

ORIGEN2 用断面積ライブラリセットと チェビシェフ有理関数近似法に基づく 燃焼計算コード CRAMO の開発

Development of Burnup/Depletion Calculation Code Based on ORIGEN2 Cross-section Libraries and Chebyshev Rational Approximation Method, CRAMO

横山 賢治 神 智之

Kenji YOKOYAMA and Tomoyuki JIN

原子力科学研究部門
原子力科学研究所
原子力基礎工学研究センター
軽水炉工学・核工学ディビジョン
Nuclear and LWR Engineering Division
Nuclear Science and Engineering Center
Nuclear Science Research Institute
Sector of Nuclear Science Research

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 (<https://www.jaea.go.jp>)
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

ORIGEN2用断面積ライブラリセットとチェビシェフ有理 関数近似法に基づく燃焼計算コード CRAMO の開発

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 原子力科学研究所

原子力基礎工学研究センター 軽水炉工学・核工学ディビジョン

横山 賢治⁺、神 智之^{*}

(2021年1月20日受理)

国産の評価済み核データライブラリ JENDL に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット ORLIB と チェビシェフ有理関数近似法に基づく燃焼計算ソルバーを組み合わせることで、新たな燃焼計算コード CRAMO を開発した。今回開発した CRAMO は、JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット ORLIBJ40 と汎用炉心解析システム MARBLE に実装された燃焼計算ソルバーを利用している。ORLIBJ40 を使った燃焼計算や放射化計算のサンプル問題に CRAMO を適用し、ORIGEN2 の計算結果とよく一致することを確認した。これにより、ORIGEN2 を使わずに ORLIB を利用することが可能になった。今後は、燃焼計算や放射化計算等で使いやすく処理した JENDL のデータを チェビシェフ有理関数近似法に基づく燃焼計算ソルバーと組み合わせて提供できると考えられる。なお、現状の CRAMO の計算機能は ORIGEN2 のサブセットとなっており、CRAMO で計算できるのは燃焼後の組成と放射能である。ただし、ORIGEN2 が output する計算結果は燃焼後の組成に基づいているので、今後、後処理機能を追加していくことで、ORIGEN2 の機能を再現できるようになると考えられる。

原子力科学研究所：〒319-1195茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4

⁺ 2020年3月まで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、現在は高速炉・新型炉
研究開発部門 大洗研究所 高速炉サイクル研究開発センター 高速炉解析評価技術開発部

^{*} 株式会社 NESI

Development of Burnup/Depletion Calculation Code Based on ORIGEN2 Cross-section Libraries and Chebyshev Rational Approximation Method, CRAMO

Kenji YOKOYAMA⁺ and Tomoyuki JIN^{*}

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

(Received January 20, 2021)

A new burnup/depletion calculation code, CRAMO, was developed by combining an ORIGEN2 cross-section library set, ORLIB, based on Japanese evaluated nuclear data library, JENDL, and a burnup/depletion solver based on Chebyshev rational approximation method. CRAMO uses the ORIGEN2 cross-section library set ORLIBJ40 based on JENDL-4.0, and the burnup/depletion solver implemented in the versatile reactor analysis code system, MARBLE. It was confirmed that results of CRAMO agreed well with those of ORIGEN2 for burnup/depletion and radioactivity calculation cases. The development of CRAMO made it possible to use ORLIB without using ORIGEN2. It will be possible to provide an easy-to-use processed JENDL data set for burnup/depletion and radioactivity calculations in combination with a burnup/depletion based on Chebyshev rational approximation method. The present version of CRAMO is a subset of ORIGEN2 and can compute only compositions and radioactivities after irradiation. However, since various kinds of outputs of ORIGEN2 can be evaluated by using the composition, it is possible to reproduce many functions of ORIGEN2 by adding post-processing modules.

Keywords: ORIGEN2, ORLIBJ40, CRAM, Burnup Equation, Depletion, Decay, Radioactivity

⁺ Nuclear Data and Reactor Engineering Division, Nuclear Science and Engineering Center until March 31, 2020, Present affiliation Fast Reactor Life-Cycle Safety and Integrity Evaluation Technology Development Department, Fast Reactor Cycle System Research and Development Center

^{*} NESI Inc.

目 次

1. はじめに	1
2. 理論と実装	2
2.1 理論	2
2.1.1 燃焼方程式の数値解法（行列指数法）	2
2.1.2 CRAM-IPF 法による行列指数の数値解法	3
2.1.3 CRAM-IPF 法による行列指数の計算アルゴリズムに関する補足説明	3
2.2 実装	4
2.2.1 燃焼計算ソルバーと ORIGEN2 ライブラリ	4
2.2.2 燃焼度依存断面積に関する計算機能	5
3. 検証	7
3.1 計算ケース	7
3.2 検証計算に用いた Python とライブラリのバージョン	8
3.3 ORIGEN2 の計算結果との比較	8
3.3.1 燃焼計算に対する検証	8
3.3.2 放射化計算に対する検証	10
4. おわりに	31
参考文献	32
付録A ユーザーマニュアル	35
A.1 実行方法と出力ファイル	35
A.1.1 実行方法	35
A.1.2 出力ファイル	35
A.2 入力ファイル	35
A.2.1 title セクション	36
A.2.2 decay_library セクション	36
A.2.3 xsfpy_library セクション	36
A.2.4 unit セクション	39
A.2.5 initial_material セクション	39
A.2.6 mode セクション	39
A.2.7 executions セクション	40
A.2.8 output セクション	40

A.3 入力ファイルの例	41
付録B 時間ステップ依存性の検討	45
B.1 計算条件	45
B.2 計算結果	45

Contents

1.	Introduction	1
2.	Theory and implementation	2
2.1	Theory	2
2.1.1	Numerical solution of burnup equation (matrix exponential method)	2
2.1.2	Numerical solution of matrix exponential based on CRAM-IPF	3
2.1.3	Further note on algorithm of matrix exponential based on CRAM-IPF	3
2.2	Implementation	4
2.2.1	Burnup/depletion solver and ORIGEN2 library	4
2.2.2	Functions related to burnup-dependent cross sections	5
3.	Verification	7
3.1	Calculation cases	7
3.2	Versions of Python and its libraries used for verification	8
3.3	Comparison with calculation results by ORIGEN2	8
3.3.1	Verification for burnup/depletion calculation	8
3.3.2	Verification for radioactivity calculation	10
4.	Conclusions	31
References		32
Appendix A Users manual		35
A.1	Execution and output file	35
A.1.1	Execution	35
A.1.2	Output file	35
A.2	Input file	35
A.2.1	“title” section	36
A.2.2	“decay_library” section	36
A.2.3	“xsfpy_library” section	36
A.2.4	“unit” section	39
A.2.5	“initial_material” section	39
A.2.6	“mode” section	39
A.2.7	“executions” section	40
A.2.8	“output” section	40

A.3 Sample input file	41
Appendix B Examination of time-step dependency	45
B.1 Calculation condition	45
B.2 Examination of time-step dependency	45

List of Tables

表 2.2.1	ORIGEN2 コードの燃焼度依存断面積の計算に関するサブルーチン	6
表 2.2.2	ORIGEN2 コードの燃焼度依存断面積の計算に関する関数	6
表 3.3.1	ORIGEN2 の計算結果との比較 (PWR34_IRP : 冷却後)	11
表 3.3.2	ORIGEN2 の計算結果との比較 (600MMXIC_IRF : 冷却後)	15
表 3.3.3	ORIGEN2 の計算結果との比較 (SF97-4 : 冷却後)	19
表 3.3.4	ORIGEN2 の計算結果との比較 (SF98-6 : 冷却後)	23
表 3.3.5	ORIGEN2 の計算結果との比較 (PWR34_ACTIVATION : 冷却なし)	27
表 3.3.6	ORIGEN2 の計算結果との比較 (BS340_ZIRCALOY2 : 冷却後)	28
表 3.3.7	ORIGEN2 の計算結果との比較 (BS340_INCONEL718 : 冷却後)	30
表 A.2.1	ORLIBJ40 の軽水炉用ライブラリ一覧と CRAMO のライブラリ名	37
表 A.2.2	ORLIBJ40 の高速炉用ライブラリ一覧と CRAMO のライブラリ名	38
表 B.2.1	出力指定計算使用・燃焼度依存断面積使用時の計算結果の時間ステップ依存性 (PWR34_IRP_900D : 900 日燃焼後の U-235 の存在量)	46
表 B.2.2	出力指定計算使用・燃焼度依存断面積未使用時の計算結果の時間ステップ依存性 (PWR34_IRP_900D_NOVACS : 900 日燃焼後の U-235 の存在量)	47
表 B.2.3	中性子束指定計算使用・燃焼度依存断面積未使用時の計算結果の時間ステップ依存性 (PWR34_IRP_900D_NOVACS : 900 日燃焼後の U-235 の存在量)	47

List of Figures

図 2.1.1	文献記載の CRAM-IPF の計算アルゴリズム	4
図 2.1.2	実装に用いた CRAM-IPF の計算アルゴリズム	4
図 A.3.1	ORIGEN2 の入力例 (SF-98-6.ft05)	42
図 A.3.2	CRAMO の入力例 (cramo_sf98-6.inp)	43
図 A.3.3	CRAMO の入力例 (cramo_sf98-6_in_flow_style.inp)	44

This is a blank page.

1. はじめに

国産の評価済み核データライブラリ JENDL¹⁻³⁾を用いた燃焼計算、放射化計算、崩壊熱計算等には、ORIGEN2 コード^{4,5)}用の断面積ライブラリセット ORLIB⁶⁻⁸⁾が広く利用されている。最初に作成された ORLIB は、評価済み核データライブラリ JENDL-3.2¹⁾に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット ORLIBJ32⁶⁾であるが、この ORLIBJ32 が国内のユーザに広く受け入れられたという背景がある。その後公開された評価済み核データライブラリ JENDL-3.3²⁾、JENDL-4.0³⁾に対しても同様に、ORIGEN2 用断面積ライブラリセット ORLIBJ33⁷⁾、ORLIBJ40⁸⁾が作成された。このように、現在でも JENDL のデータを利用するための基盤技術として ORIGEN2 コードが利用されている。しかしながら、ORIGEN2 コードの開発は終了しており、今後、開発元であるオークリッジ国立研究所においてメンテナンスが行われることは期待できない。また、ORIGEN2 コードには、核分裂収率のデータを 8 核種しか定義できない等の機能的な制限があり、最新の核データライブラリの性能を最大限に活用するための基盤技術としては機能が十分でないといった課題もある⁹⁾。

一方で、近年、行列指数法に基づいて燃焼方程式を解く方法として、クリロフ部分空間法¹⁰⁾や チェビシェフ有理関数近似法（CRAM: Chebyshev Rational Approximation Method）¹¹⁾等が提案されており、これらの手法を適用することで、ORIGEN2 コードで扱うような短半減期の核種を含む詳細な燃焼チェーンであっても効率的に解くことが可能になっている。このため、現在では、ORIGEN2 コードを使わなくても比較的簡単に燃焼方程式を解くソルバーを実装することができる。実際に、汎用炉心解析システム MARBLE にはチェビシェフ有理関数近似法に基づく燃焼計算ソルバーが実装されており¹²⁾、詳細な燃焼チェーンに対しても精度よく計算できることが確認されている¹³⁾。

以上のような背景を踏まえて、今後は JENDL の最新のデータを提供する技術基盤として、ORIGEN2 コードの代わりにチェビシェフ有理関数近似法に基づく燃焼計算ソルバーを利用できることを示すために、JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット ORLIBJ40 と、MARBLE に実装されているチェビシェフ有理関数近似法に基づく燃焼計算ソルバーを組み合わせた燃焼計算コード CRAMO (CRAM solver using Orlib) を開発した。

2. 理論と実装

前述のように、CRAMO の開発ではチェビシェフ有理関数近似法に基づく燃焼計算ソルバーと ORIGEN2 用断面積ライブラリセットを利用する。ここでは、CRAMO の開発で用いたチェビシェフ有理関数近似法と ORIGEN2 用断面積ライブラリセットを利用するため必要な燃焼度依存断面積に関する機能の概要について説明する。

2.1 理論

汎用炉心解析システム MARBLE2¹²⁾ の燃焼計算ソルバーには、M. Pusa と J. Leppänen によって提案されたチェビシェフ有理関数近似法（CRAM: Chebyshev rational approximation method）¹¹⁾に基づくオプションが追加されている。この MARBLE2 の CRAM に基づく燃焼計算ソルバーのアルゴリズムは、2010 年の文献¹¹⁾に基づいており、計算に必要な有理関数の係数は、この文献で引用されている 1992 年の E. Gallopoulos と Y. Saad の文献¹⁴⁾に掲載されている 10 次と 14 次の係数を使っている。しかしながら、その後も燃焼計算における CRAM の応用に関する文献が発表されており、2011 年の文献¹⁵⁾には、M. Pusa らが独自に計算した 14 次と 16 次の係数が掲載されている。また、2012 年の文献¹⁶⁾には、1992 年の文献¹⁴⁾に掲載されている 14 次の係数を使うと計算精度が悪くなるという指摘もある。更に、2016 年にも文献¹⁷⁾が公開されており、この文献では、数値計算誤差をより小さくすることができる IPF (Incomplete Partial Fractions) というアルゴリズムを使うことが提案されており、IPF に対応した 4 次から 48 次までの係数 (4、8、12、16、20、24、28、32、36、40、44、48 次の係数) が掲載されている。なお、この文献では、従来の計算式は PFD (Partial Fraction Decomposition) と呼ばれているので、ここでは両手法を、それぞれ、CRAM-IPF、CRAM-PFD と呼ぶことにする。

以上のように、MARBLE2 の燃焼計算ソルバーは CRAM-PDF に基づく実装となっているが、現在開発中の最新版の MARBLE には、これらの CRAM に関する最新の知見を取り入れられている。このため、今回の CRAMO の開発では、最新版の MARBLE に実装されている CRAM-IPF に基づく 48 次の燃焼計算ソルバーを採用した。

2.1.1 燃焼方程式の数値解法（行列指数法）

最初に、CRAM に基づく燃焼ソルバーの基本となる行列指数法を用いた燃焼方程式の数値解法について簡単に説明する。一般に、燃焼計算は次に示す燃焼方程式を解くことで行われる。

$$\frac{d\mathbf{n}(t)}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{n}(t) \quad (2.1)$$

ここで、 $\mathbf{n}(t)$ は時刻 t における組成ベクトルを、 \mathbf{A} は遷移（燃焼）行列を表す。この方程式を解く方法のひとつとして行列指数法がある。行列指数法では燃焼方程式の解を以下のように表すこと

ができる。

$$\mathbf{n}(t) = \exp(\mathbf{A}t)\mathbf{n}_0 \quad (2.2)$$

ただし、ここで $\mathbf{n}_0 = \mathbf{n}(0)$ である。この式から行列指数の $\exp(\mathbf{A}t)$ 、あるいは、 $\exp(\mathbf{A}t)\mathbf{n}_0$ を計算できれば、燃焼後の組成ベクトルを計算できることが分かる。

2.1.2 CRAM-IPF 法による行列指数の数値解法

2016 年の文献¹⁷⁾で提案されている CRAM-IPF の計算方法についてまとめる。この文献では、スカラーの指数関数を近似する計算する式（文献¹⁷⁾の式(19)）として、以下の式が示されている。

$$\exp(x) \approx \hat{r}_{k,k}(x) = \alpha_0 \prod_{l=1}^{k/2} \left(1 + 2\operatorname{Re} \left(\frac{\tilde{\alpha}_l}{x - \theta_l} \right) \right) \quad (2.3)$$

ここで、 k はチェビシェフ有理関数近似の次数、 $\tilde{\alpha}_l$ と θ_l は次数ごとに決まる複素数の係数である。この式(2.3)を行列の指数関数の式に拡張すると以下のようになる。

$$\exp(\mathbf{A}t) \approx \hat{r}_{k,k}(\mathbf{A}t) = \alpha_0 \prod_{l=1}^{k/2} \left(\mathbf{I} + 2\operatorname{Re} \left(\alpha_l (\mathbf{A}t - \theta_l \mathbf{I})^{-1} \right) \right) \quad (2.4)$$

この式に基づいて行列指数を計算することができるが、燃焼方程式の解を求める際には、行列指数を陽に計算する必要はなく、行列指数とベクトルの積が分かればよいので、燃焼計算ソルバーの実装で用いる式としては以下のようになる。

$$\exp(\mathbf{A}t) \approx \hat{r}_{k,k}(\mathbf{A}t)\mathbf{n}_0 = \alpha_0 \prod_{l=1}^{k/2} \left(\mathbf{n}_0 + 2\operatorname{Re} \left(\alpha_l (\mathbf{A}t - \theta_l \mathbf{I})^{-1} \mathbf{n}_0 \right) \right) \quad (2.5)$$

この式に基づいて数値計算を行うことで燃焼方程式の解を求めることができる。係数 $\tilde{\alpha}_l$ と θ_l については、文献¹⁷⁾に掲載されている値を利用した。

2.1.3 CRAM-IPF 法による行列指数の計算アルゴリズムに関する補足説明

2016 年の文献¹⁷⁾では、CRAM-IPF に基づく燃焼計算用の式は特に示されておらず、図 2.1.1 のような計算アルゴリズムのみが示されている。しかしながら、この計算アルゴリズムを参考に実装したみたところ、正しい計算結果が得られなかった。

CRAM-IPF に基づく燃焼計算用の式(2.5)を計算アルゴリズムで表すと、図 2.1.2 のようになるとを考えられる。これらの図から分かるように、2016 年の CRAM 論文¹⁷⁾の Algorithm 1 のループの中の式の最後の項の e は、 y のタイプミスではないかと思われる。この場合、 e の定義も必要なくなる。実際に、この計算アルゴリズムで実装したところ、他の数値解法と等価な結果が得られるようになった。このため、MARBLE の CRAM-IPF に基づく燃焼計算ソルバーの実装では、図 2.1.2 に示した計算アルゴリズムを採用している。

```

 $\mathbf{e} = [1, 1, \dots, 1]^T$ 
 $\mathbf{y} = \mathbf{n}(0)$ 
for  $l = 1, 2, \dots, k/2$  do
     $\mathbf{y} = 2\text{Re}(\alpha_l(\mathbf{A}t - \theta_l \mathbf{I})^{-1} \mathbf{y}) + \mathbf{e}$ 
end for
 $\mathbf{y} = \alpha_0 \mathbf{y}$ 

```

図 2.1.1 文献記載の CRAM-IPF の計算アルゴリズム（文献¹⁷⁾の Algorithm 1）

```

 $\mathbf{y} = \mathbf{n}(0)$ 
for  $l = 1, 2, \dots, k/2$  do
     $\mathbf{y} = 2\text{Re}(\alpha_l(\mathbf{A}t - \theta_l \mathbf{I})^{-1} \mathbf{y}) + \mathbf{y}$ 
end for
 $\mathbf{y} = \alpha_0 \mathbf{y}$ 

```

図 2.1.2 実装に用いた CRAM-IPF の計算アルゴリズム

2.2 実装

前述のように CRAMO の開発では、MARBLE の燃焼計算ソルバーを利用しているため、MARBLE と同様にオブジェクト指向スクリプト言語 Python で実装されている。ただし、CRAMO では、燃焼計算ソルバーに関係のないモジュールは必要ないため、CRAMO の実装に必要な MARBLE のモジュールのみを抽出して、CRAMO 単体で利用できるように整備した。

CRAMO は、Numpy¹⁸⁾、Scipy¹⁹⁾ 等の Python の標準ライブラリ以外の Python モジュールを必要とするが、CRAMO 自体は Python のみで実装された Python モジュールとなっている。このため、CRAMO は、Python と Numpy、Scipy 等がインストールされている Linux、Windows、MacOS 上等で動作させることができる。

2.2.1 燃焼計算ソルバーと ORIGEN2 ライブラリ

前述のように、CRAMO では、CRAM-IPF 法に基づく 48 次の燃焼計算ソルバーを利用している。この燃焼計算ソルバーに ORIGEN2 用断面積ライブラリセットのデータを供給することで、ORIGEN2 コードと同様の燃焼計算機能を実現している。なお、ORIGEN2 コードには、燃焼後の核種の組成や放射能を計算する以外にも、崩壊熱や放出されるガンマ線スペクトル等、様々な計算

機能が用意されているが、現在の CRAMO が対応しているのは、核種毎の組成（単位：g、mol）、核種毎の放射能（単位：Ci、Bq）のみである。ただし、崩壊熱やガンマ線スペクトルは燃焼後の組成に対して後処理を行うことで計算できるので、燃焼後の組成が正しく計算できていることが確認できれば、ORIGEN2 コードと同様の機能を追加していくことができると考えられる。

2.2.2 燃焼度依存断面積に関する計算機能

ORIGEN2 コードの断面積ライブラリセットには、燃焼度が進むに応じて断面積が変化する効果を取り扱うための燃焼度依存断面積が含まれている。ORIGEN2 コードのような中性子エネルギー 1 群の断面積データを用いた燃焼計算コードでは、特に軽水炉用のライブラリでは燃焼が進むにつれて実効的な断面積が変化する効果を無視できないので、ORIGEN2 と同様の燃焼計算機能を実現するためには、この燃焼依存断面積に関する機能を実装する必要がある。このため、CRAMO の開発では、ORIGEN2 の燃焼依存断面積の計算機能をエミュレートする Python モジュールを作成して、この機能を実現できるようにした。

この燃焼度依存断面積は、ORIGEN2 コードのサブルーチンの中で定義されており、ORIGEN2 コードの内部では、燃焼度依存断面積のデータを使って、各時間ステップにおける燃焼方程式を解くのに必要な燃焼チェーンと中性子束を計算する。表 2.2.1、2.2.2 に、それぞれ、ORIGEN2 コードの燃焼依存度断面積に関するサブルーチン、関数の名前と処理内容を示す。これらのサブルーチン、関数の機能をエミュレートする Python モジュールを実装して、チェビシェフ有理関数近似法に基づく燃焼計算ソルバーに、燃焼依存断面積を考慮した燃焼チェーンと中性子束を提供できるようにした。

表 2.2.1 ORIGEN2 コードの燃焼度依存断面積の計算に関するサブルーチン

サブルーチン名	処理内容等
XSEC	燃焼度点と燃焼度依存断面積のデータを格納する。
MAIN2	入力データの NLIB12 で指定された XSEC サブルーチンを呼び出し、燃焼依存断面積に関するデータを取得する。
MAIN3	実質的なメインルーチン。以下のサブルーチンを制御する。
NUDAT1	崩壊ライブラリからデータを読み込み、燃焼チェーンに相当する配列に崩壊に関する情報を反映する。なお、ここで構築される配列 NUCL には全核種の核種 ID が格納されており、これ以降変更されない。崩壊ライブラリに ORIGEN2 で扱う全核種が定義されていなければならぬ。
NUDAT2	断面積ライブラリからデータを読み込み、燃焼チェーンに相当する配列に核分裂以外の反応に関する情報を反映する。
NUDAT3	NUDAT1 と NUDAT2 で構築されたデータから、新たに全核種・反応の娘核種の生成に関する反応率の配列 A を構築する。また、配列 NPROD に格納された励起状態の親核種から生成される娘核種を修正（核種 ID - 1）する。なお、ORIGEN2 では断面積ライブラリに核分裂収率が格納された核種の核分裂からのみ FP が生成される。ここでは入力データの NLIB11 で指定された核種の核分裂収率のみを配列 A に格納する。
FUDGE	燃焼度依存を考慮した断面積を計算する。前ステップからの断面積の変化を各配列 (TOCAP, FISS, A) に反映する。崩壊計算しか実行されない場合（入力データが DEC コマンドの場合、IRF コマンドで中性子束がゼロの場合、IRP コマンドで出力がゼロの場合）のステップでは実行されない。
FLUXO	断面積ライブラリに核分裂収率を格納していない核種 (unconnected 核種) からの FP 生成を考慮するために、核分裂収率を格納している核種 (connected 核種) の核分裂収率を増加させる。続いて、入力データで IRF コマンドを指定した場合は中性子束から出力を計算し、IRP コマンドを指定した場合は、出力から中性子束を計算する。前ステップからの中性子の変化を配列 A に反映する。また、親核種の減少に関する反応率の配列 D を計算する。

表 2.2.2 ORIGEN2 コードの燃焼度依存断面積の計算に関する関数

関数名	処理内容等
FISSEN	核分裂あたりの発熱エネルギーを計算する
RMASS	核種 ID から原子量を計算する。
RTIME	IRP コマンド等で指定した時間の単位を秒に換算するための係数を返す。

3. 検証

開発したCRAMOの検証として、ORIGEN2コードの計算結果との比較を行った。現状のCRAMOでは、燃焼後の組成と放射能しか計算することができないので、燃焼計算に対する検証として燃焼後の組成の計算結果の比較を、放射化計算に対する検証として放射能の計算結果の比較を行った。

3.1 計算ケース

検証用の計算ケースとして、主にORLIBJ40⁸⁾とORIGEN2.2-UPJ²⁰⁾のサンプル問題を参考にして、以下を設定した。なお、放射化計算に関しては、炉内構造物の放射化核種の生成経路について調査を行った文献²¹⁾におけるORLIBJ40を使った計算ケースも参考にした。

- 燃焼計算
 - PWR34_IRP: ORLIBJ40の典型的なPWR燃料の燃焼計算と冷却計算のサンプル問題(burn-up_pwr, cooling)⁸⁾に対応する計算ケース。1100MW級PWR(17×17型燃料集合体)における酸化ウラン燃料(U-235濃縮度3.5wt%)を想定し、45GWd/tまで燃焼させる。断面積ライブラリとして、PWR34J40を用いる。なお、この計算ケースでは、ORIGEN2コードの出力指定計算(IRPコマンド)を用いている。
 - 600MMXIC_IRF: ORLIBJ40の高速炉の燃焼計算のサンプル問題(burn-up_fbr)⁸⁾に対応する計算ケース。600MW級FBR内側炉心でのLWR-Pu酸化物燃料を想定し、79GWd/tまで燃焼させ、4年間冷却する。断面積ライブラリとして、600MMXICJ40を用いる。なお、オリジナルのORLIBJ40のサンプル問題では、出力指定計算(IRPコマンド)が用いられているが、この検証計算では、中性子束指定計算(IRFコマンド)に変更している。
 - SF97-4: ORIGEN2.2-UPJのPWR燃料の照射後試験解析(SF97-4:高浜3号炉の使用済み燃料)のサンプル問題。ORLIBJ40の照射後試験解析による検証(文献⁸⁾の第3.4節)でも用いられている。断面積ライブラリとして、PWR41J40を用いる。
 - SF98-6: ORIGEN2.2-UPJのBWR燃料のPIE解析(SF98-6:福島第二2号炉の使用済み燃料)のサンプル問題。ORLIBJ40の照射後試験解析による検証(文献⁸⁾の第3.4節)でも用いられている。断面積ライブラリとして、BS170J40を用いる。
- 放射化計算
 - PWR34_ACTIVATION: ORLIBJ40の典型的なPWR燃料の放射化を計算するサンプル問題(activation)。1100MW級PWR(17×17型燃料集合体)における、窒素と酸素が添加されている酸化ウラン燃料(U-235濃縮度3.5wt%)を想定し、45GWd/tまで燃焼

させる。冷却期間は設定されておらず、燃焼直後の放射能を計算している。断面積ライブラリとして、PWR34J40 を用いる。

- **BS340_ZIRCALOY2:** 文献²¹⁾ の被覆管・スペーサ（ジルカロイ 2）における放射化核種の生成経路を同定するための放射化計算。BWR の標準的な照射履歴を想定し、冷却期間は 10 年と設定されている。断面積ライブラリとして、BS340J40 を用いる。
- **BS340_INCONEL718:** 文献²¹⁾ のスペーサ（インコネル 718）における放射化核種の生成経路を同定するための放射化計算。BWR の標準的な照射履歴を想定し、冷却期間は 10 年と設定されている。断面積ライブラリとして BS340J40 を用いる。

3.2 検証計算に用いた Python とライブラリのバージョン

この検証計算は、CentOS Linux 7.7 (Intel(R) Xeon(R) 2.40GHz) 上で実行した。Python については、OS に含まれる Python 2.7.5 を用いた。CRAMO の実行に必要な Python ライブラリは以下のバージョンを用いた。

- PyYAML-5.2
- numpy-1.15.1
- scipy-1.1.0
- scikit-umfpack-0.3.2
- future-0.17.1

なお、scikit-umfpack については、Python Package Index (PyPI) を通してバイナリ形式で配布されているパッケージを使わずに、ソースコードをコンパイルしてインストールした。

3.3 ORIGEN2 の計算結果との比較

3.3.1 燃焼計算に対する検証

燃焼計算を対象とした PWR34_IRP、600MMXIC_IRF、SF97-4、SF98-6 の各計算ケースについて、ORIGEN2 (ORLIBJ40) と CRAMO の計算結果を、それぞれ、表 3.3.1、3.3.2、3.3.3、3.3.4 に示す。なお、いずれの表も、ORIGEN2 の計算結果が降順になるように示した。

これらの表からどのケースにおいても、ほとんどの核種は 1 % 以下の差で一致していることが分かる。少し差の大きいものでもほとんどの核種が数 % の差で一致している。燃焼計算では核分裂生成物として様々な核種が生成されるが、収率の非常に小さい核種や、壊変・反応を何度も繰り返すことによってしか生成されない核種もある。このため、生成量の少ない核種は、初期組成に比べて何桁も小さい値になるものも多い。いずれの計算ケースについても、初期組成に最も多く含まれる核種は U-238 であるが、U-238 に比べて 20 桁から 30 桁小さい値となる核種も多い。このような核種に対してもオーダー (100 % 以上) でずれることはなく、ORIGEN2 の結果とよく一致していることが確認できる。

生成量の多い順に結果を見た場合、10 %以上の差が初めて見られるのは、PWR34_IRP のケースでは 284 番目の Bi-209、600MMXIC_IRF のケースでは 303 番目の Pb-206、SF97-4 のケースでは 302 番目の Pb-210、SF98-6 のケースでは 67 番目の Gd-156 である。SF98-6 の Gd-156 で比較的大きな差が見られる原因については、今後、詳細に調査する必要があるかもしれないが、10 %以上の差が見られる次の核種は 243 番目の Cf-251 であり、例外的なケースであることが分かる。

以上のように、CRAMO の計算結果は ORIGEN2 の計算結果と実用上問題ないと考えられる範囲で一致していると考えられる。

3.3.1.1 出力指定計算の時間ステップ依存性

軽水炉用のライブラリを使った計算ケース（PWR34_IRP、SF97-4、SF98-6）では濃縮ウランを初期組成としているので、主要な核分裂性核種は U-235 であるが、燃焼後の U-235 の存在量に対しても差が見られていることが分かる。特に、PWR34_IRP の計算ケースでは約 0.3 %の差が見られており、燃焼期間を通じた核分裂数の合計が一致していない可能性があるため、この観点から差の原因を検討した。詳細は付録 B にまとめた。軽水炉用のライブラリを使った計算ケースでは、いずれも出力指定計算を行っているが、CRAMO ではこの出力指定計算の機能は、ORIGEN2 の燃焼依存断面積の計算機能のエミュレートの一環として実装されている。最初の時間ステップでは、ユーザが指定する一定出力の値から換算した中性子束の値をよく再現できることを確認しているが、2 つ目の時間ステップ以降では、燃焼で新たに生成する核分裂性核種の存在量の計算結果に見られる小さな差が影響して、出力から換算した中性子束の値に差が生じる。この結果として核分裂数の合計量に差が生じ、燃焼後の U-235 の存在量に差が生じていると考えられる。一方で、ORIGEN2 で出力指定計算を行う場合は、時間ステップの設定に依存して計算結果が大きく変わってしまうことにも注意が必要である。また、ORIGEN2 のコードの制限により時間ステップを詳細に分割するのには限度があり、出力指定計算では、時間ステップを詳細にしていても計算結果を完全に収束させることができないこともある。このように、ORIGEN2 の出力指定計算の結果にはこのような時間ステップの設定に起因する不確かさが含まれていることを考慮すると、CRAMO と ORIGEN2 の計算結果は実用上問題のない範囲で一致していると考えられる。

3.3.1.2 他の燃焼計算コードとのベンチマーク

ORIGEN2 のライブラリを利用した燃焼計算に関しては、CRAMO で利用している MARBLE の CRAM-IPF 法のソルバーとフランス CEA が開発している MENDEL²²⁾ に実装された CRAMO-IPF 法のソルバーを使ったベンチマークが別途実施されている²³⁾。ORLIBJ40⁸⁾ は国内限定配布で、CEA では利用できないため、このベンチマークでは国外でも利用可能な ORLIBJ33⁷⁾ の高速炉用ライブラリ 600MMXIC_J33.LIB を利用している。燃焼計算の条件は少し異なるが、中性子束指定計算 (IRF コマンド) による計算を行っており、600MMXIC_IRF の計算ケースと似たベンチマークとなっている。このベンチマークでは、一部の核種を除いて、MENDEL と MARBLE の燃焼後の

存在量は 0.2 %以下の差で一致することが確認されている。MENDEL と MARBLE の間で差が見られる一部の核種については、MARBLE と ORIGEN2 の結果はよく一致しているので、MENDEL の計算において ORIGEN2 の燃焼チェーンを一部完全に再現できていないのが原因と推測されている。一方で、MENDEL や MARBLE の結果と、ORIGEN2 の結果を比較した場合には、燃焼後の存在量が比較的大きい核種に対しても、4 %程度の差が見られており、計算手法の違いによってこのような差が生じるものと推測されている。

3.3.2 放射化計算に対する検証

放射化計算を対象とした PWR_ACTIVATION、BS340_ZIRCLOY2、BS340_INCONEL の各ケースについて、ORIGEN2 (ORLIBJ40) と CRAMO の計算結果を、それぞれ、表 3.3.5、3.3.6、3.3.7 に示す。いずれの表も、ORIGEN2 の計算結果が降順になるように示した。

これらの表から、燃焼計算を対象としたケースと同様に、CRAMO の計算結果は ORIGEN2 の計算結果とほとんど核種で 1 %以下の差で一致していることが分かる。数%の差が見られる核種もあるが、放射能に対して最大の寄与を持つ核種に比べて、放射能が 10 衍程度小さい核種であるので実用上は問題ないと考えられる。

表 3.3.1 ORIGEN2 の計算結果との比較 (PWR34_IRP : 冷却後) (1/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
1	U-238	9.310E+05	9.309E+05	0.01	51	Am-241	2.708E+02	2.715E+02	-0.26
2	U-235	5.858E+03	5.839E+03	0.32	52	Nd-150	2.458E+02	2.465E+02	-0.30
3	Pu-239	5.826E+03	5.782E+03	0.75	53	Kr-86	2.373E+02	2.377E+02	-0.17
4	U-236	4.638E+03	4.639E+03	-0.03	54	Pd-108	2.221E+02	2.232E+02	-0.50
5	Xe-136	3.200E+03	3.210E+03	-0.31	55	Ba-134	2.141E+02	2.183E+02	-1.91
6	Pu-240	2.711E+03	2.714E+03	-0.11	56	Sm-148	2.046E+02	2.123E+02	-3.65
7	Xe-134	2.049E+03	2.054E+03	-0.27	57	Sm-147	2.075E+02	2.099E+02	-1.15
8	Nd-144	1.796E+03	1.803E+03	-0.40	58	I-129	2.043E+02	2.051E+02	-0.36
9	Ba-138	1.745E+03	1.750E+03	-0.25	59	Am-243	1.952E+02	1.971E+02	-0.95
10	Ce-140	1.634E+03	1.669E+03	-2.06	60	Ba-137	1.694E+02	1.699E+02	-0.26
11	La-139	1.628E+03	1.632E+03	-0.25	61	Eu-153	1.635E+02	1.654E+02	-1.11
12	Xe-132	1.542E+03	1.561E+03	-1.17	62	Ru-100	1.615E+02	1.634E+02	-1.18
13	Cs-137	1.537E+03	1.541E+03	-0.26	63	Gd-156	1.462E+02	1.486E+02	-1.64
14	Ce-142	1.499E+03	1.503E+03	-0.25	64	Kr-84	1.438E+02	1.441E+02	-0.21
15	Pr-141	1.486E+03	1.490E+03	-0.27	65	Rb-85	1.330E+02	1.332E+02	-0.19
16	Cs-133	1.449E+03	1.464E+03	-0.99	66	Sm-152	1.268E+02	1.280E+02	-0.94
17	Pu-241	1.457E+03	1.462E+03	-0.28	67	Te-128	1.247E+02	1.252E+02	-0.40
18	Mo-100	1.298E+03	1.301E+03	-0.26	68	Ag-109	1.118E+02	1.124E+02	-0.57
19	Ru-102	1.104E+03	1.108E+03	-0.31	69	Pm-147	9.941E+01	9.961E+01	-0.20
20	Mo-98	1.100E+03	1.103E+03	-0.26	70	Cm-244	8.083E+01	8.201E+01	-1.44
21	Mo-97	1.079E+03	1.083E+03	-0.35	71	Cs-134	7.842E+01	7.986E+01	-1.80
22	Zr-96	1.067E+03	1.069E+03	-0.23	72	Zr-90	7.732E+01	7.754E+01	-0.27
23	Ru-101	1.052E+03	1.055E+03	-0.26	73	Pd-110	7.218E+01	7.256E+01	-0.52
24	Tc-99	1.040E+03	1.047E+03	-0.63	74	Cd-110	6.379E+01	6.449E+01	-1.09
25	Zr-94	1.003E+03	1.006E+03	-0.22	75	Mo-96	6.122E+01	6.153E+01	-0.51
26	Mo-95	9.901E+02	9.924E+02	-0.23	76	I-127	6.003E+01	6.084E+01	-1.34
27	Nd-143	9.712E+02	9.753E+02	-0.43	77	Sm-154	5.140E+01	5.162E+01	-0.43
28	Nd-146	9.630E+02	9.657E+02	-0.28	78	Kr-83	5.018E+01	5.025E+01	-0.14
29	Zr-93	9.245E+02	9.268E+02	-0.25	79	Se-82	4.340E+01	4.349E+01	-0.21
30	Pu-242	8.690E+02	8.746E+02	-0.63	80	Cd-111	3.428E+01	3.525E+01	-2.75
31	Nd-145	8.656E+02	8.677E+02	-0.23	81	Nd-142	3.394E+01	3.414E+01	-0.59
32	Zr-92	8.349E+02	8.367E+02	-0.21	82	Ru-106	3.082E+01	3.095E+01	-0.42
33	Ru-104	8.008E+02	8.038E+02	-0.38	83	Ce-144	3.006E+01	3.014E+01	-0.24
34	Zr-91	7.585E+02	7.601E+02	-0.21	84	Gd-158	2.850E+01	2.908E+01	-1.98
35	Sr-90	6.367E+02	6.377E+02	-0.16	85	Eu-154	2.842E+01	2.885E+01	-1.50
36	Rh-103	6.199E+02	6.216E+02	-0.26	86	Ba-136	2.787E+01	2.801E+01	-0.52
37	Np-237	5.840E+02	5.849E+02	-0.15	87	Kr-85	2.720E+01	2.725E+01	-0.19
38	Y-89	5.771E+02	5.781E+02	-0.16	88	Sn-126	2.618E+01	2.627E+01	-0.36
39	Pd-105	5.558E+02	5.603E+02	-0.80	89	Br-81	2.589E+01	2.595E+01	-0.22
40	Pd-106	5.388E+02	5.419E+02	-0.58	90	Cd-114	1.834E+01	1.863E+01	-1.55
41	Xe-131	5.267E+02	5.325E+02	-1.09	91	Se-80	1.696E+01	1.700E+01	-0.21
42	Te-130	5.148E+02	5.163E+02	-0.28	92	Cd-112	1.615E+01	1.632E+01	-1.02
43	Nd-148	4.981E+02	4.995E+02	-0.28	93	Sm-151	1.303E+01	1.310E+01	-0.51
44	Cs-135	4.426E+02	4.440E+02	-0.33	94	Sn-124	1.120E+01	1.123E+01	-0.34
45	Sr-88	4.312E+02	4.320E+02	-0.17	95	Gd-154	1.073E+01	1.090E+01	-1.54
46	Sm-150	4.028E+02	4.113E+02	-2.08	96	Xe-130	1.081E+01	1.089E+01	-0.70
47	Pd-104	3.648E+02	3.668E+02	-0.55	97	U-234	1.025E+01	1.044E+01	-1.88
48	Pd-107	3.276E+02	3.292E+02	-0.47	98	Te-125	9.704E+00	9.866E+00	-1.64
49	Rb-87	3.152E+02	3.158E+02	-0.17	99	Eu-155	7.467E+00	7.571E+00	-1.37
50	Pu-238	2.963E+02	3.023E+02	-1.99	100	Sn-122	7.474E+00	7.500E+00	-0.35

表 3.3.1 ORIGEN2 の計算結果との比較 (PWR34_IPR : 冷却後) (2/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
101	Cd-116	6.586E+00	6.610E+00	-0.36	151	Er-166	3.929E-02	4.023E-02	-2.34
102	Sb-123	6.548E+00	6.569E+00	-0.33	152	In-113	3.457E-02	3.478E-02	-0.61
103	Cm-245	6.344E+00	6.454E+00	-1.70	153	Xe-129	3.273E-02	3.365E-02	-2.73
104	Sn-117	5.957E+00	5.980E+00	-0.40	154	Li-6	3.262E-02	3.271E-02	-0.27
105	Se-79	5.677E+00	5.689E+00	-0.21	155	La-138	2.698E-02	2.708E-02	-0.38
106	Sn-120	5.213E+00	5.230E+00	-0.33	156	Gd-152	2.359E-02	2.394E-02	-1.43
107	Sn-119	5.160E+00	5.177E+00	-0.33	157	Ge-73	2.193E-02	2.201E-02	-0.35
108	Sb-125	5.081E+00	5.149E+00	-1.32	158	Ru-99	1.616E-02	1.629E-02	-0.77
109	Sn-118	5.074E+00	5.091E+00	-0.35	159	Mo-94	1.539E-02	1.546E-02	-0.46
110	Sb-121	4.886E+00	4.914E+00	-0.56	160	Be-10	1.358E-02	1.362E-02	-0.28
111	Xe-128	4.329E+00	4.426E+00	-2.18	161	Tc-98	1.224E-02	1.238E-02	-1.17
112	Gd-155	4.178E+00	4.239E+00	-1.43	162	He-3	1.120E-02	1.123E-02	-0.24
113	Sn-116	4.057E+00	4.112E+00	-1.32	163	Cm-247	9.871E-03	1.013E-02	-2.52
114	Sm-149	3.891E+00	3.913E+00	-0.56	164	Ge-72	8.692E-03	8.781E-03	-1.01
115	Tb-159	3.723E+00	3.764E+00	-1.09	165	Pm-146	8.206E-03	8.430E-03	-2.66
116	Se-78	2.935E+00	2.943E+00	-0.27	166	Eu-152	7.535E-03	7.615E-03	-1.04
117	He-4	2.850E+00	2.870E+00	-0.69	167	Te-123	6.947E-03	7.083E-03	-1.92
118	In-115	1.811E+00	1.816E+00	-0.30	168	H-1	7.052E-03	7.071E-03	-0.27
119	Gd-160	1.600E+00	1.609E+00	-0.52	169	Se-76	6.565E-03	6.605E-03	-0.60
120	Te-126	1.266E+00	1.293E+00	-2.08	170	Sm-146	6.249E-03	6.453E-03	-3.16
121	Se-77	9.804E-01	9.848E-01	-0.45	171	Sr-87	5.120E-03	5.146E-03	-0.52
122	Sr-86	9.229E-01	9.268E-01	-0.42	172	Er-168	5.061E-03	5.116E-03	-1.07
123	Am-242m	8.452E-01	8.472E-01	-0.23	173	Ga-71	3.284E-03	3.297E-03	-0.40
124	Kr-82	8.344E-01	8.394E-01	-0.60	174	H-2	3.203E-03	3.211E-03	-0.26
125	Cm-246	7.161E-01	7.320E-01	-2.16	175	Nb-94	2.274E-03	2.283E-03	-0.43
126	Cm-243	6.795E-01	6.876E-01	-1.18	176	Zn-70	1.772E-03	1.778E-03	-0.35
127	Ba-135	6.393E-01	6.569E-01	-2.67	177	Ho-166m	1.654E-03	1.689E-03	-2.10
128	Dy-161	5.375E-01	5.515E-01	-2.53	178	Nb-93m	1.676E-03	1.680E-03	-0.25
129	Te-122	4.305E-01	4.362E-01	-1.31	179	U-233	1.480E-03	1.503E-03	-1.51
130	Dy-160	4.239E-01	4.298E-01	-1.36	180	Li-7	1.315E-03	1.319E-03	-0.32
131	Dy-162	4.067E-01	4.194E-01	-3.04	181	Pr-144	1.266E-03	1.269E-03	-0.24
132	Ge-76	4.041E-01	4.051E-01	-0.23	182	Er-167	1.225E-03	1.244E-03	-1.51
133	Sn-121m	3.913E-01	3.927E-01	-0.35	183	Sn-114	1.078E-03	1.088E-03	-0.93
134	Dy-163	3.128E-01	3.215E-01	-2.70	184	U-232	1.056E-03	1.077E-03	-1.98
135	Eu-151	3.165E-01	3.182E-01	-0.52	185	Np-236	8.452E-04	8.552E-04	-1.18
136	Te-124	2.873E-01	2.891E-01	-0.63	186	Pd-102	8.027E-04	8.071E-04	-0.55
137	Sn-115	2.696E-01	2.722E-01	-0.97	187	Cd-108	7.975E-04	8.063E-04	-1.09
138	Cm-242	2.136E-01	2.149E-01	-0.61	188	Sn-119m	7.848E-04	7.873E-04	-0.32
139	Gd-157	1.637E-01	1.657E-01	-1.19	189	Cm-248	7.532E-04	7.760E-04	-2.94
140	Y-90	1.615E-01	1.618E-01	-0.16	190	Ga-69	7.713E-04	7.735E-04	-0.29
141	Cd-113m	1.560E-01	1.570E-01	-0.60	191	Pu-236	7.292E-04	7.423E-04	-1.76
142	As-75	1.507E-01	1.511E-01	-0.26	192	Te-127m	6.942E-04	6.827E-04	1.68
143	Ho-165	1.374E-01	1.405E-01	-2.16	193	Th-232	6.632E-04	6.634E-04	-0.03
144	Cd-113	1.227E-01	1.226E-01	0.09	194	Nb-95	6.596E-04	6.609E-04	-0.20
145	Te-125m	1.074E-01	1.089E-01	-1.32	195	Sn-123	6.484E-04	6.506E-04	-0.33
146	Pu-244	8.254E-02	8.374E-02	-1.43	196	Gd-153	6.150E-04	6.261E-04	-1.77
147	Dy-164	7.781E-02	7.971E-02	-2.39	197	Zr-95	5.475E-04	5.485E-04	-0.20
148	Ag-110m	7.061E-02	7.133E-02	-1.01	198	Tm-169	4.217E-04	4.260E-04	-1.02
149	Ge-74	6.214E-02	6.233E-02	-0.29	199	Zn-68	4.215E-04	4.225E-04	-0.24
150	H-3	5.722E-02	5.737E-02	-0.26	200	Ba-132	3.334E-04	3.427E-04	-2.71

表 3.3.1 ORIGEN2 の計算結果との比較 (PWR34_IPR : 冷却後) (3/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
201	Yb-172	3.338E-04	3.354E-04	-0.49	251	Sb-126	6.259E-07	6.282E-07	-0.36
202	Er-170	3.294E-04	3.304E-04	-0.33	252	Tc-97	5.342E-07	5.367E-07	-0.46
203	Nb-93	3.030E-04	3.038E-04	-0.27	253	Th-229	4.118E-07	4.262E-07	-3.39
204	Yb-170	2.930E-04	3.025E-04	-3.14	254	Eu-150	3.878E-07	3.929E-07	-1.28
205	Xe-126	2.898E-04	2.963E-04	-2.18	255	Nb-95m	2.944E-07	2.950E-07	-0.20
206	La-137	2.598E-04	2.610E-04	-0.46	256	Tm-170	2.584E-07	2.657E-07	-2.75
207	Zn-67	2.549E-04	2.556E-04	-0.28	257	Se-74	2.527E-07	2.539E-07	-0.48
208	Ba-137m	2.347E-04	2.353E-04	-0.26	258	Ru-103	2.346E-07	2.350E-07	-0.19
209	Ba-133	2.188E-04	2.248E-04	-2.67	259	Dy-158	1.912E-07	1.938E-07	-1.33
210	Np-239	1.681E-04	1.697E-04	-0.95	260	Np-238	1.709E-07	1.713E-07	-0.23
211	Kr-80	1.658E-04	1.666E-04	-0.45	261	Nb-92	1.539E-07	1.547E-07	-0.46
212	Ag-107	1.444E-04	1.451E-04	-0.49	262	Sb-124	1.528E-07	1.537E-07	-0.62
213	Yb-171	1.418E-04	1.436E-04	-1.21	263	Y-88	1.529E-07	1.536E-07	-0.44
214	Y-91	1.038E-04	1.037E-04	0.06	264	Ru-98	1.310E-07	1.328E-07	-1.39
215	Tb-158	7.687E-05	7.791E-05	-1.34	265	Ho-163	1.222E-07	1.228E-07	-0.50
216	Th-230	6.623E-05	6.739E-05	-1.72	266	Rh-102m	9.666E-08	9.699E-08	-0.34
217	Br-79	6.010E-05	6.025E-05	-0.25	267	Ra-224	7.644E-08	7.847E-08	-2.58
218	Zn-66	5.202E-05	5.224E-05	-0.42	268	Mo-93	5.483E-08	5.520E-08	-0.67
219	U-237	4.547E-05	4.560E-05	-0.28	269	Th-231	2.382E-08	2.374E-08	0.33
220	Rh-102	4.300E-05	4.324E-05	-0.57	270	Pm-148m	1.795E-08	1.833E-08	-2.11
221	Tm-171	3.713E-05	3.746E-05	-0.89	271	Pm-145	1.643E-08	1.650E-08	-0.46
222	Pa-231	3.685E-05	3.677E-05	0.22	272	Pb-212	8.758E-09	8.995E-09	-2.64
223	Rh-106	2.885E-05	2.897E-05	-0.42	273	Dy-159	7.804E-09	7.937E-09	-1.68
224	Kr-81	2.064E-05	2.076E-05	-0.59	274	Sb-126m	4.814E-09	4.831E-09	-0.36
225	Cd-109	2.041E-05	2.068E-05	-1.33	275	Ce-141	4.298E-09	4.299E-09	-0.01
226	SF-250	2.035E-05	2.063E-05	-1.39	276	Nb-91	3.260E-09	3.275E-09	-0.46
227	Pa-233	1.978E-05	1.981E-05	-0.16	277	Ac-227	2.057E-09	2.052E-09	0.21
228	Ce-139	1.786E-05	1.832E-05	-2.53	278	Ag-110	1.095E-09	1.106E-09	-1.01
229	Sr-84	1.750E-05	1.757E-05	-0.43	279	Ra-226	9.910E-10	1.006E-09	-1.50
230	Sn-121	1.702E-05	1.708E-05	-0.35	280	Cd-115m	9.650E-10	9.691E-10	-0.43
231	Th-228	1.492E-05	1.524E-05	-2.09	281	Bi-212	8.306E-10	8.532E-10	-2.64
232	Th-234	1.352E-05	1.352E-05	0.01	282	Rh-101	5.476E-10	5.501E-10	-0.46
233	Am-242	1.090E-05	1.093E-05	-0.23	283	Pa-234m	4.514E-10	4.514E-10	0.01
234	Ge-70	1.042E-05	1.047E-05	-0.52	284	Bi-209	2.371E-10	2.676E-10	-11.40
235	Cf-249	8.254E-06	8.522E-06	-3.15	285	Rh-103m	2.325E-10	2.329E-10	-0.19
236	Sr-89	8.275E-06	8.286E-06	-0.13	286	Gd-151	2.111E-10	2.147E-10	-1.67
237	Pb-208	7.878E-06	8.128E-06	-3.08	287	Pa-234	2.036E-10	2.035E-10	0.01
238	Pr-144m	7.967E-06	7.986E-06	-0.24	288	Te-120	2.018E-10	2.028E-10	-0.46
239	Te-123m	3.590E-06	3.674E-06	-2.29	289	Pb-207	1.506E-10	1.626E-10	-7.34
240	Cf-250	3.150E-06	3.262E-06	-3.44	290	Pm-148	1.234E-10	1.260E-10	-2.11
241	Tb-160	3.206E-06	3.252E-06	-1.39	291	Te-129m	1.173E-10	1.172E-10	0.08
242	Te-127	2.430E-06	2.390E-06	1.68	292	Cm-250	7.175E-11	7.446E-11	-3.64
243	Ag-108m	2.250E-06	2.261E-06	-0.49	293	Rb-83	6.554E-11	6.571E-11	-0.26
244	Cf-251	1.519E-06	1.576E-06	-3.57	294	Te-121m	4.371E-11	4.384E-11	-0.31
245	Er-164	1.156E-06	1.176E-06	-1.70	295	Ag-109m	2.027E-11	2.054E-11	-1.32
246	Bk-249	8.117E-07	8.380E-07	-3.14	296	In-114m	1.942E-11	1.960E-11	-0.92
247	Tb-157	8.237E-07	8.276E-07	-0.46	297	Es-254	1.767E-11	1.854E-11	-4.74
248	Cf-252	7.608E-07	7.935E-07	-4.11	298	Tl-208	1.476E-11	1.516E-11	-2.64
249	Ce-138	7.764E-07	7.797E-07	-0.43	299	Rn-220	1.320E-11	1.355E-11	-2.58
250	Np-235	7.342E-07	7.462E-07	-1.61	300	Pm-144	6.588E-12	6.613E-12	-0.38

表 3.3.1 ORIGEN2 の計算結果との比較 (PWR34_IPR : 冷却後) (4/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
301	Pu-237	6.232E-12	6.387E-12	-2.42	351	Rn-219	1.098E-17	1.142E-17	-3.80
302	Se-75	5.989E-12	6.022E-12	-0.54	352	Ac-228	8.139E-18	8.144E-18	-0.07
303	Te-121	5.502E-12	5.520E-12	-0.32	353	Tl-209	4.619E-18	4.788E-18	-3.53
304	Th-227	4.646E-12	4.757E-12	-2.32	354	Po-218	3.487E-18	3.573E-18	-2.39
305	Tc-97m	3.591E-12	3.601E-12	-0.26	355	Rb-86	9.012E-20	9.056E-20	-0.49
306	Ra-223	2.789E-12	2.899E-12	-3.80	356	Am-246	7.521E-20	7.806E-20	-3.64
307	Pb-210	2.681E-12	2.756E-12	-2.74	357	At-217	5.433E-20	5.632E-20	-3.53
308	Ra-225	2.247E-12	2.327E-12	-3.47	358	Po-212	4.380E-20	4.499E-20	-2.64
309	Sr-85	1.959E-12	1.970E-12	-0.54	359	Es-255	3.766E-20	3.972E-20	-5.19
310	U-240	1.608E-12	1.631E-12	-1.43	360	Po-215	4.849E-21	5.041E-21	-3.80
311	Ac-225	1.507E-12	1.562E-12	-3.53	361	Po-211	3.860E-21	4.013E-21	-3.81
312	Sn-113	1.223E-12	1.238E-12	-1.20	362	Mo-92	2.236E-21	2.322E-21	-3.69
313	Pu-243	3.520E-13	3.610E-13	-2.52	363	Eu-149	2.017E-22	2.113E-22	-4.53
314	Pb-206	2.250E-13	2.349E-13	-4.19	364	Po-213	6.785E-24	7.033E-24	-3.53
315	Te-129	1.082E-13	1.081E-13	0.08	365	Pd-103	3.227E-24	3.255E-24	-0.85
316	As-73	8.063E-14	8.083E-14	-0.25	366	Po-214	3.024E-24	3.099E-24	-2.40
317	Ra-228	6.673E-14	6.675E-14	-0.03	367	Es-253	1.943E-24	2.033E-24	-4.43
318	Kr-83m	4.468E-14	4.480E-14	-0.26	368	Yb-169	6.310E-26	6.360E-26	-0.79
319	Po-210	4.362E-14	4.468E-14	-2.36	369	Tl-206	7.751E-27	9.993E-27	-22.44
320	Po-216	3.380E-14	3.469E-14	-2.58	370	As-74	8.502E-27	8.529E-27	-0.31
321	Pb-209	1.897E-14	1.967E-14	-3.53	371	Tc-95m	5.321E-27	5.580E-27	-4.64
322	Np-240m	1.372E-14	1.392E-14	-1.43	372	Cf-253	9.035E-28	9.453E-28	-4.43
323	Tm-168	1.170E-14	1.179E-14	-0.76	373	Ag-105	1.283E-28	1.343E-28	-4.45
324	Bk-250	8.445E-15	8.865E-15	-4.74	374	U-230	3.364E-29	3.465E-29	-2.90
325	Rn-222	6.311E-15	6.466E-15	-2.39	375	Tc-95	2.874E-30	3.014E-30	-4.64
326	Pb-211	5.788E-15	6.017E-15	-3.81	376	Th-226	3.377E-32	3.478E-32	-2.90
327	Yb-168	4.997E-15	5.033E-15	-0.71	377	Cm-249	6.912E-33	7.232E-33	-4.43
328	Zr-88	4.831E-15	4.843E-15	-0.25	378	Ra-222	6.542E-34	6.737E-34	-2.90
329	Bi-213	4.516E-15	4.682E-15	-3.53	379	Rn-218	0.000E+00	6.402E-37	-100.00
330	Y-89m	4.453E-15	4.459E-15	-0.13	380	Sn-117m	9.482E-28	0.000E+00	inf
331	Bi-210m	3.018E-15	3.892E-15	-22.44	381	I-126	8.194E-31	0.000E+00	inf
332	Xe-127	3.580E-15	3.672E-15	-2.51	382	Xe-131m	6.406E-29	0.000E+00	inf
333	Am-245	2.998E-15	3.095E-15	-3.14	383	Cs-136	7.621E-26	0.000E+00	inf
334	Rb-84	2.909E-15	2.921E-15	-0.40	384	Ba-136m	3.307E-33	0.000E+00	inf
335	Ag-108	2.024E-15	2.034E-15	-0.49	385	Ba-140	3.367E-25	0.000E+00	inf
336	Bi-208	1.455E-15	1.876E-15	-22.44	386	La-140	5.104E-26	0.000E+00	inf
337	Bi-210	1.653E-15	1.704E-15	-3.00	387	Pr-143	1.252E-23	0.000E+00	inf
338	Cm-241	1.179E-15	1.192E-15	-1.10	388	Nd-147	7.728E-30	0.000E+00	inf
339	Tl-207	7.481E-16	7.777E-16	-3.81	389	Eu-156	1.373E-21	0.000E+00	inf
340	In-113m	7.344E-16	7.435E-16	-1.22					
341	I-125	5.898E-16	6.025E-16	-2.11					
342	Fr-221	5.036E-16	5.221E-16	-3.53					
343	Bi-211	3.431E-16	3.567E-16	-3.81					
344	Cf-254	3.141E-16	3.300E-16	-4.81					
345	In-114	3.158E-16	3.187E-16	-0.92					
346	In-115m	2.845E-16	2.858E-16	-0.43					
347	Fr-223	5.357E-17	5.346E-17	0.21					
348	Pu-246	3.010E-17	3.124E-17	-3.64					
349	Pb-214	2.961E-17	3.033E-17	-2.40					
350	Bi-214	2.198E-17	2.252E-17	-2.40					

表 3.3.2 ORIGEN2 の計算結果との比較 (600MMXIC_IRF : 冷却後) (1/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
1	U-238	7.347E+05	7.347E+05	0.00	51	Sm-149	5.157E+02	5.161E+02	-0.07
2	Pu-239	9.918E+04	9.913E+04	0.05	52	Sm-152	4.366E+02	4.371E+02	-0.11
3	Pu-240	4.992E+04	4.993E+04	-0.02	53	Sr-88	4.113E+02	4.115E+02	-0.06
4	Pu-242	1.301E+04	1.301E+04	0.00	54	Ag-109	4.055E+02	4.057E+02	-0.07
5	Pu-241	1.094E+04	1.094E+04	-0.01	55	Ba-137	3.687E+02	3.689E+02	-0.06
6	Am-241	4.360E+03	4.360E+03	0.00	56	Te-128	3.339E+02	3.342E+02	-0.07
7	Pu-238	3.751E+03	3.752E+03	-0.02	57	Rb-87	3.190E+02	3.191E+02	-0.05
8	Xe-134	3.349E+03	3.351E+03	-0.06	58	U-236	2.912E+02	2.912E+02	0.00
9	Cs-135	3.303E+03	3.306E+03	-0.08	59	Np-237	2.907E+02	2.903E+02	0.15
10	Xe-136	3.158E+03	3.159E+03	-0.05	60	Sm-151	2.734E+02	2.735E+02	-0.04
11	Cs-133	2.908E+03	2.914E+03	-0.20	61	Cm-244	2.622E+02	2.623E+02	-0.03
12	Ba-138	2.837E+03	2.839E+03	-0.06	62	Pd-110	2.544E+02	2.545E+02	-0.05
13	La-139	2.678E+03	2.680E+03	-0.06	63	Kr-86	2.415E+02	2.416E+02	-0.05
14	Cs-137	2.630E+03	2.632E+03	-0.06	64	Pm-147	2.232E+02	2.227E+02	0.25
15	Ce-140	2.558E+03	2.569E+03	-0.43	65	U-234	2.223E+02	2.223E+02	-0.02
16	Ru-102	2.466E+03	2.467E+03	-0.06	66	Eu-153	1.850E+02	1.852E+02	-0.06
17	Pr-141	2.411E+03	2.413E+03	-0.06	67	Pd-104	1.840E+02	1.842E+02	-0.10
18	Xe-132	2.373E+03	2.378E+03	-0.20	68	I-127	1.706E+02	1.710E+02	-0.20
19	Ce-142	2.257E+03	2.258E+03	-0.06	69	Ru-100	1.661E+02	1.669E+02	-0.52
20	Ru-104	2.234E+03	2.235E+03	-0.06	70	Sm-150	1.616E+02	1.622E+02	-0.41
21	Rh-103	2.177E+03	2.178E+03	-0.08	71	Ba-134	1.545E+02	1.561E+02	-1.04
22	Mo-100	2.171E+03	2.172E+03	-0.05	72	Kr-84	1.501E+02	1.501E+02	-0.05
23	Nd-143	2.063E+03	2.072E+03	-0.41	73	Rb-85	1.417E+02	1.418E+02	-0.06
24	Ru-101	2.051E+03	2.052E+03	-0.06	74	Sm-154	1.388E+02	1.389E+02	-0.05
25	Nd-144	1.926E+03	1.929E+03	-0.15	75	Cd-111	1.321E+02	1.324E+02	-0.26
26	Mo-98	1.862E+03	1.863E+03	-0.06	76	Ba-136	1.271E+02	1.289E+02	-1.41
27	Tc-99	1.852E+03	1.854E+03	-0.12	77	Sm-148	1.195E+02	1.220E+02	-2.01
28	Pd-106	1.729E+03	1.730E+03	-0.09	78	Sn-126	9.826E+01	9.832E+01	-0.06
29	Pd-105	1.708E+03	1.709E+03	-0.09	79	Gd-156	9.679E+01	9.746E+01	-0.68
30	Mo-97	1.646E+03	1.648E+03	-0.08	80	Zr-90	8.394E+01	8.407E+01	-0.15
31	Zr-96	1.589E+03	1.590E+03	-0.05	81	Kr-83	8.348E+01	8.353E+01	-0.06
32	Xe-131	1.571E+03	1.575E+03	-0.28	82	Cd-112	8.080E+01	8.098E+01	-0.23
33	Nd-145	1.459E+03	1.460E+03	-0.06	83	Am-242m	6.911E+01	6.911E+01	0.00
34	Am-243	1.421E+03	1.421E+03	0.00	84	Mo-96	6.083E+01	6.094E+01	-0.19
35	Mo-95	1.417E+03	1.418E+03	-0.07	85	Gd-155	6.065E+01	6.071E+01	-0.11
36	Nd-146	1.382E+03	1.383E+03	-0.06	86	Se-82	5.721E+01	5.724E+01	-0.06
37	Zr-94	1.332E+03	1.332E+03	-0.06	87	Gd-157	5.438E+01	5.459E+01	-0.39
38	U-235	1.231E+03	1.231E+03	0.00	88	Eu-155	5.228E+01	5.234E+01	-0.11
39	Zr-93	1.197E+03	1.198E+03	-0.07	89	Nd-142	4.809E+01	4.819E+01	-0.21
40	Pd-107	1.053E+03	1.053E+03	-0.06	90	Cd-113	4.744E+01	4.747E+01	-0.07
41	Te-130	1.010E+03	1.010E+03	-0.06	91	Te-125	4.681E+01	4.696E+01	-0.32
42	Zr-92	9.728E+02	9.734E+02	-0.06	92	Sn-124	4.600E+01	4.603E+01	-0.06
43	Pd-108	8.801E+02	8.806E+02	-0.05	93	Gd-158	4.417E+01	4.424E+01	-0.15
44	Nd-148	8.653E+02	8.657E+02	-0.05	94	Ru-106	4.060E+01	4.062E+01	-0.05
45	Zr-91	7.995E+02	8.000E+02	-0.07	95	Cd-110	3.763E+01	3.769E+01	-0.15
46	Sm-147	7.038E+02	7.068E+02	-0.42	96	Cd-114	3.739E+01	3.741E+01	-0.06
47	Sr-90	5.687E+02	5.690E+02	-0.05	97	Cs-134	3.589E+01	3.621E+01	-0.87
48	I-129	5.431E+02	5.435E+02	-0.07	98	Eu-154	3.472E+01	3.483E+01	-0.33
49	Y-89	5.417E+02	5.419E+02	-0.05	99	Sn-122	3.280E+01	3.281E+01	-0.06
50	Nd-150	5.243E+02	5.245E+02	-0.05	100	Br-81	3.229E+01	3.231E+01	-0.06

表 3.3.2 ORIGEN2 の計算結果との比較 (600MMXIC_IRF : 冷却後) (2/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
101	Sb-123	3.069E+01	3.070E+01	-0.06	151	In-113	2.254E-01	2.257E-01	-0.12
102	Xe-130	3.021E+01	3.026E+01	-0.17	152	Pu-244	1.765E-01	1.766E-01	-0.02
103	In-115	2.796E+01	2.799E+01	-0.12	153	Ge-73	1.458E-01	1.459E-01	-0.07
104	Kr-85	2.725E+01	2.726E+01	-0.06	154	Y-90	1.443E-01	1.443E-01	-0.05
105	Sn-117	2.632E+01	2.634E+01	-0.07	155	Er-167	1.398E-01	1.401E-01	-0.18
106	Sn-118	2.502E+01	2.504E+01	-0.06	156	Ge-72	9.925E-02	9.941E-02	-0.16
107	Sn-120	2.466E+01	2.467E+01	-0.05	157	La-138	9.293E-02	9.300E-02	-0.07
108	Cd-116	2.452E+01	2.453E+01	-0.05	158	H-3	8.015E-02	8.020E-02	-0.06
109	Se-80	2.352E+01	2.354E+01	-0.06	159	Er-168	7.063E-02	7.071E-02	-0.12
110	Sb-121	2.300E+01	2.302E+01	-0.08	160	Li-6	5.317E-02	5.320E-02	-0.06
111	Sn-119	2.265E+01	2.266E+01	-0.05	161	Ag-110m	5.223E-02	5.229E-02	-0.12
112	Tb-159	1.882E+01	1.884E+01	-0.08	162	Sr-87	5.178E-02	5.183E-02	-0.11
113	Gd-154	1.758E+01	1.765E+01	-0.37	163	Tc-98	4.488E-02	4.512E-02	-0.53
114	Ce-144	1.738E+01	1.739E+01	-0.04	164	Mo-94	4.424E-02	4.428E-02	-0.09
115	Cm-245	1.659E+01	1.660E+01	-0.05	165	Ga-71	3.894E-02	3.897E-02	-0.07
116	He-4	1.633E+01	1.634E+01	-0.05	166	Se-76	3.732E-02	3.740E-02	-0.21
117	Sb-125	1.579E+01	1.579E+01	-0.01	167	Sm-146	3.643E-02	3.713E-02	-1.90
118	Se-79	1.346E+01	1.347E+01	-0.06	168	Pm-146	3.623E-02	3.677E-02	-1.48
119	Xe-128	1.285E+01	1.295E+01	-0.78	169	Te-123	3.570E-02	3.616E-02	-1.25
120	Eu-151	1.140E+01	1.141E+01	-0.07	170	Ru-99	3.586E-02	3.595E-02	-0.25
121	Cm-243	9.589E+00	9.604E+00	-0.16	171	He-3	2.723E-02	2.724E-02	-0.05
122	Gd-160	9.424E+00	9.428E+00	-0.05	172	Be-10	2.417E-02	2.419E-02	-0.06
123	Se-78	5.719E+00	5.723E+00	-0.07	173	Tm-169	1.712E-02	1.718E-02	-0.34
124	Sr-86	5.293E+00	5.298E+00	-0.09	174	Zn-70	1.661E-02	1.662E-02	-0.06
125	Te-126	5.190E+00	5.286E+00	-1.82	175	Cm-247	1.181E-02	1.182E-02	-0.09
126	Dy-161	4.768E+00	4.780E+00	-0.24	176	H-1	9.331E-03	9.337E-03	-0.06
127	Dy-162	4.485E+00	4.502E+00	-0.37	177	Cd-108	7.525E-03	7.536E-03	-0.15
128	Dy-160	3.567E+00	3.574E+00	-0.19	178	Ga-69	6.478E-03	6.482E-03	-0.06
129	Se-77	2.796E+00	2.799E+00	-0.11	179	Pd-102	5.963E-03	5.969E-03	-0.10
130	Sn-116	2.486E+00	2.497E+00	-0.44	180	Nb-94	5.908E-03	5.913E-03	-0.08
131	Sn-121m	1.889E+00	1.890E+00	-0.06	181	H-2	5.009E-03	5.012E-03	-0.06
132	Dy-163	1.714E+00	1.715E+00	-0.10	182	Er-170	4.906E-03	4.908E-03	-0.05
133	Kr-82	1.539E+00	1.543E+00	-0.24	183	Ho-166m	4.658E-03	4.662E-03	-0.08
134	Sn-115	1.452E+00	1.454E+00	-0.13	184	U-233	4.511E-03	4.512E-03	-0.03
135	Te-122	1.391E+00	1.399E+00	-0.57	185	Sn-114	4.433E-03	4.442E-03	-0.18
136	Ge-76	1.368E+00	1.369E+00	-0.06	186	Np-236	2.717E-03	2.736E-03	-0.69
137	Te-124	1.271E+00	1.272E+00	-0.07	187	Li-7	2.718E-03	2.720E-03	-0.06
138	Dy-164	1.236E+00	1.236E+00	-0.06	188	Nb-93m	2.594E-03	2.596E-03	-0.08
139	Ba-135	8.401E-01	8.553E-01	-1.77	189	Th-230	2.327E-03	2.327E-03	-0.01
140	Cd-113m	7.318E-01	7.326E-01	-0.11	190	Zn-68	2.248E-03	2.249E-03	-0.05
141	As-75	5.615E-01	5.618E-01	-0.06	191	Yb-170	2.130E-03	2.164E-03	-1.57
142	Cm-246	5.550E-01	5.554E-01	-0.07	192	Sn-119m	1.740E-03	1.741E-03	-0.05
143	Eu-152	4.838E-01	4.850E-01	-0.25	193	U-232	1.686E-03	1.699E-03	-0.77
144	Cm-242	4.453E-01	4.449E-01	0.09	194	Yb-171	1.607E-03	1.610E-03	-0.21
145	Ho-165	4.343E-01	4.345E-01	-0.06	195	Xe-126	1.480E-03	1.511E-03	-2.01
146	Er-166	3.753E-01	3.761E-01	-0.19	196	Ba-132	1.308E-03	1.331E-03	-1.76
147	Ge-74	3.725E-01	3.728E-01	-0.06	197	Yb-172	1.229E-03	1.230E-03	-0.09
148	Te-125m	3.338E-01	3.339E-01	-0.01	198	Np-239	1.223E-03	1.223E-03	0.01
149	Gd-152	3.304E-01	3.315E-01	-0.33	199	Tb-158	1.093E-03	1.095E-03	-0.18
150	Xe-129	2.643E-01	2.672E-01	-1.09	200	Zn-67	1.035E-03	1.036E-03	-0.07

表 3.3.2 ORIGEN2 の計算結果との比較 (600MMXIC_IRF : 冷却後) (3/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
201	Am-242	8.913E-04	8.913E-04	0.00	251	Tb-160	5.274E-07	5.281E-07	-0.13
202	Kr-80	8.090E-04	8.097E-04	-0.08	252	Np-235	5.189E-07	5.217E-07	-0.53
203	Pu-236	7.520E-04	7.564E-04	-0.58	253	Te-123m	3.574E-07	3.607E-07	-0.91
204	La-137	7.356E-04	7.362E-04	-0.07	254	Mo-93	3.394E-07	3.397E-07	-0.10
205	Pr-144	7.321E-04	7.324E-04	-0.04	255	Th-229	3.176E-07	3.210E-07	-1.08
206	Ag-107	6.329E-04	6.333E-04	-0.06	256	Nb-92	2.929E-07	2.931E-07	-0.08
207	Nb-93	5.444E-04	5.449E-04	-0.09	257	Tm-170	2.374E-07	2.400E-07	-1.06
208	Sn-123	4.730E-04	4.732E-04	-0.04	258	Rh-102m	1.643E-07	1.644E-07	-0.07
209	Ba-137m	4.018E-04	4.020E-04	-0.05	259	Ra-224	1.477E-07	1.495E-07	-1.18
210	Ba-133	3.519E-04	3.591E-04	-2.00	260	Bk-249	7.849E-08	7.861E-08	-0.15
211	U-237	3.413E-04	3.414E-04	0.00	261	Pm-145	7.586E-08	7.592E-08	-0.07
212	Te-127m	3.340E-04	3.299E-04	1.23	262	Cf-250	7.258E-08	7.279E-08	-0.28
213	Tm-171	2.602E-04	2.604E-04	-0.08	263	Sr-89	7.118E-08	7.119E-08	-0.01
214	Zn-66	2.401E-04	2.403E-04	-0.10	264	Ra-226	5.274E-08	5.274E-08	-0.01
215	Cm-248	2.123E-04	2.126E-04	-0.11	265	Y-88	2.665E-08	2.666E-08	-0.06
216	Gd-153	2.078E-04	2.087E-04	-0.45	266	Dy-159	2.557E-08	2.563E-08	-0.22
217	Br-79	1.602E-04	1.603E-04	-0.06	267	Sb-126m	1.807E-08	1.808E-08	-0.06
218	Ge-70	1.294E-04	1.295E-04	-0.08	268	Pb-212	1.693E-08	1.714E-08	-1.22
219	SF-250	1.131E-04	1.132E-04	-0.05	269	Nb-95m	9.013E-09	9.014E-09	-0.02
220	Eu-150	9.984E-05	1.001E-04	-0.28	270	Sb-124	8.943E-09	8.948E-09	-0.06
221	Rh-102	9.106E-05	9.115E-05	-0.10	271	Th-231	5.006E-09	5.006E-09	0.00
222	Sn-121	8.220E-05	8.224E-05	-0.06	272	Nb-91	4.486E-09	4.490E-09	-0.07
223	Th-232	4.695E-05	4.694E-05	0.00	273	Ac-227	3.343E-09	3.349E-09	-0.20
224	Kr-81	4.501E-05	4.508E-05	-0.15	274	Te-120	1.751E-09	1.752E-09	-0.07
225	Cd-109	4.257E-05	4.265E-05	-0.19	275	Bi-212	1.605E-09	1.625E-09	-1.22
226	Pa-231	3.812E-05	3.818E-05	-0.15	276	Cf-251	1.047E-09	1.051E-09	-0.37
227	Rh-106	3.801E-05	3.803E-05	-0.05	277	Ag-110	8.097E-10	8.107E-10	-0.12
228	Sr-84	3.274E-05	3.276E-05	-0.09	278	Ru-103	7.831E-10	7.832E-10	-0.01
229	Th-228	2.878E-05	2.902E-05	-0.86	279	Rh-101	5.920E-10	5.924E-10	-0.08
230	Pb-208	2.163E-05	2.199E-05	-1.65	280	Gd-151	5.524E-10	5.548E-10	-0.44
231	Nb-95	2.019E-05	2.020E-05	-0.02	281	Pb-207	4.840E-10	5.210E-10	-7.10
232	Zr-95	1.676E-05	1.676E-05	-0.02	282	Bi-209	3.999E-10	4.342E-10	-7.91
233	Ag-108m	1.478E-05	1.479E-05	-0.07	283	Pa-234m	3.563E-10	3.563E-10	0.00
234	Np-238	1.397E-05	1.397E-05	0.00	284	Pa-234	1.606E-10	1.606E-10	0.00
235	Er-164	1.186E-05	1.187E-05	-0.07	285	Pm-148m	1.009E-10	1.013E-10	-0.42
236	Th-234	1.067E-05	1.067E-05	0.00	286	Yb-168	9.612E-11	9.758E-11	-1.50
237	Pa-233	9.821E-06	9.830E-06	-0.09	287	Te-121m	5.745E-11	5.748E-11	-0.06
238	Ce-139	9.008E-06	9.132E-06	-1.36	288	Pb-210	4.730E-11	4.762E-11	-0.67
239	Tb-157	8.833E-06	8.840E-06	-0.07	289	Ag-109m	4.228E-11	4.236E-11	-0.18
240	Pr-144m	4.606E-06	4.608E-06	-0.04	290	Tl-208	2.853E-11	2.889E-11	-1.22
241	Dy-158	3.601E-06	3.608E-06	-0.19	291	Rn-220	2.551E-11	2.581E-11	-1.18
242	Ho-163	3.542E-06	3.545E-06	-0.07	292	Pm-144	1.691E-11	1.692E-11	-0.06
243	Sb-126	2.349E-06	2.351E-06	-0.06	293	Cd-115m	1.248E-11	1.248E-11	-0.01
244	Ce-138	2.257E-06	2.258E-06	-0.07	294	Se-75	9.498E-12	9.642E-12	-1.49
245	Cf-249	2.056E-06	2.059E-06	-0.16	295	Th-227	7.626E-12	7.762E-12	-1.75
246	Y-91	1.893E-06	1.889E-06	0.21	296	Te-121	7.232E-12	7.236E-12	-0.06
247	Se-74	1.435E-06	1.463E-06	-1.95	297	Cm-250	5.979E-12	5.988E-12	-0.16
248	Te-127	1.169E-06	1.155E-06	1.23	298	Cf-252	4.755E-12	4.776E-12	-0.43
249	Tc-97	1.052E-06	1.053E-06	-0.07	299	Ra-223	4.606E-12	4.731E-12	-2.65
250	Ru-98	5.471E-07	5.509E-07	-0.69	300	Tm-168	4.248E-12	4.290E-12	-0.98

表 3.3.2 ORIGEN2 の計算結果との比較 (600MMXIC_IRF : 冷却後) (4/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
301	U-240	3.439E-12	3.440E-12	-0.02	351	Pu-246	2.509E-18	2.513E-18	-0.16
302	Ce-141	3.121E-12	3.118E-12	0.11	352	Rb-84	2.469E-18	2.470E-18	-0.06
303	Pb-206	2.612E-12	2.933E-12	-10.95	353	Ac-228	6.522E-19	6.524E-19	-0.03
304	Rb-83	2.414E-12	2.415E-12	-0.04	354	Po-212	8.465E-20	8.570E-20	-1.22
305	Ra-225	1.728E-12	1.753E-12	-1.43	355	At-217	4.171E-20	4.242E-20	-1.66
306	Ac-225	1.157E-12	1.177E-12	-1.66	356	Bk-250	1.971E-20	2.045E-20	-3.62
307	Sn-113	1.012E-12	1.014E-12	-0.20	357	Po-215	8.008E-21	8.226E-21	-2.65
308	Pu-237	8.629E-13	8.631E-13	-0.03	358	Po-211	6.375E-21	6.549E-21	-2.66
309	Po-210	6.535E-13	8.128E-13	-19.61	359	Am-246	6.268E-21	6.278E-21	-0.16
310	Rh-103m	7.761E-13	7.762E-13	-0.01	360	Po-214	1.615E-22	1.624E-22	-0.61
311	Pm-148	6.934E-13	6.963E-13	-0.42	361	Yb-169	1.220E-22	1.243E-22	-1.84
312	Pu-243	4.212E-13	4.216E-13	-0.09	362	Cf-254	5.478E-24	6.072E-24	-9.79
313	Sr-85	3.702E-13	3.706E-13	-0.09	363	Po-213	5.209E-24	5.297E-24	-1.67
314	Rn-222	3.369E-13	3.390E-13	-0.60	364	Tl-206	8.890E-26	1.078E-25	-17.51
315	In-114m	2.922E-13	2.926E-13	-0.13	365	Es-255	1.342E-29	2.011E-29	-33.28
316	Tc-97m	2.782E-13	2.783E-13	-0.04	366	U-230	6.537E-34	6.622E-34	-1.28
317	Te-129m	1.725E-13	1.723E-13	0.12	367	Es-253	0.000E+00	3.973E-35	-100.00
318	Po-216	6.531E-14	6.609E-14	-1.18	368	Th-226	0.000E+00	6.644E-37	-100.00
319	Bi-210m	3.462E-14	4.198E-14	-17.52	369	Ra-222	0.000E+00	1.288E-38	-100.00
320	Bi-210	2.900E-14	2.944E-14	-1.49	370	Ag-105	0.000E+00	7.632E-40	-100.00
321	Np-240m	2.935E-14	2.936E-14	-0.02	371	Rn-218	0.000E+00	1.222E-41	-100.00
322	Pb-209	1.457E-14	1.481E-14	-1.67	372	As-74	3.158E-32	0.000E+00	inf
323	Ag-108	1.329E-14	1.330E-14	-0.07	373	Rb-86	6.639E-25	0.000E+00	inf
324	Pb-211	9.558E-15	9.818E-15	-2.66	374	Mo-92	3.574E-26	0.000E+00	inf
325	Bi-208	7.502E-15	9.095E-15	-17.52	375	Tc-95m	1.232E-33	0.000E+00	inf
326	As-73	5.868E-15	5.870E-15	-0.04	376	Pd-103	1.214E-30	0.000E+00	inf
327	Ra-228	5.347E-15	5.347E-15	0.00	377	Cs-136	1.421E-33	0.000E+00	inf
328	Bi-213	3.467E-15	3.526E-15	-1.67	378	Ba-140	1.383E-33	0.000E+00	inf
329	Kr-83m	1.646E-15	1.646E-15	-0.04	379	La-140	2.097E-34	0.000E+00	inf
330	Pb-214	1.581E-15	1.590E-15	-0.61	380	Pr-143	1.656E-31	0.000E+00	inf
331	Tl-207	1.235E-15	1.269E-15	-2.66	381	Eu-156	2.594E-29	0.000E+00	inf
332	Bi-214	1.174E-15	1.181E-15	-0.61					
333	Eu-149	8.904E-16	8.908E-16	-0.04					
334	In-113m	6.074E-16	6.087E-16	-0.20					
335	Bi-211	5.666E-16	5.820E-16	-2.66					
336	Fr-221	3.867E-16	3.932E-16	-1.66					
337	Am-245	2.899E-16	2.904E-16	-0.15					
338	Po-218	1.862E-16	1.873E-16	-0.60					
339	Zr-88	1.682E-16	1.683E-16	-0.04					
340	Te-129	1.590E-16	1.589E-16	0.12					
341	Fr-223	8.706E-17	8.723E-17	-0.20					
342	I-125	6.141E-17	6.299E-17	-2.51					
343	Y-89m	3.831E-17	3.831E-17	-0.01					
344	Xe-127	2.154E-17	2.183E-17	-1.35					
345	Rn-219	1.814E-17	1.863E-17	-2.65					
346	Cm-241	6.413E-18	6.410E-18	0.04					
347	Es-254	4.348E-18	5.838E-18	-25.53					
348	In-114	4.752E-18	4.758E-18	-0.13					
349	In-115m	3.679E-18	3.679E-18	-0.01					
350	Tl-209	3.546E-18	3.606E-18	-1.67					

表 3.3.3 ORIGEN2 の計算結果との比較 (SF97-4 : 冷却後) (1/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
1	U-238	9.250E+05	9.250E+05	0.00	51	Pd-107	3.161E+02	3.170E+02	-0.29
2	U-235	8.228E+03	8.225E+03	0.04	52	Kr-86	2.572E+02	2.574E+02	-0.07
3	Pu-239	6.162E+03	6.134E+03	0.46	53	Sm-147	2.541E+02	2.545E+02	-0.14
4	U-236	5.428E+03	5.429E+03	0.00	54	Nd-150	2.530E+02	2.534E+02	-0.15
5	Xe-136	3.275E+03	3.280E+03	-0.17	55	Ba-134	2.480E+02	2.518E+02	-1.49
6	Pu-240	2.681E+03	2.684E+03	-0.12	56	Ba-137	2.228E+02	2.231E+02	-0.13
7	Xe-134	2.149E+03	2.152E+03	-0.14	57	Sm-148	2.175E+02	2.178E+02	-0.15
8	Nd-144	1.887E+03	1.894E+03	-0.38	58	U-234	2.143E+02	2.143E+02	-0.01
9	Ba-138	1.836E+03	1.839E+03	-0.13	59	Pd-108	2.127E+02	2.133E+02	-0.30
10	Ce-140	1.720E+03	1.793E+03	-4.07	60	I-129	2.091E+02	2.095E+02	-0.23
11	La-139	1.716E+03	1.718E+03	-0.13	61	Am-243	1.798E+02	1.808E+02	-0.57
12	Xe-132	1.598E+03	1.608E+03	-0.63	62	Eu-153	1.671E+02	1.698E+02	-1.60
13	Ce-142	1.582E+03	1.584E+03	-0.13	63	Ru-100	1.647E+02	1.664E+02	-1.06
14	Pr-141	1.569E+03	1.571E+03	-0.15	64	Kr-84	1.532E+02	1.533E+02	-0.09
15	Cs-137	1.562E+03	1.564E+03	-0.14	65	Rb-85	1.462E+02	1.463E+02	-0.09
16	Cs-133	1.525E+03	1.546E+03	-1.33	66	Gd-156	1.399E+02	1.416E+02	-1.23
17	Pu-241	1.433E+03	1.437E+03	-0.28	67	Sm-152	1.289E+02	1.320E+02	-2.32
18	Mo-100	1.360E+03	1.362E+03	-0.14	68	Te-128	1.271E+02	1.273E+02	-0.21
19	Mo-98	1.154E+03	1.156E+03	-0.14	69	Ag-109	1.080E+02	1.084E+02	-0.37
20	Ru-102	1.141E+03	1.142E+03	-0.16	70	Zr-90	1.047E+02	1.048E+02	-0.14
21	Mo-97	1.137E+03	1.139E+03	-0.21	71	Pm-147	7.920E+01	7.930E+01	-0.12
22	Zr-96	1.130E+03	1.131E+03	-0.12	72	Cm-244	6.959E+01	7.018E+01	-0.84
23	Tc-99	1.095E+03	1.103E+03	-0.72	73	Pd-110	6.916E+01	6.932E+01	-0.23
24	Ru-101	1.097E+03	1.099E+03	-0.15	74	Mo-96	6.462E+01	6.476E+01	-0.22
25	Nd-143	1.071E+03	1.081E+03	-0.93	75	I-127	6.118E+01	6.237E+01	-1.91
26	Zr-94	1.070E+03	1.071E+03	-0.11	76	Cd-110	5.976E+01	6.019E+01	-0.71
27	Mo-95	1.052E+03	1.053E+03	-0.12	77	Cs-134	5.644E+01	5.730E+01	-1.50
28	Nd-146	1.010E+03	1.011E+03	-0.13	78	Kr-83	5.542E+01	5.547E+01	-0.09
29	Zr-93	9.895E+02	9.908E+02	-0.13	79	Sm-154	5.113E+01	5.125E+01	-0.24
30	Nd-145	9.219E+02	9.232E+02	-0.14	80	Se-82	4.628E+01	4.633E+01	-0.11
31	Zr-92	8.984E+02	8.994E+02	-0.11	81	Nd-142	3.386E+01	3.396E+01	-0.29
32	Zr-91	8.203E+02	8.213E+02	-0.12	82	Cd-111	3.288E+01	3.293E+01	-0.15
33	Pu-242	8.068E+02	8.102E+02	-0.41	83	Ba-136	3.002E+01	3.011E+01	-0.30
34	Ru-104	8.021E+02	8.039E+02	-0.22	84	Eu-154	2.773E+01	2.823E+01	-1.75
35	Sr-90	6.712E+02	6.716E+02	-0.07	85	Gd-158	2.704E+01	2.752E+01	-1.74
36	Np-237	6.440E+02	6.442E+02	-0.03	86	Br-81	2.745E+01	2.749E+01	-0.13
37	Rh-103	6.331E+02	6.344E+02	-0.21	87	Kr-85	2.717E+01	2.719E+01	-0.09
38	Y-89	6.272E+02	6.277E+02	-0.07	88	Sn-126	2.635E+01	2.641E+01	-0.22
39	Pd-105	5.561E+02	5.593E+02	-0.57	89	Se-80	1.809E+01	1.811E+01	-0.11
40	Xe-131	5.540E+02	5.568E+02	-0.52	90	Cd-114	1.803E+01	1.803E+01	-0.05
41	Te-130	5.350E+02	5.358E+02	-0.15	91	Cd-112	1.565E+01	1.569E+01	-0.27
42	Pd-106	5.337E+02	5.356E+02	-0.35	92	Sm-151	1.439E+01	1.487E+01	-3.25
43	Nd-148	5.209E+02	5.216E+02	-0.13	93	Gd-154	1.408E+01	1.432E+01	-1.71
44	Cs-135	5.191E+02	5.204E+02	-0.25	94	Ru-106	1.422E+01	1.426E+01	-0.27
45	Sr-88	4.681E+02	4.685E+02	-0.08	95	Ce-144	1.189E+01	1.191E+01	-0.16
46	Sm-150	4.135E+02	4.537E+02	-8.85	96	Sn-124	1.134E+01	1.136E+01	-0.20
47	Pd-104	3.676E+02	3.686E+02	-0.29	97	Te-125	1.115E+01	1.117E+01	-0.22
48	Am-241	3.556E+02	3.565E+02	-0.26	98	Xe-130	1.026E+01	1.030E+01	-0.37
49	Rb-87	3.418E+02	3.421E+02	-0.08	99	Sn-122	7.539E+00	7.554E+00	-0.20
50	Pu-238	3.209E+02	3.222E+02	-0.40	100	Sb-123	6.628E+00	6.640E+00	-0.19

表 3.3.3 ORIGEN2 の計算結果との比較 (SF97-4 : 冷却後) (2/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
101	Eu-155	6.530E+00	6.631E+00	-1.52	151	Er-166	3.508E-02	3.553E-02	-1.26
102	Cd-116	6.604E+00	6.615E+00	-0.17	152	Gd-152	3.362E-02	3.472E-02	-3.16
103	Se-79	6.040E+00	6.047E+00	-0.12	153	Li-6	3.412E-02	3.417E-02	-0.14
104	Sn-117	5.992E+00	6.005E+00	-0.22	154	Xe-129	3.163E-02	3.237E-02	-2.26
105	Cm-245	5.863E+00	5.921E+00	-0.97	155	La-138	2.814E-02	2.819E-02	-0.17
106	Sn-120	5.287E+00	5.297E+00	-0.18	156	Ag-110m	2.338E-02	2.354E-02	-0.68
107	Gd-155	5.207E+00	5.287E+00	-1.51	157	Ge-73	2.239E-02	2.244E-02	-0.22
108	Sn-119	5.238E+00	5.248E+00	-0.18	158	Ru-99	2.146E-02	2.164E-02	-0.81
109	Sn-118	5.126E+00	5.135E+00	-0.18	159	Mo-94	1.672E-02	1.674E-02	-0.16
110	Sb-121	4.948E+00	4.967E+00	-0.38	160	He-3	1.504E-02	1.506E-02	-0.12
111	Xe-128	4.389E+00	4.485E+00	-2.14	161	Be-10	1.411E-02	1.413E-02	-0.15
112	Sm-149	4.125E+00	4.111E+00	0.33	162	Tc-98	1.270E-02	1.283E-02	-1.05
113	Sn-116	4.046E+00	4.088E+00	-1.04	163	Eu-152	1.001E-02	1.039E-02	-3.65
114	Sb-125	3.814E+00	3.822E+00	-0.21	164	Ge-72	8.701E-03	8.822E-03	-1.37
115	Tb-159	3.574E+00	3.598E+00	-0.67	165	Cm-247	7.930E-03	8.039E-03	-1.35
116	He-4	3.206E+00	3.220E+00	-0.43	166	Sm-146	7.753E-03	7.766E-03	-0.17
117	Se-78	3.100E+00	3.104E+00	-0.15	167	H-1	7.731E-03	7.742E-03	-0.14
118	In-115	1.836E+00	1.838E+00	-0.07	168	Pm-146	7.208E-03	7.219E-03	-0.15
119	Gd-160	1.532E+00	1.533E+00	-0.05	169	Te-123	6.857E-03	6.943E-03	-1.23
120	Te-126	1.291E+00	1.293E+00	-0.20	170	Se-76	6.828E-03	6.850E-03	-0.32
121	Am-242m	1.101E+00	1.104E+00	-0.24	171	U-233	6.158E-03	6.158E-03	0.00
122	Se-77	1.047E+00	1.050E+00	-0.31	172	Sr-87	5.240E-03	5.251E-03	-0.22
123	Sr-86	9.904E-01	9.918E-01	-0.14	173	Er-168	4.794E-03	4.766E-03	0.58
124	Kr-82	8.714E-01	8.742E-01	-0.32	174	Th-230	4.000E-03	4.000E-03	0.01
125	Ba-135	7.672E-01	7.801E-01	-1.66	175	H-2	3.360E-03	3.365E-03	-0.13
126	Cm-243	7.269E-01	7.340E-01	-0.96	176	Ga-71	3.260E-03	3.267E-03	-0.23
127	Cm-246	5.807E-01	5.877E-01	-1.18	177	Nb-93m	2.220E-03	2.223E-03	-0.14
128	Dy-161	5.236E-01	5.239E-01	-0.05	178	Nb-94	2.091E-03	2.096E-03	-0.21
129	Eu-151	4.614E-01	4.770E-01	-3.27	179	U-232	1.796E-03	1.801E-03	-0.28
130	Te-122	4.312E-01	4.348E-01	-0.83	180	Zn-70	1.762E-03	1.766E-03	-0.20
131	Ge-76	4.283E-01	4.288E-01	-0.12	181	Ho-166m	1.442E-03	1.447E-03	-0.37
132	Dy-160	4.118E-01	4.155E-01	-0.89	182	Li-7	1.347E-03	1.349E-03	-0.18
133	Sn-121m	3.883E-01	3.891E-01	-0.22	183	Sn-114	1.260E-03	1.267E-03	-0.52
134	Dy-162	3.822E-01	3.818E-01	0.10	184	Er-167	1.168E-03	1.151E-03	1.49
135	Te-124	2.906E-01	2.915E-01	-0.30	185	Np-236	1.006E-03	1.006E-03	-0.03
136	Dy-163	2.904E-01	2.900E-01	0.14	186	Th-232	9.769E-04	9.769E-04	0.00
137	Sn-115	2.720E-01	2.738E-01	-0.66	187	Pd-102	8.279E-04	8.303E-04	-0.29
138	Y-90	1.702E-01	1.704E-01	-0.07	188	Pa-231	7.912E-04	7.914E-04	-0.03
139	Gd-157	1.727E-01	1.700E-01	1.59	189	Ga-69	7.752E-04	7.763E-04	-0.14
140	As-75	1.581E-01	1.583E-01	-0.15	190	Cd-108	7.528E-04	7.582E-04	-0.71
141	Cd-113m	1.439E-01	1.439E-01	-0.05	191	Pu-236	6.179E-04	6.187E-04	-0.12
142	Cd-113	1.339E-01	1.306E-01	2.59	192	Cm-248	5.828E-04	5.920E-04	-1.55
143	Ho-165	1.224E-01	1.224E-01	0.01	193	Pr-144	5.008E-04	5.016E-04	-0.17
144	Te-125m	8.064E-02	8.081E-02	-0.21	194	Nb-93	4.616E-04	4.623E-04	-0.15
145	Dy-164	7.739E-02	7.713E-02	0.34	195	Zn-68	4.261E-04	4.265E-04	-0.08
146	Pu-244	7.130E-02	7.188E-02	-0.81	196	Tm-169	4.133E-04	4.010E-04	3.07
147	Ge-74	6.416E-02	6.427E-02	-0.17	197	Ba-132	3.453E-04	3.505E-04	-1.49
148	H-3	5.676E-02	5.684E-02	-0.14	198	Yb-172	3.315E-04	3.326E-04	-0.34
149	Cm-242	5.553E-02	5.565E-02	-0.22	199	Er-170	3.257E-04	3.182E-04	2.34
150	In-113	4.218E-02	4.222E-02	-0.11	200	Sn-119m	3.079E-04	3.085E-04	-0.21

表 3.3.3 ORIGEN2 の計算結果との比較 (SF97-4 : 冷却後) (3/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
201	Xe-126	2.918E-04	2.982E-04	-2.14	251	Bk-249	3.080E-07	3.131E-07	-1.64
202	Yb-170	2.881E-04	2.860E-04	0.76	252	Te-127	2.661E-07	2.662E-07	-0.03
203	Gd-153	2.694E-04	2.772E-04	-2.82	253	Se-74	2.521E-07	2.528E-07	-0.26
204	Zn-67	2.587E-04	2.589E-04	-0.09	254	Dy-158	2.330E-07	2.349E-07	-0.82
205	La-137	2.499E-04	2.508E-04	-0.33	255	Np-238	2.226E-07	2.231E-07	-0.24
206	Ba-133	2.430E-04	2.471E-04	-1.65	256	Ra-224	1.683E-07	1.693E-07	-0.60
207	Ba-137m	2.386E-04	2.389E-04	-0.14	257	Ru-98	1.627E-07	1.646E-07	-1.20
208	Ag-107	1.787E-04	1.793E-04	-0.31	258	Nb-92	1.483E-07	1.488E-07	-0.34
209	Kr-80	1.676E-04	1.680E-04	-0.24	259	Ra-226	1.361E-07	1.361E-07	0.02
210	Np-239	1.548E-04	1.556E-04	-0.57	260	Ho-163	1.171E-07	1.154E-07	1.48
211	Yb-171	1.534E-04	1.500E-04	2.24	261	Tb-160	9.969E-08	1.006E-07	-0.94
212	Sn-123	8.689E-05	8.709E-05	-0.23	262	Rh-102m	7.349E-08	7.366E-08	-0.23
213	Br-79	7.659E-05	7.670E-05	-0.15	263	Ac-227	7.069E-08	7.073E-08	-0.04
214	Te-127m	7.601E-05	7.604E-05	-0.03	264	Sr-89	6.810E-08	6.823E-08	-0.19
215	Tb-158	7.263E-05	7.323E-05	-0.82	265	Mo-93	5.908E-08	5.920E-08	-0.20
216	Zn-66	5.244E-05	5.254E-05	-0.19	266	Tm-170	3.493E-08	3.439E-08	1.56
217	U-237	4.470E-05	4.483E-05	-0.27	267	Th-231	3.345E-08	3.344E-08	0.04
218	Th-228	3.276E-05	3.287E-05	-0.32	268	Pb-212	1.928E-08	1.940E-08	-0.63
219	Pb-208	2.673E-05	2.701E-05	-1.03	269	Y-88	1.516E-08	1.520E-08	-0.24
220	SF-250	2.331E-05	2.351E-05	-0.84	270	Pm-145	1.509E-08	1.514E-08	-0.33
221	Tm-171	2.420E-05	2.331E-05	3.79	271	Nb-95m	6.376E-09	6.390E-09	-0.22
222	Pa-233	2.181E-05	2.182E-05	-0.04	272	Pb-207	5.156E-09	5.265E-09	-2.07
223	Kr-81	2.003E-05	2.010E-05	-0.36	273	Sb-126m	4.846E-09	4.856E-09	-0.22
224	Sr-84	1.807E-05	1.810E-05	-0.19	274	Nb-91	3.130E-09	3.140E-09	-0.34
225	Sn-121	1.689E-05	1.693E-05	-0.21	275	Sb-124	2.489E-09	2.499E-09	-0.39
226	Nb-95	1.429E-05	1.432E-05	-0.22	276	Bi-212	1.829E-09	1.840E-09	-0.63
227	Am-242	1.420E-05	1.423E-05	-0.24	277	Dy-159	1.353E-09	1.368E-09	-1.07
228	Th-234	1.343E-05	1.343E-05	0.00	278	Bi-209	1.037E-09	1.051E-09	-1.33
229	Rh-106	1.331E-05	1.335E-05	-0.27	279	Pa-234m	4.486E-10	4.485E-10	0.00
230	Rh-102	1.236E-05	1.240E-05	-0.37	280	Ru-103	4.438E-10	4.445E-10	-0.17
231	Zr-95	1.186E-05	1.188E-05	-0.22	281	Rh-101	4.405E-10	4.414E-10	-0.19
232	Cd-109	1.092E-05	1.101E-05	-0.84	282	Ag-110	3.626E-10	3.650E-10	-0.68
233	Ge-70	1.032E-05	1.034E-05	-0.20	283	Pa-234	2.023E-10	2.023E-10	0.00
234	Cf-249	6.963E-06	7.079E-06	-1.64	284	Te-120	1.940E-10	1.947E-10	-0.34
235	Pr-144m	3.151E-06	3.156E-06	-0.17	285	Th-227	1.613E-10	1.639E-10	-1.56
236	Ce-139	2.884E-06	3.015E-06	-4.34	286	Pb-210	1.425E-10	1.429E-10	-0.28
237	Cf-250	2.232E-06	2.273E-06	-1.83	287	Ra-223	9.745E-11	9.990E-11	-2.45
238	Ag-108m	2.182E-06	2.188E-06	-0.27	288	Pm-148m	5.321E-11	5.330E-11	-0.17
239	Th-229	1.619E-06	1.632E-06	-0.76	289	Cm-250	4.943E-11	5.041E-11	-1.95
240	Y-91	1.623E-06	1.622E-06	0.07	290	Gd-151	3.819E-11	3.938E-11	-3.03
241	Cf-251	1.154E-06	1.178E-06	-2.06	291	Tl-208	3.251E-11	3.271E-11	-0.63
242	Er-164	1.043E-06	1.040E-06	0.29	292	Rn-220	2.906E-11	2.923E-11	-0.60
243	Tb-157	7.828E-07	7.846E-07	-0.22	293	Ag-109m	1.085E-11	1.094E-11	-0.83
244	Ce-138	7.574E-07	7.597E-07	-0.30	294	Ra-225	8.835E-12	8.911E-12	-0.85
245	Sb-126	6.300E-07	6.314E-07	-0.22	295	Pb-206	7.515E-12	8.418E-12	-10.74
246	Eu-150	5.496E-07	5.630E-07	-2.38	296	Te-121m	7.827E-12	7.832E-12	-0.06
247	Tc-97	5.138E-07	5.155E-07	-0.34	297	Ac-225	5.926E-12	5.981E-12	-0.92
248	Te-123m	4.314E-07	4.371E-07	-1.30	298	Es-254	4.561E-12	4.684E-12	-2.63
249	Cf-252	4.106E-07	4.203E-07	-2.30	299	Cd-115m	3.769E-12	3.754E-12	0.38
250	Np-235	4.096E-07	4.100E-07	-0.11	300	Rb-83	3.442E-12	3.451E-12	-0.28

表 3.3.3 ORIGEN2 の計算結果との比較 (SF97-4 : 冷却後) (4/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
301	Pm-144	2.971E-12	2.980E-12	-0.31	351	In-114	2.475E-18	2.488E-18	-0.52
302	Po-210	2.011E-12	2.439E-12	-17.56	352	Rb-84	1.677E-18	1.682E-18	-0.26
303	Ce-141	2.346E-12	2.345E-12	0.06	353	In-115m	1.111E-18	1.107E-18	0.38
304	U-240	1.389E-12	1.400E-12	-0.80	354	Cm-241	7.208E-19	7.279E-19	-0.97
305	Te-121	9.854E-13	9.884E-13	-0.30	355	At-217	2.137E-19	2.156E-19	-0.92
306	Rn-222	8.714E-13	8.747E-13	-0.38	356	Po-215	1.694E-19	1.737E-19	-2.45
307	Se-75	7.257E-13	7.297E-13	-0.55	357	Po-211	1.349E-19	1.383E-19	-2.45
308	Rh-103m	4.398E-13	4.406E-13	-0.17	358	Po-212	9.644E-20	9.705E-20	-0.63
309	Pm-148	3.658E-13	3.664E-13	-0.17	359	Am-246	5.182E-20	5.285E-20	-1.95
310	Pu-243	2.828E-13	2.866E-13	-1.35	360	Po-214	4.176E-22	4.192E-22	-0.38
311	Tc-97m	2.127E-13	2.133E-13	-0.28	361	Es-255	4.829E-23	4.975E-23	-2.94
312	Pb-211	2.022E-13	2.073E-13	-2.45	362	Po-213	2.668E-23	2.693E-23	-0.92
313	Sn-113	1.617E-13	1.629E-13	-0.71	363	Tl-206	3.153E-26	3.236E-26	-2.56
314	In-114m	1.522E-13	1.530E-13	-0.52	364	Yb-169	2.705E-29	2.208E-29	22.55
315	Ra-228	1.179E-13	1.179E-13	0.00	365	Es-253	8.421E-30	8.641E-30	-2.55
316	Bi-210	8.749E-14	8.835E-14	-0.98	366	U-230	7.173E-34	7.230E-34	-0.79
317	Te-129m	8.122E-14	8.107E-14	0.18	367	Th-226	0.000E+00	7.256E-37	-100.00
318	Pb-209	7.461E-14	7.530E-14	-0.92	368	Ra-222	0.000E+00	1.406E-38	-100.00
319	Po-216	7.440E-14	7.484E-14	-0.60	369	Rn-218	0.000E+00	1.344E-41	-100.00
320	Sr-85	4.362E-14	4.375E-14	-0.29	370	As-74	9.062E-33	0.000E+00	inf
321	Pu-237	3.139E-14	3.159E-14	-0.62	371	Rb-86	1.949E-25	0.000E+00	inf
322	Tl-207	2.614E-14	2.680E-14	-2.45	372	Mo-92	1.473E-21	0.000E+00	inf
323	Bi-213	1.776E-14	1.792E-14	-0.92	373	Tc-95	3.389E-32	0.000E+00	inf
324	Bi-210m	1.228E-14	1.260E-14	-2.57	374	Tc-95m	6.275E-29	0.000E+00	inf
325	Bi-211	1.199E-14	1.229E-14	-2.45	375	Pd-103	1.804E-30	0.000E+00	inf
326	Np-240m	1.186E-14	1.195E-14	-0.80	376	Ag-105	2.243E-31	0.000E+00	inf
327	Bi-208	5.977E-15	6.135E-15	-2.57	377	Cs-136	7.336E-34	0.000E+00	inf
328	Pb-214	4.088E-15	4.103E-15	-0.38	378	Ba-140	1.725E-33	0.000E+00	inf
329	As-73	3.446E-15	3.455E-15	-0.26	379	La-140	2.615E-34	0.000E+00	inf
330	Yb-168	4.349E-15	3.324E-15	30.84	380	Pr-143	2.041E-31	0.000E+00	inf
331	Bi-214	3.035E-15	3.047E-15	-0.38	381	Eu-149	9.470E-24	0.000E+00	inf
332	Kr-83m	2.346E-15	2.353E-15	-0.28	382	Eu-156	1.366E-28	0.000E+00	inf
333	Bk-250	2.180E-15	2.239E-15	-2.63	383	Cf-253	6.615E-34	0.000E+00	inf
334	Fr-221	1.981E-15	1.999E-15	-0.92					
335	Ag-108	1.963E-15	1.968E-15	-0.27					
336	Fr-223	1.841E-15	1.842E-15	-0.04					
337	Am-245	1.138E-15	1.157E-15	-1.64					
338	Tm-168	7.319E-16	5.558E-16	31.69					
339	Po-218	4.815E-16	4.833E-16	-0.38					
340	Rn-219	3.838E-16	3.934E-16	-2.45					
341	Zr-88	2.309E-16	2.315E-16	-0.28					
342	In-113m	9.711E-17	9.780E-17	-0.71					
343	Te-129	7.488E-17	7.474E-17	0.18					
344	Y-89m	3.665E-17	3.672E-17	-0.19					
345	Pu-246	2.074E-17	2.115E-17	-1.95					
346	Tl-209	1.816E-17	1.833E-17	-0.92					
347	Ac-228	1.438E-17	1.439E-17	-0.03					
348	I-125	9.040E-18	9.207E-18	-1.82					
349	Xe-127	4.138E-18	4.237E-18	-2.34					
350	Cf-254	3.262E-18	3.353E-18	-2.71					

表 3.3.4 ORIGEN2 の計算結果との比較 (SF98-6 : 冷却後) (1/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
1	U-238	9.332E+05	9.331E+05	0.00	51	Ba-137	2.560E+02	2.564E+02	-0.14
2	U-235	9.335E+03	9.323E+03	0.13	52	Pd-107	2.440E+02	2.447E+02	-0.29
3	Pu-239	5.900E+03	5.871E+03	0.50	53	U-234	2.380E+02	2.382E+02	-0.09
4	U-236	4.963E+03	4.964E+03	-0.03	54	Pu-238	2.222E+02	2.260E+02	-1.70
5	Xe-136	2.725E+03	2.730E+03	-0.17	55	Kr-86	2.250E+02	2.252E+02	-0.09
6	Pu-240	2.472E+03	2.472E+03	-0.01	56	Nd-150	2.101E+02	2.104E+02	-0.16
7	Xe-134	1.820E+03	1.823E+03	-0.14	57	Ba-134	2.029E+02	2.059E+02	-1.47
8	Nd-144	1.589E+03	1.599E+03	-0.62	58	Sm-148	1.706E+02	1.751E+02	-2.61
9	Ba-138	1.559E+03	1.562E+03	-0.14	59	I-129	1.732E+02	1.738E+02	-0.37
10	Ce-140	1.460E+03	1.480E+03	-1.33	60	Pd-108	1.619E+02	1.624E+02	-0.31
11	La-139	1.461E+03	1.463E+03	-0.14	61	Eu-153	1.375E+02	1.386E+02	-0.79
12	Pr-141	1.340E+03	1.354E+03	-1.07	62	Kr-84	1.315E+02	1.317E+02	-0.11
13	Ce-142	1.348E+03	1.350E+03	-0.14	63	Rb-85	1.311E+02	1.312E+02	-0.10
14	Cs-133	1.330E+03	1.339E+03	-0.67	64	Zr-90	1.233E+02	1.235E+02	-0.15
15	Xe-132	1.313E+03	1.323E+03	-0.76	65	Ru-100	1.190E+02	1.201E+02	-0.91
16	Cs-137	1.251E+03	1.253E+03	-0.14	66	Sm-152	1.152E+02	1.159E+02	-0.62
17	Mo-100	1.152E+03	1.153E+03	-0.14	67	Gd-156	9.762E+01	1.098E+02	-11.09
18	Pu-241	1.073E+03	1.075E+03	-0.23	68	Am-243	1.075E+02	1.083E+02	-0.80
19	Mo-98	9.777E+02	9.791E+02	-0.14	69	Te-128	1.050E+02	1.052E+02	-0.22
20	Mo-97	9.689E+02	9.710E+02	-0.21	70	Ag-109	8.565E+01	8.595E+01	-0.36
21	Zr-96	9.671E+02	9.683E+02	-0.12	71	Pd-110	5.222E+01	5.236E+01	-0.28
22	Nd-143	9.540E+02	9.603E+02	-0.66	72	I-127	5.086E+01	5.135E+01	-0.94
23	Tc-99	9.471E+02	9.513E+02	-0.44	73	Kr-83	4.972E+01	4.976E+01	-0.08
24	Ru-102	9.437E+02	9.453E+02	-0.17	74	Mo-96	4.813E+01	4.954E+01	-2.85
25	Mo-95	9.104E+02	9.421E+02	-3.37	75	Sm-154	4.079E+01	4.089E+01	-0.23
26	Ru-101	9.292E+02	9.306E+02	-0.14	76	Pm-147	4.045E+01	4.038E+01	0.19
27	Zr-94	9.205E+02	9.215E+02	-0.12	77	Se-82	3.992E+01	3.996E+01	-0.11
28	Zr-93	8.567E+02	8.579E+02	-0.14	78	Cd-110	3.873E+01	3.904E+01	-0.80
29	Nd-146	8.428E+02	8.440E+02	-0.15	79	Cm-244	3.163E+01	3.203E+01	-1.23
30	Nd-145	8.031E+02	8.042E+02	-0.13	80	Nd-142	2.538E+01	2.588E+01	-1.93
31	Zr-92	7.806E+02	7.815E+02	-0.12	81	Cd-111	2.479E+01	2.527E+01	-1.89
32	Zr-91	7.167E+02	7.176E+02	-0.12	82	Ba-136	2.370E+01	2.421E+01	-2.12
33	Ru-104	6.458E+02	6.472E+02	-0.22	83	Br-81	2.367E+01	2.370E+01	-0.12
34	Sr-90	5.572E+02	5.577E+02	-0.09	84	Sn-126	2.149E+01	2.153E+01	-0.21
35	Rh-103	5.534E+02	5.542E+02	-0.15	85	Kr-85	2.051E+01	2.053E+01	-0.10
36	Pu-242	5.511E+02	5.539E+02	-0.51	86	Gd-158	1.936E+01	2.032E+01	-4.71
37	Y-89	5.504E+02	5.509E+02	-0.09	87	Cs-134	1.962E+01	1.989E+01	-1.34
38	Np-237	5.306E+02	5.316E+02	-0.18	88	Eu-154	1.832E+01	1.851E+01	-1.05
39	Xe-131	4.949E+02	4.983E+02	-0.67	89	Se-80	1.559E+01	1.560E+01	-0.11
40	Cs-135	4.657E+02	4.666E+02	-0.18	90	Gd-154	1.469E+01	1.485E+01	-1.10
41	Te-130	4.495E+02	4.502E+02	-0.16	91	Cd-114	1.413E+01	1.429E+01	-1.13
42	Pd-105	4.473E+02	4.497E+02	-0.54	92	Sm-151	1.209E+01	1.214E+01	-0.45
43	Nd-148	4.397E+02	4.404E+02	-0.15	93	Cd-112	1.197E+01	1.204E+01	-0.55
44	Am-241	4.191E+02	4.201E+02	-0.23	94	Te-125	1.053E+01	1.063E+01	-0.96
45	Pd-106	4.164E+02	4.179E+02	-0.35	95	Sn-124	9.311E+00	9.329E+00	-0.19
46	Sr-88	4.103E+02	4.107E+02	-0.09	96	Xe-130	7.505E+00	7.558E+00	-0.70
47	Sm-150	3.401E+02	3.461E+02	-1.72	97	Gd-155	5.687E+00	6.172E+00	-7.86
48	Rb-87	2.994E+02	2.997E+02	-0.09	98	Sn-122	6.150E+00	6.162E+00	-0.19
49	Sm-147	2.717E+02	2.728E+02	-0.41	99	Sb-123	5.458E+00	5.468E+00	-0.18
50	Pd-104	2.663E+02	2.672E+02	-0.34	100	Cd-116	5.354E+00	5.364E+00	-0.18

表 3.3.4 ORIGEN2 の計算結果との比較 (SF98-6 : 冷却後) (2/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
101	Se-79	5.244E+00	5.250E+00	-0.11	151	Li-6	2.881E-02	2.885E-02	-0.14
102	Sn-117	4.877E+00	4.889E+00	-0.24	152	Ru-99	2.550E-02	2.563E-02	-0.52
103	Sn-120	4.326E+00	4.334E+00	-0.18	153	Er-166	2.184E-02	2.212E-02	-1.27
104	Sn-119	4.295E+00	4.303E+00	-0.18	154	La-138	2.131E-02	2.136E-02	-0.21
105	Sn-118	4.176E+00	4.184E+00	-0.19	155	Xe-129	1.975E-02	2.018E-02	-2.14
106	Eu-155	3.812E+00	4.137E+00	-7.85	156	Ge-73	1.865E-02	1.869E-02	-0.20
107	Sb-121	4.102E+00	4.116E+00	-0.34	157	He-3	1.847E-02	1.849E-02	-0.13
108	Sm-149	3.611E+00	3.616E+00	-0.16	158	Mo-94	1.189E-02	1.222E-02	-2.72
109	Xe-128	3.101E+00	3.154E+00	-1.67	159	Be-10	1.182E-02	1.184E-02	-0.15
110	Sn-116	3.059E+00	3.088E+00	-0.96	160	Tc-98	8.944E-03	9.025E-03	-0.90
111	Tb-159	2.664E+00	2.695E+00	-1.15	161	Eu-152	7.918E-03	7.968E-03	-0.63
112	Se-78	2.648E+00	2.652E+00	-0.15	162	Ge-72	7.066E-03	7.122E-03	-0.79
113	He-4	2.610E+00	2.627E+00	-0.62	163	Sm-146	6.483E-03	6.610E-03	-1.93
114	Cm-245	2.513E+00	2.551E+00	-1.48	164	H-1	6.579E-03	6.589E-03	-0.15
115	Ru-106	2.429E+00	2.434E+00	-0.21	165	U-233	6.128E-03	6.136E-03	-0.13
116	Sb-125	1.775E+00	1.788E+00	-0.72	166	Th-230	6.025E-03	6.025E-03	-0.01
117	In-115	1.674E+00	1.674E+00	-0.02	167	Se-76	5.097E-03	5.117E-03	-0.39
118	Ce-144	1.401E+00	1.402E+00	-0.08	168	Te-123	4.484E-03	4.549E-03	-1.43
119	Gd-160	1.156E+00	1.158E+00	-0.19	169	Pm-146	3.942E-03	4.010E-03	-1.69
120	Te-126	1.033E+00	1.047E+00	-1.35	170	Sr-87	3.748E-03	3.836E-03	-2.27
121	Am-242m	8.678E-01	9.566E-01	-9.29	171	Cm-242	3.459E-03	3.689E-03	-6.25
122	Se-77	9.068E-01	9.093E-01	-0.28	172	Er-168	3.416E-03	3.414E-03	0.06
123	Sr-86	7.506E-01	7.637E-01	-1.72	173	H-2	2.846E-03	2.850E-03	-0.14
124	Kr-82	6.574E-01	6.601E-01	-0.40	174	Ga-71	2.598E-03	2.604E-03	-0.23
125	Eu-151	6.060E-01	6.088E-01	-0.45	175	Cm-247	2.507E-03	2.561E-03	-2.09
126	Ba-135	4.939E-01	5.049E-01	-2.19	176	Nb-93m	2.546E-03	2.550E-03	-0.14
127	Cm-243	4.601E-01	4.644E-01	-0.92	177	Ag-110m	1.622E-03	1.633E-03	-0.65
128	Dy-161	3.935E-01	3.995E-01	-1.52	178	Nb-94	1.511E-03	1.557E-03	-2.92
129	Ge-76	3.679E-01	3.683E-01	-0.12	179	U-232	1.466E-03	1.486E-03	-1.35
130	Sn-121m	3.076E-01	3.083E-01	-0.20	180	Zn-70	1.413E-03	1.416E-03	-0.20
131	Te-122	3.013E-01	3.043E-01	-0.98	181	Th-232	1.221E-03	1.221E-03	-0.02
132	Dy-162	2.909E-01	2.961E-01	-1.76	182	Li-7	1.113E-03	1.115E-03	-0.18
133	Dy-160	2.813E-01	2.849E-01	-1.25	183	Sn-114	9.043E-04	9.098E-04	-0.60
134	Sn-115	2.204E-01	2.218E-01	-0.61	184	Pa-231	8.823E-04	8.824E-04	-0.02
135	Cm-246	2.153E-01	2.193E-01	-1.83	185	Er-167	8.828E-04	8.769E-04	0.67
136	Dy-163	2.035E-01	2.067E-01	-1.52	186	Ho-166m	8.198E-04	8.296E-04	-1.17
137	Te-124	1.998E-01	2.006E-01	-0.39	187	Np-236	7.323E-04	7.390E-04	-0.90
138	Y-90	1.413E-01	1.415E-01	-0.08	188	Nb-93	6.641E-04	6.652E-04	-0.15
139	As-75	1.352E-01	1.354E-01	-0.14	189	Ga-69	6.297E-04	6.307E-04	-0.16
140	Gd-157	1.267E-01	1.346E-01	-5.90	190	Pd-102	5.881E-04	5.901E-04	-0.34
141	Cd-113	1.188E-01	1.181E-01	0.64	191	Cd-108	4.802E-04	4.841E-04	-0.80
142	Cd-113m	9.894E-02	9.916E-02	-0.22	192	Zn-68	3.470E-04	3.475E-04	-0.13
143	Ho-165	7.891E-02	7.975E-02	-1.06	193	Tm-169	3.358E-04	3.323E-04	1.06
144	Ge-74	5.373E-02	5.382E-02	-0.16	194	Yb-172	2.614E-04	2.623E-04	-0.35
145	Dy-164	5.220E-02	5.279E-02	-1.11	195	Er-170	2.560E-04	2.536E-04	0.98
146	In-113	4.416E-02	4.427E-02	-0.25	196	Ba-132	2.444E-04	2.499E-04	-2.22
147	H-3	4.236E-02	4.242E-02	-0.14	197	Pu-236	2.449E-04	2.485E-04	-1.45
148	Te-125m	3.752E-02	3.780E-02	-0.72	198	Zn-67	2.121E-04	2.125E-04	-0.15
149	Pu-244	3.592E-02	3.632E-02	-1.12	199	Yb-170	2.063E-04	2.096E-04	-1.59
150	Gd-152	3.297E-02	3.324E-02	-0.82	200	Xe-126	1.988E-04	2.052E-04	-3.10

表 3.3.4 ORIGEN2 の計算結果との比較 (SF98-6 : 冷却後) (3/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
201	Ag-107	1.965E-04	1.971E-04	-0.31	251	Ac-227	1.110E-07	1.110E-07	-0.04
202	La-137	1.955E-04	1.960E-04	-0.29	252	Ho-163	9.069E-08	9.018E-08	0.56
203	Ba-137m	1.911E-04	1.913E-04	-0.14	253	Np-235	6.892E-08	6.979E-08	-1.24
204	Cm-248	1.536E-04	1.575E-04	-2.44	254	Cf-252	4.101E-08	5.894E-08	-30.42
205	Ba-133	1.284E-04	1.312E-04	-2.18	255	Th-231	3.796E-08	3.791E-08	0.13
206	Yb-171	1.284E-04	1.277E-04	0.55	256	Mo-93	3.484E-08	3.543E-08	-1.66
207	Kr-80	1.263E-04	1.266E-04	-0.27	257	Rh-102m	3.526E-08	3.533E-08	-0.18
208	Np-239	9.252E-05	9.326E-05	-0.80	258	Ce-139	3.402E-08	3.475E-08	-2.11
209	Br-79	8.770E-05	8.781E-05	-0.13	259	Pb-212	1.905E-08	1.934E-08	-1.48
210	Pr-144	5.902E-05	5.908E-05	-0.10	260	Bk-249	1.335E-08	1.371E-08	-2.63
211	Tb-158	4.583E-05	4.634E-05	-1.10	261	Pb-207	1.159E-08	1.181E-08	-1.94
212	Zn-66	4.262E-05	4.273E-05	-0.24	262	Pm-145	1.082E-08	1.085E-08	-0.28
213	Pb-208	4.169E-05	4.243E-05	-1.74	263	Sb-126m	3.951E-09	3.959E-09	-0.20
214	Sn-119m	3.677E-05	3.682E-05	-0.13	264	Nb-91	2.442E-09	2.450E-09	-0.29
215	U-237	3.346E-05	3.354E-05	-0.23	265	Te-123m	2.327E-09	2.361E-09	-1.41
216	Th-228	3.232E-05	3.276E-05	-1.34	266	Nb-95	1.843E-09	1.842E-09	0.01
217	Gd-153	2.331E-05	2.351E-05	-0.85	267	Bi-212	1.807E-09	1.834E-09	-1.48
218	Pa-233	1.797E-05	1.800E-05	-0.19	268	Zr-95	1.529E-09	1.529E-09	0.01
219	SF-250	1.641E-05	1.660E-05	-1.13	269	Te-127	1.303E-09	1.292E-09	0.90
220	Kr-81	1.467E-05	1.472E-05	-0.37	270	Bi-209	1.013E-09	1.067E-09	-5.07
221	Th-234	1.355E-05	1.355E-05	0.01	271	Pa-234m	4.525E-10	4.525E-10	0.00
222	Sr-84	1.326E-05	1.350E-05	-1.81	272	Pb-210	3.389E-10	3.398E-10	-0.26
223	Sn-121	1.338E-05	1.341E-05	-0.20	273	Tm-170	3.149E-10	3.169E-10	-0.60
224	Am-242	1.119E-05	1.234E-05	-9.28	274	Th-227	2.546E-10	2.573E-10	-1.04
225	Tm-171	8.420E-06	8.302E-06	1.42	275	Rh-101	2.310E-10	2.316E-10	-0.26
226	Ge-70	7.281E-06	7.303E-06	-0.31	276	Pa-234	2.040E-10	2.040E-10	0.00
227	Rh-106	2.274E-06	2.279E-06	-0.20	277	Ra-223	1.542E-10	1.568E-10	-1.63
228	Cd-109	1.807E-06	1.825E-06	-0.98	278	Te-120	1.518E-10	1.522E-10	-0.29
229	Cf-249	1.733E-06	1.780E-06	-2.65	279	Y-91	9.325E-11	9.311E-11	0.15
230	Ag-108m	1.688E-06	1.692E-06	-0.28	280	Y-88	5.622E-11	5.634E-11	-0.22
231	Th-229	1.296E-06	1.316E-06	-1.54	281	Tl-208	3.212E-11	3.260E-11	-1.48
232	Sn-123	9.065E-07	9.064E-07	0.01	282	Rn-220	2.870E-11	2.913E-11	-1.47
233	Er-164	6.340E-07	6.370E-07	-0.47	283	Tb-160	2.702E-11	2.736E-11	-1.27
234	Ce-138	6.018E-07	6.034E-07	-0.26	284	Pb-206	2.290E-11	2.585E-11	-11.40
235	Tb-157	5.988E-07	6.003E-07	-0.24	285	Ag-110	2.515E-11	2.533E-11	-0.68
236	Rh-102	5.859E-07	5.879E-07	-0.34	286	Dy-159	1.535E-11	1.557E-11	-1.36
237	Sb-126	5.137E-07	5.148E-07	-0.20	287	Cm-250	1.010E-11	1.042E-11	-3.14
238	Eu-150	4.584E-07	4.620E-07	-0.79	288	Ra-225	7.066E-12	7.185E-12	-1.65
239	Cf-250	4.479E-07	4.613E-07	-2.91	289	Po-210	4.947E-12	5.799E-12	-14.69
240	Tc-97	4.021E-07	4.033E-07	-0.29	290	Ac-225	4.739E-12	4.822E-12	-1.73
241	Pr-144m	3.713E-07	3.717E-07	-0.10	291	Ag-109m	1.795E-12	1.813E-12	-0.98
242	Te-127m	3.723E-07	3.689E-07	0.90	292	Rn-222	1.707E-12	1.712E-12	-0.28
243	Cf-251	2.460E-07	3.428E-07	-28.24	293	Sr-89	8.531E-13	8.530E-13	0.02
244	Ra-226	2.664E-07	2.663E-07	0.03	294	Nb-95m	8.223E-13	8.222E-13	0.01
245	Dy-158	2.143E-07	2.167E-07	-1.09	295	U-240	6.997E-13	7.077E-13	-1.12
246	Np-238	1.754E-07	1.934E-07	-9.28	296	Pm-144	5.000E-13	5.007E-13	-0.16
247	Se-74	1.856E-07	1.911E-07	-2.87	297	Gd-151	3.379E-13	3.413E-13	-1.00
248	Ra-224	1.662E-07	1.687E-07	-1.47	298	Pb-211	3.201E-13	3.254E-13	-1.63
249	Ru-98	1.229E-07	1.242E-07	-1.01	299	Bi-210	2.083E-13	2.100E-13	-0.83
250	Nb-92	1.161E-07	1.164E-07	-0.29	300	Ra-228	1.848E-13	1.848E-13	-0.02

表 3.3.4 ORIGEN2 の計算結果との比較 (SF98-6 : 冷却後) (4/4)

番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	質量 (g)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
301	Es-254	8.231E-14	1.793E-13	-54.09	351	Po-214	8.180E-22	8.203E-22	-0.28
302	Te-121m	1.636E-13	1.637E-13	-0.04	352	Y-89m	4.591E-22	4.590E-22	0.02
303	Sb-124	1.461E-13	1.466E-13	-0.33	353	I-125	3.912E-22	4.059E-22	-3.64
304	Pu-243	8.938E-14	9.129E-14	-2.09	354	Cf-254	3.908E-23	6.887E-23	-43.25
305	Po-216	7.350E-14	7.459E-14	-1.47	355	Po-213	2.134E-23	2.171E-23	-1.73
306	Pb-209	5.966E-14	6.071E-14	-1.73	356	In-114	1.875E-23	1.886E-23	-0.55
307	Tl-207	4.138E-14	4.206E-14	-1.63	357	Te-129	3.044E-24	3.024E-24	0.65
308	Te-121	2.060E-14	2.060E-14	-0.04	358	In-115m	2.749E-24	2.744E-24	0.21
309	Bi-211	1.897E-14	1.929E-14	-1.63	359	Xe-127	4.310E-25	4.910E-25	-12.22
310	Bi-213	1.420E-14	1.445E-14	-1.73	360	Rb-84	3.952E-26	4.067E-26	-2.83
311	Bi-210m	8.007E-15	9.493E-15	-15.66	361	Tl-206	2.056E-26	2.437E-26	-15.65
312	Pb-214	8.007E-15	8.030E-15	-0.28	362	Cm-241	1.398E-26	1.537E-26	-9.02
313	Np-240m	5.972E-15	6.039E-15	-1.12	363	Es-255	3.827E-30	8.631E-30	-55.66
314	Bi-214	5.946E-15	5.962E-15	-0.28	364	Yb-169	0.000E+00	3.988E-37	-100.00
315	Se-75	4.420E-15	4.439E-15	-0.43	365	Mo-92	2.219E-22	0.000E+00	inf
316	Bi-208	3.631E-15	4.305E-15	-15.66	366	Tc-95m	9.032E-34	0.000E+00	inf
317	Rb-83	4.041E-15	4.038E-15	0.08	367	Eu-149	3.335E-27	0.000E+00	inf
318	Fr-223	2.891E-15	2.892E-15	-0.03					
319	Yb-168	3.274E-15	2.887E-15	13.40					
320	Fr-221	1.584E-15	1.612E-15	-1.73					
321	Ag-108	1.518E-15	1.522E-15	-0.28					
322	Po-218	9.431E-16	9.458E-16	-0.28					
323	Sn-113	7.250E-16	7.305E-16	-0.75					
324	Rn-219	6.074E-16	6.175E-16	-1.63					
325	Tc-97m	3.318E-16	3.316E-16	0.07					
326	Ru-103	2.023E-16	2.021E-16	0.08					
327	Bk-250	3.937E-17	8.576E-17	-54.09					
328	Pm-148m	5.050E-17	5.105E-17	-1.09					
329	Am-245	4.931E-17	5.065E-17	-2.65					
330	Ac-228	2.254E-17	2.255E-17	-0.04					
331	Tl-209	1.453E-17	1.478E-17	-1.73					
332	Cd-115m	9.324E-18	9.304E-18	0.21					
333	Sr-85	4.925E-18	5.019E-18	-1.88					
334	Pu-246	4.236E-18	4.374E-18	-3.14					
335	Kr-83m	2.755E-18	2.753E-18	0.08					
336	As-73	2.495E-18	2.492E-18	0.10					
337	In-114m	1.153E-18	1.160E-18	-0.55					
338	Tm-168	1.214E-18	1.057E-18	14.79					
339	In-113m	4.354E-19	4.387E-19	-0.75					
340	Pm-148	3.471E-19	3.510E-19	-1.09					
341	Po-215	2.682E-19	2.726E-19	-1.63					
342	Zr-88	2.174E-19	2.172E-19	0.09					
343	Po-211	2.135E-19	2.171E-19	-1.63					
344	Rh-103m	2.005E-19	2.003E-19	0.08					
345	At-217	1.709E-19	1.739E-19	-1.73					
346	Po-212	9.529E-20	9.672E-20	-1.48					
347	Pu-237	7.837E-20	8.846E-20	-11.41					
348	Ce-141	5.524E-20	5.425E-20	1.83					
349	Am-246	1.058E-20	1.093E-20	-3.14					
350	Te-129m	3.302E-21	3.280E-21	0.65					

表 3.3.5 ORIGEN2 の計算結果との比較 (PWR34_ACTIVATION : 冷却なし)

番号	核種	放射能 (Ci)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2	
1	N-16	6.081E+02	6.103E+02	-0.35
2	O-19	5.310E+00	5.328E+00	-0.35
3	C-14	2.291E+00	2.296E+00	-0.22
4	C-15	1.192E+00	1.196E+00	-0.35
5	N-13	3.273E-02	3.284E-02	-0.34
6	B-12	1.784E-02	1.792E-02	-0.50
7	Li-8	8.885E-04	8.933E-04	-0.53
8	Be-8	8.885E-04	8.933E-04	-0.53
9	F-20	2.841E-04	2.856E-04	-0.53
10	Be-11	2.552E-05	2.567E-05	-0.57
11	Be-10	2.068E-06	2.076E-06	-0.41
12	H-3	2.576E-07	2.591E-07	-0.59
13	He-6	2.575E-11	2.596E-11	-0.82
14	H-4	3.491E-14	3.523E-14	-0.89
15	Ne-23	2.990E-16	3.022E-16	-1.08
16	Na-24	9.478E-20	9.633E-20	-1.60
17	Na-24m	3.994E-20	4.040E-20	-1.13
18	Na-22	4.318E-25	0.000E+00	inf

表 3.3.6 ORIGEN2 の計算結果との比較 (BS340_ZIRCALOY2 : 冷却後) (1/2)

番号	核種	放射能 (Ci)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	放射能 (Ci)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
1	Co-60	5.779E+02	5.782E+02	-0.04	51	Na-22	2.414E-11	2.415E-11	-0.05
2	Sb-125	2.626E+02	2.621E+02	0.19	52	K-42	6.475E-12	6.478E-12	-0.04
3	Te-125m	9.748E+01	9.729E+01	0.19	53	Ar-42	6.475E-12	6.478E-12	-0.04
4	Fe-55	5.040E+01	5.043E+01	-0.05	54	Te-127m	4.683E-12	4.800E-12	-2.43
5	Ni-63	3.717E+01	3.718E+01	-0.04	55	Te-127	4.587E-12	4.701E-12	-2.43
6	Sn-121m	4.277E+00	4.279E+00	-0.04	56	Pd-107	3.238E-12	3.239E-12	-0.04
7	Sn-121	3.319E+00	3.320E+00	-0.04	57	Nb-95	1.486E-12	1.486E-12	-0.04
8	C-14	1.776E+00	1.777E+00	-0.04	58	I-129	1.067E-12	1.126E-12	-5.21
9	Zr-93	4.960E-01	4.962E-01	-0.04	59	W-185	9.430E-13	9.435E-13	-0.05
10	Ni-59	2.929E-01	2.930E-01	-0.04	60	Zr-95	6.739E-13	6.741E-13	-0.04
11	Nb-93m	1.978E-01	1.978E-01	-0.04	61	Cl-36	2.883E-13	2.884E-13	-0.04
12	Sn-119m	6.201E-02	6.203E-02	-0.04	62	Co-58	1.960E-13	1.961E-13	-0.04
13	Nb-94	5.699E-02	5.701E-02	-0.04	63	Sc-46	1.029E-13	1.029E-13	-0.04
14	Mn-54	3.003E-02	3.004E-02	-0.04	64	Rb-87	9.014E-15	9.018E-15	-0.04
15	Mo-93	8.579E-03	8.583E-03	-0.04	65	Hf-175	8.316E-15	8.319E-15	-0.04
16	Y-90	3.240E-03	3.242E-03	-0.04	66	Nb-95m	6.427E-15	6.430E-15	-0.04
17	Sr-90	3.239E-03	3.241E-03	-0.04	67	Tm-171	4.609E-15	4.611E-15	-0.04
18	Ca-41	2.595E-03	2.596E-03	-0.04	68	In-115	1.106E-15	1.107E-15	-0.10
19	Ag-109m	1.155E-03	1.156E-03	-0.05	69	Re-188	1.055E-15	1.050E-15	0.46
20	Cd-109	1.155E-03	1.156E-03	-0.05	70	W-188	1.044E-15	1.039E-15	0.46
21	H-3	2.934E-04	2.935E-04	-0.04	71	V-50	5.971E-16	5.973E-16	-0.04
22	Tc-99	1.557E-04	1.558E-04	-0.03	72	Cs-134	3.351E-16	3.998E-16	-16.18
23	Ar-39	7.975E-05	7.979E-05	-0.04	73	Rh-106	2.637E-16	2.640E-16	-0.09
24	Zn-65	2.288E-05	2.289E-05	-0.06	74	Ru-106	2.637E-16	2.640E-16	-0.08
25	Pt-193	1.401E-05	1.557E-05	-9.99	75	Te-123	1.820E-16	1.834E-16	-0.75
26	Ta-182	4.004E-06	4.006E-06	-0.05	76	Rh-102	1.350E-16	1.352E-16	-0.11
27	Hf-182	3.988E-06	3.990E-06	-0.04	77	Ir-192	8.917E-17	9.333E-17	-4.45
28	Ag-108m	2.462E-06	2.463E-06	-0.07	78	Sb-124	3.595E-17	3.596E-17	-0.04
29	In-113m	1.038E-06	1.038E-06	-0.04	79	Y-91	2.295E-17	2.296E-17	-0.05
30	Sn-113	1.037E-06	1.038E-06	-0.04	80	Cd-113	6.713E-18	6.718E-18	-0.07
31	Be-10	9.531E-07	9.535E-07	-0.04	81	Sr-89	2.038E-20	2.039E-20	-0.05
32	Ca-45	6.828E-07	6.822E-07	0.10	82	In-114m	2.010E-20	2.011E-20	-0.09
33	Re-187	3.537E-07	3.537E-07	-0.02	83	In-114	1.944E-20	1.946E-20	-0.09
34	Nb-92	2.546E-07	2.547E-07	-0.04	84	S-35	1.487E-20	1.488E-20	-0.04
35	Ag-110m	2.346E-07	2.347E-07	-0.04	85	Tc-97	2.000E-21	2.021E-21	-1.07
36	Ag-108	2.142E-07	2.143E-07	-0.07	86	Cs-135	1.978E-22	2.412E-22	-17.97
37	K-40	1.586E-07	1.586E-07	-0.04	87	Tm-170	5.805E-23	5.975E-23	-2.85
38	Kr-85	1.280E-07	1.281E-07	-0.04	88	Hf-181	1.761E-23	1.760E-23	0.07
39	Sn-123	1.004E-07	1.004E-07	-0.04	89	Fe-59	7.121E-24	7.122E-24	-0.02
40	P-32	1.392E-08	1.392E-08	-0.04	90	Y-89m	3.058E-24	3.059E-24	-0.05
41	Si-32	1.391E-08	1.392E-08	-0.04	91	Cs-137	3.841E-23	2.518E-24	1.43E+03
42	W-181	1.385E-08	1.386E-08	-0.04	92	Ba-137m	3.637E-23	2.385E-24	1.43E+03
43	Te-123m	6.056E-09	6.096E-09	-0.66	93	Cd-115m	8.551E-26	8.552E-26	-0.01
44	Lu-177m	3.489E-09	3.489E-09	0.02	94	Sr-85	1.016E-26	1.019E-26	-0.34
45	Ag-110	3.191E-09	3.192E-09	-0.04	95	Tc-97m	2.741E-30	3.833E-30	-28.48
46	Lu-177	8.009E-10	8.007E-10	0.02	96	Ar-37	0.000E+00	1.255E-30	-100.00
47	Tc-98	5.948E-11	5.966E-11	-0.30	97	Ru-103	0.000E+00	7.073E-31	-100.00
48	Lu-176	3.983E-11	3.984E-11	-0.04	98	I-125	0.000E+00	4.792E-31	-100.00
49	Ir-194	2.372E-11	2.638E-11	-10.09	99	Se-79	1.011E-28	0.000E+00	inf
50	Os-194	2.371E-11	2.637E-11	-10.09	100	Kr-81	1.502E-26	0.000E+00	inf

表 3.3.6 ORIGEN2 の計算結果との比較 (BS340_ZIRCALOY2 : 冷却後) (2/2)

番号	核種	放射能 (Ci)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2	
101	Ba-133	1.155E-22	0.000E+00	inf
102	Tl-204	1.596E-25	0.000E+00	inf
103	Pb-204	2.334E-41	0.000E+00	inf
104	Pb-205	2.071E-36	0.000E+00	inf

表 3.3.7 ORIGEN2 の計算結果との比較 (BS340_INCONEL718 : 冷却後)

番号	核種	放射能 (Ci)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)	番号	核種	放射能 (Ci)		CRAMO/ ORIGEN - 1 (%)
		CRAMO	ORIGEN2				CRAMO	ORIGEN2	
1	Co-60	2.893E+05	2.894E+05	-0.04	51	Sr-89	4.076E-27	4.081E-27	-0.11
2	Ni-63	3.516E+04	3.517E+04	-0.04	52	Tc-97m	1.660E-27	1.657E-27	0.16
3	Fe-55	8.099E+03	8.103E+03	-0.05	53	Ru-103	4.323E-28	4.323E-28	0.01
4	Ni-59	2.796E+02	2.797E+02	-0.04	54	Sr-85	3.082E-30	3.194E-30	-3.53
5	Nb-94	2.920E+01	2.922E+01	-0.04	55	Y-89m	0.000E+00	6.161E-31	-100.00
6	Mo-93	5.233E+00	5.236E+00	-0.04	56	Se-79	5.933E-34	0.000E+00	inf
7	Mn-54	3.734E+00	3.735E+00	-0.05	57	Kr-81	6.053E-32	0.000E+00	inf
8	Nb-93m	1.946E+00	1.947E+00	-0.04	58	Cd-113	4.348E-38	0.000E+00	inf
9	Tc-99	9.226E-02	9.228E-02	-0.01	59	In-115	9.011E-40	0.000E+00	inf
10	Zn-65	1.375E-03	1.376E-03	-0.10					
11	Zr-93	3.311E-04	3.312E-04	-0.04					
12	C-14	2.436E-04	2.437E-04	-0.04					
13	Nb-92	1.375E-04	1.375E-04	-0.04					
14	H-3	1.694E-05	1.695E-05	-0.04					
15	Be-10	6.546E-06	6.549E-06	-0.04					
16	Cl-36	5.549E-06	5.551E-06	-0.04					
17	Y-90	1.790E-06	1.791E-06	-0.04					
18	Sr-90	1.789E-06	1.790E-06	-0.04					
19	Ca-45	7.787E-07	7.778E-07	0.11					
20	P-32	5.750E-07	5.752E-07	-0.04					
21	Si-32	5.748E-07	5.751E-07	-0.04					
22	Tc-98	3.577E-08	3.588E-08	-0.29					
23	Co-58	1.871E-10	1.872E-10	-0.04					
24	Ar-39	1.415E-10	1.416E-10	-0.05					
25	Sc-46	1.571E-11	1.572E-11	-0.04					
26	S-35	3.601E-12	3.603E-12	-0.04					
27	Rh-106	1.609E-13	1.610E-13	-0.08					
28	Ru-106	1.609E-13	1.610E-13	-0.08					
29	V-50	1.134E-13	1.135E-13	-0.04					
30	Rh-102	8.220E-14	8.219E-14	0.01					
31	K-42	6.708E-14	6.712E-14	-0.05					
32	Ar-42	6.708E-14	6.711E-14	-0.05					
33	Na-22	3.189E-14	3.190E-14	-0.05					
34	Kr-85	3.643E-15	3.645E-15	-0.05					
35	Ca-41	6.891E-16	6.898E-16	-0.10					
36	Pd-107	3.013E-16	3.036E-16	-0.77					
37	Nb-95	1.251E-17	1.251E-17	-0.04					
38	Zr-95	5.673E-18	5.675E-18	-0.05					
39	Tc-97	1.213E-18	1.226E-18	-1.06					
40	Ag-110m	1.661E-19	1.526E-19	8.86					
41	Nb-95m	5.411E-20	5.413E-20	-0.04					
42	Y-91	2.166E-20	2.167E-20	-0.03					
43	Ag-109m	2.318E-22	1.241E-20	-98.13					
44	Cd-109	2.318E-22	1.241E-20	-98.13					
45	Rb-87	2.893E-21	2.949E-21	-1.91					
46	Ag-110	2.259E-21	2.294E-21	-1.51					
47	K-40	1.653E-21	1.654E-21	-0.06					
48	Fe-59	1.286E-21	1.286E-21	-0.02					
49	Ag-108m	4.693E-22	2.874E-22	63.28					
50	Ag-108	4.083E-23	2.501E-23	63.28					

4. おわりに

評価済み核データライブラリ JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット ORLIBJ40 と、汎用炉心解析システム MARBLE に実装されたチェビシェフ有理関数近似法に基づく燃焼計算ソルバーを組み合わせた燃焼計算コード CRAMO を開発した。本来、ORLIBJ40 は燃焼計算ソルバーとして ORIGEN2 コードを必要とするが、チェビシェフ有理関数近似法に基づく燃焼計算ソルバーを利用することで、ORIGEN2 コードを用いずに ORLIBJ40 と同等の計算結果が得られることを確認した。今後は JENDL のデータを利用するための基盤技術として、ORIGEN2 コードの代わりにチェビシェフ有理関数近似法に基づく燃焼計算ソルバーを利用できると考えられる。

評価済み核データライブラリ JENDL を ORIGEN2 コードと組み合わせて利用する ORIGEN2 用断面積ライブラリセット ORLIB は、これまでに、JENDL-3.2、JENDL-3.3、JENDL-4.0 に基づくものとして、それぞれ、ORLIBJ32、ORLIBJ33、ORLIBJ40 が開発されてきており、JENDL の普及に大きく寄与してきた。今後は、評価済み核データライブラリのデータとチェビシェフ有理関数近似法に基づく燃焼計算ソルバーを組み合わせた燃焼計算コードを提供することで、最新の評価済み核データライブラリの性能を最大限に利用した燃焼計算コードを提供できると考えられる。

参考文献

- 1) T. Nakagawa, K. Shibata, S. Chiba, T. Fukahori, Y. Nakajima, Y. Kikuchi, T. Kawano, Y. Kanda, T. Ohsawa, H. Matsunobu, M. Kawai, A. Zukeran, T. Watanabe, S. Igarashi, K. Kosako and T. Asami: “Japanese evaluated nuclear data library, version 3 revision-2; JENDL-3.2,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 12, pp. 1259–1271 (1995).
- 2) K. Shibata, T. Kawano, T. Nakagawa, O. Iwamoto, J. Katakura, T. Fukahori, S. Chiba, A. Hasegawa, T. Murata, H. Matsunobu, T. Ohsawa, Y. Nakajima, T. Yoshida, A. Zukeran, M. Kawai, M. Baba, M. Ishikawa, T. Asami, T. Watanabe, Y. Watanabe, M. Igashira, N. Yamamuro, H. Kitazawa, N. Yamano and H. Takano: “Japanese evaluated nuclear data library version 3 revision-3: JENDL-3.3,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 11, pp. 1125–1136 (2002).
- 3) K. Shibata., O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada and J. Katakura: “JENDL-4.0: A new library for nuclear science and engineering,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 48, no. 1, pp. 1–30 (2011).
- 4) A. G. Croff: “ORIGEN2 – a revised and updated version of the Oak Ridge isotope generation and depletion code,” ORNL-5621 (1980), 63p.
- 5) A. G. Croff: “A user’s manual for the ORIGEN2 computer code,” ORNL/TM-7175 (1980), 197p.
- 6) 須山賢也, 片倉純一, 大川内靖, 石川眞 : “JENDL-3.2 に基づく ORIGEN2 用ライブラリ : ORLIBJ32”, JAERI-Data/Code 99-003 (1999), 83p.
- 7) 片倉純一, 片岡理治, 須山賢也, 神智之, 大木繁夫 : “JENDL-3.3 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット : ORLIBJ33”, JAERI-Data/Code 2004-015 (2004), 115p.
- 8) 奥村啓介, 杉野和輝, 小嶋健介, 神智之, 岡本力, 片倉純一 : “JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット : ORLIBJ40”, JAEA-Data/Code 2012-032 (2013), 148p.
- 9) 須山賢也, 横山賢治 : “もう一つの重要なピース キラーソフトとしての国産一点炉燃焼計算コード”, 核データニュース, no. 119, pp. 38–47 (2018).
- 10) A. Yamamoto, M. Tatsumi and N. Sugimura: “Numerical solution of stiff burnup equation with short half lived nuclides by the Krylov subspace method,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 2, pp. 147–154 (2007).

- 11) M. Pusa and J. Leppänen: “Computing the matrix exponential in burnup calculations,” Nucl. Sci. Eng., vol. 164, no. 2, pp. 140–150 (2010).
- 12) 横山賢治, 神智之, 平井康志, 羽様平：“汎用炉心解析システム MARBLE2 の開発”, JAEA-Data/Code 2015-009 (2015), 120p.
- 13) 横山賢治, 神智之 :“高速炉用オブジェクト統合型解析システムの研究開発(14) MARBLE の燃焼・崩壊熱計算機能の拡張”, 日本原子力学会 2016 年秋の大会予稿集, 3L06 (2016).
- 14) E. Gallopoulos and Y. Saad: “Efficient solution of parabolic equations by Krylov approximation methods,” SIAM, J. Sci. Stat. Comput., vol. 13, no. 5, pp. 1236–1264 (1992).
- 15) M. Pusa: “Rational approximations to the matrix exponential in burnup calculations,” Nucl. Sci. Eng., vol. 169, no. 2, pp. 155–167 (2011).
- 16) M. Pusa: “Correction to partial fraction decomposition coefficients for Chebyshev rational approximation on the negative real axis,” arXiv:1206.2880v1 [math.NA] (2012).
- 17) M. Pusa: “Higher-order chebyshev rational approximation method and application to burnup equations,” Nucl. Sci. Eng., vol. 182, pp. 297–318 (2016).
- 18) S. van der Walt, S. C. Colbert and G. Varoquaux: “The NumPy array: A structure for efficient numerical computation,” Comput. Sci. Eng., vol. 13, no. 2, pp. 22–30 (2011).
- 19) P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, E. Burovski, P. Peterson, W. Weckesser, J. Bright, S. J. van der Walt, M. Brett, J. Wilson, K. Jarrod Millman, N. Mayorov, A. R. J. Nelson, E. Jones, R. Kern, E. Larson, C. Carey, İ. Polat, Y. Feng, E. W. Moore, J. VanderPlas, D. Laxalde, J. Perktold, R. Cimrman, I. Henriksen, E. A. Quintero, C. R. Harris, A. M. Archibald, A. H. Ribeiro, F. Pedregosa, P. van Mulbregt and SciPy 1.0 Contributors: “Scipy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in python,” Nat. Methods, vol. 17, pp. 261–272 (2020).
- 20) K. Suyama: “A complete package of ORIGEN2 libraries based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3,” OECD Nuclear Energy Agency. <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/NEA-1642> (参照: 2021.02.02).
- 21) 山本建士, 奥村啓介, 小嶋健介, 岡本力：“炉内構造物の放射化核種の主要な生成経路（共同研究）”, JAEA-Research 2013-038 (2014), 88p.
- 22) A. Tsilanizara, N. Gilardi, T. Huynh, C. Jouanne, S. Lahaye, J. Martinez and C. Diop: “Probabilistic approach for decay heat uncertainty estimation using URANIE platform and MENDEL depletion code,” Ann. Nucl. Energy, vol. 90, pp. 62–70 (2016).

- 23) K. Yokoyama and S. Lahay: “Benchmarks of depletion and decay heat calculation between mendel and marble,” Proc. of Joint Int. Conf. on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2020 (2020).

付録A ユーザーマニュアル

A.1 実行方法と出力ファイル

A.1.1 実行方法

CRAMO は、オブジェクト指向スクリプト言語 Python の `cramo` という名前のモジュールとして実装されており、Python から `cramo` モジュールを呼び出すことで実行することができる。具体的には、後述する入力ファイルを作成して、以下のようなコマンドを実行する。

```
$ python -m cramo <入力ファイル名>
```

A.1.2 出力ファイル

前述のコマンドを実行すると、すべての燃焼ステップの核種の原子個数の計算結果が、CSV (Comma Separated Value) 形式のファイルにまとめられて出力される。出力ファイルは、上記のコマンドを実行したディレクトリに生成され、ファイル名は、入力ファイル名に拡張子 (.csv) が追加されたものとなる。

CRAMO では、計算結果を表計算ソフト等で後処理することを想定して、CSV 形式ファイルを採用している。なお、後述する入力ファイルの `output` / `unit` サブセクションで計算結果の単位を指定した場合は、指定した数だけ追加で CSV 形式ファイルが出力される。出力されるファイル名は、入力ファイル名に単位名と拡張子 (.csv) が追加されたものになる。

A.2 入力ファイル

CRAMO の入力ファイルは、YAML 形式と呼ばれるテキストファイルで作成する。YAML 形式ファイルでは、行頭にハイフン (-) をつけることで配列（リスト）を、キーワードにコロン（:）をつけることで名前付きの配列（ハッシュ、辞書）を表す。また、YAML 形式ファイルでは、字下げ（インデント）で構造を表すことが可能であり、リストとハッシュを入れ子にした構造化されたデータを表現することができる。

CRAMO の入力ファイルでは、名前付きの配列を使って、以下の項目（セクション）を入力する。

- `title`: 計算ケース名
- `decay_library`: 使用する ORIGEN2 の崩壊定数ライブラリ名
- `xsfpy_library`: 使用する ORIGEN2 の断面積・核分裂収率ライブラリ名
- `unit`: 入力する組成、時間の単位
- `initial_material`: 初期組成

- **mode** : 計算モード（計算に用いる ORIGEN2 の燃焼チェーンの指定）
- **executions** : 照射・冷却条件
- **output** : 出力設定

なお、一部のセクションは入れ子になったサブセクションを持つ。以下、サブセクションでの入力項目を含めて、各セクションの詳細を説明する。

A.2.1 **title** セクション

計算ケースを識別するための任意の文字列を指定する。出力ファイル等に印字されるだけで、数値計算結果には影響しない。

A.2.2 **decay_library** セクション

計算に使用する ORIGEN2 の崩壊定数ライブラリ名（CRAMO 用のライブラリ名）を入力する。現在の CRAMO は ORLIBJ40 のみに対応しており、ORLIBJ40 の崩壊定数ライブラリは一つしかないので、CRAMO で使える崩壊定数ライブラリは **orlibj40_DECAYJ40** のみである。

A.2.3 **xsfpy_library** セクション

計算に使用する ORIGEN2 の断面積・核分裂収率ライブラリ名（CRAMO 用のライブラリ名）を入力する。CRAMO 用のライブラリ名は、基本的には ORLIBJ40 のライブラリ名と同じであるが、ORLIBJ40 のライブラリであることを示すために、ORLIBJ40 のライブラリ名の前に「**orlibj40_**」を付加した名前になっている。例えば、ORLIBJ40 のライブラリ PWR34J40 を使いたい場合は、**xsfpy_library** に「**orlibj40_PWR34J40**」と指定する。CRAMO で利用できる軽水炉用のライブラリ、高速炉用のライブラリを、それぞれ、表 A.2.1、A.2.2 に示す。

表 A.2.1 ORLIBJ40 の軽水炉用ライブラリ一覧（文献 8 の表 3.1.1 より引用）と CRAMO のライブラリ名

ORLIB のライブラリ名	代表燃料	CRAMO のライブラリ名
PWR34I40	PWR, 17 × 17, UO ₂ 濃縮度 3.4wt%	orlibj40_PWR34J40
PWR41I40	PWR, 17 × 17, UO ₂ 濃縮度 4.1wt%	orlibj40_PWR41J40
PWR47I40	PWR, 17 × 17, UO ₂ 濃縮度 4.7wt%	orlibj40_PWR47J40
BS100I40	BWR, STEP-I, UO ₂ 燃料 0% ボイド率	orlibj40_BS100J40
BS140I40	BWR, STEP-I, UO ₂ 燃料 40% ボイド率	orlibj40_BS140J40
BS170I40	BWR, STEP-I, UO ₂ 燃料 70% ボイド率	orlibj40_BS170J40
BS200I40	BWR, STEP-II, UO ₂ 燃料 0% ボイド率	orlibj40_BS200J40
BS240I40	BWR, STEP-II, UO ₂ 燃料 40% ボイド率	orlibj40_BS240J40
BS270I40	BWR, STEP-III, UO ₂ 燃料 70% ボイド率	orlibj40_BS270J40
BS300I40	BWR, STEP-III, UO ₂ 燃料 0% ボイド率	orlibj40_BS300J40
BS340I40	BWR, STEP-III, UO ₂ 燃料 40% ボイド率	orlibj40_BS340J40
BS370I40	BWR, STEP-III, UO ₂ 燃料 70% ボイド率	orlibj40_BS370J40
BS2M040SI40	BWR, STEP-II, 0% ボイド率, MOX Pu 富化度 4wt%, Pu 組成:Standard	orlibj40_BS2M040SJ40
BS2M044LJ40	BWR, STEP-II, 40% ボイド率, MOX Pu 富化度 4wt%, Pu 組成:Low	orlibj40_BS2M044LJ40
BS2M044SI40	BWR, STEP-II, 40% ボイド率, MOX Pu 富化度 4wt%, Pu 組成:Standard	orlibj40_BS2M044SJ40
BS2M044HJ40	BWR, STEP-II, 40% ボイド率, MOX Pu 富化度 4wt%, Pu 組成:High	orlibj40_BS2M044HJ40
BS2M047SI40	BWR, STEP-II, 70% ボイド率, MOX Pu 富化度 4wt%, Pu 組成:Standard	orlibj40_BS2M047SJ40
BS2M084SI40	BWR, STEP-II, 40% ボイド率, MOX Pu 富化度 8wt%, Pu 組成:Standard	orlibj40_BS2M084SJ40
BS2M134SI40	BWR, STEP-II, 40% ボイド率, MOX Pu 富化度 13wt%, Pu 組成:Standard	orlibj40_BS2M134SJ40
PWRM0113J40	PWR, 17 × 17, MOX Pu 富化度 13wt%, Pu 組成:Low	orlibj40_PWRM0113J40
PWRM0205J40	PWR, 17 × 17, MOX Pu 富化度 5wt%, Pu 組成:Standard	orlibj40_PWRM0205J40
PWRM0210J40	PWR, 17 × 17, MOX Pu 富化度 10wt%, Pu 組成:Standard	orlibj40_PWRM0210J40
PWRM0213J40	PWR, 17 × 17, MOX Pu 富化度 13wt%, Pu 組成:Standard	orlibj40_PWRM0213J40
PWRM0305J40	PWR, 17 × 17, MOX Pu 富化度 13wt%, Pu 組成:High	orlibj40_PWRM0305J40

表 A.2.2 ORLIBJ40 の高速炉用ライブライ一覧（文献 8 の表 4.3-2 より引用）と CRAMO のライブライ名

炉心	領域	ORLIBJ40 のライブライ名	CRAMO のライブライ名
75 万 kW _e 酸化物燃料炉心 (高除染 U-Pu 燃料)	内側炉心 外側炉心 軸方向ブランケット 径方向ブランケット	750MMXICJ40 750MMXOCJ40 750MMXOCJ40 750MMXOCJ40	orlibj40_750MMXICJ40 orlibj40_750MMXOCJ40 orlibj40_750MMXAXJ40 orlibj40_750MMXRDI40
高速実験炉「常陽」MK-I	炉心 軸方向ブランケット 径方向ブランケット	JOYOMK1COJ40 JOYOMK1AXJ40 JOYOMK1RDJ40	orlibj40_JOYOMK1COJ40 orlibj40_JOYOMK1AXJ40 orlibj40_JOYOMK1RDJ40
高速原型炉「もんじゅ」	内側炉心 外側炉心 軸方向ブランケット 径方向ブランケット	MONJMXICJ40 MONJMXAXJ40 MONJMXRDJ40	orlibj40_MONJMXICJ40 orlibj40_MONJMXAXJ40 orlibj40_MONJMXRDJ40
60 万 kW _e 酸化物燃料炉心 (軽水炉取出し Pu)	内側炉心 外側炉心 軸方向ブランケット 径方向ブランケット	600MMXICJ40 600MMXOCJ40 600MMXAXJ40 600MMXRDI40	orlibj40_600MMXICJ40 orlibj40_600MMXOCJ40 orlibj40_600MMXAXJ40 orlibj40_600MMXRDI40
60 万 kW _e 金属燃料炉心	内側炉心 外側炉心 軸方向ブランケット 径方向ブランケット	600MMTICJ40 600MMTOCJ40 600MMTAJ40 600MMTRDI40	orlibj40_600MMTICJ40 orlibj40_600MMTOCJ40 orlibj40_600MMTAJ40 orlibj40_600MMTRDI40
60 万 kW _e 硼化物燃料炉心	内側炉心 外側炉心 軸方向ブランケット 径方向ブランケット	600MNIIJCJ40 600MNILOCJ40 600MNIAJ40 600MNIRDJ40	orlibj40_600MNIIJCJ40 orlibj40_600MNILOCJ40 orlibj40_600MNIAJ40 orlibj40_600MNIRDJ40
60 万 kW _e 酸化物燃料炉心 (高速炉リサイクル Pu)	内側炉心 外側炉心 軸方向ブランケット 径方向ブランケット	600MRPICJ40 600MRPOCJ40 600MRPAXJ40 600MRPRDJ40	orlibj40_600MRPICJ40 orlibj40_600MRPOCJ40 orlibj40_600MRPAXJ40 orlibj40_600MRPRDJ40
130 万 kW _e 酸化物燃料炉心	内側炉心 外側炉心 軸方向ブランケット 径方向ブランケット	1300MXICJ40 1300MXOCJ40 1300MXAXJ40 1300MXPRDJ40	orlibj40_1300MXICJ40 orlibj40_1300MXOCJ40 orlibj40_1300MXAXJ40 orlibj40_1300MXRDJ40
Pu パーナー炉心	内側炉心 外側炉心 軸方向ブランケット 径方向ブランケット	PUBRMXICJ40 PUBRMXOCJ40	orlibj40_PUBRMXICJ40 orlibj40_PUBRMXOCJ40
150 万 kW _e 酸化物燃料炉心 (FBR 多重リサイクル TRU 燃料)	内側炉心 外側炉心 軸方向ブランケット 径方向ブランケット	1500MXICJ40 1500MXOCJ40 1500MXAXJ40 1500MXPRDJ40	orlibj40_1500MXICJ40 orlibj40_1500MXOCJ40 orlibj40_1500MXAXJ40 orlibj40_1500MXRDJ40

A.2.4 unit セクション

このセクションでは、入力する値の単位を指定する。単位を指定することができるのは、初期組成 (`initial_material`)、照射・冷却終了時刻 (`time`)、照射・冷却期間 (`interval`) である。

A.2.4.1 `unit / initial_material` サブセクション

入力する初期組成の単位として、質量（グラム）「`g`」と物質量（モル）「`mol`」を指定することができます。CRAMO の「`mol`」は ORIGEN2 の「`gram-atom`」に対応する。なお、ORIGEN2 ライブラリには、原子量のデータは含まれておらず、質量と物質量を換算する場合の原子量として原子核の質量数が用いられるが、ORIGEN2 ライブラリを利用する CRAMO でも同様の処理を行って換算される。アボガドロ数については、ORIGEN2 のソースコードを確認すると、6.022169E-01、0.6022、0.6023 等の値が使われているようであるが、CRAMO では 2004 年版の核図表掲載値 (6.0221419947E+23) を用いている。

A.2.4.2 `unit / time`、`unit / interval` サブセクション

入力する時間、期間の単位として、秒「`s`」、分「`m`」、時「`h`」、日「`d`」、年「`a`」を指定することができます。なお、ORIGEN2 では、換算係数として 3.15576×10^7 秒/年 ($= 365.25 \times 24 \times 60 \times 60$)、すなわち、365.25 日/年を用いているようであるが、閏年は厳密に 4 年に 1 回ある訳ではないので、CRAMO では換算係数として 365.2422 日/年を用いている。

A.2.5 `initial_material` セクション

このセクションでは、燃焼初期の組成を入力する。核種名は MARBLE と同じであり、基本的には「元素名-質量数」で指定する。例えば、 ^{238}U の場合は「`U-238`」となる。なお、準安定核種の場合は、最後に「`m`」を付ける。例えば、 ^{242m}Am の場合、「`Am-242m`」となる。初期組成の値は、前述の `unit / initial_material` サブセクションで指定した単位で入力する。入力にはハッシュを使い、キーワードとして核種名を、値として初期組成を入力する。なお、初期組成の値には Python の簡単な数式 (+、-、*、/ 等) を使うことができる。

A.2.6 `mode` セクション

ORIGEN2 では、核種を Actinide、Fission Product、Activation Product という概念で 3 つに分類して扱うが、アクチノイド核種が核分裂して核分裂生成物が生じるので、通常は、Actinide と Fission Product を合わせて使う。このため、CRAMO では、Actinide と Fission Product を合わせた「`actinide_fp`」と ActivationProduct に対応する「`activation`」という二つの概念に分類する。ORIGEN2 では、初期組成を 3 つの分類毎に同時に入力することができるが、CRAMO では入力

できる初期組成は一種類のみであり、Actinide と Fission Product のライブラリで定義される燃焼・崩壊チェーンで計算する「actinide_fp」モードか、Activation Product のライブラリで定義される燃焼・崩壊チェーンで計算する「activation」モードのいずれかを選択して利用する。

ORIGEN2 では 3 つの概念を組み合わせて、より複雑な計算をすることも可能であるが、CRAMO では上記のような単純な扱いとしている。このため、例えば、ORIGEN2 では、ORLIBJ40 のサンプル問題の activation.inp のように、Actinide に燃料の初期組成を入力して出力指定計算 (IRP コマンド) で燃焼計算を行い、同時に、Activation Product の初期組成に酸素や窒素を指定して放射化計算を行うといったことが可能であるが、CRAMO ではこのような計算を 1 回の計算では実行できない。

CRAMO では、このような計算を行う場合は、先に「actinide_fp」モードで燃料の燃焼計算を行っておき、計算結果として出力される各ステップの中性子束の値を使って「activation」モードで放射化計算を行うという二段階の計算が必要になる。

A.2.7 executions セクション

このセクションでは、ORIGEN2 の出力指定計算 (IRP コマンド)、中性子束指定計算 (IRF コマンド)、崩壊計算 (DEC コマンド) に相当する照射・冷却条件を入力する。

A.2.7.1 executions / irradiation サブセクション

IRP コマンドと IRF コマンドに相当する executions / irradiation サブセクションを必要な回数、リストとして指定し、出力指定計算の場合はキーワードとして「power」を指定して出力 (単位 : MW) を、中性子束指定計算の場合はキーワードとして「flux」を指定して中性子束 (単位 : $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) を入力する。なお、CRAMO では、中性子束指定計算と出力指定計算を混在させることは想定していない。

続けて、キーワードとして「time」を指定して照射終了時刻を入力する。時刻の単位は、前述の「unit」の「time」で指定した単位となる。なお、「time」の代わりに「interval」を使うと期間で指定することも可能である。この場合の単位についても「unit」の「interval」で指定した単位となる。

A.2.7.2 executions / decay サブセクション

冷却計算のステップを入れる場合は「decay」を指定する。「decay」では中性子束や出力を指定する必要はないので、「time」または「interval」のいずれかを指定するだけでよい。

A.2.8 output セクション

このセクションでは、計算結果の出力に関するオプションを指定する。

A.2.8.1 output / unit サブセクション

現状の CRAMO で出力できるのは核種毎の核種毎の質量（単位：グラム（g）、物質量（単位：モル（mol）、放射能（単位：キュリー（Ci）、ベクレル（Bq）のみである。output / unit サブセクションに、それぞれ、`g`、`mol`、`ci`、`bq` を指定することで、それぞれの単位に換算された計算結果が、CSV 形式ファイルで出力される。なお、原子個数単位（単位： $\text{yokto} = 10^{-24}$ ）の CSV 形式ファイルは常に出力されるようになっており、output / unit サブセクションを指定しなかった場合は、原子個数単位の CSV 形式ファイルのみ出力される。

A.2.8.2 output / cutoff サブセクション

チェビシェフ有理関数近似法を使った計算結果には、数値計算上の誤差等の理由により負の値が含まれることがある。また、物理的に意味がないと考えられる非常に小さい値も含まれる。このため、一定の値よりも小さい値をゼロと扱うためのオプションとして output / cutoff サブセクションを利用することができる。

「cutoff」に値を指定すると、初期組成の中で最も原子数密度が大きい核種の原子数（密度）の値を cutoff 倍した値よりも小さい原子数密度の結果はゼロとみなして、CSV 形式ファイルを作成する。

A.3 入力ファイルの例

これまでに ORIGEN2 を利用したことがあれば、同じ計算内容の ORIGEN2 の入力ファイルと CRAMO の入力ファイルを見比べることで、CRAMO の入力ファイルの内容を理解することができると考えられるので、ORIGEN2 と CRAMO の入力ファイルの例を示す。図 A.3.1 に、ORIGEN2 の入力ファイル例を示す。この入力ファイルは ORIGEN2.2-UPJ の照射後試験解析（SF98-6）のサンプル問題を ORLIBJ40 で動作するように微修正したものである。この ORIGEN2 の入力ファイルに対応する CRAMO の入力ファイルを、図 A.3.2 に示す。CRAMO には、ORIGEN2 のような組成ベクトルを操作する MOV コマンド等はないが、LIB コマンドでライブラリを指定し、INP コマンドで初期組成を入力、IRP コマンドや DEC コマンドで燃焼計算を実行するという流れは、ORIGEN2 とよく似ており、ORIGEN2 を利用したことがあれば、CRAMO の入力ファイルの内容は容易に理解できるものと思われる。

なお、CRAMO の入力ファイルでは照射履歴が長いと ORIGEN2 の入力ファイルに比べてファイルの行数が多くなってしまうが、YAML 形式ファイルにはフロー形式と呼ばれる入力方法もあり、フロー形式を使うことで行数を少なくすることが可能である。図 A.3.3 にフロー形式を使った入力ファイルの例を示す。このようにフロー形式を使うことで入力ファイルの行数を少なくできることが分かる。

```

-1
-1
-1
BAS TEST OF SF98-6(BS170J40) 2003/JUL/02
LIP 0 0 0
LIB 0 1 2 3 715 716 717 9 3 0 1 48
PHO 101 102 103 10
RDA *** -1 = FRESH MATERIALS ****
INP -1 1 -1 -1 4 4
RDA *** IRRADIATION MODULES ****
TIT TEST of SF98-6
MOV -1 1 0 1.0
HED 1 * Initial
BUP
IRP 6.0 12.21 1 2 4 2
IRP 9.0 30.81 2 3 4 0
IRP 141.0 37.98 3 4 4 0
DEC 162.0 4 5 4 0
IRP 167.0 13.76 5 6 4 0
IRP 411.0 33.13 6 7 4 0
IRP 419.0 38.36 7 8 4 0
DEC 536.0 8 9 4 0
IRP 541.0 13.76 9 10 4 0
IRP 858.0 33.13 10 11 4 0
DEC 867.0 11 1 4 0
IRP 871.0 14.34 1 2 4 0
IRP 943.0 33.71 2 3 4 0
IRP 953.0 37.98 3 4 4 0
DEC 1034.0 4 5 4 0
IRP 1037.0 15.69 5 6 4 0
IRP 1402.0 35.07 6 7 4 0
BUP
OPTL 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
OPTA 8 8 8 8 5 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
OPTF 8 8 8 8 5 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
OUT 7 1 -1 0
MOV 7 1 0 1.0
HED 1 * AfterIrr
RDA READ DECAYING DATA
DEC 6.2 1 2 5 1
OPTL 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
OPTA 8 8 8 8 5 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
OPTF 8 8 8 8 5 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8
OUT 2 1 -1 0
END
2 922340 400.0 922350 39100.0 922360 0.0 922380 960500.0
0

```

図 A.3.1 ORIGEN2 の入力例 (SF-98-6.ft05)

```

title: PIE_SF98-6 based on origen22upj/samples/pie_analysis/SF98-6.INP
decay_library: orlibj40_DECAYJ40
xsfpv_library: orlibj40_BS170J40
unit:
  initial_material: g
  time: d
initial_material:
  U-234: 400.0
  U-235: 39100.0
  U-238: 960500.0
mode: actinide_fp
executions:
  - irradiation:
    time: 6.0
    power: 12.21
  - irradiation:
    time: 9.0
    power: 30.81
  - irradiation:
    time: 141.0
    power: 37.98
  - decay:
    time: 162.0
  - irradiation:
    time: 167.0
    power: 13.76
  - irradiation:
    time: 411.0
    power: 33.13
  - irradiation:
    time: 419.0
    power: 38.36
  - decay:
    time: 536.0
  - irradiation:
    time: 541.0
    power: 13.76
  - irradiation:
    time: 858.0
    power: 33.13
  - decay:
    time: 867.0
  - irradiation:
    time: 871.0
    power: 14.34
  - irradiation:
    time: 943.0
    power: 33.71
  - irradiation:
    time: 953.0
    power: 37.98
  - decay:
    time: 1034.0
  - irradiation:
    time: 1037.0
    power: 15.69
  - irradiation:
    time: 1402.0
    power: 35.07
  - decay:
    time: 1402.0 + 6.2 * 365.25 ## ORIGEN2 uses 3.15576E+07 sec/yr (= 365.25 * 24 * 60 * 60).
output:
  cutoff: 1e-40
unit:
  - g
  - mol
  - ci
  - bq

```

図 A.3.2 CRAMO の入力例 (cramo_sf98-6.inp)

```

title: PIE_SF98-6 based on origin22upj/samples/pie_analysis/SF98-6.INP
decay_library: orlibj40_DECAYJ40
xsfpy_library: orlibj40_BS170J40
unit:
  initial_material: g
  time: d
initial_material:
  U-234: 400.0
  U-235: 39100.0
  U-238: 960500.0
mode: actinide_fp
executions:
  - irradiation: {time: 6.0, power: 12.21}
  - irradiation: {time: 9.0, power: 30.81}
  - irradiation: {time: 141.0, power: 37.98}
  - decay: {time: 162.0}
  - irradiation: {time: 167.0, power: 13.76}
  - irradiation: {time: 411.0, power: 33.13}
  - irradiation: {time: 419.0, power: 38.36}
  - decay: {time: 536.0}
  - irradiation: {time: 541.0, power: 13.76}
  - irradiation: {time: 858.0, power: 33.13}
  - decay: {time: 867.0}
  - irradiation: {time: 871.0, power: 14.34}
  - irradiation: {time: 943.0, power: 33.71}
  - irradiation: {time: 953.0, power: 37.98}
  - decay: {time: 1034.0}
  - irradiation: {time: 1037.0, power: 15.69}
  - irradiation: {time: 1402.0, power: 35.07}
  - decay: {time: 1402.0 + 6.2 * 365.25} ## ORIGEN2 uses 3.15576E+07 sec/yr (= 365.25 * 24 * 60 * 60).
output:
  cutoff: 1e-40
  unit: [g, mol, ci, bq]

```

図 A.3.3 CRAMO の入力例 (cramo_sf98-6_in_flow_style.inp)

付録B 時間ステップ依存性の検討

本文の第3章で述べたように、ORIGEN2の出力指定計算（IRPコマンド）を使う場合には、ユーザが入力する時間ステップの設定によって計算結果が変化する。また、PWR34_IRPの計算ケースでは、ORIGEN2とCRAMOの燃焼後のU-235の存在量の計算結果に約0.3%の差が見られており、核分裂数の合計量に差がある可能性がある。このため、時間ステップの分割数を変更した計算を行い、計算結果に対する時間ステップ依存性の確認を行った。

B.1 計算条件

この時間ステップ依存性の確認では、基本的にPWR34_IRPの計算ケースを用いた。ただし、PWR34_IRPの計算ケースでは、燃焼期間を1125.0日間(45GWd/t)としているが、ここでは、時間ステップの分割数を変更しやすいように、燃焼期間を900日間として計算を行った。なお、PWR34_IRPの計算ケースでは、燃焼期間を9ステップ(125日/ステップ)に分割している。また、軽水炉を対象としたライブラリには燃焼度依存断面積(variable actinide cross sections)が含まれており、通常は出力指定計算で燃焼度依存断面積を使った計算を行うが、ここでは、出力指定計算を使う効果と燃焼度依存断面積を使う効果を分離できるように、以下の3つの計算ケースを設定して、時間ステップの分割数を変更した計算を行った。

- PWR34_IRP_900D: 出力指定計算（IRPコマンド）を使用し、燃焼度依存断面積を使用する。（通常の使用方法）
- PWR34_IRP_900D_NOVACS: 出力指定計算（IRPコマンド）を使用し、燃焼度依存断面積を使用しない。
- PWR34_IRF_900D_NOVACS: 中性子束指定計算（IRFコマンド）を使用し、燃焼度依存断面積を使用しない。中性子束の値は $4.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ とした。

なお、CRAMOではライブラリで提供されている燃焼度依存断面積を自動的に利用するため、燃焼度依存断面積を使用しないようにする入力オプションはない。この計算ではソースコードを変更して燃焼度依存断面積を使用しないようにした。

B.2 計算結果

計算ケースPWR34_IRP_900D、PWR34_IRP_900D_NOVACS、PWR34_IRF_900D_NOVACSの計算結果を、それぞれ、表B.2.1、B.2.2、B.2.3に示した。なお、時間ステップの分割数を150より大きくなるとORIGEN2が正常に動作しなくなつたため、時間ステップの分割数の最大値を150とした。ここでは、期間中の核分裂数の合計数に着目して、900日燃焼後のU-235の存在量で比較を

行った。

表 B.2.1 は、前述のように、ORIGEN2 の通常の使用方法に対応するが、この表から時間ステップの分割数を変更すると計算結果が有意に変化することが分かる。ORIGEN2 では分割数を 150 より大きくすることができなかつたので、時間ステップの分割数に対して計算結果が収束しているかどうかは明確ではない。分割数 150 の結果と差は、分割数を大きくするにしたがって小さくなっているので、ORIGEN2 の結果はほぼ収束しているものと思われるが、むしろ CRAMO の結果の方が時間ステップの分割数に対する収束性は良いように見える。この表から分かるように、ORIGEN2 の通常の使用方法である出力指定計算使用・燃焼度依存断面積使用時の計算結果は、時間ステップの分割数を変更すると ORIGEN2 では、1~2 % の差が生じることが分かる。一方、CRAMO と ORIGEN2 の差は概ね 0.3 % 弱であり、最大でも約 1.2 % である。このように、ORIGEN2 の計算結果には時間ステップの分割数に伴う不確かさが含まれていると考えられる。CRAMO と ORIGEN2 の差はこの不確かさと同程度であるので、実用上は大きな問題にはならないと考えられる。

表 B.2.2 は、燃焼度依存断面積を使用しないようにした場合の計算結果であるが、この表から、燃焼度依存断面積を使用しない場合は、時間ステップの分割数の依存性は小さくなることが分かる。

表 B.2.3 は、出力指定計算も燃焼依存断面積も使わないようにした場合の計算結果であるが、このときは、時間ステップの分割数の依存性はなくなり、CRAMO と ORIGEN2 の計算結果はよく一致することが確認できる。

**表 B.2.1 出力指定計算使用・燃焼度依存断面積使用時の計算結果の時間ステップ依存性
(PWR34_IRP_900D : 900 日燃焼後の U-235 の存在量)**

分割数	日/ステップ	U-235の存在量 (mol)		CRAMO/ ORIGEN-1 (%)	分割数150との比較 (%)	
		ORIGEN2	CRAMO		ORIGEN2	CRAMO
1	900.0	1.99296E+01	1.99295E+01	0.00	-48.199	-47.565
3	300.0	3.67078E+01	3.67568E+01	0.13	-4.589	-3.292
6	150.0	3.77310E+01	3.78014E+01	0.19	-1.929	-0.544
9	100.0	3.78534E+01	3.79351E+01	0.22	-1.611	-0.192
10	90.0	3.78689E+01	3.79529E+01	0.22	-1.571	-0.145
18	50.0	3.79133E+01	3.80042E+01	0.24	-1.455	-0.011
20	45.0	3.79171E+01	3.80078E+01	0.24	-1.445	-0.001
30	30.0	3.79323E+01	3.80169E+01	0.22	-1.406	0.023
36	25.0	3.79419E+01	3.80200E+01	0.21	-1.381	0.031
50	18.0	3.80350E+01	3.80341E+01	0.00	-1.139	0.068
60	15.0	3.80347E+01	3.80219E+01	-0.03	-1.140	0.036
90	10.0	3.82465E+01	3.80113E+01	-0.61	-0.589	0.008
100	9.0	3.83096E+01	3.80102E+01	-0.78	-0.425	0.005
150	6.0	3.84732E+01	3.80082E+01	-1.21	-----	-----

表 B.2.2 出力指定計算使用・燃焼度依存断面積未使用時の計算結果の時間ステップ依存性
(PWR34_IRP_900D_NOVACS : 900 日燃焼後の U-235 の存在量)

分割数	日/ステップ	U-235の存在量 (mol)		CRAMO/ ORIGEN-1 (%)	分割数150との比較 (%)	
		ORIGEN2	CRAMO		ORIGEN2	CRAMO
1	900.0	2.27991E+01	2.27990E+01	0.00	-40.559	-40.559
3	300.0	3.79395E+01	3.79873E+01	0.13	-1.086	-0.960
6	150.0	3.83232E+01	3.83927E+01	0.18	-0.085	0.097
9	100.0	3.83175E+01	3.83981E+01	0.21	-0.100	0.111
10	90.0	3.83127E+01	3.83955E+01	0.22	-0.113	0.105
18	50.0	3.82890E+01	3.83784E+01	0.23	-0.174	0.060
20	45.0	3.82868E+01	3.83759E+01	0.23	-0.180	0.053
30	30.0	3.82849E+01	3.83681E+01	0.22	-0.185	0.033
36	25.0	3.82886E+01	3.83655E+01	0.20	-0.175	0.026
50	18.0	3.83784E+01	3.83775E+01	0.00	0.059	0.058
60	15.0	3.83678E+01	3.83671E+01	0.00	0.031	0.031
90	10.0	3.83584E+01	3.83580E+01	0.00	0.007	0.007
100	9.0	3.83575E+01	3.83571E+01	0.00	0.004	0.004
150	6.0	3.83559E+01	3.83554E+01	0.00	-----	-----

表 B.2.3 中性子束指定計算使用・燃焼度依存断面積未使用時の計算結果の時間ステップ依存性
(PWR34_IRP_900D_NOVACS : 900 日燃焼後の U-235 の存在量)

分割数	日/ステップ	U-235の存在量 (mol)		CRAMO/ ORIGEN-1 (%)	分割数150との比較 (%)	
		ORIGEN2	CRAMO		ORIGEN2	CRAMO
1	900.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
3	300.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
6	150.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
9	100.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
10	90.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
18	50.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
20	45.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
30	30.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
36	25.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
50	18.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
60	15.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
90	10.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
100	9.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	0.000	0.000
150	6.0	3.19674E+01	3.19674E+01	0.00	-----	-----

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
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI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
比體積	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
質量濃度 ^(a) 、濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	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物質濃度(substance concentration)ともよばれる。

(b) これらは無次元あるいは次元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
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	1/s
力	ニュートン	N	m kg s ⁻²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	m ² kg s ⁻²
仕事率、工率、放射束	ワット	W	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	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m ²
セルシウス温度	センチ	°C	kg s ⁻² A ⁻¹
光照度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	lm/m ²
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	グレイ	Gy	m ² s ⁻²
線量当量、周辺線量当量、方向線量当量、個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性	カタール	kat	m ² s ⁻²
			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じである。したがって、温度差や温度間隔を表す數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 ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	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
表面電荷密度	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	ファラード毎メートル	F/m	m ³ kg s ⁻⁴ A ²
透過率	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	グレイ毎秒	Gy/s	m ⁻² s ⁻³
放射強度	ワット毎メートル毎ステラジアン	W/sr	m ¹ 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	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	ゼット	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/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 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=0.1MPa=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	M	1 M=1852m
ノット	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネバール	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
デシベル	dB	

(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=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1nT=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	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J(「15°C」カロリー), 4.1868J(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
ミクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

