benchmark Specifications
- (4) Results of Sample Calculation
- **5** References
- 6 Appendix (if any)

①には実験場所、実験器具、使用した物質等の詳細が、②には実験結果や誤差等の評価法が記載されている。③では実験体系を簡略化したベンチマークモデルとその増倍率が説明される。④では MCNP や粒子輸送モンテカルロコード KENO⁸によるサンプル計算の結果がまとめられている。

ICSBEP に収納される実験データは、図1に示すように燃料物質(Fissile Materials)、燃料形態 (Fuel Forms)、中性子スペクトル(Neutron Spectra)、実験番号(Numerical Index)によって階層 的に分類されている。

Fissile Materials -	- Fuel Forms	 Neutron Spec 	tra — Numerical	Index
HEU:Highly Enriched Uranium Systems (60%~)	SOL:Solution	FAST:Fast		
IEU:Intermediate and Mixed Enriched Uranium Systems (10%~60%)	COMP: Compound	INTER:Intermediate		
LEU:Low Enriched Uranium Systems (~10%)	MET:Metal	THERM:Thermal		
MIX:Mixed Plutonium- Uranium Systems	MISC:Miscellaneous	MIXED:Mixed		
U233:Uranium-233 Systems PU:Plutonium Systems				
SPEC:Special Isotope Systems				

図1: ICSBEP ハンドブックの実験データ分類方法

燃料形態区分の「MISC」には、溶液燃料中に燃料棒格子が存在する実験といったような、複数の燃料形態が含まれた実験データが収められている。また、中性子スペクトル区分の「MIXED」 には、中性子スペクトルを高速中性子・中速中性子・熱中性子に区分できない実験データが収納 されている。Numerical Index は各臨界実験とその中で条件を変更して行われた枝実験を示す数 字となっている。

ICSBEP ハンドブックでは、これらの分類名によってすべての実験データが番号付けられ、整理されている。例えば、1950年代に米国のオークリッジ国立研究所で行われた、硝酸ウラニル溶液が注入されたステンレスタンクを用いた実験では、溶液の高さを変えた4ケースについてそれぞれ U233-SOL-THERM-009-001から U233-SOL-THERM-009-004の番号が与えられている。 簡略化のため、本報告書では燃料物質、燃料形態、中性子スペクトルまでのカテゴリを以下に示す略称によって表記し、その後にNumerical Index を付けて各実験データを区別することとする。 例えば、U233-SOL-THERM-009-001の場合は UST9.1と表記する。

ICSBEP U-233 体系カテゴリ毎の略称:

UMF: U233 Metal Fast Systems	(金属燃料高速体系)
UMT: U233 Metal Thermal Systems	(金属燃料熱体系)
UST: U233 Solution Thermal Systems	(溶液燃料熱体系)
USI: U233 Solution Intermediate Systems	(溶液燃料中速体系)
USM: U233 Solution Mixed Systems	(溶液燃料混合体系)
UCT: U233 Compound Thermal Systems	(化合物燃料熱体系)

ICSBEP における実験データのベンチマークモデル化では、構造物の簡素化や不純物の近似等 が行われ、感度解析等によってそれらの影響が評価されている。これらの評価をもとに、実際の 実験結果からベンチマークモデルでの *k*eff が計算され、ベンチマークモデル *k*eff として記載されて いる。本ベンチマークテストでは、このように評価されたベンチマークモデル *k*eff を実験値(E値) として、MVP による計算値(C値)と比較し、C/E値として整理した。

前回ベンチマークでは金属燃料高速体系(UMF)、溶液燃料熱体系(UST)、溶液燃料中速体系 (USI)、溶液燃料混合体系(USM)の 86 ケースについて計算が行われた⁴⁾。本ベンチマークテスト ではこれら 86 ケースに加え、溶液燃料熱体系(UST9,12,13,15,17)の 66 ケース、溶液燃料混合体 系(USM2)の 5 ケース、化合燃料熱体系(UCT1,4)の 9 ケースについて新たに解析を行い、全 166 ケースの包括的なテストを行った。

2013 年版 ICSBEP ハンドブックに収納されている U-233 体系のケース数と、そのうちベンチ マークテストを実施したケース内訳を表1に示す。

燃料形態	中性子スペクトル	ICSBEP2013 収納数	MVP ベンチマーク計算数
COMP	THERM	9	9
	MIXED	8	8
SOL	INTER	29	29
	THERM	192	110
МЕТ	FAST	10	10
	THERM	1	0

表 1: ICSBEP2013 の U-233 体系収納数と MVP によるベンチマークテスト計算数

UST6,7,14,16 と UMT1 については、ICSBEP ハンドブックにおいて非常に詳細なベンチマー クモデルのみが提案されており、MVP 入力データの検証に時間がかかるため、今回のベンチマー クテストから除外した。

すべてのベンチマークテストは、以下の計算パラメータで計算を行った。

バッチサイズ (NHIST): 10,000

捨てバッチ数 (NSKIP):100

バッチ数 (NPART): 2,000

この条件では、すべての場合において k_{eff} の誤差 Δk_{eff} が 0.00026(1 σ)以下となり、ベンチマーク モデル k_{eff} の誤差に比べて十分小さいため、C/E 値に対する C 値の統計誤差は無視することがで きる。初期線源分布は全体系において、燃料が存在する領域に一様に与えた。

2.2 ベンチマークテスト計算モデル

本ベンチマークテストで計算を行った U-233 体系の多くは、簡単な形状のベンチマークモデル となっている。例えば、金属燃料高速体系ではすべての実験において、球状金属燃料一領域モデ ルとなっている。また、溶液燃料体系では容器とその中に注入された液体燃料のみのモデルが大 半を占める。例外として、化合燃料熱体系の UCT1 と UCT4 は複雑なベンチマークモデルとなっ ており、以下では UCT1 と UCT4 の計算モデルについて説明する。特に UCT4 のベンチマーク 計算では体系の一部を簡略化したため、簡略化した部分について説明する。

(1) U233-Compound-Thermal-001

U233-Compound-Thermal-001(UCT1)は米国の軽水増殖炉プログラム(Light Water Breeder Reactor (LWBR) Program)の一環として、1960~1970年代にベティス原子力研究所で行われた 臨界実験である^{3,9)}。この実験で用いられた設備では、燃料棒を差し込むことのできる格子プレートが円柱状炉心容器中心に配置され、複数の燃料棒を組み合わせて炉心を構成することができる

ようになっている。²³⁵UO₂-ZrO₂ と ²³³UO₂-ZrO₂ から成る二種類の燃料と、²³²ThO₂ と ²³³UO₂-²³²ThO₂から成る二種類のブランケット燃料を組み合わせて構成された 8 ケースの炉心に ついて実験が行われ、ICSBEP ハンドブックではそれぞれに UCT1.1~UCT1.8 の番号が与えら れている。本ベンチマークテストでは、ICSBEP ハンドブックに記載されたベンチマークモデル を忠実に再現した MVP インプットファイルを作成し計算を行った。MVP 付随の体系可視化ユー ティリティ CGVIEW によって、それぞれのケースごとに図 2~9 に示すような炉心の断面描画図 を作成し、幾何学形状が正しく定義されているかを確認した。

	シンボル	物質	ピッチ[cm]
燃料	•	$^{235}\rm{UO}_2-ZrO_2$	0.91948
ブランケット燃料	•	$^{232}{ m Th0}_{2}$	1.8396
制御板		Stainless steel	



図2:UCT1.1の炉心断面描画図

	シンボル	物質	ピッチ[cm]
燃料	•	$^{233}UO_2 - ZrO_2$	0.91948
ブランケット燃料	•	$^{232}{ m ThO}_{2}$	1.8396
制御板		Stainless steel	



図3: UCT1.2の炉心断面描画図

	シンボル	物質	ピッチ[cm]
燃料	•	²³³ UO ₂ -ZrO ₂	0.91948
制御板		Stainless steel	



図 4: UCT1.3 の炉心断面描画図

	シンボル	物質	ピッチ[cm]
燃料	•	²³³ U0 ₂ -Zr0 ₂	0.91948
ブランケット燃料		²³³ U0 ₂ -Zr0 ₂	1.8396
制御板		Stainless steel	



図 5: UCT1.4 の炉心断面描画図

	シンボル	物質	ピッチ[cm]
燃料	•	$^{235}UO_2 - ZrO_2$	0.91948
ブランケット燃料		$^{233}UO_2 - ZrO_2$	1.8396
制御板		Stainless steel	



図6:UCT1.5の炉心断面描画図

	シンボル	物質	ピッチ[cm]
燃料	•	²³⁵ U0 ₂ -Zr0 ₂	1.45034
ブランケット燃料	•	$^{232}{ m Th0}_{2}$	1.45034
制御板		Stainless steel	



図7:UCT1.6の炉心断面描画図

	シンボル	物質	ピッチ[cm]
燃料	•	²³³ UO ₂ -ZrO ₂	1.45034
ブランケット燃料	•	$^{232}ThO_{2}$	1.45034
制御板		Stainless steel	



図8: UCT1.7の炉心断面描画図

	シンボル	物質	ピッチ[cm]
燃料	•	²³³ U0 ₂ -Zr0 ₂	1.45034
ブランケット燃料	•	$^{233}UO_2 - ^{232}ThO_2$	1.45034
制御板		Stainless steel	



図 9: UCT1.8 の炉心断面描画図

(2) U233-Compound-Thermal-004

U233-Compound-Thermal-004(UCT4)はUCT1と同様に軽水増殖炉プログラムの一環として、 1969から1971年の間にベティス原子力研究所で行われた ETA 実験(Epithermal Test Assembly (ETA) experiments)という名の臨界実験である¹⁰。この実験では、重水が注入された炉心容器の 周りに軽水で満たされたタンクが設置され、炉心容器内には UO₂-ThO₂燃料棒が、タンク内には 炉心容器を囲うようにして TRX 高密度 UO₂燃料棒がそれぞれ装架された。UO₂-ThO₂燃料棒の ウラン濃度を変更した 2 ケースの実験が行われたが、UCT4 ではそのうちの1 ケースがベンチマ ークモデルとして評価され記載されている。UCT4 のベンチマークモデルは非常に複雑な体系と なっているため、CGVIEW によっていくつかの座標で体系描画図を作成し、幾何形状の確認を行 った。その一例を図 10 に示す。



図 10 : CGVIEW による UCT4 の体系図描画の一例 (左側の図では、CGVIEW で指定した断面の位置の関係で UO₂-ThO₂燃料棒のトップエンドプ ラグは描画されていない。)

UCT4の MVP 入力データの作成においては、計算に影響を及ぼさない範囲で ICSBEP ハンド ブックに記載されたベンチマークモデルの一部を簡略化した。UO₂-ThO₂ 燃料棒のボトムエンド プラグの幾何形状は、図 11 に示すように窪みを取り除いた形にした。



図 11:ボトムエンドプラグの簡略化

また、ベンチマークモデルでは UO₂-ThO₂燃料棒と燃料棒下部を固定するベースプレートの間 にスペーサーブロックと呼ばれる構造物が設置されているが、MVP 入力データではスペーサーブ ロックは取り除き、その領域を重水で満たした。

2.3 計算結果と実験値との比較

表1で示した166ケースについて、MVPによる増倍率計算結果(C値)、計算の統計誤差、実験値(E値:ベンチマーク k_{eff})、ベンチマーク誤差、C/E値を表2に示す。

表 2: ICSBEP ベンチマーク解析結果 (U233 体系) (1/3)

	r	koff	fed (1σ)	Donohmark	Popohmark	
Case ID	C/E	Kell	ISU (10)	Deliciliark	Deliciliark	Title
	-	(Cal.)	(%)	keff (EXP.)	uncertainy	
U233-COMP-THERM-001-001	0.9996	1.000180	0.0222	1.0006	0.0027	LWBR SB CORE EXPERIMENTS
U233-COMP-THERM-001-002	0.9988	1 000270	0 0241	1 0015	0.0025	
1/233 COMP THEPM 001 003	0.0077	0.007722	0.0229	1,0000	0.0024	1
	0.9977	0.997723	0.0236	1.0000	0.0024	+
0233-COMP-THERIV-001-004	0.9981	0.998767	0.0193	1.0007	0.0025	
U233-COMP-THERM-001-005	0.9997	1.001230	0.0179	1.0015	0.0026	
U233-COMP-THERM-001-006	0.9951	0.996547	0.0212	1.0015	0.0028	
1233 COMP THERM 001 007	0.0072	0.006600	0.0229	0.0005	0.0027	1
	0.9972	0.990099	0.0220	0.9990	0.0027	4
0233-COMP-THERM-001-008	0.9954	0.995801	0.0211	1.0004	0.0028	
U233-COMP-THERM-004	0.9977	0.999424	0.0136	1.0017	0.0018	D20 MODERATED LATTICE of 233UO2-232ThO2
10000 MET EACT 004 004	0.0007	0.000005	0.0400	4 0000	0.0040	
0233-IVIE 1-FAS 1-001-001	0.9997	0.9999665	0.0128	1.0000	0.0010	2330 JEZEBEL. A DARE SPITERE OF URANIUN-233 METAL
U233-MET-FAST-002-001	0.9982	0.998231	0.0128	1.0000	0.0010	BENCHMARK CRITICAL EXPERIMENTS OF URANIUM-233
1/233_MET_EAST_002_002	1 0002	1 000150	0.0120	1 0000	0.0011	SPHERES SURROUNDED BY URANIUM-235
0200 MET 17 01 002 002	1.0002	1.000130	0.0130	1.0000	0.0011	
233-MET-FAST-003-001	0.9988	0.998760	0.0133	1.0000	0.0010	BENCHMARK CRITICAL EXPERIMENTS OF HIGHLY
233-MET-FAST-003-002	0.9987	0.998713	0.0139	1.0000	0.0010	ENRICHED URANIUM-233 SPHERES REFLECTED BY
	1 4 9 9 9 9	4 000000	0.0105	1 0000	a aaa .	
U233-IVIE 1-FAS 1-004-001	1.0002	1.000200	0.0135	1.0000	0.0007	BENCHMARK CRITICAL EXPERIMENTS OF HIGHLY
U233-MET-FAST-004-002	0.9978	0.997840	0.0138	1.0000	0.0008	ENRICHED URANIUM-233 SPHERES REFLECTED BY
U233-MET-FAST-005-001	0 0058	0 995751	0.0133	1 0000	0 0030	
	0.00000	0.005040	0.0133	1.0000	0.0000	
0233-IVIE 1-FAS 1-005-002	0.9959	0.995942	0.0144	1.0000	0.0030	UKANIUM-233 SPHERES REFLECTED BY BERYLLIUM
U233-MET-FAST-006-001	0.9983	0.998326	0.0153	1 0000	0.0014	BENCHMARK CRITICAL EXPERIMENT OF A URANIUM-233
	0.0000	0.000020	0.0100	1.0000	0.0014	
U233-SOL-THERM-001-001	0.9979	0.997889	0.0124	1.0000	0.0031	UNREFLECTED SPHERES OF 233U NITRATE SOLUTIONS
U233-SOL-THERM-001-002	0.9975	0.998048	0.0123	1.0005	0.0033	
U233-SOL-THERM-001-003	0 9971	0 997678	0.0121	1 0006	0.0033	1
	0.3371	0.337070	0.0121	1.0000	0.0000	4
0233-30L-THERIVF001-004	0.9975	0.997343	0.0121	0.9998	0.0033	
U233-SOL-THERM-001-005	0.9968	0.996717	0.0122	0.9999	0.0033	
U233-SOL-THERM-002-001	0 9995	1 003540	0.0237	1 0040	0.0087	PARAFEIN-REFLECTED 8- 8 5- 9- 10- AND 12-INCH-
	0.0000	0.004070	0.0201	1.0010	0.0007	
0233-30L-THERIVF002-002	0.9871	0.991078	0.0241	1.0040	0.0087	DIAMETER CILINDERS OF 2330 URANIL NITRATE
0233-SOL-THERM-002-003	1.0022	1.006190	0.0241	1.0040	0.0087	SOLUTIONS
U233-SOL-THERM-002-004	0.9989	1.002850	0.0238	1.0040	0.0087	
U233-SOL-THERM-002-005	1.0045	1.008550	0.0229	1.0040	0.0087	
1/233-SOL-THERM-002-006	0.0001	0.004012	0.0225	1.0040	0.0097	4
	0.9901	0.994012	0.0235	1.0040	0.0007	-
0233-SOL-THERIVF002-007	0.9795	0.983439	0.0231	1.0040	0.0087	-
U233-SOL-THERM-002-008	0.9930	0.997004	0.0225	1.0040	0.0087	
U233-SOL-THERM-002-009	0.9817	0.985640	0.0224	1.0040	0.0087	
U233-SOL-THERM-002-010	0 9952	0 999216	0.0216	1 0040	0.0087	
1/233 SOL THERM 002 011	1.0045	1 009490	0.0109	1.0010	0.0007	+
	1.0045	1.000400	0.0196	1.0040	0.0007	+
0233-SOL-THERM-002-012	0.9875	0.991475	0.0252	1.0040	0.0087	
U233-SOL-THERM-002-013	0.9881	0.992081	0.0250	1.0040	0.0087	
U233-SOL-THERM-002-014	0.9942	0.998223	0.0247	1.0040	0.0087	
LI233-SOL-THERM-002-015	1 0000	1 004020	0.0235	1 0040	0.0087	1
	1.0003	1.004320	0.0233	1.0040	0.0007	+
0233-30L-THERIVF002-016	1.0041	1.008110	0.0226	1.0040	0.0087	4
U233-SOL-THERM-002-017	1.0025	1.005830	0.0215	1.0040	0.0087	
U233-SOL-THERM-003-001	1.0023	1.001770	0.0243	0.9995	0.00871	PARAFFIN-REFLECTED 5-, 5.4 6 6.6 7.5 8 8.5 9 AND
U233-SOL-THERM-003-002	1 0 1 9 3	1 018390	0.0234	0.9991	0.01513	12-INCH-DIAMETER CYLINDERS OF 23311 URANYL FLUORIDE
	0.0070	0.007050	0.0204	1 0007	0.00074	
0233-30L-11ERIV-003-003	0.9973	0.997956	0.0250	1.0007	0.00871	SOLUTIONS
U233-SOL-THERM-003-004	1.0054	1.006890	0.0233	1.0015	0.01258	1
U233-SOL-THERM-003-005	1.0124	1.013000	0.0243	1.0006	0.01222	
U233-SOL-THERM-003-006	1.0182	1.019440	0.0236	1.0012	0.00871	
1233-SOL-THERM 003-007	1 0100	1 011500	0.0220	1 0016	0.00871	†
	1.0100	1.011090	0.0239	1.0010	0.00071	f
0233-50L-THERM-003-008	1.0056	1.007240	0.0230	1.0016	0.00871	4
U233-SOL-THERM-003-009	1.0048	1.006610	0.0225	1.0018	0.00871	ļ
U233-SOL-THERM-003-010	1.0031	1.003920	0.0196	1.0008	0.00871	
1233-SOL_THERM 004 004	0.0060	1 000690	0.0242	1 0020	0.0000	
0233-30L-THER/VF004-001	0.9968	1.00000	0.0243	1.0039	0.0088	TARAFTIN-REFLECTED 5-, 0-, AND 7.5-INCH-DIAMETER
0233-SOL-THERM-004-002	0.9994	1.002830	0.0237	1.0034	0.0086	CYLINDER OF 233-U URANYL NITRATE SOLUTIONS
U233-SOL-THERM-004-003	0.9903	0.994396	0.0246	1.0041	0.0089	
U233-SOL-THERM-004-004	0.9818	0.986834	0.0252	1,0051	0 0089	
	1 0014	1 002270	0.0240	1.0001	0.0105	†
0233-30L-THERIV-004-005	1.0014	1.003370	0.0248	1.0020	0.0105	4
U233-SOL-THERM-004-006	0.9967	0.998708	0.0245	1.0020	0.0104	1
U233-SOL-THERM-004-007	0.9880	0.991648	0.0244	1.0037	0.0090	1
U233-SOL-THERM-004-008	1.0015	1.003540	0.0244	1.0020	0.0102	
			0.0211		0.0102	•
	0.0007	0.000500	0.000-	4 0000	0.00.10	
0233-SOL-THERM-005-001	0.9985	0.998536	0.0227	1.0000	0.0040	WATER-REFLECTED 2330 URANYL NITRATE SOLUTIONS IN
U233-SOL-THERM-005-002	1.0015	1.001490	0.0215	1.0000	0.0049	SIMPLE GEOMETRY
	0.0000	0.007407	0.0400	1 0000	0.0000	
0200-001-111ERIV-000-001	0.9900	0.99/43/	0.0122	0000.1	0.0029	A TOTING PURINE LEN UNINELLEUTED OFFICKE OF 200

表 2:	(Continued)	ICSBEP	ベンチマー	ク解析結果	(U233 体系)) (2/3)
------	-------------	--------	-------	-------	-----------	---------

	0/5	keff	fsd (1σ)	Benchmark	Benchmark	Ti4-
Case ID	C/E	(Cal.)	(%)	keff (EXP.)	uncertainv	litie
U233-SOL-THERM-009-001	0.9952	0.991813	0.0107	0.9966	0.0044	UNREFLECTED LARGE-DIAMETER CYLINDERS
U233-SOL-THERM-009-002	0.9967	0.994820	0.0095	0.9981	0.0040	OF 233U URANYL NITRATE SOLUTIONS
U233-SOL-THERM-009-003	0.9972	0.996092	0.0083	0.9989	0.0038	
U233-SOL-THERM-009-004	0.9947	0.994498	0.0070	0.9998	0.0038	
U233-SOL-THERM-011-28	0.9810	0.981003	0.0242	1.0000	0.0061	URANYL-FLUORIDE (233U) SOLUTIONS IN SPHERICAL
				•		
U233-SOL-THERM-012-001	0.9957	0.994693	0.0247	0.9990	0.0028	WATER-REFLECTED SPHERICAL VESSELS PARTIALLY
U233-SOL-THERM-012-002	0.9952	0.994527	0.0237	0.9993	0.0025	FILLED OR FILLED WITH 233UO2(NO3)2 SOLUTION
U233-SOL-THERM-012-003	1.0055	1.004940	0.0242	0.9994	0.0023	
U233-SOL-THERM-012-004	0.9979	0.997904	0.0244	1.0000	0.0015	
U233-SOL-THERM-012-005	1.0003	1.000310	0.0233	1.0000	0.0071	
U233-SOL-THERM-012-006	1.0021	1.000770	0.0237	0.9987	0.0011	
U233-SOL-THERM-012-007	0.9987	0.998673	0.0215	1.0000	0.0038	
0233-SOL-THERIV-012-008	0.9961	0.996060	0.0217	1.0000	0.0048	
	1 0000	4 004770	0.0040	0.0000	0.0070	
U233-SOL-THERIVE013-001	1.0026	1.001770	0.0246	0.9992	0.0073	UNREFLECTED SPHERICAL VESSELS PARTIALLY FILLED OR
U233-SOL-THERM-013-002	1.0034	1.002590	0.0238	0.9992	0.0070	FILLED WITH 233002(NO3)2 SOLUTION
U233-SOL-THERM-013-004	1.0032	1.002330	0.0230	0.9992	0.0009	
1233-SOL-THERM-013-004	1.0032	1.002440	0.0240	0.9992	0.0073	
U233-SOL-THERM-013-006	1.0043	1.003470	0.0240	0.9992	0.0007	
U233-SOL-THERM-013-007	1.0030	1.002020	0.0232	0.0002	0.0050	
U233-SOL-THERM-013-008	1 0042	1.003080	0.0244	0.9992	0.0050	1
U233-SOL-THERM-013-009	1.0042	1.003740	0.0244	0.9992	0.0030	
U233-SOI -THERM-013-010	1.0045	1.003730	0.0243	0.9992	0.0046	
U233-SOL-THERM-013-011	1.0021	1.001300	0.0244	0.9992	0.0054	
U233-SOL-THERM-013-012	1.0039	1.003090	0.0241	0.9992	0.0050	
U233-SOL-THERM-013-013	1.0016	1.000840	0.0243	0.9992	0.0062	
U233-SOL-THERM-013-014	1.0044	1.003550	0.0252	0.9992	0.0051	
U233-SOL-THERM-013-015	1.0180	1.017610	0.0238	0.9996	0.0077	
U233-SOL-THERM-013-016	0.9914	0.991049	0.0234	0.9996	0.0069	
U233-SOL-THERM-013-017	0.9945	0.994078	0.0233	0.9996	0.0052]
U233-SOL-THERM-013-018	0.9976	0.997201	0.0235	0.9996	0.0020	
U233-SOL-THERM-013-019	0.9940	0.993634	0.0230	0.9996	0.0089	
U233-SOL-THERM-013-020	0.9971	0.996662	0.0218	0.9996	0.0056	
U233-SOL-THERM-013-021	1.0003	0.999866	0.0212	0.9996	0.0034	
U233-SOL-THERM-015-001	0.9872	0.987215	0.0247	1.0000	0.0075	URANYL-FLUORIDE (233U) SOLUTIONS
U233-SOL-THERM-015-002	0.9832	0.983200	0.0238	1.0000	0.0070	IN SPHERICAL STAINLESS STEEL VESSELS
U233-SOL-THERM-015-004	0.9861	0.986132	0.0245	1.0000	0.0041	WITH REFLECTORS OF Be, CH2, AND Be-CH2 COMPOSITES
0233-SOL-THERM-015-007	0.9832	0.983225	0.0240	1.0000	0.0070	PARTI
0233-30L-THERIVF015-010	0.9871	0.987119	0.0252	1.0000	0.0051	4
U233-SOL-THERMO15-011	0.9009	0.966943	0.0237	1.0000	0.0075	4 }
U233-SOL-THERM-015-012	0.9900	0.990020	0.0241	1.0000	0.0069	
LI233-SOL-THERM-015-014	0.9007	0.900002	0.0230	1.0000	0.0009	
U233-SOL-THERM-015-015	0.9900	0.995020	0.0230	1.0000	0.0050	
U233-SOI -THERM-015-016	0.9858	0.985818	0.0240	1,0000	0.0043	
U233-SOL-THERM-015-017	0.9934	0.993376	0.0240	1.0000	0.0029	1
U233-SOL-THERM-015-018	0.9723	0.972269	0.0255	1.0000	0.0056	1
U233-SOL-THERM-015-019	0.9728	0.972784	0.0257	1.0000	0.0052	1
U233-SOL-THERM-015-020	0.9911	0.991054	0.0234	1.0000	0.0079	
U233-SOL-THERM-015-021	0.9934	0.993396	0.0250	1.0000	0.0070] [
U233-SOL-THERM-015-022	0.9930	0.993018	0.0238	1.0000	0.0062]
U233-SOL-THERM-015-023	0.9906	0.990605	0.0246	1.0000	0.0055	
U233-SOL-THERM-015-024	0.9879	0.987862	0.0246	1.0000	0.0051	
U233-SOL-THERM-015-025	0.9924	0.992449	0.0243	1.0000	0.0023	
U233-SOL-THERM-015-026	0.9905	0.990547	0.0231	1.0000	0.0066	
U233-SOL-THERM-015-027	0.9955	0.995512	0.0229	1.0000	0.0063	1
U233-SOL-THERM-015-028	0.9936	0.993614	0.0232	1.0000	0.0058	4
U233-SOL-THERM-015-029	0.9922	0.992207	0.0229	1.0000	0.0051	
U233-SOL-THERM-015-030	0.9920	0.991978	0.0238	1.0000	0.0048	4
U233-SOL-THERM-015-031	0.9919	0.991862	0.0236	1.0000	0.0055	I
	1 4 9 5 5 5	4 0000 11	0.00	0.0	0.0000	
U233-SUL-THERM-017-001	1.0006	1.000310	0.0244	0.9997	0.0032	WATER-REFLECTED SOLUTIONS OF 233UO2(NO3)2 IN CYLIN
U233-SUL-THERM-017-002	0.9967	0.996661	0.0248	1.0000	0.0025	4
U233-SUL-THERM-017-003	1.0009	1.001010	0.0239	1.0001	0.0035	4
U233-SOL-THERIVEUT/-UU4	1.0022	1.001600	0.0241	0.9994	0.0040	4
1233-SOL-THERM-017-005	0.9980	0.007140	0.0242	1.0000	0.0029	4
U233-SOL-THERM-017-000	0.99/1	0.99/140	0.0210	1.0000	0.0029	1
	0.3310	0.001040	0.0223	1.0000	0.0037	

		keff	fsd (1σ)	Benchmark	Benchmark	
Case ID	C/E	(Cal.)	(%)	keff (FXP)	uncertainv	Title
U233-SOL-INTER-001-001	0.9839	0.983880	0.0245	1.0000	0.0083	URANYL-FLUORIDE (233U) SOLUTIONS
U233-SOL-INTER-001-002	0.9792	0.979203	0.0242	1.0000	0.0085	IN SPHERICAL STAINLESS STEEL VESSELS
U233-SOL-INTER-001-003	0.9805	0.980480	0.0240	1.0000	0.0066	WITH REFLECTORS OF Be. CH2 AND Be-CH2 COMPOSITES -
U233-SOL-INTER-001-004	0.9899	0.989857	0.0234	1.0000	0.0061	PARTI
U233-SOL-INTER-001-005	0.9843	0.984326	0.0239	1.0000	0.0082	
U233-SOL-INTER-001-006	0.9834	0.983365	0.0243	1.0000	0.0061	
U233-SOL-INTER-001-007	0.9816	0.981640	0.0244	1.0000	0.0059	
U233-SOL-INTER-001-008	0.9788	0.978815	0.0250	1.0000	0.0056	
U233-SOL-INTER-001-009	0.9775	0.977488	0.0244	1.0000	0.0068	
U233-SOL-INTER-001-010	0.9793	0.979331	0.0246	1.0000	0.0053	
U233-SOL-INTER-001-011	0.9787	0.978677	0.0239	1.0000	0.0057	
U233-SOL-INTER-001-012	0.9794	0.979440	0.0238	1.0000	0.0091	
U233-SOL-INTER-001-013	0.9794	0.979362	0.0239	1.0000	0.0071	
U233-SOL-INTER-001-015	0.9792	0.979165	0.0239	1.0000	0.0075	
U233-SOL-INTER-001-017	0.9868	0.986836	0.0243	1.0000	0.0055	
U233-SOL-INTER-001-018	0.9778	0.977793	0.0243	1.0000	0.0057	
U233-SOL-INTER-001-019	0.9744	0.974387	0.0242	1.0000	0.0083	
U233-SOL-INTER-001-020	0.9781	0.978097	0.0244	1.0000	0.0056	
U233-SOL-INTER-001-021	0.9724	0.972440	0.0250	1.0000	0.0050	
U233-SOL-INTER-001-022	0.9787	0.978729	0.0247	1.0000	0.0049	
U233-SOL-INTER-001-023	0.9887	0.988731	0.0247	1.0000	0.0047	
U233-SOL-INTER-001-024	0.9883	0.988288	0.0243	1.0000	0.0081	
U233-SOL-INTER-001-025	0.9823	0.982335	0.0243	1.0000	0.0081	
U233-SOL-INTER-001-026	0.9860	0.986029	0.0246	1.0000	0.0065	
U233-SOL-INTER-001-027	0.9869	0.986912	0.0236	1.0000	0.0051	
U233-SOL-INTER-001-029	0.9752	0.975169	0.0237	1.0000	0.0098	
U233-SOL-INTER-001-031	0.9889	0.988935	0.0248	1.0000	0.0071	
U233-SOL-INTER-001-032	0.9744	0.974404	0.0256	1.0000	0.0053	
U233-SOL-INTER-001-033	0.9909	0.990933	0.0251	1.0000	0.0046	
U233-SOL-MIXED-001-014	0.9870	0.987001	0.0238	1.0000	0.0052	URANYL-FLUORIDE (233U) SOLUTIONS
U233-SOL-MIXED-001-016	0.9771	0.977112	0.0249	1.0000	0.0028	IN SPHERICAL STAINLESS STEEL VESSELS WITH
U233-SOL-MIXED-001-030	0.9742	0.974217	0.0249	1.0000	0.0053	REFLECTORS OF Be, CH2 AND Be-CH2 COMPOSITES -
U233-SOL-MIXED-002-003	0.9845	0.984451	0.0247	1.0000	0.0068	URANYL-FLUORIDE (233U) SOLUTIONS
U233-SOL-MIXED-002-005	0.9845	0.984475	0.0248	1.0000	0.0055	IN SPHERICAL STAINLESS STEEL VESSELS
U233-SOL-MIXED-002-006	0.9748	0.974836	0.0253	1.0000	0.0099	WITH REFLECTORS OF Be, CH2, AND Be-CH2 COMPOSITES
U233-SOL-MIXED-002-008	0.9717	0.971733	0.0258	1.0000	0.0067	PART II
U233-SOL-MIXED-002-009	0.9669	0.966861	0.0255	1.0000	0.0050	

表 2: (Continued) ICSBEP ベンチマーク解析結果 (U233 体系) (3/3)

それぞれのカテゴリ毎に C/E-1 の平均値を計算した結果を表3に示す。

Category	UMF	UST	USI	USM	UCT
Average value for	164	330	1945	2244	221
C/E - 1 (in pcm)	-104	-339	-1045	-2241	-251

表3:カテゴリ毎のC/E-1平均値

JENDL-4.0 の臨界性に対する予測精度は、すべてのカテゴリにおいて実験値に対して過小評価 する傾向を示した。特に溶液燃料中速体系(USI)、溶液燃料混合体系(USM)では大きく過小 評価する傾向が見られ、改善の余地があるということが分かった。

2.4 前回ベンチマークとの比較

表 2 で示した結果のうち、前回ベンチマークと 0.1%Δ*k* 以上の差があったケースについて、そ れぞれの計算結果(C値)とその差Δ*k* を表 4 に示す。

	本ベンチマークテストの	前回ベンチマークの	Δk (%)	
	$k_{ m eff}$ (Cal.)	$k_{ m eff}$ (Cal.)	<i>⊡</i> n (70)	
U233-SOL-THERM-002-014	0.998223	0.999248	-0.103	
U233-SOL-THERM-002-016	1.008110	1.006720	0.139	
U233-SOL-THERM-003-003	0.997956	0.999264	-0.131	
U233-SOL-THERM-003-005	1.013000	1.014640	-0.164	
U233-SOL-THERM-004-001	1.000680	0.998941	0.174	
U233-SOL-THERM-004-002	1.002830	1.001210	0.162	
U233-SOL-THERM-004-003	0.994396	0.993229	0.117	
U233-SOL-THERM-004-004	0.986834	0.984986	0.185	
U233-SOL-THERM-004-007	0.991648	0.989792	0.186	
U233-SOL-THERM-004-008	1.003540	1.002080	0.146	
U233-SOL-INTER-001-004	0.989857	0.990945	-0.109	
U233-SOL-INTER-001-006	0.983365	0.984555	-0.119	
U233-SOL-INTER-001-009	0.977488	0.978616	-0.113	
U233-SOL-INTER-001-013	0.979362	0.980503	-0.114	
U233-SOL-INTER-001-024	0.988288	0.989490	-0.120	
U233-SOL-INTER-001-033	0.990933	0.992015	-0.108	

表4:前回ベンチマークと0.1%Δk以上差があったケース

これらのケースで計算結果に差が生じてしまう原因を明らかにするために、本ベンチマークテストと前回ベンチマークの入力データの比較を行った。

(1) U233-SOL-THERM-002-016

UST2.16 については、前回の入力データに誤りがあり、溶液高さがベンチマークモデルより低 くなっていることがわかった。計算結果の差は溶液高さの違いによるものと考えられる。

(2) U233-SOL-THERM-004

前回ベンチマークで使用された、UST4の入力データの断面描画図を図 12,13 に示す。

	カラー	物質
溶液燃料		硝酸ウラニル溶液
制御機構		カドミウム
反射材		パラフィン(C ₂₅ H ₅₂)



図 12:前回ベンチマークでの UST4.1~4, UST4.7 の入力データ断面描画図



図 13:前回ベンチマークでの UST4.8 の入力データ断面描画図

溶液が注入された容器の周りにセーフティブレードと制御棒が設置されたモデルとなっている。 ICSBEP2013のベンチマークモデルではこれらの制御機構が取り除かれているため、本ベンチマ ークテストでは図 14,15 に示すようにセーフティブレードと制御棒のないモデルの入力データを 作成した。

	カラー	物質
溶液燃料		硝酸ウラニル溶液
反射材		パラフィン(C ₂₅ H ₅₂)



図 14:本ベンチマークテストでの UST4.1~4, UST4.7 の入力データ断面描画図

	カラー	物質
溶液燃料		硝酸ウラニル溶液
反射材		パラフィン(C ₂₅ H ₅₂)



図 15:本ベンチマークテストでの UST4.8 の入力データ断面描画図

また、溶液容器下部の配管も同様の理由で入力データから取り除いた。計算結果の差は容器下 部の配管、制御機構の有無によるものと考えられる。

(3) U233-SOL-INTER-001

USI1.4, 1.6, 1.9, 1.13, 1.24 では金属ベリリウムが反射体として使用されている。MVP において金属ベリリウムの断面積は BE009BJ40 で指定されるが、前回ベンチマークの入力データでは

誤って BE0090J40 を使用していたことがわかった。計算結果の差は断面積の違いによるものと 考えられる。

(4) その他

UST2.14, UST3.3, UST3.5, USI1.33 については、前回ベンチマークの入力データとの違いを 特定することができなかったため、乱数シードの初期値を変えた入力データによって2回追加計 算を行い、3回の計算結果の荷重平均値を(1)-(3)式によって導出した。ただし、荷重は分散の逆数 とした。

$$\bar{x} = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i} \tag{1}$$

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \tag{2}$$

$$\frac{1}{\sigma_x^2} = \sum \frac{1}{\sigma_i^2} \tag{3}$$

ただし、 \bar{x} は荷重平均値、 x_i はi回目の計算値、 w_i はi回目の計算値の荷重、 σ_i はi回目の計算値 の標準偏差、 σ_x は荷重平均値の標準偏差である。

それぞれのケース毎の荷重平均値と1標準偏差を表5に示す。

表5: 乱数シードの初期値を変えた3回の計算結果の荷重平均値と標準偏差

	前回べい	ンチマークの	本ベンチマークの		
	入力データ	による計算結果	入力データのよる計算結果		
Case ID	古 重亚 均 植	1標準偏差	古 重亚 均 储	1標準偏差	
	何里千均恒	(1σ)	何里千均恒	(1σ)	
UST2.14	0.99820	0.00068	0.99866	0.00029	
UST3.3	0.99849	0.00051	0.99860	0.00042	
UST3.5	1.01415	0.00039	1.01352	0.00034	
USI1.33	0.99081	0.00080	0.99105	0.00009	

すべてのケースにおいて、荷重平均値が2標準偏差の範囲内で一致しているため、前回ベンチ マークとの計算結果の差は統計的なゆらぎによるものと考えられる。

3. C/E 値と ATFF の依存性

ENDF/B-VII.1 の U-233 体系に対する積分ベンチマークテストにおいて、炉特性パラメータ ATFF が 0.05 付近のケースでは C/E 値が 1 に近くなり、臨界性の予測精度はよいが、ATFF が大 きくなるにつれ、徐々に C/E 値が減少していくという問題が報告されている ⁷⁾。ATFF は全エネ ルギー領域に対する核分裂反応率のうち、熱中性子エネルギー以上の核分裂反応率の割合で定義 される。ATFF の定義を(4)式に示す。

$$ATFF = \frac{\underline{A} + \underline{E} + \underline{E} + \underline{E} - \underline{E} + \underline{E}$$

この問題は ENDF/B-VII.0 に対する積分テストでも指摘されていたが、ENDF/B-VII.1 でも依然として改善されていない。

JENDL・4.0 に対する積分テストでも同様の傾向があるか調べるために、MVP を用いた本ベン チマークテストにおいても ATFF の計算を行った。MVP では指定した領域での特定の反応率を 計算する機能が実装されている。ATFF は全炉心領域において、0~0.675 eV、0.675eV~2×107 eV の2つのエネルギービン毎に巨視的核分裂反応率を計算することで導出した。

MVP で ATFF を計算するためのタリーの指定:

```
$TALLY
ENGYB.N(1.0E-5 0.675 2.0E+7)
&
ID(1)
LABEL("Above Thermal Fission Fraction")
EVENT(TRACK)
PARTICLE(NEUTRON)
DIMENTION(REGION ENERGY)
REGION(@TOTAL)
IENERGY(1 <%NGROUP.N-1>:1)
MACRO(FISSION)
$END TALLY
```

ATFF の計算誤差は、分子と分母の相関は無視することとして、(5)式によって導出した。

$$\frac{M_1 + \Delta M_1}{M_2 + \Delta M_2} = \frac{M_1}{M_2} \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta M_1}{M_2}\right)^2 + \left(\frac{M_1 \cdot \Delta M_2}{M_2^2}\right)^2},$$

$$M_1 = \int_{\widehat{x} \not = \widehat{U}} d\vec{r} \int_{0.675 eV}^{20 MeV} \sum_f \phi(E) dE ,$$

$$M_2 = \int_{\widehat{x} \not = \widehat{U}} d\vec{r} \int_{10^{-5} eV}^{20 MeV} \sum_f \phi(E) dE$$
(5)

各ケースについて、ATFF とその計算誤差(1標準偏差)の計算結果を表6示す。

		計算誤差
Case ID	AIFF	(1標準偏差)
U233-COMP-THERM-001-001	0.2803	0.00013
U233-COMP-THERM-001-002	0.4761	0.00024
U233-COMP-THERM-001-003	0.3929	0.00021
U233-COMP-THERM-001-004	0.3334	0.00017
U233-COMP-THERM-001-005	0.2438	0.00010
U233-COMP-THERM-001-006	0.1456	0.00007
U233-COMP-THERM-001-007	0.2925	0.00015
U233-COMP-THERM-001-008	0.3585	0.00016
U233-COMP-THERM-004	0.2389	0.00013
U233-MET-FAST-001-001	0.9999	0.00018
U233-MET-FAST-002-001	1.0000	0.00020
U233-MET-FAST-002-002	1.0000	0.00018
233-MET-FAST-003-001	1.0000	0.00020
233-MET-FAST-003-002	1.0000	0.00021
U233-MET-FAST-004-001	1.0000	0.00021
U233-MET-FAST-004-002	1.0000	0.00021
U233-MET-FAST-005-001	1.0000	0.00021
U233-MET-FAST-005-002	1.0000	0.00023
U233-MET-FAST-006-001	1.0000	0.00020
U233-SOL-THERM-001-001	0.0520	0.00002
U233-SOL-THERM-001-002	0.0542	0.00002
U233-SOL-THERM-001-003	0.0561	0.00002
U233-SOL-THERM-001-004	0.0580	0.00002
U233-SOL-THERM-001-005	0.0599	0.00002

表 6: ICSBEP U-233 体系 ATFF 計算結果 (1/6)

	ATEE	計算誤差
Case ID	AIFF	(1標準偏差)
U233-SOL-THERM-002-001	0.2365	0.00012
U233-SOL-THERM-002-002	0.2046	0.00011
U233-SOL-THERM-002-003	0.1740	0.00009
U233-SOL-THERM-002-004	0.1484	0.00007
U233-SOL-THERM-002-005	0.1311	0.00006
U233-SOL-THERM-002-006	0.1168	0.00006
U233-SOL-THERM-002-007	0.1101	0.00005
U233-SOL-THERM-002-008	0.0996	0.00005
U233-SOL-THERM-002-009	0.0868	0.00004
U233-SOL-THERM-002-010	0.0824	0.00004
U233-SOL-THERM-002-011	0.0735	0.00003
U233-SOL-THERM-002-012	0.2912	0.00015
U233-SOL-THERM-002-013	0.3593	0.00019
U233-SOL-THERM-002-014	0.2094	0.00011
U233-SOL-THERM-002-015	0.1629	0.00008
U233-SOL-THERM-002-016	0.1118	0.00005
U233-SOL-THERM-002-017	0.0927	0.00004
U233-SOL-THERM-003-001	0.3067	0.00016
U233-SOL-THERM-003-002	0.3208	0.00016
U233-SOL-THERM-003-003	0.3162	0.00017
U233-SOL-THERM-003-004	0.4140	0.00021
U233-SOL-THERM-003-005	0.4461	0.00023
U233-SOL-THERM-003-006	0.2009	0.00010
U233-SOL-THERM-003-007	0.1463	0.00007
U233-SOL-THERM-003-008	0.1226	0.00006
U233-SOL-THERM-003-009	0.1090	0.00005
U233-SOL-THERM-003-010	0.0723	0.00003
U233-SOL-THERM-004-001	0.2352	0.00012
U233-SOL-THERM-004-002	0.2032	0.00010
U233-SOL-THERM-004-003	0.2913	0.00015

表 6: (Continued) ICSBEP U-233 体系 ATFF 計算結果 (2/6)

	ATEE	計算誤差
Case ID	AIFF	(1標準偏差)
U233-SOL-THERM-004-004	0.3596	0.00019
U233-SOL-THERM-004-005	0.3590	0.00019
U233-SOL-THERM-004-006	0.3314	0.00018
U233-SOL-THERM-004-007	0.3319	0.00017
U233-SOL-THERM-004-008	0.2086	0.00011
U233-SOL-THERM-005-001	0.1091	0.00005
U233-SOL-THERM-005-002	0.0931	0.00004
U233-SOL-THERM-008-001	0.0445	0.00001
U233-SOL-THERM-009-001	0.0470	0.00002
U233-SOL-THERM-009-002	0.0457	0.00001
U233-SOL-THERM-009-003	0.0444	0.00001
U233-SOL-THERM-009-004	0.0430	0.00001
U233-SOL-THERM-011-028	0.5773	0.00026
U233-SOL-THERM-012-001	0.2385	0.00012
U233-SOL-THERM-012-002	0.2322	0.00012
U233-SOL-THERM-012-003	0.2175	0.00011
U233-SOL-THERM-012-004	0.1784	0.00009
U233-SOL-THERM-012-005	0.1585	0.00008
U233-SOL-THERM-012-006	0.1425	0.00007
U233-SOL-THERM-012-007	0.0907	0.00004
U233-SOL-THERM-012-008	0.0907	0.00004
U233-SOL-THERM-013-001	0.2304	0.00011
U233-SOL-THERM-013-002	0.2302	0.00011
U233-SOL-THERM-013-003	0.2303	0.00011
U233-SOL-THERM-013-004	0.2304	0.00011
U233-SOL-THERM-013-005	0.2305	0.00011

表 6: (Continued) ICSBEP U-233 体系 ATFF 計算結果 (3/6)

	ATEE	計算誤差
Case ID	AIFF	(1標準偏差)
U233-SOL-THERM-013-006	0.2250	0.00011
U233-SOL-THERM-013-007	0.2248	0.00011
U233-SOL-THERM-013-008	0.2250	0.00011
U233-SOL-THERM-013-009	0.2248	0.00011
U233-SOL-THERM-013-010	0.2248	0.00011
U233-SOL-THERM-013-011	0.2250	0.00011
U233-SOL-THERM-013-012	0.2248	0.00010
U233-SOL-THERM-013-013	0.2249	0.00010
U233-SOL-THERM-013-014	0.2250	0.00011
U233-SOL-THERM-013-015	0.1785	0.00008
U233-SOL-THERM-013-016	0.1568	0.00007
U233-SOL-THERM-013-017	0.1518	0.00007
U233-SOL-THERM-013-018	0.1442	0.00007
U233-SOL-THERM-013-019	0.1446	0.00007
U233-SOL-THERM-013-020	0.1100	0.00005
U233-SOL-THERM-013-021	0.0992	0.00004
U233-SOL-THERM-015-001	0.4806	0.00022
U233-SOL-THERM-015-002	0.4946	0.00025
U233-SOL-THERM-015-004	0.4136	0.00021
U233-SOL-THERM-015-007	0.4256	0.00021
U233-SOL-THERM-015-010	0.4745	0.00023
U233-SOL-THERM-015-011	0.4236	0.00020
U233-SOL-THERM-015-012	0.4360	0.00020
U233-SOL-THERM-015-013	0.4421	0.00020
U233-SOL-THERM-015-014	0.3609	0.00018
U233-SOL-THERM-015-015	0.4470	0.00021
U233-SOL-THERM-015-016	0.4492	0.00021
U233-SOL-THERM-015-017	0.3713	0.00019
U233-SOL-THERM-015-018	0.4523	0.00021
U233-SOL-THERM-015-019	0.4532	0.00021
U233-SOL-THERM-015-020	0.3117	0.00015

表 6: (Continued) ICSBEP U-233 体系 ATFF 計算結果 (4/6)

	ATEE	計算誤差
Case ID	AILL	(1標準偏差)
U233-SOL-THERM-015-021	0.3234	0.00015
U233-SOL-THERM-015-022	0.3291	0.00015
U233-SOL-THERM-015-023	0.3337	0.00016
U233-SOL-THERM-015-024	0.3362	0.00016
U233-SOL-THERM-015-025	0.2703	0.00014
U233-SOL-THERM-015-026	0.2047	0.00010
U233-SOL-THERM-015-027	0.2090	0.00010
U233-SOL-THERM-015-028	0.2112	0.00010
U233-SOL-THERM-015-029	0.2128	0.00010
U233-SOL-THERM-015-030	0.2136	0.00010
U233-SOL-THERM-015-031	0.2142	0.00010
U233-SOL-THERM-017-001	0.1876	0.00009
U233-SOL-THERM-017-002	0.1831	0.00009
U233-SOL-THERM-017-003	0.1796	0.00009
U233-SOL-THERM-017-004	0.1459	0.00007
U233-SOL-THERM-017-005	0.1429	0.00007
U233-SOL-THERM-017-006	0.0916	0.00004
U233-SOL-THERM-017-007	0.0940	0.00004
U233-SOL-INTER-001-001	0.6825	0.00032
U233-SOL-INTER-001-002	0.6982	0.00032
U233-SOL-INTER-001-003	0.7029	0.00032
U233-SOL-INTER-001-004	0.5885	0.00029
U233-SOL-INTER-001-005	0.7099	0.00032
U233-SOL-INTER-001-006	0.6061	0.00030
U233-SOL-INTER-001-007	0.7172	0.00033
U233-SOL-INTER-001-008	0.6133	0.00030
U233-SOL-INTER-001-009	0.6772	0.00032
U233-SOL-INTER-001-010	0.7151	0.00032
U233-SOL-INTER-001-011	0.6821	0.00032
U233-SOL-INTER-001-012	0.6392	0.00029

表 6: (Continued) ICSBEP U-233 体系 ATFF 計算結果 (5/6)

	ATEE	計算誤差
Case ID	AIFF	(1 標準偏差)
U233-SOL-INTER-001-013	0.6533	0.00030
U233-SOL-INTER-001-015	0.6603	0.00030
U233-SOL-INTER-001-017	0.5526	0.00027
U233-SOL-INTER-001-018	0.6651	0.00031
U233-SOL-INTER-001-019	0.6684	0.00030
U233-SOL-INTER-001-020	0.5731	0.00029
U233-SOL-INTER-001-021	0.6705	0.00031
U233-SOL-INTER-001-022	0.6719	0.00030
U233-SOL-INTER-001-023	0.6321	0.00030
U233-SOL-INTER-001-024	0.5507	0.00026
U233-SOL-INTER-001-025	0.5658	0.00026
U233-SOL-INTER-001-026	0.5719	0.00026
U233-SOL-INTER-001-027	0.4771	0.00024
U233-SOL-INTER-001-029	0.5802	0.00027
U233-SOL-INTER-001-031	0.5815	0.00027
U233-SOL-INTER-001-032	0.5835	0.00027
U233-SOL-INTER-001-033	0.5450	0.00026
U233-SOL-MIXED-001-014	0.5398	0.00027
U233-SOL-MIXED-001-016	0.5014	0.00026
U233-SOL-MIXED-001-030	0.4965	0.00025
U233-SOL-MIXED-002-003	0.4946	0.00023
U233-SOL-MIXED-002-005	0.5053	0.00023
U233-SOL-MIXED-002-006	0.5086	0.00024
U233-SOL-MIXED-002-008	0.5108	0.00024
U233-SOL-MIXED-002-009	0.5123	0.00024

表 6: (Continued) ICSBEP U-233 体系 ATFF 計算結果 (6/6)



JENDL-4.0 による keff に対する C/E 値の ATFF に対する依存性を図 16 に示す。

図 16: JENDL-4.0 による *k*_{eff}に対する C/E 値の ATFF に対する依存性 (赤で示した USI, USM1, UST11 と薄緑で示した UST15, USM2 は同じ実験装置で行われた一連の臨界実験であるため同 色で示す。)

JENDL-4.0 においても、ATFF が大きくなるにつれて C/E 値が減少していくという傾向が確認 できる。JENDL-4.0 では U-233 の分散共鳴パラメータに ORNL グループの評価値¹¹⁾を採用し¹⁾、 ENDF/B-VII.1 でも同じ評価値を採用している⁵⁾。二つの核データによる結果が同様の傾向を示 すのは、このことに起因している可能性が高いが、感度解析によって原因を明確にすることが必 要である。

4. まとめ

炉心解析用モンテカルロコード MVP を用いて、評価済み核データ JENDL-4.0 の U-233 体系 に関する包括的な積分ベンチマークテストを行った。その結果、JENDL-4.0 の臨界性に対する予 測精度は、ICSBEP の金属燃料高速体系(UMF)に対して-164 pcm(対象カテゴリの平均差異)、溶 液燃料熱体系(UST)に対して-339 pcm、溶液燃料中速体系(USI)に対して-1,845 pcm、溶液燃料混 合体系に対して-2,241 pcm、化合物燃料熱体系(UCT)に対して-231 pcm、となり、実験値に対し て過小評価する傾向があることが分かった。また、ENDF/B-VII.1 の U-233 熱体系に対するベン チマークテストにおいて、炉特性パラメータ ATFF に対する C/E 値の依存性の問題が指摘されて いたが、JENDL-4.0 でも同様の傾向があることが確認された。

これらの結果より、JENDL-4.0 は U-233 燃料体系の臨界性予測に対して改善の余地があるということが分かった。今後は、感度解析により原因を調査することが必要である。

謝辞

本報告書における積分ベンチマークテストは、日本原子力研究開発機構の 2016 年度夏期実習 にて行われました。実習中には、多田健一氏を始めとする炉物理標準コード研究グループの方々 に大変お世話になりました。また、奥村啓介氏には、前回ベンチマークで実施した MVP の入力 データをご提供いただきました。深く感謝するとともに、この場をお借りして厚く御礼申し上げ ます。 参考文献

- Shibata, K., Iwamoto, O., Nakagawa, T., Iwamoto, N., Ichihara, A., Kunieda, S., Chiba, S., Furutaka, K., Otuka, N., Ohsawa, T., Murata, T., Matsunobu, H., Zukeran, A., Kamada, .S and Katakura, J., JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.48, no.1, 2011, pp.172-187.
- Nagaya, Y., Okumura, K., Mori, T. and Nakagawa, M., 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.
- 3) NEA Nuclear Science Committee, International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, 2013.
- 奥村 啓介,長家 康展, JENDL-4.0 に基づく連続エネルギーモンテカルロコード MVP 用の 性子断面積ライブラリーの作成と ICSBEP ハンドブックの臨界性ベンチマーク解析への適 用, JAEA-Data/Code 2011-010, 2011, 82p.
- Chadwick, M.B. et al., ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data, Nuclear Data Sheets, vol.112, 2011, pp.2887-2996.
- X-5 Monte Carlo Team, MCNP A General Monte Carlo Transport Code, Version 5, LA-UR-03-1987, 2003.
- 7) Kahler, A. C., MacFarlane, R. E., Mosteller, R. D., Kiedrowski, B. C., Frankle, S. C., Chadwick, M. B., McKnight, R. D., Lell, R. M., Palmiotti, G., Hiruta, H., Herman, M., Arcilla, R., Mughabghab, S.F, Sublet, J. C., Trkov, A., Trumbull, T. H. and Dunn, M., ENDF/B-VII.1 Neutron Cross Section Data Testing with Critical Assembly Benchmarks and Reactor Experiments, Nuclear Data Sheets, vol.112, 2011, pp.2997-3036.
- 8) Petrie, L. M., Landers, N. F., KENO Va.: an Improved Monte Carlo Criticality Programme with Supergrouping, NUREG/CR-0200, vol.2, Section F11, 2000.
- Milani, S. and Weiss, S. H., Small U-233 Fueled Seed-and-Blanket Critical Experiments, Pittsburgh, WAPD-TM-614, 1967.
- 10) Zerkle, M. L., Design of the ETA-I and ETA-II Critical Experiments, B-TM-1640, 2009, 104p.
- Leal, L. C., Derrien, H., Harvey, J. A., Guber, K. H., Larson, N. M. and Spenser, R. R., R-Matrix Resonance Analysis and Statistical Properties of the Resonance Parameters of ²³³U in the Neutron Energy Range from Thermal to 600 eV, ORNL/TM-2000, ENDF-365, 2001, 49p.

This is a blank page.

_

表 1. SI 基本単位			
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 是 SI 組 立 単位	
名称	記号
面 積 平方メートル	m ²
体 積 立方メートル	m ³
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 ⁻¹
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1
比 透 磁 率 (b) (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租工单位	
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 鱼	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
压力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
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 ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
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 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与,	ガレイ	Gv	J/kg	m ² e ⁻²
カーマ		Gy	ong	
線量当量,周辺線量当量,	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2 e^{-2}$
方向性線量当量,個人線量当量		50	5/Kg	III 8
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ 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 ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
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 ⁻³
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 ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	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 ⁻² A ⁻²
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 ⁻¹ 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 ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語					
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エクサ	Е	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 ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	$1 t=10^3 kg$		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの				
名称 言			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 ⁻¹⁹ J
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ 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 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ 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 ⁻¹⁰ 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接け
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 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =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 ⁻² =10 ⁴ lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²			
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 ⁻² =10 ⁻⁴ T			
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹			
(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 帰	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 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ	3	/	7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	x	N	111		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートルヌ	系カラ:	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進っ	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ	П	IJ	Į	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ		~		$1 = 1 = 10^{-6} m$