

**プルトニウム-240 同位体組成割合を考慮した
計算誤差評価に基づくMOX 燃料体系の
推定臨界下限増倍率の算出**

Calculation of the Estimated Criticality Lower Limit Multiplication Factor
of MOX Fuel Systems Based on the Evaluation of Calculation Errors
Dependent on Plutonium-240 Isotopic Fraction

佐藤 庄平 奥野 浩

Shohei SATO and Hiroshi OKUNO

安全研究センター

原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット

Nuclear Facility Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center

November 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

プルトニウム-240 同位体組成割合を考慮した計算誤差評価に基づく
MOX 燃料体系の推定臨界下限増倍率の算出

日本原子力研究開発機構安全研究センター
原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット
佐藤 庄平*・奥野 浩

(2009 年 9 月 1 日受理)

推定臨界下限増倍率は、評価対象と類似した燃料体系の臨界実験データに対して同じ臨界計算コードシステムを適用した計算結果から未臨界と判断してよいと考える中性子増倍率の上限値である。これまで推定臨界下限増倍率は、「燃料の種類が同じならば計算誤差量は同じ」という仮定に基づき、ベンチマーク計算結果に統計処理を実施して決定していた。この仮定が満足されない場合には、計算誤差を過度に大きく見積もり、推定臨界下限増倍率を低く設定している可能性があった。また、燃料の種類のカテゴリが広すぎることも推定臨界下限増倍率をさらに低く設定する要因となりえた。本報告書では合理的なウラン・プルトニウム混合酸化物燃料 (MOX 燃料) 体系の推定臨界下限増倍率を算出する方法を確立することを目的に、統計処理対象のカテゴリについて検討するとともに、その統計処理対象ごとに ^{240}Pu 同位体組成割合依存性を考慮した計算誤差評価を実施した。この評価には、臨界計算コード MVP と評価済核データライブラリー JENDL3.3 を利用し、国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト (ICSBEP) ハンドブックに登録された MOX 燃料の臨界実験を適用した。

燃料の種類のカテゴリに「二重非均質体系」を新たに導入することで、ベンチマーク計算結果の ^{240}Pu 同位体組成への依存性が強くなることを見出した。この分類と誤差評価の結果、推定臨界下限増倍率のすべての算出値がベンチマーク計算結果を下回ること、また従来の方法に基づく推定臨界下限増倍率よりも推定臨界下限増倍率を高くとれることを確認した。

Calculation of the Estimated Criticality Lower Limit Multiplication Factor of MOX Fuel Systems
Based on the Evaluation of Calculation Errors Dependent on Plutonium-240 Isotopic Fraction

Shohei SATO* and Hiroshi OKUNO

Nuclear Facility Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 1, 2009)

The estimated criticality lower limit multiplication factor (hereafter, ECLLMF) is the upper limit of the neutron multiplication factor where the system may be judged subcritical through the calculation results of the same criticality calculation system applied to analogous fuel systems to be evaluated. In the past, the ECLLMF was decided through a statistical process using the benchmark calculation results, which process was based on the assumption that “the calculation errors are common among the experiments that use the same kind of fuel.” When this assumption was not fulfilled, there was a possibility that the ECLLMF was established as irrationally low with an excess calculation error. The wide range of classification schemes in the critical experiments for the statistical processing might also be a factor that made the ECLLMF underestimated. Aiming to establish an effective method to find the rational ECLLMF of mixed uranium and plutonium oxide (MOX) fuel systems, this report investigated the classification of the critical experiments for the statistical processing, and evaluated the calculation errors with considering the dependence on ^{240}Pu isotopic fraction within the classified experiments. In this evaluation, the criticality calculation code MVP and the evaluated nuclear data library JENDL-3.3 library were utilized, and the criticality experiments with MOX fuels registered in the international criticality safety benchmark evaluation project (ICSBEP) handbook were adopted.

It was found that the dependency of the benchmark calculation results on the ^{240}Pu isotopic fraction was enhanced by introducing a new fuel class: “dual heterogeneous fuel systems.” As a result of this classification and error evaluation, it was confirmed that the calculated values of all the ECLLMFs were below the benchmark calculation results, and that the value of the ECLLMF was high compared with that obtained with the traditional method.

Keywords: Estimated Criticality Lower Limit Multiplication Factor(ECLLMF), Calculation Error, MVP, JENDL-3.3, MOX Fuel, ICSBEP

※ Collaborating Engineer

目次

1. はじめに	1
2. 臨界計算誤差評価手法	2
3. ベンチマーク計算	3
3.1 対象臨界実験	3
3.2 ベンチマーク計算結果	7
4. 実験グループの再構築	11
4.1 実験グループに対する考察	11
4.2 再構築した実験グループの妥当性評価	12
5. プルトニウム-240 同位体組成依存性を考慮した推定臨界下限増倍率	14
5.1 二重非均質体系の推定臨界下限増倍率	14
5.2 非均質体系の推定臨界下限増倍率	15
5.3 均質体系の推定臨界下限増倍率	16
6. 結論	18
謝辞	18
参考文献	19

Contents

1. Introduction	1
2. Method for evaluation of errors associated with criticality calculation	2
3. Benchmark Calculations	3
3.1 Critical experiments	3
3.2 Benchmark calculation results	7
4. Reconstruction of experiment groups	11
4.1 Discussion on grouping experiments	11
4.2 Validation of reconstructed experiment groups	12
5. ECLLMFs considering the dependence on the isotopic fraction of plutonium-240	14
5.1 ECLLMF of the double heterogeneous experiment group	14
5.2 ECLLMF of the heterogeneous experiment group	15
5.3 ECLLMF of the homogeneous experiment group	16
6. Conclusions	18
Acknowledgments	18
References	19

1. はじめに

推定臨界下限増倍率は、評価対象と類似した燃料体系の臨界実験データを用いた計算精度の評価結果から未臨界と判断してよいと考える中性子増倍率の上限値であり、臨界安全評価上重要な値である¹⁾。これまで、推定臨界下限増倍率の設定では、計算コードが算出する k_{eff} 分布の十分に下側の値として統計処理により求めていた²⁾。この統計処理では、計算コードが算出する k_{eff} 分布は燃料の種類ごとに同じ、つまり同一実験グループ内の各実験に対する計算誤差量には核燃料パラメータの依存性がない、と仮定されていた。

「臨界安全ハンドブック」³⁾には、燃料の形状や種類ごと 8 種類のグループ（以下単に実験グループとよぶ）に分類された、約 400 のベンチマーク実験に対する推定臨界下限増倍率が記載されている。しかしこの統計処理では、上記のようにウラン濃縮度（あるいはプルトニウム同位体組成）や燃料密度等の燃料のパラメータと臨界計算誤差との間の依存性が考慮されていなかった。このため、パラメータ依存性がある場合には計算値の幅が大きくなることから、臨界計算誤差量を大きく、従って推定臨界下限増倍率を低く設定している可能性があった。また、実験グループの分類が大雑把すぎると臨界計算誤差量を大きく見積もり、従って推定臨界下限増倍率を低く設定する要因となりえた。臨界計算誤差量を大きくとることは、増倍率限度¹⁾（または、最大許容増倍率⁴⁾）を一定値（たとえば 0.95）に採るときには、安全裕度を小さくすることになる。また逆に、安全裕度を一定値にするときには、未臨界限度¹⁾を低く設定せざるを得ないことを意味する。

上に記した従来の統計処理に基づく臨界計算誤差評価方法の改良として、実験グループ内における計算誤差と燃料パラメータとの依存性を考慮した臨界計算誤差評価方法が提案されている⁵⁾。この評価方法では、統計処理時に上記評価で考慮できなかった燃料パラメータの依存性を考慮し、合理的な推定臨界下限増倍率を算出することができる。同論文では濃縮度 5 から 10wt%の均質ウラン燃料臨界実験体系を適用例として、ウラン濃縮度と減速度 ($H/^{235}\text{U}$ 比) の 2 つを依存パラメータに設定した誤差評価が実施されている。

本報告書では燃料パラメータ依存性を考慮した MOX 燃料の推定臨界下限増倍率を算出する方法を確立することを目的に、まず計算誤差評価の対象とする MOX 燃料の実験グループの分類について検討し、次に MOX 燃料を使用したベンチマーク実験とそのベンチマーク解析結果の誤差量について、パラメータとの依存性を検討した。最後に、設定した実験グループ内でパラメータ依存性を考慮した統計処理を行うことにより、計算誤差量を算出した。誤差評価に使用するベンチマーク実験は ICSBEP ハンドブック⁶⁾ から選出した。誤差評価の対象として、臨界計算コードには MVP⁷⁾ を、評価済核データライブラリには JENDL-3.3⁸⁾ を使用した。

2. 臨界計算誤差評価手法

推定臨界下限増倍率は、統計手法に基づいた計算誤差評価により、計算コードを用いた計算の計算誤差を考慮して未臨界と判断できる中性子増倍率の計算値として設定される。この計算誤差評価では、統計処理の前に、評価対象と類似の臨界実験選定と、その臨界実験に対するベンチマーク計算を実施している。そして統計処理では、臨界ベンチマーク計算で得られる k_{eff} の平均値や分散等の統計量を基に、計算コードが算出する k_{eff} 計算値の母集団確率分布の下側の値をとることが任意の確率でいえる⁹⁾ 値を求めている²⁾。臨界安全ハンドブック³⁾では、燃料の種類ごとに8種類に分類された約400の臨界実験を対象にした JACS コードシステムの計算結果から、97.5%以上の確率で k_{eff} の分布の下側から2.5%以下（下側2.5%）に入る値を推定臨界下限増倍率の判断基準として、

$$k_{\text{L}} = \bar{k} - \mu s, \quad (2.1)$$

から推定臨界下限増倍率を求めている。ここで、 k_{L} は推定臨界下限増倍率、 $\bar{k}$ はベンチマーク計算結果の平均値、 s はベンチマーク計算結果の標準偏差であり、 μ は定数で、臨界ベンチマーク計算の数、未臨界と判断する k_{eff} 分布の下側割合（ここでは2.5%）及びその信頼度（ここでは97.5%）の3つのパラメータから非心 t 分布にもとづいて決定される。

上記で示した計算誤差評価方法では、臨界実験グループを8種類に分類した後、「各臨界実験グループに属する実験は同じ計算誤差量をもつ」という仮定を置いていた。このため、仮に計算誤差量と燃料パラメータに依存性があった場合には、計算値の幅が大きくなることから計算誤差量を過剰に見積もってしまう可能性があった。これに対し、本報告では計算誤差量と燃料パラメータの依存性があると仮定し、この依存性を考慮した統計処理に基づく計算誤差評価方法⁵⁾を導入して推定臨界下限増倍率を求めた。この方法では、2.1 式中のパラメータを、それぞれ燃料依存性を考慮したパラメータに置き換えた、

$$k_{\text{L}}(x) = \bar{k}(x) - \mu \cdot g(x) \cdot s, \quad (2.2)$$

により推定臨界下限増倍率を求めている。2.2 式中の $k_{\text{L}}(x)$ は燃料パラメータ依存性を考慮した推定臨界下限増倍率である。2.2 式中の $\bar{k}(x)$ は、ベンチマーク解析結果に最小二乗法を適用することで算出された値で、燃料パラメータに依存する。2.2 式中の μ は、3つのパラメータ（臨界ベンチマーク計算の数、未臨界と判断する k_{eff} 分布の下側の値からの割合、その信頼度）を考慮して非心 t 分布にもとづいて決定される定数である。2.2 式中の $g(x) \cdot s$ は回帰式より算出される $\bar{k}(x)$ の分散の平方根に比例する量であり、 s は $g(x) \cdot s$ の最小値である⁵⁾。本報告では、この評価方法を MOX 燃料体系に適用し、計算誤差を考慮した誤差評価を実施して推定臨界下限増倍率を算出する。

3. ベンチマーク計算

3.1 対象臨界実験

前節で示したように、計算コードの計算誤差量を算出するためには、臨界実験に対するベンチマーク計算を実施する必要がある。本節では、本報告書で計算誤差評価対象に設定した MOX 燃料の臨界実験と、そのベンチマーク計算結果について検討する。Table1 に、ベンチマーク計算対象とした臨界実験シリーズの概要を示す。なお、データの精度を考慮して、対象臨界実験は、1970 年以降に実施された実験に限定した。Table1 では、各臨界実験シリーズにおける、本報告書で定義した番号、ICSBEP で定義されている実験登録番号、実験施設名、実験実施年度、燃料の均質・非均質の区分、実験数、燃料のウラン濃縮度、 ^{240}Pu 同位体組成、プルトニウム富化度について示している。

なお、ICSBEP の実験登録番号は、以下の形で構成されている。

(核分裂性物質) - (物理的形態) - (スペクトル) - (番号)

例えば、Table1 で示した実験「MIX-COMP-THERM-001」は、プルトニウムとウランの混合複合燃料を扱った熱中性子体系の実験の 1 つであることを示している。Table1 では、この ICSBEP の実験登録番号に従って計算誤差評価の対象とした臨界実験を 4 つのグループに分類して a から d の番号をつけるとともに、実験シリーズごとに枝番号を設定した。この結果、a-1 から d-4 までの 16 種類の実験番号を設定した。以下には、臨界実験グループごとに実験の概要を示す。

3.1.1 実験グループ a

軽水減速体系中の非均質体系 MOX 燃料の実験を実験グループ a に設定した。

実験 a-1(MIX-COMP-THERM-001)は、1978 年にアメリカのパシフィック・ノースウェスト研究所 (PNL) で実施された臨界実験で、4 種類の燃料棒の配置に対して実験が行われている。燃料は、 PuO_2 富化度 19.7wt%、 ^{240}Pu 同位体組成 11.5wt% の MOX 燃料を使用している。ウランには天然ウランを使用している。実験 a-2 (MIX-COMP-THERM-002) も実験 a-1 同様に PNL で実施された実験であるが、実施年度は 1975 年から 1976 年と異なる。燃料棒の配置に加え、減速材中のボロン濃度もパラメータとした 6 ケースの実験が実施されている。燃料は、プルトニウム富化度 2.0wt%、 ^{240}Pu 同位体組成 7.76 wt% の MOX 燃料を使用している。ウランには天然ウランを使用している。実験 a-3 (MIX-COMP-THERM-004) は、1972 年から 1975 年にかけて、日本原子力研究所 (JAERI) の TCA 実験施設で実施された臨界実験で、MOX 燃料棒を 20×20 、 21×21 、 23×23 の 3 パターンの正方形に配置して、燃料棒ピッチや実験日時を変更して全 11 ケースの臨界水位を測定している。燃料は、プルトニウム富化度が 3wt%、 ^{240}Pu 同位体組成 22.0wt% の MOX 燃料を使用した。ウランには天然ウランを使用している。実験 a-4

(MIX-COMP-THERM-011) は、1970 年にフランスの Valduc で実施された。6 種類の燃料配置と燃料本数の組み合わせについて臨界水位を測定した燃料棒配列実験である。燃料には、ウラン濃縮度 60.2wt%のウランと、 ^{240}Pu 同位体組成 9.72 wt%のプルトニウムが、25.8wt%のプルトニウム富化度で混合されている MOX 燃料を使用している。

Table 1 Outline of criticality experiment series with MOX fuel for benchmark calculation in this paper

No.	Identification Number in ICSBEP Handbook ⁶⁾	Laboratory	Years	Fuel System	Number of Experiments	²³⁵ U Enrichment [wt%]	²⁴⁰ Pu Content in Pu [wt%]	Pu/(Pu+U) [wt%/wt%]
a-1	MIX-COMP-THERM-001	PNL, USA	1978	Hetero	4	0.710	11.5	0.224
a-2	MIX-COMP-THERM-002	PNL, USA	1975-1976	Hetero	6	0.708	7.76	0.020
a-3	MIX-COMP-THERM-004	JAERI, Japan	1972-1975	Hetero	11	0.711	22.1-23.7	0.030
a-4	MIX-COMP-THERM-011	VALDUC, France	1970	Hetero	6	60.0	9.75	0.257
b-1	MIX-MISC-THERM-001	PNL, USA	1987-1988	Hetero	11	0.710	11.8	0.223
b-2	MIX-MISC-THERM-002	VALDUC, France	1970	Hetero	12	60.2	9.75	0.257
b-3	MIX-MISC-THERM-003	VALDUC, France	1971	Hetero	24	60.2	9.82	0.258
b-4	MIX-MISC-THERM-004	PNL, USA	1974	Hetero	6	0.711	11.9	0.252
b-5	MIX-MISC-THERM-005	PNL, USA	1975	Hetero	3	0.72	11.9	0.252
c-1	MIX-MISC-FAST-002	IPPE, Russia	1985	Hetero	2	0.42	4.59	0.125
c-2	MIX-MISC-FAST-003	IPPE, Russia	2004-2005	Hetero	3	0.42	4.59, 4.64	0.0966, 0.222
c-3	MIX-MISC-MIXED-001	IPPE, Russia	2004-2005	Hetero	8	0.42	4.59, 4.64, 10.2	0.0966, 0.222
d-1	MIX-COMP-THERM-012	PNL, USA	1970-1972	Homo	33	0.15	8.00-23.0	0.0758-0.30
d-2	MIX-COMP-THERM-013	PNL, USA	1975-1976	Homo	30	0.15	8.01	0.146
d-3	MIX-COMP-THERM-014	PNL, USA	1973	Homo	22	0.15	8.01	0.146
d-4	MIX-COMP-THERM-016	PNL, USA	1976	Homo	19	0.15	11.6	0.293

3.1.2 実験グループ b

溶液燃料中に MOX 燃料棒を配置した、非均質体系の臨界実験を実験グループ b に設定した。実験 b-1 (MIX-MISC-THERM-001) は、アメリカの PNL で 1987 年から 1988 年にかけて実施された実験で、溶液燃料中に MOX 燃料棒を 1.4cm ピッチの正方格子状に配置させて燃料溶液の臨界高さを測定している。溶液燃料には、4 から 468g(Pu+U)/l の濃度を持つ 11 種類の硝酸ウランと硝酸プルトニウムと、ガドリニウムの混合溶液を使用した。燃料棒中の燃料には、11.8wt%の ^{240}Pu 同位体組成を持つプルトニウムと天然ウランが 22.3wt%の富化度で混合された MOX 燃料を使用した。実験 b-2 (MIX-MISC-THERM-002) は、1970 年にフランスの Valduc で実施された、硝酸プルトニウム中に MOX 燃料棒を三角配列させた体系の臨界実験である。使用した硝酸プルトニウムの濃度は約 10g/l または約 20 g/l である。実験では、12 種類の燃料棒の配列に対して臨界液位を測定している。ピッチの間隔は 1.9cm または 2.5cm である。燃料棒には、9.75wt%の ^{240}Pu 同位体組成を持つプルトニウムと 60.2wt%濃縮度のウランが 25.7wt%の富化度で混合された MOX 燃料を使用している。実験 b-3 (MIX-MISC-THERM-003) は、実験 b-2 と同様に硝酸プルトニウム中に MOX 燃料棒をいれた体系の臨界実験で、フランスの Valduc において 1971 年に実施された。硝酸プルトニウムは、濃度が約 20～200 g/l の 6 種類を使用している。三角格子配列のピッチの間隔を 1.9cm または 2.5cm に設定した 37～169 本の燃料棒に対して実施された 24 ケースについて、臨界液位を測定している。燃料棒には、9.82wt%の ^{240}Pu 同位体組成を持つプルトニウムと 60.2wt%濃縮度のウランが 25.8wt%の富化度で混合された MOX 燃料を使用している。実験 b-2 と b-3 は同じ MOX 燃料棒を使用しているが、実験時期が異なるため、 ^{240}Pu 同位体組成は異なっている。実験 b-4 (MIX-MISC-THERM-004) は、1974 年にアメリカの PNL で実施された実験で、硝酸ウラン、硝酸プルトニウムとガドリニウムの混合溶液燃料中に MOX 燃料の燃料棒を三角格子に配置して臨界液位を測定した実験である。混合溶液燃料中のウランの濃度は 180.0g/l、プルトニウム濃度は 77.6g/l で一定であるが、ガドリニウム濃度については 0.02 から 1.34g/l まで 6 濃度に変化させている。燃料棒中には、11.9wt% ^{240}Pu 同位体組成のプルトニウムと天然ウランがプルトニウム富化度 25.2wt%で混合された MOX 燃料を使用している。実験 b-5 (MIX-MISC-THERM-005) は、1975 年にアメリカの PNL で実施された実験で、硝酸ウラン、硝酸プルトニウム、ガドリニウムとボロンの混合溶液燃料中に MOX 燃料棒を三角格子に設置して臨界高さを測定している。混合溶液燃料は、ウランの濃度は 82.7～84.5g/l、プルトニウム濃度は 180.6～183.2g/l、ガドリニウム濃度は 0.13～0.31g/l、ボロン濃度は 0.27～0.90g/l の範囲で変化させた。7 実験体系中 3 体系が ICSBEP ハンドブックに採用されている。MOX 燃料棒については、実験 b-4 とほぼ同じものを使用している。

3.1.3 実験グループ c

ロシアの物理エネルギー研究所（IPPE）にある高速臨界実験装置 BFS-1 で実施された臨界実験を、実験グループ c に設定した。BFS-1 の実験では、プルトニウムペレットと劣化ウランペレットをいれたアルミニウム管燃料棒を三角格子状に配列し、ポリエチレンを減速材として使用して減速度を調節している。実験 c-1 (MIX-MISC-FAST-002) は、 ^{240}Pu 同位体組成 4.59wt% のプルトニウムペレットと劣化ウランペレットがプルトニウム富化度 12.5wt% の割合で詰められた燃料棒を使用していて、減速度を 2 種類変えた実験を実施している。実験 c-2 (MIX-MISC-FAST-003) は、4.6wt% の ^{240}Pu 同位体組成をもつプルトニウムが 9.7wt% 及び 22.2wt% のプルトニウム富化度で混合された燃料を使用していて、H/Pu 比を 0～2.5 の範囲で変えて実験を行っている。実験 c-3 (MIX-MISC-MIXED-001) では、4.6wt% 及び 10.2wt% の ^{240}Pu 同位体組成をもつプルトニウムが 9.7wt% 及び 22.2wt% のプルトニウム富化度の割合で混合されている燃料を使用し、H/Pu 比を 4.7～7.5 の範囲で変えて実験を行っている。

3.1.4 実験グループ d

アメリカの PNL で実施された MOX 粉末の燃料ブロックを使用した臨界実験を、実験グループ d に設定した。燃料ブロックには、酸化ウランおよび酸化プルトニウムの粉末をポリスチレンで固めた燃料ブロックを使用し、その形状は、一辺 2 インチの立方体と、一辺 2 インチの正方形を底面にもつ高さ 0.5 インチの直方体の 2 種類である。また、各燃料ブロックは、ポリ塩化ビニールテープで覆われており、燃料に混合されているポリスチレンは減速材として働いている。実験では、初めに一辺 2 インチの立方体の燃料を積み上げたあと、高さ 0.5 インチの直方体で高さを調整し、その後燃料ブロックを積み上げた 2 つのテーブルをあわせることで臨界にしている。実験 d-1 (MIX-COMP-THERM-012) では、8.0～23.0wt% ^{240}Pu 同位体組成を持つプルトニウムと 0.15wt% の濃縮度を持つウランが、プルトニウム富化度 7.58～30.0wt% で混合され、減速度が 19.5、30.6、47.4、51.8 の MOX 粉末燃料について、プレキシグラス反射体を持つケースを 27 ケース、反射体のないケースを 6 ケースの、全 33 ケースの条件で実験を実施している。実験 d-2 (MIX-COMP-THERM-013)、実験 d-3 (MIX-COMP-THERM-014)、実験 d-4 (MIX-COMP-THERM-016) は、上記実験方法に対して、様々な組成をもつ中性子吸収材を使用して実験している。

3.2 ベンチマーク計算結果

3.1 で示した臨界実験に対する、MVP と JENDL-3.3 の組み合わせを使用したベンチマーク計算の結果を Table2 及び Table3 に示す。なお、実験 a-3, -4, b-1, -2, -3, -4, -5 及び d-1, -2, -3, -4 については、(独)原子力安全基盤機構（JNES）の報告書¹⁰⁻¹²⁾に記載された計算結果を引用している。Fig.1 には、Table1 で示した実験グループに分類したベンチマーク

計算の結果について、横軸に ^{240}Pu 同位体組成をとり示す。Fig.1 より、 ^{240}Pu 同位体組成 10wt%付近で k_{eff} の計算結果が大きくなることがわかる。また、実験グループ a, b, c は、Table1 ではそれぞれ非均質体系の実験グループに分類されているが、計算誤差がそれぞれ大きく異なる傾向を示した。実験グループと計算誤差の依存性について、次章に示す。

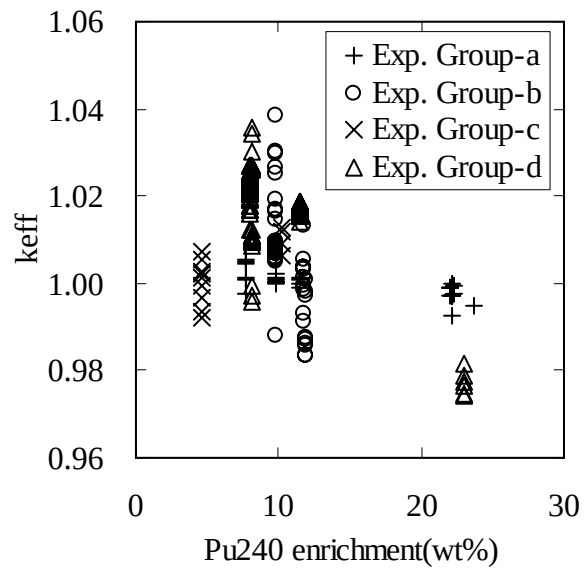


Fig.1 Result of benchmark calculations with MVP-JENDL-3.3

Table 2 Result of benchmark calculations with MVP-JENDL-3.3 (1)

No.	Fuel			Calculation Result	
	²³⁵ U Enrichment [wt%]	²⁴⁰ Pu Content in Pu [wt%]	Pu/(U+Pu) [-]	k _{eff}	σ
a-1	0.71	11.5414	0.2237	1.0006	0.0006
a-1	0.71	11.5414	0.2237	0.9998	0.0006
a-1	0.71	11.5414	0.2237	0.9992	0.0006
a-1	0.71	11.5414	0.2237	1.0012	0.0006
a-2	0.708	7.7593	0.0204	0.9976	0.0006
a-2	0.708	7.7593	0.0204	1.0012	0.0005
a-2	0.708	7.7593	0.0204	1.0009	0.0005
a-2	0.708	7.7593	0.0204	1.0045	0.0004
a-2	0.708	7.7593	0.0204	1.0054	0.0005
a-2	0.708	7.7593	0.0204	1.0052	0.0004
a-3	0.711	22.0825	0.03	0.9925	0.0011
a-3	0.711	22.1504	0.0299	0.9971	0.0011
a-3	0.711	23.7291	0.028	0.9950	0.0011
a-3	0.711	22.078	0.03	0.9990	0.0010
a-3	0.711	22.1521	0.0299	0.9973	0.0010
a-3	0.711	22.289	0.0298	0.9974	0.0011
a-3	0.711	22.0708	0.03	0.9972	0.0009
a-3	0.711	22.1533	0.0299	0.9973	0.0010
a-3	0.711	22.2246	0.0298	0.9994	0.0010
a-3	0.711	22.0739	0.03	0.9990	0.0009
a-3	0.711	22.155	0.0299	0.9999	0.0009
a-4	60	9.7532	0.257	1.0001	0.0009
a-4	60	9.7532	0.257	1.0020	0.0009
a-4	60	9.7532	0.257	1.0005	0.0009
a-4	60	9.7532	0.257	1.0006	0.0008
a-4	60	9.7532	0.257	1.0004	0.0009
a-4	60	9.7532	0.257	1.0013	0.0009
b-1	0.71	11.7773	0.2234	0.9910	0.0009
b-1	0.71	11.7773	0.2234	0.9996	0.0008
b-1	0.71	11.7773	0.2234	0.9984	0.0008
b-1	0.71	11.7773	0.2234	0.9928	0.0008
b-1	0.71	11.7773	0.2234	1.0012	0.0008
b-1	0.71	11.7773	0.2234	1.0035	0.0007
b-1	0.71	11.7773	0.2234	1.0054	0.0007
b-1	0.71	11.7773	0.2234	1.0030	0.0006
b-1	0.71	11.7773	0.2234	1.0038	0.0007
b-1	0.71	11.7773	0.2234	1.0035	0.0007
b-1	0.71	11.7773	0.2234	1.0133	0.0009
b-2	60.2	9.7532	0.2573	1.0090	0.0008
b-2	60.2	9.7532	0.2573	1.0079	0.0009
b-2	60.2	9.7532	0.2573	1.0145	0.0008
b-2	60.2	9.7532	0.2573	1.0165	0.0008
b-2	60.2	9.7532	0.2573	1.0190	0.0007
b-2	60.2	9.7532	0.2573	1.0171	0.0007
b-2	60.2	9.7532	0.2573	1.0299	0.0008
b-2	60.2	9.7532	0.2573	1.0303	0.0008
b-2	60.2	9.7532	0.2573	1.0266	0.0008
b-2	60.2	9.7532	0.2573	1.0386	0.0008

No.	Fuel			Calculation Result	
	²³⁵ U Enrichment [wt%]	²⁴⁰ Pu Content in Pu [wt%]	Pu/(U+Pu) [-]	k _{eff}	σ
b-2	60.2	9.7532	0.2573	1.0253	0.0008
b-2	60.2	9.7532	0.2573	0.9881	0.0009
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0081	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0078	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0094	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0080	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0079	0.0003
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0080	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0071	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0095	0.0003
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0088	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0096	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0091	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0078	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0068	0.0003
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0082	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0080	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0058	0.0003
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0052	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0072	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0074	0.0003
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0055	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0066	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0049	0.0004
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0068	0.0003
b-3	60.2	9.8241	0.2575	1.0056	0.0004
b-4	0.711	11.9341	0.252	0.9877	0.0004
b-4	0.711	11.9341	0.252	0.9872	0.0002
b-4	0.711	11.9341	0.252	0.9861	0.0002
b-4	0.711	11.9341	0.252	0.9834	0.0002
b-4	0.711	11.9341	0.252	0.9857	0.0001
b-4	0.711	11.9341	0.252	0.9832	0.0001
b-5	0.72	11.9434	0.2519	0.9981	0.0002
b-5	0.72	11.9434	0.2519	0.9971	0.0002
b-5	0.72	11.9434	0.2519	1.0007	0.0001
c-1	0.42	4.5866	0.1249	0.9936	0.0004
c-1	0.42	4.5868	0.1249	0.9968	0.0004
c-2	0.42	4.6397	0.2216	0.9922	0.0004
c-2	0.42	4.6397	0.2216	1.0012	0.0005
c-2	0.42	4.5895	0.0966	1.0021	0.0004
c-3	0.42	4.6395	0.2216	1.0027	0.0005
c-3	0.42	4.6395	0.2216	1.0073	0.0005
c-3	0.42	10.1941	0.2219	1.0117	0.0005
c-3	0.42	10.1941	0.2219	1.0091	0.0005
c-3	0.42	10.1941	0.2219	1.0129	0.0004
c-3	0.42	4.5896	0.0966	0.9995	0.0004
c-3	0.42	10.1942	0.0966	1.0062	0.0004
c-3	0.42	4.5896	0.0966	1.0054	0.0004

Table 3 Result of benchmark calculations with MVP-JENDL-3.3 (2)

No.	Fuel			Calculation Result	
	²³⁵ U Enrichment [wt%]	²⁴⁰ Pu Content in Pu [wt%]	Pu/(U+Pu) [-]	k _{eff}	σ
d-1	0.15	23.0093	0.0758	0.9746	0.0005
d-1	0.15	23.0093	0.0758	0.9773	0.0005
d-1	0.15	23.0093	0.0758	0.9740	0.0005
d-1	0.15	23.0093	0.0758	0.9789	0.0005
d-1	0.15	23.0093	0.0758	0.9765	0.0005
d-1	0.15	23.0093	0.0758	0.9814	0.0005
d-1	0.15	8.1493	0.0788	1.0341	0.0005
d-1	0.15	8.1493	0.0788	1.0301	0.0005
d-1	0.15	8.1493	0.0788	1.0271	0.0005
d-1	0.15	8.1493	0.0788	1.0267	0.0005
d-1	0.15	8.1493	0.0788	1.0260	0.0005
d-1	0.15	8.1493	0.0788	1.0271	0.0005
d-1	0.15	8.1493	0.0788	1.0357	0.0005
d-1	0.15	8.0016	0.1461	1.0222	0.0006
d-1	0.15	8.0016	0.1461	1.0218	0.0006
d-1	0.15	8.0016	0.1461	1.0194	0.0006
d-1	0.15	8.0016	0.1461	1.0177	0.0006
d-1	0.15	8.0016	0.1461	1.0177	0.0006
d-1	0.15	8.0016	0.1461	1.0167	0.0006
d-1	0.15	8.0016	0.1461	1.0168	0.0006
d-1	0.15	8.0016	0.1461	1.0159	0.0006
d-1	0.15	8.0016	0.1461	1.0121	0.0006
d-1	0.15	8.1648	0.3001	1.0107	0.0006
d-1	0.15	8.1648	0.3001	1.0124	0.0006
d-1	0.15	8.1648	0.3001	1.0102	0.0006
d-1	0.15	8.1648	0.3001	1.0094	0.0006
d-1	0.15	8.1648	0.3001	1.0094	0.0006
d-1	0.15	8.1648	0.3001	1.0106	0.0006
d-1	0.15	8.1648	0.3001	1.0109	0.0006
d-1	0.15	8.1648	0.3001	1.0084	0.0006
d-1	0.15	8.1648	0.3001	0.9973	0.0006
d-1	0.15	8.1648	0.3001	0.9994	0.0006
d-1	0.15	8.1648	0.3001	0.9956	0.0006
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0227	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0232	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0238	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0244	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0248	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0249	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0250	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0228	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0214	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0232	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0232	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0220	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0226	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0206	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0215	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0213	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0216	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0194	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0268	0.0004

No.	Fuel			Calculation Result	
	²³⁵ U Enrichment [wt%]	²⁴⁰ Pu Content in Pu [wt%]	Pu/(U+Pu) [-]	k _{eff}	σ
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0271	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0255	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0254	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0240	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0227	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0231	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0236	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0250	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0242	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0255	0.0004
d-2	0.15	8.0112	0.146	1.0272	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0225	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0222	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0218	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0231	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0210	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0204	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0231	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0219	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0219	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0228	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0217	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0217	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0221	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0232	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0224	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0226	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0217	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0198	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0198	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0232	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0234	0.0004
d-3	0.15	8.0077	0.1461	1.0215	0.0004
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0157	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0181	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0178	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0167	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0186	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0187	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0166	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0189	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0164	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0156	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0168	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0143	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0153	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0163	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0179	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0158	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0180	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0179	0.0003
d-4	0.15	11.5519	0.2927	1.0172	0.0003

4. 実験グループの再構築

4.1 実験グループに対する考察

計算誤差評価の対象実験グループが包括する実験の範囲が広すぎると、計算誤差を大きく見積もりすぎてしまう可能性があることから、本報告書の目的である合理的な推定臨界下限増倍率を設定するには、燃料の種類や形状だけでなく、実験内容に踏み込んだ実験グループを設定する必要がある。このことから、本章では臨界実験の内容を考慮することで、実験グループを再設定する。

臨界安全ハンドブックで示された誤差評価では、誤差評価の対象となる臨界実験を燃料の種類および均質・非均質により、8つの実験グループ（均質低濃縮ウラン、均質高濃縮ウラン、均質プルトニウム、均質 MOX、均質 MIX、非均質低濃縮ウラン、非均質プルトニウム、非均質 MOX）に分類している。ここで MIX とは $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$ 系の燃料のことを指している。Table1 で示した臨界実験は、従来の誤差評価の実験グループで分類すると、均質 MOX と非均質 MOX の2種類に分類される。Table4 に、臨界安全ハンドブックで示された実験グループの分類と、本報告書で対象とした臨界実験の対応について示す。

分類された実験グループの実験内容についてみていく。実験グループ c はロシアの IPPE で実施された実験のグループであるが、燃料棒が三角格子配列であり、そのピッチが非常に小さいことから均質体系とみなし、実験グループ c は均質体系に設定することとした。次に、実験グループ b は燃料棒が溶液燃料中に漬かってタンクに入れられていて二重に非均質な体系となっている。軽水中に燃料棒を入れた単純な非均質体系とは異なると考え、従来の誤差評価に新たに「二重非均質」という実験グループを設け、実験グループ b を「二重非均質」グループに入れることとした。また、実験 d-1 は、燃料を被覆しているテープの影響を補正しているが、その補正方法に検討の余地があることが報告されている。^{14,15)} このことから、本報告書における計算誤差評価の対象実験から実験 d-1 を除外することとした。同様の手法が実験 d-2, -3, -4 でも用いられていることから、実験グループ d に含まれる実験をすべて除外することとした。

Table 4 Experimental groups in Handbook³⁾ and criticality experiments in this report

No	Experimental Group		Corresponding number of Table 1
1	U(Low enrichment)		-
2	U(High enrichment)		-
3	Homogeneous	Pu	-
4		MOX	d
5		MIX*	-
6	U(Low enrichment)		-
7	Heterogeneous	Pu	-
8		MOX	a, b, c

* “MIX” means “the solution is $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-Pu}(\text{NO}_3)_4$.”

4.2 再構築した実験グループの妥当性評価

本節では、4.1 節での検討結果の妥当性を評価することを目的に、再構築前後の各実験グループにおける燃料パラメータと計算誤差量の依存性を評価した。依存性評価は、4.1 節の結果から導かれた実験グループの分類と、従来の分類の 2 ケースの分類について相関係数を使用することで実施した。ケース 1 では従来方法による実験グループ分類を、ケース 2 では本報告書で新たに設定した実験グループ分類を採用した。燃料パラメータには、 ^{240}Pu 同位体組成とプルトニウム富化度を設定した。Table5 に、ケース 1、ケース 2 の実験グループの分類と、それぞれのケースについて計算結果と燃料パラメータとの相関係数を示す。

ケース 1 では、非均質実験のグループに実験グループ a, b, c が分類された。また、実験グループ d については、4.1 節で示した通り実験データの精度に検討が必要であることがわかっているので、本節での検討に加えなかった。非均質体系の実験に分類された実験グループにおけるベンチマーク計算結果と燃料パラメータとの相関係数は、 ^{240}Pu 同位体組成については 0.33、プルトニウム富化度については 0.32 となり、両燃料パラメータともにベンチマーク計算結果との相関は小さいことが判明した。

ケース 2 では、ケース 1 で非均質体系に分類されていた実験グループ a, b, c が、それぞれ非均質実験、二重非均質実験、均質燃料実験に分類されている。各実験に分類されたベンチマーク計算結果と ^{240}Pu 同位体組成の相関係数は、非均質実験では 0.57、二重非均質では 0.66、均質燃料では 0.74 という結果になり、本報告書で設定した実験分類方法により全ての実験で相関係数が向上することが判明した。また、同様にプルトニウム富化度との相関係数は、非均質実験グループにおいて 0.48、二重非均質グループにおいて 0.28、均質燃料グループにおいて 0.37 という結果となり、ケース 1 の相関係数から大きく変動しなかった。この結果より、燃料パラメータに ^{240}Pu 同位体組成の

みを設定するとともに、4.1 節の検討結果を反映した新たな実験グループを設定することが妥当であると考えられる。Fig.2 に、新たな分類に基づいてプロットさせたベンチマーク計算結果を示す。

Table 5 Experimental group and correlation coefficients of Case 1 and Case 2

Case Name	Experimental Group	Corresponding number in Table 2	Correlation coefficient	
			^{240}Pu Content in Pu [wt%]	Pu enrichment [-]
1	Homo	-*	-	-
	Hetero	a,b,c	0.33	0.32
2	Homo	c	0.74	0.37
	Hetero	a	0.57	0.48
	Double Hetero	b	0.66	0.28

* Experimental group-d is eliminated since the accuracy of the experimental data is under review

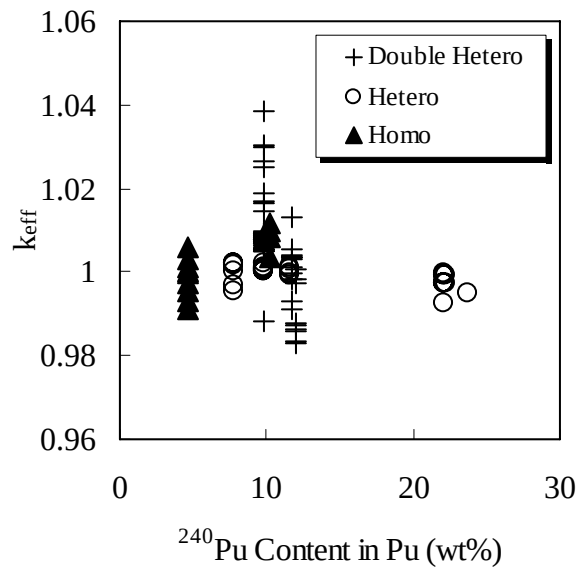


Fig.2 Result of benchmark calculations with MVP-JENDL-3.3 plotted by the sorted experiments

5. プルトニウム-240 同位体組成依存性を考慮した推定臨界下限増倍率

本節では、前章までの検討結果に基づき、MVP を MOX 燃料体系の臨界計算に適用した場合の推定臨界下限増倍率を導出する。推定臨界下限増倍率として、MVP が算出する k_{eff} 分布の下側 2.5% に属することが 97.5% の確かさで言える k_{eff} を設定した。MVP のベンチマーク計算結果には Table2 及び Table3 に示された値を採用し、統計処理の対象となる実験カテゴリは、4 章での検討結果導かれた「均質燃料体系」、「非均質燃料体系」、「二重非均質燃料体系」の 3 つを設定した。また、式 4.2 式における μ の算出に当たって、windows 版統計計算プログラム STATTAB¹⁵⁾を使用した。

以降の節では、燃料パラメータとして ^{240}Pu 同位体組成の 1 次依存性を考慮した計算誤差評価結果を示すとともに、比較のため、燃料パラメータ依存性を考慮しない場合の計算誤差評価結果についても示す。パラメータ依存性を考慮した誤差評価に関する統計量の記号については無印、パラメータ依存性を考慮しない誤差評価に関する統計量には*を付けて区別する。

5.1 二重非均質体系の推定臨界下限増倍率

まず、二重非均質体系の計算誤差評価結果について示す。二重非均質体系の実験には、実験グループ b が属し、総実験数は 56 であった。Table2 に示されたベンチマーク計算結果より、パラメータ依存性がある場合とない場合の二重非均質体系の推定臨界増倍率 $\bar{k}$ 、 $\bar{k}^*$ は、それぞれ、

$$\bar{k}^* = 1.0058 \quad (5.1a)$$

$$\bar{k} = 1.0853 - 0.0075 \times X \quad (5.1b)$$

となった。ただし X は ^{240}Pu 同位体組成である。それぞれの残差は、 $\bar{k}^*$ については 7.219×10^{-3} 、 $\bar{k}$ については 4.138×10^{-3} で、パラメータ依存性を考慮することで残差が小さくなった。また、 μ は 2.502、 μ^* は 2.497 であった。この結果より、二重非均質体系の推定臨界下限増倍率 k_{L}^* 及び k_{L} は、それぞれ、

$$k_{\text{L}}^* = 0.977 \quad (5.2a)$$

$$k_{\text{L}} = (1.085 - 0.007544 \times X) - 2.502 \times 0.008754 \times \sqrt{1 + 56 \times (0.01847 \times (X - 10.53))^2} \quad (5.2b)$$

となった。Fig.3 に二重非均質体系の推定臨界下限増倍率 k_{L} 及び k_{L}^* を示す。横軸に ^{240}Pu 同位体組成、縦軸に k_{eff} の計算値をとっている。Fig.3 より、二重非均質体系における k_{L} は、 ^{240}Pu 同位体組成 10wt%前後を頂点とした曲線となる。その値は、 k_{L}^* に比

べ、 ^{240}Pu 同位体組成が 9～11wt%程度範囲では大きくなり、それ以外では逆に小さくなった。パラメータ依存性を考慮した場合、あるいは考慮しない場合、いずれの場合も推定臨界下限増倍率を下回る k_{eff} 計算値を与える実験結果はなかった。

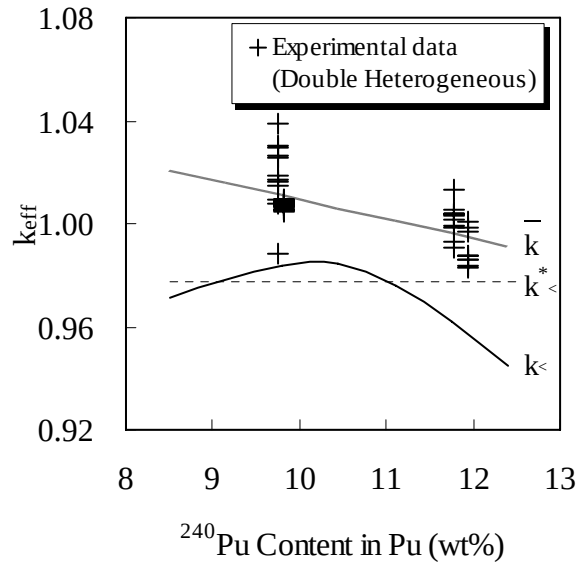


Fig.3 $k_{<}$ of double heterogeneous MOX fuel systems

5.2 非均質体系の推定臨界下限増倍率

次に非均質体系に対する計算誤差評価結果について示す。非均質体系の実験は実験グループ a に属し、総実験数は 27 であった。Table2 に示された臨界ベンチマーク計算結果より、パラメータ依存性がある場合とない場合の非均質体系の推定臨界増倍率 $\bar{k}$ 、 $\bar{k}^*$ は、それぞれ、

$$\bar{k}^* = 0.9991 \quad (5.3a)$$

$$\bar{k} = 1.0022 - 0.0002 \times X \quad (5.3b)$$

となった。ただし X は ^{240}Pu 同位体組成である。それぞれの残差は、 $\bar{k}^*$ については 1.524×10^{-4} 、 $\bar{k}$ については 1.019×10^{-4} で、パラメータ依存性を考慮することで残差が小さくなった。また、 μ は 2.833、 μ^* は 2.815 であった。この結果より、非均質体系の推定臨界下限増倍率 $k_{<}^*$ 及び $k_{<}$ は、それぞれ、

$$k_{<}^* = 0.992 \quad (5.4a)$$

$$k_{<} = (1.002 - 0.0002134 \times X) - 2.833 \times 0.002019 \times \sqrt{1 + 27 \times (0.0008998 \times (X - 14.68)^2)} \quad (5.4b)$$

となった。Fig.4 に非均質体系の推定臨界下限増倍率 $k_{<}$ 及び $k_{<}^*$ を示す。横軸に ^{240}Pu 同位体組成、縦軸に k_{eff} の計算値をとっている。Fig.4 より、非均質体系における $k_{<}$ は ^{240}Pu 同位体組成 13wt% 前後を頂点とした曲線となり、 $k_{<}^*$ に比べ、 ^{240}Pu 同位体組成が 8～18wt% の範囲では大きく、それ以外の範囲では小さくなった。パラメータ依存性を考慮した場合、考慮しない場合、いずれの場合も推定臨界下限増倍率を下回る k_{eff} 計算値を与える実験結果はなかった。なお、 $k_{<}^*$ と実験データの k_{eff} 計算値の差は ^{240}Pu 同位体組成 22wt% 付近で非常に小さい。これに対して、パラメータ依存性を考慮した $k_{<}$ では実験データの k_{eff} 計算値に対して裕度がある結果となった。

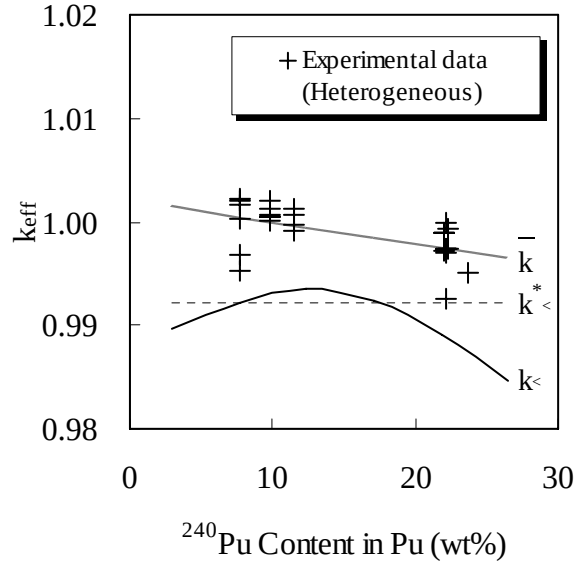


Fig.4 $k_{<}$ of heterogeneous MOX fuel systems

5.3 均質体系の推定臨界下限増倍率

最後に均質体系の誤差評価結果について示す。均質体系の実験は、実験グループ c に属し、総実験数は 13 であった。Table2 に示された臨界ベンチマーク計算結果より、パラメータ依存性がある場合とない場合の二重非均質体系の推定臨界増倍率 $\bar{k}$ 、 $\bar{k}^*$ は、それぞれ、

$$\bar{k}^* = 1.0016 \quad (5.5a)$$

$$\bar{k} = 0.9904 - 0.0018 \times X \quad (5.5b)$$

となった。ただし X は ^{240}Pu 同位体組成である。それぞれの残差は、 $\bar{k}^*$ については 5.670×10^{-4} 、 $\bar{k}$ については 5.611×10^{-4} で、わずかではあるがパラメータ依存性を考慮することで残差が小さくなった。また、 μ は 3.514、 μ^* は 3.427 であった。この結果より、均質体系の推定臨界下限増倍率 $k_{<}^*$ 及び $k_{<}$ は、それぞれ、

$$k_{<}^* = 0.980 \quad (5.5a)$$

$$k_{<} = (0.990 - 0.001757 \times X) - 3.514 \times 0.004465 \times \sqrt{1 + 13 \times (0.01158 \times (X - 6.329)^2)} \quad (5.5b)$$

で表された。Fig.5 に均質体系の $k_{<}$ 及び $k_{<}^*$ を示す。横軸に ^{240}Pu 同位体組成、縦軸に k_{eff} の計算値をとっている。Fig.5 より、均質体系における $k_{<}$ は ^{240}Pu 同位体組成 7wt%前後を頂点とした曲線となり、 $k_{<}$ は、 $k_{<}^*$ に比べ、 ^{240}Pu 同位体組成が 5～10wt%の範囲で大きく、それ以外の範囲では小さくなった。 $k_{<}^*$ および $k_{<}$ を下回る実験結果はなかった。実験データの分散が大きいため、実験データの存在する ^{240}Pu 同位体組成の範囲において $k_{<}^*$ では実験データの k_{eff} 計算値から大きく離れているのに対して、 $k_{<}$ はより実験値に近く、誤差を小さくする値になっていることが分かる。

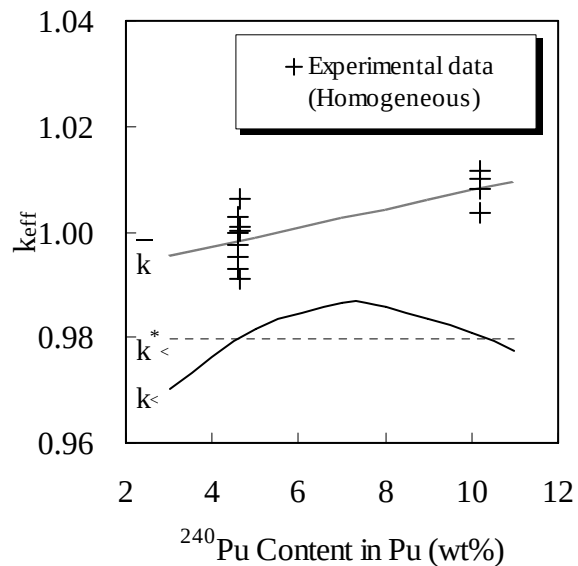


Fig.5 $k_{<}$ of homogeneous fuel system of MOX fuel

6. 結論

合理的な MOX 燃料の推定臨界下限増倍率を算出する方法を確立することを目的に、MVP と JENDL-3.3 の組み合わせによる計算を対象に、燃料パラメータ依存性を考慮した計算誤差評価を実施した。最初に、MOX 燃料を扱った臨界実験のうち、ベンチマーク計算未実施の体系に対してベンチマーク計算を実施した。次に、臨界実験の内容について検討を加え、本報告書で対象とする計算誤差評価で使用する臨界実験を選定した。選定の結果、MOX 燃料ブロックを使用した実験は使用しないこと、ロシアで実施した臨界実験は均質燃料体系とみなすこと、及び溶液燃料中に MOX 燃料棒を挿入させた実験は新たに「二重非均質体系」とみなすこととした。この検討結果の妥当性を検討するために、ベンチマーク計算結果と燃料のパラメータの相関係数を比較し、本報告書で設定した実験の分類方法が妥当であることを確認した。

最後に、上記で設定した燃料の分類方法を適用し、燃料パラメータ依存性を考慮した計算誤差評価を実施した。評価の結果、すべての算出値がベンチマーク計算結果を下回ることを確認した。さらに、従来の方に基づく推定臨界下限増倍率よりも臨界実験が存在する ^{240}Pu 同位体組成の範囲で多くの場合に推定臨界下限増倍率が大きくなることを確認した。

本報告では、利用可能な MOX 燃料体系の臨界実験が限られた中で評価を進めてきた。実際への適用に当っては、 ^{240}Pu 同位体組成をパラメータとして内挿となるようにする必要がある。さらに、評価対象とする実験の取捨選択及び今後実施される臨界実験の評価を追加することにより、推定臨界下限増倍率の精度向上が図られるものとする。

謝辞

本研究を進めるにあたり、三竹晋氏（当時：（独）原子力安全基盤機構、旧（財）原子力発電技術機構）から提供いただいた同機構及び（財）原子力発電技術機構で実施されたベンチマーク計算結果が役立ちました。また、外池幸太郎 副研究主幹には、原稿を閲読いただき有益なコメントをいただきました。ここに記して謝辞といたします。

参考文献

- 1) “日本原子力学会標準 臨界安全管理の基本事項：2004,” 社団法人日本原子力学会, AESI-SC-F004:2004 (2005).
- 2) 奥野浩, 内藤淑孝, “臨界安全解析コードシステム JACS の計算誤差評価,” JAERI-M 87-057 (1987).
- 3) 科学技術庁原子力安全局核燃料規制課, “臨界安全ハンドブック,” につかん書房 (1988).
- 4) 日本原子力研究所核燃料施設安全性研究委員会臨界安全性専門部会臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ, “臨界安全ハンドブック第2版,” JAERI 1340 (1999).
- 5) H. Okuno, “Development of a Statistical Method for Evaluation of Estimated Criticality Lower-Limit Multiplication Factor Depending on Uranium Enrichment and H/Uranium-235 Atomic Ratio,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**, 137 – 1146, (2007).
- 6) Nuclear Energy Agency, “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, September 2008 Edition,” NEA/NSC/DOC(95)03 (2008).
- 7) 森貴正, 中川正幸, “MVP/GMVP 連続エネルギー法及び他群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード,” JAERI-Data/Code 94-007 (1994).
- 8) K. Shibata, T. Kawano, T. Nakagawa, et al., “Japanese evaluated nuclear data library version 3 revision-3: JENDL-3.3,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, 1125 (2002).
- 9) D.B. Owen, “Factors for One-Sided Tolerance Limits and for Variables Sampling Plans,” SCR-607 (1963).
- 10) 財団法人 原子力発電技術機構, “平成14年度 MOX 燃料加工施設の臨界安全解析コードの整備に関する報告書,” INS/MO2-50 (2003).
- 11) 独立行政法人 原子力安全基盤機構, “平成15年度 MVP/JENDL-3.3 のプルトニウムを含む燃料系臨界実験の検証解析,” JNES/SAE04-021 (2004).
- 12) 独立行政法人 原子力安全基盤機構, “MVP/JENDL-3.3 のプルトニウムを含む燃料系臨界実験の検証解析 ー追補ー,” JNES/SAE04-021 Addendum (2007).
- 13) T. Yamamoto, Y. Miyoshi, “Research Activities at the Japan Atomic Energy Research Institute for Criticality Safety Issue on MOX Fuel Fabrication,” The Need for Integral Critical Experiments with Low-moderated MOX Fuels, Workshop Proceedings, Paris, France, April 14-15, 2004, pp.67-75, (2004).
- 14) 三好慶典, 高田友幸, 山本俊弘, 奥野浩, “MOX 粉末燃料臨界ベンチマーク実験の再評価,” 日本原子力学会 2004 年秋の大会 B54 (2004).
- 15) STATTAB: Double Precision Statistical Tables (2002) in MDACC Biostatistics Public Resources available from [<http://biostatistics.mdanderson.org/>].

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

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

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	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
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	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	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ 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	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 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	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

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

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

表 10. SIに属さないその他の単位の例

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

