

核分裂生成物のマスバランス解析のための核種選定

Selection of Nuclides for Mass-balance Analysis of Fission Products

岡村 知拓 大泉 昭人 西原 健司 中瀬 正彦
竹下 健二

Tomohiro OKAMURA, Akito OIZUMI, Kenji NISHIHARA, Masahiko NAKASE
and Kenji TAKESHITA

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

分離変換技術開発ディビジョン

Partitioning and Transmutation Technology Division

Nuclear Science and Engineering Center

Nuclear Science Research Institute

Sector of Nuclear Science Research

March 2021

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2021

核分裂生成物のマスバランス解析のための核種選定

日本原子力研究開発機構 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 分離変換技術開発ディビジョン

岡村 知拓*、大泉 昭人、西原 健司、中瀬 正彦*、竹下 健二*

(2020年12月23日受理)

核燃料サイクルで発生する放射性廃棄物のマスバランスを評価するためには、原子炉運転に始まり、再処理、ガラス固化、中間貯蔵、地層処分まで含めた、分野横断的な解析が求められる。日本原子力研究開発機構では核燃料サイクルのマスバランス解析を可能とする、Nuclear Material Balance コード(NMB コード)を開発している。しかし、従来の NMB コードの解析対象は 26 核種のアクチノイドに対して核分裂生成物(FP)が 3 核種のみであり、アクチノイドのマスバランス解析に特化している。よって、バックエンドのマスバランス解析を精度良く行うために、NMB コードの計算で扱われる FP 核種数を拡充する必要がある。そこで本研究では NMB コードにおいて解析対象とすべき主要な FP 核種を選定し、NMB コードに実装するための FP リストを作成した。軽水炉ウラン燃料、軽水炉 MOX 燃料、高速炉 MOX 燃料の 2 炉型、3 燃料の条件で ORGIEN を用いた燃焼・崩壊計算を行い、質量、発熱量、放射エネルギー、被ばく線量、固化体阻害因子の 5 つの評価指標において FP 核種を選定した。また、ORIGEN と同等の計算精度を有する簡易的な燃焼チェーンを NMB コード内で構成するために必要な FP 核種を選定した。その結果、核種数が異なる 2 つの FP リスト(詳細リストと簡易リスト)を作成した。

Selection of Nuclides for Mass-balance Analysis of Fission Products

Tomohiro OKAMURA*, Akito OIZUMI, Kenji NISHIHARA, Masahiko NAKASE* and Kenji TAKESHITA*

Partitioning and Transmutation Technology 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 December 23, 2020)

Nuclear Material Balance code (NMB code) have been developed in Japan Atomic Energy Agency. The NMB code will be updated with the function of mass balance analysis at the backend process such as reprocessing, vitrification and geological disposal. In order to perform its analysis with high accuracy, it is necessary to expand the number of FP nuclides calculated in the NMB code. In this study, depletion calculation by ORIGEN code was performed under 3 different burn-up conditions such as spent uranium fuel from light water reactor, and nuclides were selected from 5 evaluation indexes such as mass and heat generation. In addition, the FP nuclides required to configure a simple burnup chain with the same calculation accuracy as ORIGEN in the NMB code was selected. As the result, two lists with different number of nuclides, such as “Detailed list” and a “Simplified list”, were created.

Keywords: Fission Product, ORIGEN, Mass-balance Analysis, Nuclear Material Balance Code,
Radioactive Waste, Back-end

* Tokyo Institute of Technology

目次

1. 緒言	1
2. 計算条件と選定方法	2
2.1 5つの評価指標における再現率を用いたFP核種の選定.....	3
2.1.1 ORIGEN 計算条件.....	3
2.1.2 評価指標の設定および選定条件	4
2.2 NMBコードにおける簡易燃焼チェーン構成に必要なFP核種の選定	8
2.2.1 NMBコードの制約と補正機能	8
2.2.2 捕獲断面積が大きいFP核種の選定	11
3. FP核種の選定結果および詳細リストと簡易リストの構築.....	12
3.1 5つの評価指標における再現率を用いたFP核種の選定結果	12
3.1.1 質量.....	12
3.1.2 発熱量	14
3.1.3 放射エネルギー.....	15
3.1.4 被ばく線量	16
3.1.5 固化体阻害因子	16
3.2 NMBコードにおける簡易燃焼チェーン構成に必要なFP核種の選定結果.....	17
3.3 NMBコードの機能更新の際に必要なFPリスト	18
4. 結言	22
謝辞	22
参考文献	22
付録 A.....	24

Contents

1. Introduction	1
2. Calculation condition and selection method.....	2
2.1 Selection of FP nuclides with the 5 evaluation indexes	3
2.1.1 Calculation conditon of ORIGEN.....	3
2.1.2 Definisition of evaluation index and selection condition.....	4
2.2 Selection of FP nuclides required for simple burnup chain configuration in NMB code	8
2.2.1 Constraints and correcting function in NMB code	8
2.2.2 Selection of FP nuclides with large capture cross section.....	11
3. Selection result and creation of FP lists for NMB code	12
3.1 Selection result of FP nuclides on 5 evaluation indexes	12
3.1.1 Mass.....	12
3.1.2 Heat generation	14
3.1.3 Radioactivity.....	15
3.1.4 Radiotoxicity.....	16
3.1.5 Inhibitor for vitrification.....	16
3.2 Selection result of FP nuclides required for simple burnup chain configuration in NMB code	17
3.3 FP list required for updating NMB code functions	18
4. Conclusion.....	22
Acknowledgment.....	22
References	22
Appendix A.....	24

表リスト

表 2-1	ORIGEN における燃焼条件と燃料の仕様	4
表 2-2	MOX 燃料の同位体組成比 [wt%]	4
表 2-3	廃棄物含有率とガラス固化制限の関係	7
表 2-4	半減期 2 日未満の主要 FP 核種	9
表 2-5	Rh-105 周辺核種の NMB コードと ORIGEN の計算結果の差	11
表 2-6	Xe-135 周辺核種の NMB コードと ORIGEN の計算結果の差	11
表 3-1	質量の値を基に選定した FP127 核種(再現率 99.9%以上)	13
表 3-2	質量の値を基に選定した FP49 核種(再現率 90.0%以上)	14
表 3-3	発熱量の値を基に選定した FP17 核種(再現率 99.9%以上)	14
表 3-4	発熱量の値を基に選定した FP8 核種(ORIGEN 再現率 90.0%以上)	15
表 3-5	放射エネルギーの値を基に選定した FP37 核種(再現率 99.9%以上)	15
表 3-6	放射エネルギーの値を基に選定した FP36 核種 (再現率 90.0%以上)	15
表 3-7	被ばく線量の値を基に選定した FP37 核種(再現率 99.9%以上)	16
表 3-8	被ばく線量の値を基に選定した FP30 核種(再現率 90.0%以上)	16
表 3-9	Mo と PGM の質量の値を基に選定した FP19 核種(再現率 99.9%以上)	17
表 3-10	NMB コード用の簡易燃焼チェーン構成のために必要な FP 核種	17
表 3-11	詳細リスト(再現率 99.9%以上、152 核種)	19
表 3-12	簡易リスト(再現率 96.9%、106 核種)	20
表 3-13	詳細リストと簡易リストにおける 5 つの評価指標の再現率	21
表 A-1	質量リスト(LWR-UO ₂)	25
表 A-2	質量リスト(LWR-MOX)	26
表 A-3	質量リスト(FBR)	27
表 A-4	発熱量リスト(LWR-UO ₂)	28
表 A-5	発熱量リスト(LWR-MOX)	28
表 A-6	発熱量リスト(FBR)	28
表 A-7	放射エネルギーリスト(LWR-UO ₂)	29
表 A-8	放射エネルギーリスト(LWR-MOX)	29
表 A-9	放射エネルギーリスト(FBR)	30
表 A-10	被ばく線量リスト(LWR-UO ₂)	30
表 A-11	被ばく線量リスト(LWR-MOX)	31
表 A-12	被ばく線量リスト(FBR)	31
表 A-13	Mo/PGM リスト(LWR-UO ₂)	32
表 A-14	Mo/PGM リスト(LWR-MOX)	32
表 A-15	Mo/PGM リスト(FBR)	32

図リスト

図 2-1 FPリストの作成フロー	2
図 2-2 150 万 kWe 酸化物燃料炉心 (FBR 多重リサイクル TRU 燃料) の炉心構成図	3
図 2-3 崩壊チェーン	10
図 2-4 分岐を持つ崩壊チェーン	10

1. 緒言

核燃料サイクルで発生する放射性廃棄物のマスバランスを評価するためには、原子炉運転に始まり、再処理、ガラス固化、中間貯蔵、地層処分まで含めた、分野横断的な解析が求められる。日本原子力研究開発機構では核燃料サイクルのマスバランス解析を可能とする Nuclear Material Balance コード(NMB コード)[1]が開発されている。従来の NMB コードでは半減期 2 日以上 of 燃焼計算に影響するアクチノイド 26 核種と、核分裂生成物(FP)の中でも長半減期を持つ Tc-99 と I-129 の 2 核種、その他の FP 核種の核分裂収率及び質量を全て集約した疑似核種(FPs)の合計 29 核種が扱われている。

NMB コードのアクチノイド核種それぞれの燃焼・崩壊計算の精度は、ORIGEN[2]と同程度であることが確認されている[3]。FP に関しては Tc-99 と I-129 以外の核種は全て FPs に集約されているため、NMB コードの燃焼計算から算出される FP 総質量は ORIGEN の計算結果と同等である。一方で個々の FP 核種は全て FPs に集約されているため、ORIGEN から出力される FP の発熱量や放射エネルギーを再現することは難しい。FP の発熱量や放射エネルギーはガラス固化体発生量や地層処分場面積に関係しているため、従来の NMB コードでは核燃料サイクルのバックエンドにおけるマスバランス解析に課題がある。NMB コードの FP の燃焼・崩壊計算の精度を ORIGEN と同程度にし、バックエンドのマスバランス解析を改良するためには、NMB コードで計算される FP 核種の数を拡充することが求められる。しかし、ORIGEN で計算される FP は安定核種も含めて約 1200 核種あり、それら全てを NMB コード上で扱うことは計算時間の観点から現実的ではない。そのため、NMB コードでの燃焼・崩壊計算の計算時間を抑えつつ、ORIGEN と同程度の計算精度を NMB コードで実現するために必要な FP 核種を選定する必要がある。

そこで本研究では ORIGEN を用いて、軽水炉 UO₂ 燃料(LWR-UO₂)、軽水炉 MOX 燃料(LWR-MOX)、高速炉 MOX 燃料(FBR)を対象とした燃焼・崩壊計算をそれぞれ行い、質量、発熱量、放射エネルギー、被ばく線量、固化体阻害因子の 5 つの評価指標に影響のある FP 核種を選定する。また、ORIGEN と同等の計算精度となる簡易的な燃焼チェーンを NMB コード内で構成するのに必要な FP 核種を選定する。その上で、NMB コードのバックエンドのマスバランス解析に必要となる FP リストとして、FP 核種数の異なる詳細リストと簡易リストを作成する。2 種類の FP リストを作成する理由は、求める計算精度と時間によって、扱べき FP 核種数を使い分けられるようにするためである。再現率の定義や 5 つの評価指標を用いた理由、計算条件については次章以降に詳しく説明する。

2. 計算条件と選定方法

FPリストの作成フローを図 2-1 に示す。まず ORIGEN を用いて LWR-UO₂、LWR-MOX、FBR の燃焼・崩壊計算を行う。ここで計算された 3 つの使用済燃料 (SNF) を対象とし、5 つの評価指標 (質量、発熱量、放射エネルギー、被ばく線量、固化体阻害因子) の再現率が 99.9% 及び 90.0% 以上となるようにそれぞれ FP 核種を選定する。被ばく線量は各核種の放射エネルギーに線量換算係数を乗じた値である。また固化体阻害因子はガラス固化時に熔融炉の運転やガラスの品質に影響を与えると考えられる元素 (Mo と PGM) を指している。再現率は式 (1) を用いて算出する。

次に NMB コードの燃焼計算の速度と精度の要件から、後述する例外を除き、選定した FP 核種から半減期 2 日以上 of 核種だけを抽出する。ここで抽出した FP 核種を用いて NMB コードで燃焼計算を行い、ORIGEN と同程度の計算精度になる燃焼チェーンが構成されているか検証する。この検証を通して NMB コードの燃焼計算の精度が ORIGEN と同程度になるように、燃焼チェーンの構成に必要な FP 核種を選定する。なお、半減期が 2 日以内であっても燃焼チェーンに影響を与える FP 核種は、燃焼チェーンの構成に必要な核種として選定する。

以上の検討で選定した FP 核種を用いて、ORIGEN の燃焼・崩壊計算を再現する FP リスト (詳細リストと簡易リスト) を作成する。

$$\text{再現率 (例えば質量)} = \frac{\text{選定した FP 核種の ORIGEN 計算結果 (質量) の総和}}{\text{FP 全核種の ORIGEN 計算結果 (質量) の総和}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

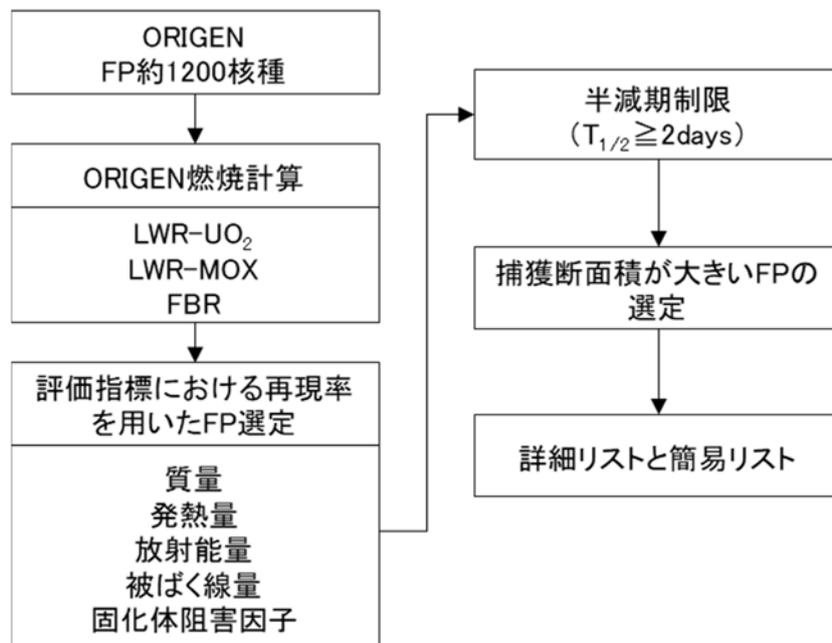


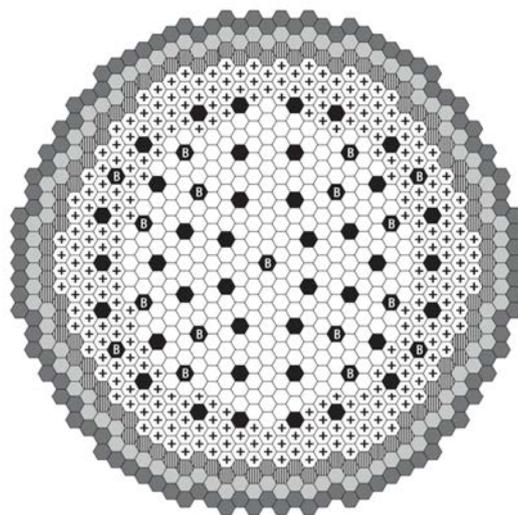
図 2-1 FP リストの作成フロー

2.1 5つの評価指標における再現率を用いたFP核種の選定

2.1.1 ORIGEN 計算条件

本検討の燃焼・崩壊計算は ORIGEN2.2-upj[2]を用いて実施した。実効断面積ライブラリには ORLIBJ40[4]を用いた。軽水炉用の燃焼計算には ORLIBJ40 に示された 1100MW 級の 17×17 燃料集合体の加圧水型軽水炉(PWR)を用いた。高速炉用には FaCT プロジェクト[5]で大型炉心に位置づけられている 150 万 kWe 酸化物燃料炉を使用した(図 2-2)。今回の検討で用いた高速炉は、初期燃料組成が異なる MOX 燃料が内側炉心と外側炉心にそれぞれ装荷される仕様になっている。初期燃料組成の異なる内側炉心と外側炉心の燃焼計算を行った結果、SNF の FP 組成に大きな変化はなかった。そのため本検討では、高速炉用の燃焼計算に内側炉心を用いた。

表 2-1 に各炉心運転における燃焼条件と燃料の仕様を示す。また LWR-MOX と FBR の初期燃料組成を表 2-2 に示す。LWR-UO₂と LWR-MOX の燃焼条件に比出力 38 MW/tHM、燃焼度 45 GWd/tHM を用いた。LWR-UO₂の初期燃料の濃縮度は 4.5wt%、LWR-MOX の初期燃料の TRU 富化度は 12wt%に設定した。FBR の燃焼条件に関して、文献[4]および、文献[5]を参考に比出力 73.5 MW/tHM、燃焼度 150 GWd/tHM を用いた。また、FBR の TRU 富化度は 22.1wt%に設定した。



○	内側炉心燃料集合体	288体
⊕	外側炉心燃料集合体	274体
▨	径方向ブランケット	96体
●	SUS遮へい体(1層)	102体
●	Zr-H遮へい体(1層)	108体
●	主炉停止系制御棒	40体
●	後備炉停止系制御棒	17体
合 計		925体

図 2-2 150 万 kWe 酸化物燃料炉心(FBR 多重リサイクル TRU 燃料)の炉心構成図 [4]

表 2-1 ORIGIN における燃焼条件と燃料の仕様

	LWR-UO ₂	LWR-MOX	FBR
燃焼度 [GWd/tHM]	45	45	150
U-235 濃縮度 [wt%]	4.5	0.166	0.234
TRU 富化度 [wt%]	0	12	22.1
Pu 富化度*1 [wt%]	0	11.676	21.1
MA 含有量 [wt%]	0	0.324	1.0
比出力 [MW/tHM]	38	38	73.5
運転日数 [days]	1184.21	1184.21	2040.816

*1 Pu 富化度 = Pu / (U + Pu + MA)

表 2-2 MOX 燃料の同位体組成比 [wt%]

	LWR-MOX	FBR
Pu-238	0.252	0.243
Pu-239	3.82	12.0
Pu-240	1.75	7.09
Pu-241	0.651	0.950
Pu-242	0.448	0.862
Np-237	0.0	0.111
Am-241	0.189	0.442
Am-243	0.0	0.221
Cm-244	0.0	0.221
U-235	0.166	0.234
U-238	92.8	77.7

2.1.2 評価指標の設定および選定条件

本検討では、FP 核種の選定を行うために質量、発熱量、放射能量、被ばく線量、固化体阻害因子の 5 つの評価指標を設定する。これらの評価指標を設けた理由と選定条件を以下に示す。

2.1.2.1 質量

現行の核燃料サイクルにおいて、炉から取り出された SNF は再処理される。U と Pu が回収された後に残された高レベル放射性廃棄物 (HLW) はガラス固化され、地層処分される。マスバランス解析において、固化体の発生本数は式 (2) から導かれる。HLW 総質量の大部分を FP 酸化物が占めるため、FP の質量が固化体本数を算出する上で重要因子である。したがって、質量を評価指標の 1 つとして設定する。

$$\text{固化体本数 [本/tHM]} = \frac{\text{HLW 総質量 [kg/tHM]}}{\text{固化体質量 [kg/本]} \times \text{廃棄物含有率 [wt\%]}} \quad (2)$$

質量を指標とする FP 核種の選定は、以下の手順で行う。

- ① ORIGEN を用いて SNF 中の FP 質量を算出する。
- ② 3 種類の燃料条件において炉取出し直後の FP 組成から、閾値を設定する。(設定した閾値の情報は付録 A を参照。)
- ③ 式(1)の再現率が 99.9%及び 90.0%以上となるように FP 核種をそれぞれ選定する。

2.1.2.2 発熱量

発熱量に関しては 3 つの論点がある。それらを以下に示す。

✓ ガラス固化体の結晶化

現行のガラス固化に用いられるホウケイ酸ガラスは、ガラス転移温度以上になった場合、ガラス固化体中で結晶化が起こる。この結晶化によって、ガラス固化体の核種の閉じ込め性能が低下する可能性がある[6]。

✓ 固化体貯蔵施設の仕様

現在の六ヶ所再処理工場の固化体貯蔵施設では固化体発熱量制限として平均 2.3 kW/本以下、最大 2.8 kW/本以下が設定されている[7]。

✓ 地層処分における人口バリアの温度制限

固化体を地下に埋設する際、人口バリアの温度制限を満足させる必要がある [8]。

これら 3 つの論点には核種の崩壊熱が関係している。最初の二つの論点はガラス固化直後の問題であり、ガラス固化体の発生本数に影響を与える。三つ目の論点は廃棄体専有面積に影響を与える。したがって、発熱量の再現率を高めることで、固化体発生本数や処分場面積をより正確に解析可能となる。以上のことから、発熱量を評価指標の 1 つとして設定する。

発熱量における FP 核種の選定は、以下の手順で行う。

- ① ORIGEN を用いて SNF 中の FP 発熱量を算出する。
- ② 3 種類の燃料条件において炉取出し後 4 年の FP 組成に閾値を設定する。(設定した閾値の情報は付録 A を参照。)
- ③ 炉取出し後 4 年から 300 年の期間において式(1)の再現率が 99.9%及び 90.0%以上となるように FP 核種をそれぞれ選定する。

2.1.2.3 放射エネルギー・被ばく線量

放射エネルギー、被ばく線量に関して 3 つの論点がある。それらを以下に示す。

✓ 潜在的放射性毒性

核燃料サイクルのシナリオ評価を行う際の着眼点の 1 つとして潜在的放射性毒性がある。潜在的放射性毒性は放射性廃棄物に含まれる各核種の放射エネルギーを公衆の経口摂取による被ばく線量に換算して、総和することによって得られる指標である[9]。

✓ 地層処分における安全性評価

地層処分における長期の安全性評価は地下水シナリオのように環境中の核種移行を仮定し、経口摂取による内部被ばくを前提とした被ばく線量によって評価される[10,11]。

✓ 廃棄体処分における規制

放射性物質を含む廃棄体の処分について事業許可申請を行う場合、廃棄体に含有される放射性核種ごとの最大放射エネルギーおよび全廃棄体の総放射エネルギーを記載する必要がある。また、その記載内容に基づいて一般公衆を対象にした被ばく線量を評価し、その廃棄体の処分に係る安全性を示すことが求められる[12]。

3つの論点の評価を行う場合、核種の組成に加えて、放射エネルギーと被ばく線量の算出が必要である。したがって、放射エネルギーおよび被ばく線量を評価指標として設定する。

放射エネルギーにおけるFP核種の選定は、以下の手順で行う。

- ① ORIGEN を用いて炉取り出し後4年から 10^7 年までのSNF中のFP放射エネルギーを算出する。
- ② 3種類の燃料条件における炉取り出し後4年、10年、50年、100年のFP組成に閾値を設定する。(設定した閾値の情報は付録Aを参照。)
- ③ 炉取り出し後4年から 10^7 年の期間において式(1)の再現率が99.9%以上及び90.0%以上となるようにFP核種をそれぞれ選定する。

被ばく線量におけるFP核種の選定は、以下の手順で行う。

- ① ORIGEN を用いて炉取り出し後4年から 10^7 年までのSNF中のFP放射エネルギーを算出する。
- ② ICRP Publication 72[13]に示された線量換算係数を元に放射エネルギーを被ばく線量に換算する。
- ③ 3種類の燃料条件において炉取り出し後4年と10年のFP組成に閾値を設定する。(設定した閾値の情報は付録Aを参照。)
- ④ 炉取り出し後4年から 10^7 年の期間における式(1)の再現率が99.9%及び90.0%以上となるようにFP核種を選定する。

2.1.2.4 固化体阻害因子

現在、ガラス固化体発生本数の削減を目的として、ガラス固化体廃棄物含有率の高含有化が検討されている。しかし現状のホウケイ酸ガラスを主原料としてLFCM(Liquid Fed Ceramic Melter)法を用いたガラス固化技術では幾つかの課題がある。それらを以下に示す。

✓ 白金族元素の沈降・堆積管理

白金族元素(PGM; Platinum Group Metal(ルテニウム(Ru)、ロジウム(Rh)、パラジウム(Pd)))はガラスにはほとんど溶解しない。加えて、密度が大きく沈降しやすいことから、熔融ガラス中で凝集物を形成し、熔融炉底部に沈降・堆積する。2007年に日本原燃で実施されたアクティブ試験ではPGMの熔融炉内底部への堆積により安定運転が困難となった。さらに2008年に行われたアクティブ試験でも同様の現象が確認された。熔融炉壁にPGMが堆積したことによるガラスの高粘性化や、堆積物中の通電によるジュール加熱の不調によって熔融ガラス温度の低下したことが原因であった[14]。

✓ イエローフェーズ生成抑制

HLWに含まれるモリブデン(Mo)はガラスへの溶解度が低く、モリブデン酸塩を主成分とするイエローフェーズ(YF)となって分離相を形成する。YFは水溶性であることから、固化ガラスの核種閉じ込め性能の低下につながる。YFの生成抑制として、現行のガラス固化プロセスではPGM対策と同様に希釈によるMoの濃度調整が行われている[15]。

Inagaki らの研究[16]では、Mo および PGM それぞれの含有制限 1.5wt%、1.25wt%が設けられている。そこで、2.1.2.2 で示したガラス固化時の固化体発熱量制限である 2.3 kW/本を含めて、廃棄物含有率とガラス固化制限の関係を表 2-3 に示す。この時の ORIGEN の燃焼計算には LWR-UO₂を用いた。廃棄物含有率に、H12 レポート[8]に示された基本ケースの 20.8 wt%を最少として、25.0、30.0、35.0 wt%の 4 条件を設定した。この時廃棄物含有率の 10.0 wt%はガラスの粘性を下げるために Na₂O を含有させることを想定している。そのため基本ケースの 20.8 wt%中の HLW 含有率は 10.8 wt%である。

表 2-3 より、廃棄物含有率 20.8 wt%では発熱量、Mo、PGM の含有量で制限されない一方で、25 wt%以上に高含有させた際には制限を超過する。特に Mo と PGM については SNF 冷却期間によらず、廃棄物含有率を高含有化した際に含有制限を超過する。したがって、固化体阻害因子として Mo と PGM を、評価指標に設定する。

Mo と PGM における核種選定は、以下の手順で行う。

- ① ORIGEN を用いて SNF 中の Mo と PGM の質量を算出する。
- ② 3 種類の燃料条件において炉取出し時の Mo と PGM 組成から、閾値を設定する。(設定した閾値の情報は付録 A を参照。)
- ③ 式(1)の再現率が 99.9%及び 90.0%以上となるように FP 核種をそれぞれ選定する。

表 2-3 廃棄物含有率とガラス固化制限の関係

(a)初期発熱量 [kW/本]

廃棄物含有率 SNF 冷却期間	20.8wt%	25.0wt%	30.0wt%	35.0wt%
4 年	2.30	3.18	4.25	5.31
15 年	0.914	1.27	1.69	2.12
20 年	0.813	1.13	1.51	1.88
30 年	0.665	0.924	1.23	1.54

(b)MoO₃ 含有率 [wt%]

廃棄物含有率 SNF 冷却期間	20.8wt%	25.0wt%	30.0wt%	35.0wt%
4 年	1.38	1.91	2.54	3.18
15 年	1.36	1.88	2.51	3.14
20 年	1.35	1.88	2.50	3.13
30 年	1.34	1.87	2.49	3.11

(c)PGM 含有率 [wt%]

廃棄物含有率 SNF 冷却期間	20.8wt%	25.0wt%	30.0wt%	35.0wt%
4 年	1.08	1.49	1.98	2.48
15 年	1.06	1.47	1.96	2.45
20 年	1.06	1.47	1.95	2.44
30 年	1.05	1.46	1.94	2.43

注)網掛けは制限値を超えることを意味する。

2.2 NMB コードにおける簡易燃焼チェーン構成に必要な FP 核種の選定

2.2.1 NMB コードの制約と補正機能

2.2.1.1 半減期制限

NMB コードでは半減期 2 日以上の核種のみが計算されている。その理由を以下に示す。

NMB コードの燃焼計算は式 (3) を解くことで行われている。

$$\frac{dX}{dt} = AX \quad (3)$$

$$A = D + \frac{P}{P_F \cdot F \cdot X} (C_{n,fission} + C_{n,\gamma} + C_{n,2n} + C_{n,3n} + C_{n,\alpha} + C_{n,p})$$

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_I \end{pmatrix} : \text{同位体量のベクトル}$$

I : 核種数

P : 原子炉出力

P_F : 核分裂一回毎の出力を表すベクトル

D : 崩壊による変化を表す行列 (以下、崩壊行列)

F : 単位中性子あたりの核分裂断面積のベクトル

$C_{n,fission}$: 単位中性子あたりの核分裂反応による変化を表す行列

$C_{n,\gamma}$: 単位中性子あたりの(n, γ)反応による変化を表す行列

$C_{n,2n}$: 単位中性子あたりの(n, 2n)反応による変化を表す行列

$C_{n,3n}$: 単位中性子あたりの(n, 3n)反応による変化を表す行列

$C_{n,\alpha}$: 単位中性子あたりの(n, α)反応による変化を表す行列

$C_{n,p}$: 単位中性子あたりの(n, p)反応による変化を表す行列

実際にはタイムステップ毎に A が更新されるが、 A が時間依存しないと仮定すると、行列指数法により式 (3) の解は式 (4) になる。

$$X = \left(I + At + \frac{1}{2!} (At)^2 + \frac{1}{3!} (At)^3 + \dots \right) X(0) \quad (4)$$

I : 単位行列

$X(0)$: 初期組成

式 (4) で短半減期の核種を精度良く計算するためには、タイムステップを短くするか、高次まで計算する必要がある。しかし、いずれの方法においても計算コストが増加する。さらには半減期が極端に短い核種においては計算が収束しない可能性もある。そのため現状の NMB コードでは半減期 2 日以上の核種のみが扱われている。表 2-4 に半減期 2 日未満の主要 FP 核種を示す。これらの核種は後述する例外を除き、本報告書で示す NMB コード用の FP リスト (詳細リストと簡易リスト) には入れないこととする。

表 2-4 半減期 2 日未満の主要 FP 核種

核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期
Zr-97	16.91h	Ag-109m	39.6s	I-135	6.57h	Ce-143	1.376625d
Rh-105	1.47338d	Sn-121	1.127499d	Xe-135	9.14h	Pr-144	17.28m
Rh-106	29.8s	Sb-126m	19.15m	Ba-137m	2.552m	Pr-144m	7.2m
Ag-108	2.37m	I-133	20.8h	La-140	1.6781d	Sm-153	1.927917d

2.2.1.2 FPリストから外れた FP 核種に対する補正機能

NMB コードには本報告書で作成する FP リストを追加することを想定し、FP リストから外れた FP 核種に対する補正機能が組込まれている。その補正機能を以下に示す。

① 崩壊チェーンの探索機能

崩壊チェーンの探索機能とは FP リストから外れた FP 核種の質量をその核種の崩壊チェーンを探索して、子孫核種に保存する機能である。例えば、図 2-3 に示す崩壊チェーンにおいて核種 X_1 は選定されず、核種 X_2 は選定された場合、核種 X_1 の核分裂生成量は核種 X_2 に加算される。この機能は図 2-4 のような分岐を持つ崩壊チェーンにも対応しており、(b)と(c)のように崩壊チェーンに分解して探索される。また、この機能は核分裂収率だけでなく、吸収反応などによる核種生成にも適応される。

② 発熱量、放射エネルギー、被ばく線量の補正

FP リストから外れた FP 核種の発熱量、放射エネルギー、被ばく線量はその核種の親核種に加算することで補正される。例えば、Cs-137 の子孫核種である Ba-137m の半減期は 2.6min と非常に短い。2.2.1.1 に記した通り Ba-137m のような短半減期核種を NMB コードで計算することは難しい。一方、Ba-137m の発熱量(崩壊熱)は非常に大きく、HLW の主要発熱核種である。そこで NMB コードでは、Ba-137m の発熱量をその親核種である Cs-137 の発熱量に加算して計算される設定が組込まれている。

以上のように、NMB コードには FP リストから外れた FP 核種の質量や発熱量、放射エネルギー、被ばく線量を補正する機能を有している。

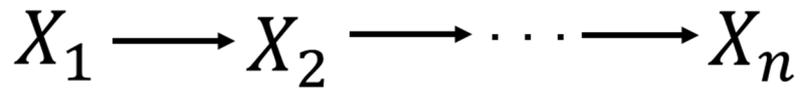
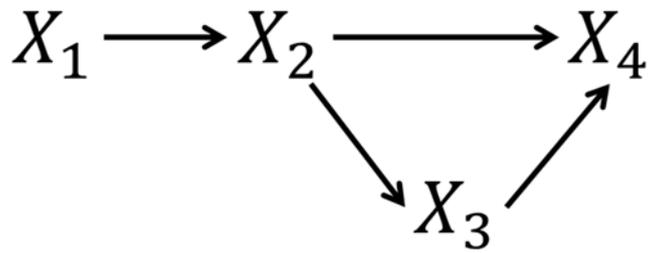
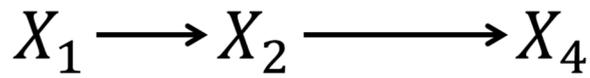


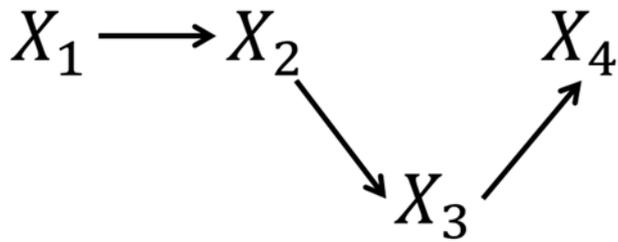
図 2-3 崩壊チェーン



(a) ある核種の崩壊チェーン



(b) 分岐した崩壊チェーン 1



(c) 分岐した崩壊チェーン 2

図 2-4 分岐を持つ崩壊チェーン

2.2.2 捕獲断面積が大きいFP核種の選定

2.2.1.2 に示した通り、5つの評価指標及び半減期の要件によってFPリストから外れたFP核種の質量は、その子孫核種に加算される。しかしFPリストから外れたFP核種中に捕獲断面積が大きい核種がある場合、捕獲反応によって質量数が増えるため計算誤差の原因となる。そこで式(5)を用いてNMBコードとORIGENの計算結果の差を評価した。その一例として、Rh-105とXe-135の周辺核種におけるNMBコードとORIGENの計算結果の差を、表2-5と表2-6にそれぞれ示す。Rh-105は半減期制限によりFPリストから外れるが、原子炉内での中性子捕獲断面積が大きい。そのためRh-105がNMBコードで計算されない場合、Rh-105の中性子捕獲で生成されるPd-106は過小評価される。一方、Rh-105の崩壊で生成されるPd-105は過大評価される。Xe-135も同様に、Xe-135がない場合はXe-136が過小評価され、Cs-135やCs-136は過大評価される。

この2核種以外のFPリストから外れたFP核種の中にもORIGENと同等の計算精度となる燃焼チェーンを構成するのに必要な核種がある。そこでNMBコード用に選定したFP核種を用いてNMBコードで燃焼計算を行い、ORIGENと同程度の計算精度になるように燃焼チェーンが構成されているか検証する。その結果をもとにNMBコードの燃焼チェーンに必要なFP核種を選定する。

$$\text{NMBコードとORIGENの計算結果の差} = \frac{\text{NMBの結果} - \text{ORIGENの結果}}{\text{ORIGENの結果}} \quad (5)$$

表 2-5 Rh-105 周辺核種の NMB コードと ORIGEN の計算結果の差

	Pd-104	Pd-105	Pd-106	Pd-107
Rh-105 なし	-0.570%	6.92%	-13.6%	-0.660%
Rh-105 あり	-0.570%	-0.730%	-0.630%	-0.600%

表 2-6 Xe-135 周辺核種の NMB コードと ORIGEN の計算結果の差

	Xe-136	Cs-135	Cs-136	Cs-137	Ba-135	Ba-136	Ba-137
Xe-135 なし	-43.2%	248%	187%	-0.282%	-1.64%	160%	-0.0837%
Xe-135 あり	-0.290%	-0.300%	-0.480%	-0.270%	-1.78%	-0.610%	-0.170%

3. FP 核種の選定結果および詳細リストと簡易リストの構築

前章で示した選定方法に基づいて FP 核種の選定を行い、5 つの評価指標と 3 つの燃焼条件に対応した表 A-1～表 A-15(付録参照)を作成した。この選定結果を基に、5 つの評価指標ごとに再現率 99.9%、90.0%以上となる FP 核種を選定する。さらに ORIGEN と同等の計算精度を有する簡易燃焼チェーンを NMB コード内に構成するために必要となる FP 核種を選定する。以上の検討を踏まえて NMB コードのバックエンドのマスバランス解析機能の更新の際に必要な 2 つの FP リスト(詳細リストと簡易リスト)を作成する。以下にその詳細を示す。

3.1 5 つの評価指標における再現率を用いた FP 核種の選定結果

3.1.1 質量

2.1.2.1 に示した条件で選定した FP 核種を表 3-1 と表 3-2 に示す。表 3-1 の再現率 99.9%以上の条件において、FP127 核種を選定した。また、表 3-2 の再現率 90.0%以上の条件では、49 核種を選定した。これら 2 つの質量の値を基にした FP 核種の選定は表 A-1～A-3(付録参照)を用いて行った。FP127 核種は WU1(再現率:99.91%)、WM1(99.90%)、WF1(99.91%) (ナンバーリングの詳細は付録参照)から選定した。また FP49 核種は WU2(90.95%)、WM2(90.37%)、WF2(90.41%)から選定した。

表 3-1 質量の値を基に選定した FP127 核種(再現率 99.9%以上)

核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期
Se-78	stable	Ru-102	stable	Te-132	3.204d	Nd-148	stable
Se-79	2.95E+5y	Ru-103	39.26d	I-127	stable	Nd-150	1E+18y
Se-80	stable	Ru-104	stable	I-129	1.57E+7y	Pm-147	2.6234y
Se-82	1.4E+2y	Ru-106	1.0235y	I-131	8.0207d	Pm-148m	41.29d
Br-81	stable	Rh-103	stable	Xe-128	stable	Sm-147	1.06E+11y
Kr-83	stable	Pd-104	stable	Xe-130	stable	Sm-148	7E+15y
Kr-84	stable	Pd-105	stable	Xe-131	stable	Sm-149	2E+15y
Kr-85	10.756y	Pd-106	stable	Xe-132	stable	Sm-150	stable
Kr-86	stable	Pd-107	6.5E+6y	Xe-133	5.243d	Sm-151	90y
Rb-85	stable	Pd-108	stable	Xe-134	stable	Sm-152	stable
Rb-87	4.75E+1y	Pd-110	stable	Xe-136	stable	Sm-154	stable
Sr-86	stable	Ag-109	stable	Cs-133	stable	Eu-153	stable
Sr-88	stable	Cd-110	stable	Cs-134	2.0648y	Eu-154	8.593y
Sr-89	50.53d	Cd-111	stable	Cs-135	2.3E+6y	Eu-155	4.7611y
Sr-90	28.78y	Cd-112	stable	Cs-137	30.07y	Eu-156	15.19d
Y-89	stable	Cd-113	9.3E+15y	Ba-134	stable	Gd-154	stable
Y-91	58.51d	Cd-114	stable	Ba-136	stable	Gd-155	stable
Zr-90	stable	Cd-116	stable	Ba-137	stable	Gd-156	stable
Zr-91	stable	In-115	4.41E+14y	Ba-138	stable	Gd-157	stable
Zr-92	stable	Sn-116	stable	Ba-140	12.752d	Gd-158	stable
Zr-93	1.53E+6y	Sn-117	stable	La-139	stable	Gd-160	stable
Zr-94	stable	Sn-118	stable	La-140	1.6781d	Tb-159	stable
Zr-95	64.02d	Sn-119	stable	Ce-140	stable	Dy-160	stable
Zr-96	stable	Sn-120	stable	Ce-141	32.501d	Dy-161	stable
Nb-95	34.975d	Sn-122	stable	Ce-142	5E+16y	Dy-162	stable
Mo-95	stable	Sn-124	stable	Ce-144	284.893d		
Mo-96	stable	Sn-126	1E+5y	Pr-141	stable		
Mo-97	stable	Sb-121	stable	Pr-143	13.57d		
Mo-98	stable	Sb-123	stable	Nd-142	stable		
Mo-99	2.7475d	Sb-125	2.7582y	Nd-143	stable		
Mo-100	stable	Te-125	stable	Nd-144	2.29E+15y		
Tc-99	2.111E+5y	Te-126	stable	Nd-145	stable		
Ru-100	stable	Te-128	7.7E+24y	Nd-146	stable		
Ru-101	stable	Te-130	1.25E+21y	Nd-147	10.98d		

表 3-2 質量の値を基に選定した FP49 核種(再現率 90.0%以上)

核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期
Rb-87	4.75E+1y	Tc-99	2.111E+5y	Xe-131	stable	Nd-143	stable
Sr-88	stable	Ru-101	stable	Xe-132	stable	Nd-144	2.29E+15y
Sr-90	28.78y	Ru-102	stable	Xe-134	stable	Nd-145	stable
Y-89	stable	Ru-104	stable	Xe-136	stable	Nd-146	stable
Zr-91	stable	Ru-106	1.0235y	Cs-133	stable	Nd-148	stable
Zr-92	stable	Rh-103	stable	Cs-135	2.3E+6y	Nd-150	1E+18y
Zr-93	1.53E+6y	Pd-104	stable	Cs-137	30.07y	Pm-147	2.6234y
Zr-94	stable	Pd-105	stable	Ba-138	stable	Sm-149	2E+15y
Zr-96	stable	Pd-106	stable	La-139	stable	Sm-150	stable
Mo-95	stable	Pd-107	6.5E+6y	Ce-140	stable	Sm-152	stable
Mo-97	stable	Pd-108	stable	Ce-142	5E+16y		
Mo-98	stable	Te-130	1.25E+21y	Ce-144	284.893d		
Mo-100	stable	I-129	1.57E+7y	Pr-141	stable		

3.1.2 発熱量

2.1.2.2 で示した条件で選定した FP 核種を表 3-3 と表 3-4 に示す。表 3-3 の再現率 99.9%以上の条件において、FP17 核種を選定した。また再現率 90.0%以上の条件では 8 核種の FP を選定した。なお、これら発熱量の値を基にした FP 核種の選定は表 A-4~A-6(付録参照)を用いて行った。FP17 核種は HU1(再現率:99.96%)、HM1(99.91%)、HF1(99.96%) (ナンバーリングの詳細は付録参照)から選定した。また、FP8 核種は HU2(96.71%)、HM2(96.61%)、HF2(95.21%)から選定した。

表 3-3 発熱量の値を基に選定した FP17 核種(再現率 99.9%以上)

核種	半減期	核種	半減期
Sr-90	28.78y	Ba-137m	2.552m
Y-90	2.6708d	Ce-144	284.893d
Ru-106	1.0235y	Pr-144	17.28m
Rh-106	29.8s	Pm-147	2.6234y
Ag-110m	249.79d	Sm-151	90y
Te-125m	57.4d	Eu-152	13.537y
Sb-125	2.7582y	Eu-154	8.593y
Cs-134	2.0648y	Eu-155	4.7611y
Cs-137	30.07y		

表 3-4 発熱量の値を基に選定した FP8 核種 (ORIGEN 再現率 90.0%以上)

核種	半減期
Sr-90	28.78y
Y-90	2.6708d
Rh-106	29.8s
Cs-134	2.0648y
Cs-137	30.07y
Ba-137m	2.552m
Pr-144	17.28m
Eu-154	8.593y

3.1.3 放射能量

2.1.2.3 で示した条件で選定した FP 核種を表 3-5 と表 3-6 に示す。表 3-5 の再現率 99.9%以上の条件において、FP37 核種を選定した。また、表 3-6 の再現率 90.0%以上の条件では 36 核種を選定した。これら放射能量の値を基にした FP 核種の選定は表 A-7~A-9 (付録参照) を用いて行った。FP37 核種は AU1 (再現率:99.95%)、AM1 (99.97%)、AF1 (99.97%) (ナンバーリングの詳細は付録参照) から選定した。また、FP36 核種は AU1 (99.95%)、AM2 (91.17%)、AF2 (93.93%) から選定した。

表 3-5 放射能量の値を基に選定した FP37 核種 (再現率 99.9%以上)

核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期
H-3	12.33y	I-129	1.57E+7y	Pm-147	2.6234y	Nb-93m	16.13y
Se-79	2.95E+5y	Sb-125	2.7582y	Sm-151	90y	Tb-158	180y
Kr-85	10.756y	Sb-126	12.46d	Eu-152	13.537y	Tm-171	1.92y
Sr-90	28.78y	Sn-126	1E+5y	Eu-154	8.593y	Sn-119m	293.1d
Y-90	2.6708d	Ba-133	10.535y	Eu-155	4.7611y		
Zr-93	1.53E+6y	Cs-134	2.0648y	Cd-113m	14.1y		
Tc-99	2.111E+5y	Cs-135	2.3E+6y	Sn-121m	55y		
Ru-106	1.0235y	Cs-137	30.07y	Te-125m	57.4d		
Rh-106	29.8s	Ce-144	284.893d	Sb-126m	19.15m		
Pd-107	6.5E+6y	Pr-144	17.28m	Ba-137m	2.552m		
Sn-121	1.127499d	Pm-146	5.53y	Pr-144m	7.2m		

表 3-6 放射能量の値を基に選定した FP36 核種 (再現率 90.0%以上)

核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期
H-3	12.33y	Pd-107	6.5E+6y	Ba-133	10.535y	Sm-151	90y
Se-79	2.95E+5y	Cd-113m	14.1y	Cs-134	2.0648y	Eu-152	13.537y
Kr-85	10.756y	Sn-121	1.127499d	Cs-135	2.3E+6y	Eu-154	8.593y
Sr-90	28.78y	Sn-121m	55y	Cs-137	30.07y	Eu-155	4.7611y
Y-90	2.6708d	Sb-125	2.7582y	Ba-137m	2.552m	Tb-158	180y
Zr-93	1.53E+6y	Te-125m	57.4d	Ce-144	284.893d	Tm-171	1.92y
Nb-93m	16.13y	Sb-126	12.46d	Pr-144	17.28m		
Tc-99	2.111E+5y	Sn-126	1E+5y	Pr-144m	7.2m		
Ru-106	1.0235y	Sb-126m	19.15m	Pm-146	5.53y		
Rh-106	29.8s	I-129	1.57E+7y	Pm-147	2.6234y		

3.1.4 被ばく線量

2.1.2.3 で示した条件で選定した FP 核種を表 3-7 と表 3-8 に示す。表 3-7 の再現率 99.9%以上の条件において、FP37 核種を選定した。また、表 3-8 の再現率 90.0%以上の条件で、30 核種を選定した。これら被ばく線量の値を基にした FP 核種を選定は表 A-10～A-12(付録参照)を用いて行った。FP37 核種は DU1(99.90%)、DM1(99.99%)、DF1(99.98%)から選定した。また FP30 核種は DU2(96.84%)、DM2(97.67%)、DF2(98.67%)から選定した。

表 3-7 被ばく線量の値を基に選定した FP37 核種(再現率 99.9%以上)

核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期
H-3	12.33y	Cd-113m	14.1y	Cs-134	2.0648y	Eu-155	4.7611y
Se-79	2.95E+5y	Sn-119m	293.1d	Cs-135	2.3E+6y	Tb-158	180y
Sr-90	28.78y	Sn-121	1.127499d	Cs-137	30.07y	Ho-166m	1.2E+3y
Y-90	2.6708d	Sn-121m	55y	Ce-144	284.893d	Tm-171	1.92y
Zr-93	1.53E+6y	Sb-125	2.7582y	Pr-144	17.28m		
Nb-93m	16.13y	Te-125m	57.4d	Pm-146	5.53y		
Tc-99	2.111E+5y	Sb-126	12.46d	Pm-147	2.6234y		
Rh-102	207d	Sn-126	1E+5y	Eu-150	36.9y		
Ru-106	1.0235y	Sb-126m	19.15m	Sm-151	90y		
Pd-107	6.5E+6y	I-129	1.57E+7y	Eu-152	13.537y		
Cd-109	1.27y	Ba-133	10.535y	Eu-154	8.593y		

表 3-8 被ばく線量の値を基に選定した FP30 核種(再現率 90.0%以上)

核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期
H-3	12.33y	Cd-109	1.27y	Sb-126	12.46d	Pm-146	5.53y
Se-79	2.95E+5y	Cd-113m	14.1y	I-129	1.57E+7y	Pm-147	2.6234y
Sr-90	28.78y	Sn-119m	293.1d	Ba-133	10.535y	Sm-151	90y
Y-90	2.6708d	Sn-121	1.127499d	Cs-134	2.0648y	Eu-152	13.537y
Zr-93	1.53E+6y	Sn-121m	55y	Cs-135	2.3E+6y	Eu-154	8.593y
Tc-99	2.111E+5y	Sb-125	2.7582y	Cs-137	30.07y	Eu-155	4.7611y
Rh-102	207d	Te-125m	57.4d	Ce-144	284.893d		
Ru-106	1.0235y	Sn-126	1E+5y	Pr-144	17.28m		

3.1.5 固化体阻害因子

2.1.2.4 で示した条件で選定した FP 核種を表 3-9 に示す。表 3-9 の再現率 99.9%以上の条件において、19 核種を選定した。この Mo と PGM の質量の値を基にした FP 核種を選定は表 A-13～A-15(付録参照)を用いて行った。Mo と PGM の質量に寄与する FP 核種は再現率 99.9%以上のもののみが示した。この理由は、Mo と PGM の質量に寄与する核種が非常に限られているためである。

表 3-9 MoとPGMの質量の値を基に選定したFP19核種(再現率99.9%以上)

核種	半減期	核種	半減期
Mo-94	stable	Ru-103	39.26d
Mo-95	stable	Ru-104	stable
Mo-96	stable	Pd-104	stable
Mo-97	stable	Pd-105	stable
Mo-98	stable	Ru-106	1.0235y
Mo-100	stable	Pd-106	stable
Ru-100	stable	Pd-107	6.5E+6y
Ru-101	stable	Pd-108	stable
Ru-102	stable	Pd-110	stable
Rh-103	stable		

3.2 NMBコードにおける簡易燃焼チェーン構成に必要なFP核種の選定結果

2.2.2項で示した通り、3.1節で選定しなかったFP核種の中にもORIGENと同等の計算精度を有する簡易燃焼チェーンをNMBコード上で構成するのに必要な核種がある。そこで3.1節で選定したFP核種をNMBコードに用いた際に構成される燃焼チェーンが、ORIGENと同程度の計算精度を有しているのか検証を行った。その結果、ORIGENと同程度の計算精度となるNMBコードの簡易燃焼チェーンに必要なFP核種として、表3-10の29核種を選定した。

表 3-10 NMBコード用の簡易燃焼チェーン構成のために必要なFP核種

核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期
Sr-89	50.53d	Cd-111	stable	Pm-148m	41.29d	Gd-156	stable
Y-91	58.51d	Cd-112	stable	Sm-147	1.06E+11y	Gd-157	stable
Zr-95	64.02d	Te-127m	109d	Sm-148	7E+15y	Gd-158	stable
Nb-94	2.03E+4y	Xe-135	9.14h	Eu-151	stable	Tb-159	stable
Nb-95	34.975d	Ba-134	stable	Eu-153	stable	Tb-160	72.3d
Rh-105	1.47338d	Ce-141	32.501d	Eu-156	15.19d		
Ag-109	stable	Nd-147	10.98d	Gd-154	stable		
Cd-110	stable	Pm-148	5.37d	Gd-155	stable		

3.3 NMB コードの機能更新の際に必要な FP リスト

本節ではこれまでの選定結果を集約し、NMB コードのバックエンドのマスバランス解析に必要な FP リストとして、詳細リストと簡易リストの 2 種類を作成した。

詳細リストの 152 核種と簡易リストの 106 核種を、表 3-11 と表 3-12 に示す。詳細リストは各評価指標で再現率 99.9%以上の条件で選定した FP 核種(表 3-1、表 3-3、表 3-5、表 3-7、表 3-9)と NMB コードの簡易燃焼チェーンを構成するために必要な FP 核種(表 3-10)を基に作成した。簡易リストは各評価指標で再現率 90.0%以上の条件で選定した FP 核種(表 3-2、表 3-4、表 3-6、表 3-8、表 3-9)と NMB コードの簡易燃焼チェーンを構成するのに必要な FP 核種(表 3-10)を基に作成した。なお、捕獲断面積が小さく、半減期 2 日以内の FP 核種は両方のリストから除外した。

表 3-13 にそれぞれのリストにおける 5 つの評価指標の再現率を示す。なお、表 3-13 は全ての燃焼条件中から再現率が最小の値を示している。発熱量や放射エネルギー、被ばく線量は両方のリストにおいて 100%に近い再現率になっている。質量については詳細リストにおいて再現率 99.9%、簡易リストでは 96.9%となった。この結果、NMB コードの機能更新の際に必要な FP リストとして詳細リスト(再現率 99.9%、152 核種)と簡易リスト(再現率 96.9%、106 核種)を得た。

表 3-11 詳細リスト(再現率 99.9%以上、152 核種)

核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期
H-3	12.33y	Ru-101	stable	Sb-126	12.46d	Nd-144	2.29E+15y
Se-78	stable	Ru-102	stable	Te-125	stable	Nd-145	stable
Se-79	2.95E+5y	Ru-103	39.26d	Te-125m	57.4d	Nd-146	stable
Se-80	stable	Ru-104	stable	Te-126	stable	Nd-147	10.98d
Se-82	1.4E+2y	Ru-106	1.0235y	Te-127m	109d	Nd-148	stable
Br-81	stable	Rh-102	207d	Te-128	7.7E+24y	Nd-150	1E+18y
Kr-83	stable	Rh-103	stable	Te-130	1.25E+21y	Pm-146	5.53y
Kr-84	stable	Rh-105	1.47338d	Te-132	3.204d	Pm-147	2.6234y
Kr-85	10.756y	Pd-104	stable	I-127	stable	Pm-148	5.37d
Kr-86	stable	Pd-105	stable	I-129	1.57E+7y	Pm-148m	41.29d
Rb-85	stable	Pd-106	stable	I-131	8.0207d	Sm-147	1.06E+11y
Rb-87	4.75E+1y	Pd-107	6.5E+6y	Xe-128	stable	Sm-148	7E+15y
Sr-86	stable	Pd-108	stable	Xe-130	stable	Sm-149	2E+15y
Sr-88	stable	Pd-110	stable	Xe-131	stable	Sm-150	stable
Sr-89	50.53d	Ag-109	stable	Xe-132	stable	Sm-151	90y
Sr-90	28.78y	Ag-110m	249.79d	Xe-133	5.243d	Sm-152	stable
Y-89	stable	Cd-109	1.27y	Xe-134	stable	Sm-154	stable
Y-90	2.6708d	Cd-110	stable	Xe-135	9.14h	Eu-150	36.9y
Y-91	58.51d	Cd-111	stable	Xe-136	stable	Eu-151	stable
Zr-90	stable	Cd-112	stable	Cs-133	stable	Eu-152	13.537y
Zr-91	stable	Cd-113	9.3E+15y	Cs-134	2.0648y	Eu-153	stable
Zr-92	stable	Cd-113m	14.1y	Cs-135	2.3E+6y	Eu-154	8.593y
Zr-93	1.53E+6y	Cd-114	stable	Cs-137	30.07y	Eu-155	4.7611y
Zr-94	stable	Cd-116	stable	Ba-133	10.535y	Eu-156	15.19d
Zr-95	64.02d	In-115	4.41E+14y	Ba-134	stable	Gd-154	stable
Zr-96	stable	Sn-116	stable	Ba-136	stable	Gd-155	stable
Nb-93m	16.13y	Sn-117	stable	Ba-137	stable	Gd-156	stable
Nb-94	2.03E+4y	Sn-118	stable	Ba-138	stable	Gd-157	stable
Nb-95	34.975d	Sn-119	stable	Ba-140	12.752d	Gd-158	stable
Mo-94	stable	Sn-119m	293.1d	La-139	stable	Gd-160	stable
Mo-95	stable	Sn-120	stable	Ce-140	stable	Tb-158	180y
Mo-96	stable	Sn-121m	55y	Ce-141	32.501d	Tb-159	stable
Mo-97	stable	Sn-122	stable	Ce-142	5E+16y	Tb-160	72.3d
Mo-98	stable	Sn-124	stable	Ce-144	284.893d	Dy-160	stable
Mo-99	2.7475d	Sn-126	1E+5y	Pr-141	stable	Dy-161	stable
Mo-100	stable	Sb-121	stable	Pr-143	13.57d	Dy-162	stable
Tc-99	2.111E+5y	Sb-123	stable	Nd-142	stable	Ho-166m	1.2E+3y
Ru-100	stable	Sb-125	2.7582y	Nd-143	stable	Tm-171	1.92y

表 3-12 簡易リスト(再現率 96.9%、106 核種)

核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期	核種	半減期
H-3	12.33y	Ru-101	stable	Te-130	1.25E+21y	Pm-146	5.53y
Se-79	2.95E+5y	Ru-102	stable	I-129	1.57E+7y	Pm-147	2.6234y
Kr-85	10.756y	Ru-103	39.26d	Xe-131	stable	Pm-148	5.37d
Rb-87	4.75E+1y	Ru-104	stable	Xe-132	stable	Pm-148m	41.29d
Sr-88	stable	Ru-106	1.0235y	Xe-134	stable	Sm-147	1.06E+11y
Sr-89	50.53d	Rh-102	207d	Xe-135	9.14h	Sm-148	7E+15y
Sr-90	28.78y	Rh-103	stable	Xe-136	stable	Sm-149	2E+15y
Y-89	stable	Rh-105	1.47338d	Cs-133	stable	Sm-150	stable
Y-90	2.6708d	Pd-104	stable	Cs-134	2.0648y	Sm-151	90y
Y-91	58.51d	Pd-105	stable	Cs-135	2.3E+6y	Sm-152	stable
Zr-91	stable	Pd-106	stable	Cs-137	30.07y	Eu-151	stable
Zr-92	stable	Pd-107	6.5E+6y	Ba-133	10.535y	Eu-152	13.537y
Zr-93	1.53E+6y	Pd-108	stable	Ba-134	stable	Eu-153	stable
Zr-94	stable	Pd-110	stable	Ba-138	stable	Eu-154	8.593y
Zr-95	64.02d	Ag-109	stable	La-139	stable	Eu-155	4.7611y
Zr-96	stable	Cd-109	1.27y	Ce-140	stable	Eu-156	15.19d
Nb-93m	16.13y	Cd-110	stable	Ce-141	32.501d	Gd-154	stable
Nb-94	2.03E+4y	Cd-111	stable	Ce-142	5E+16y	Gd-155	stable
Nb-95	34.975d	Cd-112	stable	Ce-144	284.893d	Gd-156	stable
Mo-94	stable	Cd-113m	14.1y	Pr-141	stable	Gd-157	stable
Mo-95	stable	Sn-119m	293.1d	Nd-143	stable	Gd-158	stable
Mo-96	stable	Sn-121m	55y	Nd-144	2.29E+15y	Tb-158	180y
Mo-97	stable	Sn-126	1E+5y	Nd-145	stable	Tb-159	stable
Mo-98	stable	Sb-125	2.7582y	Nd-146	stable	Tb-160	72.3d
Mo-100	stable	Sb-126	12.46d	Nd-147	10.98d	Tm-171	1.92y
Tc-99	2.111E+5y	Te-125m	57.4d	Nd-148	stable		
Ru-100	stable	Te-127m	109d	Nd-150	1E+18y		

表 3-13 詳細リストと簡易リストにおける 5 つの評価指標の再現率

(a) 質量の再現率

経過時間 [年]	0
詳細リスト	99.94%
簡易リスト	96.85%

(b) 発熱量の再現率

経過時間 [年]	4	10	50	100	500	10 ³
詳細リスト	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
簡易リスト	99.87%	100.00%	100.00%	100.00%	99.85%	99.81%

(c) 放射エネルギーの再現率

経過時間 [年]	4	10	100	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
詳細リスト	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	99.99%	100.00%
簡易リスト	99.97%	100.00%	100.00%	99.98%	100.00%	100.00%	99.99%	100.00%

(d) 被ばく線量の再現率

経過時間 [年]	4	10	100	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
詳細リスト	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
簡易リスト	99.99%	100.00%	100.00%	99.97%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

(e) 固化体阻害因子の再現率

経過時間 [年]	0
詳細リスト	100.00%
簡易リスト	100.00%

経過時間:使用済燃料の炉取り出し後の経過時間

4. 結言

本報告書では NMB コードのバックエンドのマスバランス解析に必要な FP 核種の選定を行った。2 つの炉型、3 つの燃料(軽水炉 UO_2 燃料、軽水炉 MOX 燃料、高速炉 MOX 燃料)、5 つの評価指標(質量、発熱量、放射能量、被ばく線量、固化体阻害因子)に対応する FP 核種を選定した。また、ORIGEN と同等の燃焼チェーンを構成するために必要な FP 核種を選定した。その結果、ORIGEN と同等の計算精度となる簡易燃焼チェーンの構築に資する 2 つの FP リストとして詳細リストと簡易リストを作成した。詳細リストは 152 核種、簡易リストは 106 核種でそれぞれ構成されており、必要となる計算精度と時間に応じて NMB コードで扱うべき FP 核種数を使い分けることが可能である。NMB コードの機能拡張を行い、上記の FP リストに記載されている核種を解析対象に含めることで、ORIGEN と同程度の精度でバックエンドのマスバランス解析を行うことが可能になる。

謝辞

本研究の推進にあたり、2019 年度先導原子力研究所共同利用・共同研究「バックエンドプロセスにおける物量評価手法の開発と NMB コードへの実装」からの資金を用いた。

参考文献

- [1] K. Nishihara, H. Akie, N. Shirasu and T. Iwamura, “Utilization of rock-like oxide fuel in the phase-out scenario,” J. Nucl. Sci. Technol., 51(2), pp. 150-165, 2014.
- [2] S. B. Ludwig and A. G. Croff, “Revision to ORIGEN2 - Version 2.2”, Transmittal memo of CCC-371/17, Oak Ridge National Laboratory, 2002.
- [3] 西原健司, 大井川宏之, “アクチニド核種のマスバランス解析に基づく群分離-核変換サイクルの導入シナリオと効果の検討”, JAEA-Research 2006-081, 2006, 91p.
- [4] 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.
- [5] 次世代原子力システム研究開発部門, 日本原子力発電株式会社 研究開発室, “高速増殖炉サイクル実用化研究開発(FaCT プロジェクト)－フェーズ I 報告書－”, JAEA-Evaluation 2011-003, 2011, 303p.
- [6] 資源エネルギー庁電力・ガス事業部原子力立地・核燃料サイクル産業課, 株式会社 IHI, 日本原燃株式会社, 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, 一般財団法人電力中央研究所, “次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業(ガラス固化技術の基盤整備)概要”, 第 1 回次世代再処理ガラス固化技術基盤研究事業中間評価検討会資料 5-1.
- [7] 原子力規制委員会, “ガラス固化体貯蔵設備の比較”, <https://www2.nsr.go.jp/data/000216296.pdf>, (最終閲覧日 2020 年 12 月 1 日).
- [8] 核燃料サイクル開発機構, “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ- 分冊 2 地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-022, 1999.

- [9] 西原健司, “使用済核燃料の潜在的放射性毒性評価のためのデータベース”, JAEA-Data/Code 2010-012, 2010, 52p.
- [10] 核燃料サイクル開発機構, “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ- 分冊3 地層処分システムの安全評価”, JNC TN1400 99-023, 1999.
- [11] 原子力発電環境整備機構, “包括的技術報告:わが国における安全な地層処分の実現-適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築-(レビュー版)”, 2018.
- [12] 原子力安全委員会, “放射性廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方”, 1988,
<https://www.rwmc.or.jp/law/d2/no3.html> (最終閲覧日 2020年12月1日).
- [13] ICRP, “Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides”, ICRP Publication 72, 1995.
- [14] 兼平憲男, “六ヶ所再処理工場のガラス固化試験と新型炉開発”, 原子力バックエンド研究 Vol.23 No.2, pp.175-180, 2016.
- [15] 日本原燃株式会社, “ガラス固化試験の状況, 再処理・リサイクル部会セミナー”, 2013.
- [16] Y. Inagaki, T. Iwasaki, S. Sato, T. Ohe, K. Kato, S. Torikai, Y. Niibori, S. Nagasaki and K. Kitayama, “LWR high burn-up operation and MOX introduction; fuel cycle performance from the viewpoint of waste management”, J. Nucl. Sci. Technol., 46, pp. 677-689, 2009.

付録 A

本付録では各燃焼条件(LWR-UO₂、LWR-MOX、FBR)における評価指標ごと(質量、発熱量、放射エネルギー、被ばく線量、ガラス固化体阻害因子)に選定した核種を示す。各条件においてナンバーリングがされており、1文字目は評価指標(W; Weight, H; Heat, A; Radioactivity, D; Radiation dose, Mo, Ru, Rh, Pd)、2文字目は燃焼条件(U; LWR-UO₂, M; LWR-MOX, F; FBR)、3文字目は1から始まる閾値の識別番号を示している(例;WU 1= LWR-UO₂+質量+1番目の閾値)。

表中には FP 核種を選定する際に用いた閾値をそれぞれ示している。質量と発熱量は炉取出しから4年時において、FP 核種を選定した。また、放射エネルギーと被ばく線量に関しては炉取出しから4、10、50、100年時で FP 核種を選定した。表中にある閾値は“/”ごとに各時間で区切られており、それぞれの炉取り出し時間に対する閾値を示している。また“0”は ORIGEN の出力の最小値である 10⁻²⁵ Bq を閾値として用いたことを意味する。例として、表 A-7 中の“10⁹/10⁹/0/0”は SNF 炉取出し後4年と10年において10⁹ Bq/tHM より大きく、加えて50年と100年において10⁻²⁵ Bq/tHM より大きい核種を選定したことを意味している。

表 A-1 質量リスト(LWR-UO₂)

	WU1				WU2	
閾値 [g/tHM]	3				260	
核種数	114				42	
再現率	99.911%				90.955%	
核種	Se-78	Ru-100	Te-128	Nd-143	Rb-87	La-139
	Se-79	Ru-101	Te-130	Nd-144	Sr-88	Ce-140
	Se-80	Ru-102	Te-132	Nd-145	Sr-90	Ce-142
	Se-82	Ru-103	I-127	Nd-146	Y-89	Ce-144
	Br-81	Ru-104	I-129	Nd-147	Zr-91	Pr-141
	Kr-83	Ru-106	I-131	Nd-148	Zr-92	Nd-143
	Kr-84	Rh-103	Xe-128	Nd-150	Zr-93	Nd-144
	Kr-85	Pd-104	Xe-130	Pm-147	Zr-94	Nd-145
	Kr-86	Pd-105	Xe-131	Sm-147	Zr-96	Nd-146
	Rb-85	Pd-106	Xe-132	Sm-148	Mo-95	Nd-148
	Rb-87	Pd-107	Xe-133	Sm-150	Mo-97	Sm-150
	Sr-88	Pd-108	Xe-134	Sm-151	Mo-98	
	Sr-89	Pd-110	Xe-136	Sm-152	Mo-100	
	Sr-90	Ag-109	Cs-133	Sm-154	Tc-99	
	Y-89	Cd-110	Cs-134	Eu-153	Ru-101	
	Y-91	Cd-111	Cs-135	Eu-154	Ru-102	
	Zr-90	Cd-112	Cs-137	Eu-155	Ru-104	
	Zr-91	Cd-114	Ba-134	Eu-156	Rh-103	
	Zr-92	Cd-116	Ba-136	Gd-156	Pd-104	
	Zr-93	Sn-116	Ba-137	Gd-158	Pd-105	
	Zr-94	Sn-117	Ba-138	Tb-159	Pd-106	
	Zr-95	Sn-118	Ba-140		Pd-107	
	Zr-96	Sn-119	La-139		Te-130	
	Nb-95	Sn-120	La-140		Xe-131	
	Mo-95	Sn-122	Ce-140		Xe-132	
	Mo-96	Sn-124	Ce-141		Xe-134	
	Mo-97	Sn-126	Ce-142		Xe-136	
	Mo-98	Sb-121	Ce-144		Cs-133	
	Mo-99	Sb-123	Pr-141		Cs-135	
	Mo-100	Sb-125	Pr-143		Cs-137	
	Tc-99	Te-125	Nd-142		Ba-138	

表 A-2 質量リスト(LWR-MOX)

	WM1				WM2	
閾値 [g/tHM]	3				260	
核種数	118				43	
再現率	99.904%				90.369%	
核種	Se-79	Ru-101	Te-128	Nd-143	Sr-90	La-139
	Se-80	Ru-102	Te-130	Nd-144	Y-89	Ce-140
	Se-82	Ru-103	Te-132	Nd-145	Zr-91	Ce-142
	Br-81	Ru-104	I-127	Nd-146	Zr-92	Ce-144
	Kr-83	Ru-106	I-129	Nd-147	Zr-93	Pr-141
	Kr-84	Rh-103	I-131	Nd-148	Zr-94	Nd-143
	Kr-85	Pd-104	Xe-128	Nd-150	Zr-96	Nd-144
	Kr-86	Pd-105	Xe-130	Pm-147	Mo-95	Nd-145
	Rb-85	Pd-106	Xe-131	Pm-148m	Mo-97	Nd-146
	Rb-87	Pd-107	Xe-132	Sm-147	Mo-98	Nd-148
	Sr-88	Pd-108	Xe-133	Sm-148	Mo-100	Nd-150
	Sr-89	Pd-110	Xe-134	Sm-149	Tc-99	Sm-150
	Sr-90	Ag-109	Xe-136	Sm-150	Ru-101	
	Y-89	Cd-110	Cs-133	Sm-151	Ru-102	
	Y-91	Cd-111	Cs-134	Sm-152	Ru-104	
	Zr-90	Cd-112	Cs-135	Sm-154	Ru-106	
	Zr-91	Cd-114	Cs-137	Eu-153	Rh-103	
	Zr-92	Cd-116	Ba-134	Eu-154	Pd-105	
	Zr-93	In-115	Ba-136	Eu-155	Pd-106	
	Zr-94	Sn-116	Ba-137	Eu-156	Pd-107	
	Zr-95	Sn-117	Ba-138	Gd-154	Pd-108	
	Zr-96	Sn-118	Ba-140	Gd-156	Te-130	
	Nb-95	Sn-119	La-139	Gd-158	I-129	
	Mo-95	Sn-120	La-140	Gd-160	Xe-131	
	Mo-96	Sn-122	Ce-140	Tb-159	Xe-132	
	Mo-97	Sn-124	Ce-141		Xe-134	
	Mo-98	Sn-126	Ce-142		Xe-136	
	Mo-99	Sb-121	Ce-144		Cs-133	
	Mo-100	Sb-123	Pr-141		Cs-135	
	Tc-99	Sb-125	Pr-143		Cs-137	
	Ru-100	Te-125	Nd-142		Ba-138	

表 A-3 質量リスト(FBR)

	WF1				WF2	
閾値 [g/tHM]	8				750	
核種数	123				44	
再現率	99.905%				90.407%	
核種	Se-78	Ru-100	Te-125	Pr-143	Sr-88	La-139
	Se-79	Ru-101	Sn-126	Nd-143	Y-89	Ce-140
	Se-80	Ru-102	Te-126	Ce-144	Sr-90	Pr-141
	Br-81	Ru-103	I-127	Nd-144	Zr-91	Ce-142
	Se-82	Rh-103	Te-128	Nd-145	Zr-92	Nd-143
	Kr-83	Ru-104	Xe-128	Nd-146	Zr-93	Nd-144
	Kr-84	Pd-104	I-129	Nd-147	Zr-94	Nd-145
	Kr-85	Pd-105	Te-130	Pm-147	Mo-95	Nd-146
	Rb-85	Ru-106	Xe-130	Sm-147	Zr-96	Pm-147
	Kr-86	Pd-106	I-131	Nd-148	Mo-97	Nd-148
	Sr-86	Pd-107	Xe-131	Sm-148	Mo-98	Sm-149
	Rb-87	Pd-108	Te-132	Sm-149	Tc-99	Nd-150
	Sr-88	Ag-109	Xe-132	Nd-150	Mo-100	Sm-152
	Sr-89	Pd-110	Xe-133	Sm-150	Ru-101	
	Y-89	Cd-110	Cs-133	Sm-151	Ru-102	
	Sr-90	Cd-111	Xe-134	Sm-152	Rh-103	
	Zr-90	Cd-112	Cs-134	Eu-153	Ru-104	
	Y-91	Cd-113	Ba-134	Sm-154	Pd-105	
	Zr-91	Cd-114	Cs-135	Eu-154	Pd-106	
	Zr-92	In-115	Xe-136	Gd-154	Pd-107	
	Zr-93	Cd-116	Ba-136	Eu-155	Pd-108	
	Zr-94	Sn-116	Cs-137	Gd-155	I-129	
	Zr-95	Sn-117	Ba-137	Gd-156	Te-130	
	Nb-95	Sn-118	Ba-138	Gd-157	Xe-131	
	Mo-95	Sn-119	La-139	Gd-158	Xe-132	
	Zr-96	Sn-120	Ba-140	Tb-159	Cs-133	
	Mo-96	Sb-121	Ce-140	Gd-160	Xe-134	
	Mo-97	Sn-122	Ce-141	Dy-160	Cs-135	
	Mo-98	Sb-123	Pr-141	Dy-161	Xe-136	
	Tc-99	Sn-124	Ce-142	Dy-162	Cs-137	
	Mo-100	Sb-125	Nd-142		Ba-138	

表 A-4 発熱量リスト(LWR-UO₂)

	HU1		HU2
閾値 [W/tHM]	1		100
核種数	15		7
再現率	99.964%		94.455%
核種	Sr-90 Y-90 Ru-106 Rh-106 Ag-110m Te-125m Sb-125 Cs-134	Cs-137 Ba-137m Ce-144 Pr-144 Pm-147 Eu-154 Eu-155	Sr-90 Y-90 Rh-106 Cs-134 Cs-137 Ba-137m Pr-144

表 A-5 発熱量リスト(LWR-MOX)

	HM1		HM2
閾値 [W/tHM]	1		100
核種数	15		7
再現率	99.912%		93.453%
核種	Sr-90 Y-90 Ru-106 Rh-106 Ag-110m Te-125m Sb-125 Cs-134	Pm-147 Eu-154 Eu-155	Y-90 Rh-106 Cs-134 Cs-137 Ba-137m Pr-144 Eu-154

表 A-6 発熱量リスト(FBR)

	HF1		HF2
閾値 [W/tHM]	1		100
核種数	17		7
再現率	99.958%		92.258%
核種	Sr-90 Y-90 Ru-106 Rh-106 Ag-110m Te-125m Sb-125 Cs-134	Pm-147 Sm-151 Eu-152 Eu-154 Eu-155	Y-90 Rh-106 Cs-134 Cs-137 Ba-137m Pr-144 Eu-154

表 A-7 放射能量リスト(LWR-UO₂)

		AU1				
閾値 [Bq/tHM]	10 ⁹ /10 ⁹ /0/0					
核種数	34					
再現率	99.95%					
核種	H-3 Se-79 Kr-85 Sr-90 Y-90 Zr-93 Nb-93m	Tc-99 Ru-106 Rh-106 Pd-107 Cd-113m Sn-121 Sn-121m	Sb-125 Te-125m Sb-126 Sn-126 Sb-126m I-129 Ba-133	Cs-134 Cs-135 Cs-137 Ba-137m Ce-144 Pr-144 Pr-144m	Pm-146 Pm-147 Sm-151 Eu-152 Eu-154 Eu-155	

表 A-8 放射能量リスト(LWR-MOX)

		AM1				AM2			
閾値 [Bq/tHM]	10 ⁹ /10 ⁹ /0/0				10 ⁹ /10 ⁹ /1/0				
核種数	34				31				
再現率	99.97%				91.17%				
核種	H-3 Se-79 Kr-85 Sr-90 Y-90 Nb-93m Zr-93 Tc-99 Ru-106	Rh-106 Pd-107 Cd-113m Sn-121 Sn-121m Te-125m Sb-125 Sb-126 Sn-126	Sb-126m I-129 Ba-133 Cs-134 Cs-135 Ba-137m Cs-137 Pr-144m Ce-144	Pr-144 Pm-146 Pm-147 Sm-151 Eu-152 Eu-154 Eu-155	H-3 Se-79 Kr-85 Sr-90 Y-90 Nb-93m Zr-93 Tc-99 Ru-106	Rh-106 Pd-107 Cd-113m Sn-121 Sn-121m Te-125m Sb-125 Sb-126 Sn-126	Sb-126m I-129 Ba-133 Cs-134 Cs-135 Ba-137m Cs-137 Pm-146 Pm-147	Sm-151 Eu-152 Eu-154 Eu-155	

表 A-9 放射エネルギーリスト(FBR)

閾値 [Bq/tHM]	AFI1				AFI2			
	10 ⁹ /10 ⁹ /0/0				10 ⁹ /10 ⁹ /1/0			
核種数	37				33			
再現率	99.97%				93.93%			
核種	H-3	Pd-107	I-129	Pm-146	H-3	Pd-107	Ba-133	Eu-155
	Se-79	Cd-113m	I-129	Pm-147	Se-79	Cd-113m	Cs-134	Tb-158
	Kr-85	Sn-119m	Ba-133	Pm-147	Kr-85	Sn-121	Cs-135	Tm-171
	Sr-90	Sn-121	Cs-134	Sm-151	Sr-90	Sn-121m	Ba-137m	
	Y-90	Sn-121m	Cs-135	Eu-152	Y-90	Te-125m	Cs-137	
	Nb-93m	Te-125m	Ba-137m	Eu-154	Nb-93m	Sb-125	Pm-146	
	Zr-93	Sb-125	Cs-137	Eu-155	Zr-93	Sb-126	Pm-147	
	Tc-99	Sb-126	Pr-144m	Tb-158	Tc-99	Sn-126	Sm-151	
	Ru-106	Sn-126	Ce-144	Tm-171	Ru-106	Sb-126m	Eu-152	
	Rh-106	Sb-126m	Pr-144		Rh-106	I-129	Eu-154	

表 A-10 被ばく線量リスト(LWR-UO₂)

閾値 [Sv/tHM]	DU1				DU2		
	10/0/0/0				100/0/0/0		
核種数	31				25		
再現率	99.90%				96.84%		
核種	H-3	Cd-109	I-129	Sm-151	H-3	Sn-121m	Pr-144
	Se-79	Cd-113m	Ba-133	Eu-152	Sr-90	Sb-125	Pm-146
	Sr-90	Sn-119m	Cs-134	Eu-154	Y-90	Te-125m	Pm-147
	Y-90	Sn-121	Cs-135	Eu-155	Zr-93	Sn-126	Sm-151
	Zr-93	Sn-121m	Cs-137		Tc-99	I-129	Eu-152
	Nb-93m	Sb-125	Ce-144		Ru-106	Cs-134	Eu-154
	Tc-99	Te-125m	Pr-144		Cd-113m	Cs-135	Eu-155
	Rh-102	Sb-126	Pm-146		Sn-119m	Cs-137	
	Ru-106	Sn-126	Pm-147		Sn-121	Ce-144	

表 A-11 被ばく線量リスト(LWR-MOX)

	DM1				DM2		
閾値 [Sv/tHM]	1/0/0/0				100/0/0/0		
核種数	36				26		
再現率	99.99%				97.67%		
核種	H-3	Pd-107	Sn-126	Pm-146	H-3	Sn-121	Ce-144
	Se-79	Cd-109	Sb-126m	Pm-147	Sr-90	Sn-121m	Pr-144
	Sr-90	Cd-113m	I-129	Sm-151	Y-90	Te-125m	Pm-146
	Y-90	Sn-119m	Ba-133	Eu-152	Zr-93	Sb-125	Pm-147
	Nb-93m	Sn-121	Cs-134	Eu-154	Tc-99	Sn-126	Sm-151
	Zr-93	Sn-121m	Cs-135	Eu-155	Rh-102	I-129	Eu-152
	Tc-99	Te-125m	Cs-137	Tb-158	Ru-106	Cs-134	Eu-154
	Rh-102	Sb-125	Ce-144	Ho-166m	Cd-113m	Cs-135	Eu-155
	Ru-106	Sb-126	Pr-144	Tm-171	Sn-119m	Cs-137	

表 A-12 被ばく線量リスト(FBR)

	DF1				DF2		
閾値 [Sv/tHM]	10/0/0/0				100/0/0/0		
核種数	37				30		
再現率	99.98%				98.73%		
核種	H-3	Cd-109	I-129	Sm-151	H-3	Sn-119m	Cs-135
	Se-79	Cd-113m	Ba-133	Eu-152	Se-79	Sn-121	Cs-137
	Sr-90	Sn-119m	Cs-134	Eu-154	Sr-90	Sn-121m	Ce-144
	Y-90	Sn-121	Cs-135	Eu-155	Y-90	Te-125m	Pr-144
	Nb-93m	Sn-121m	Cs-137	Tb-158	Zr-93	Sb-125	Pm-146
	Zr-93	Te-125m	Ce-144	Ho-166m	Tc-99	Sb-126	Pm-147
	Tc-99	Sb-125	Pr-144	Tm-171	Rh-102	Sn-126	Sm-151
	Rh-102	Sb-126	Pm-146		Ru-106	I-129	Eu-152
	Ru-106	Sn-126	Pm-147		Cd-109	Ba-133	Eu-154
	Pd-107	Sb-126m	Eu-150		Cd-113m	Cs-134	Eu-155

表 A-13 Mo/PGM リスト(LWR-UO₂)

	Mo-U	Ru-U	Rh-U	Pd-U
核種数	5	5	1	6
再現率	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
核種	Mo95	Ru100	Rh103	Pd104
	Mo96	Ru101		Pd105
	Mo97	Ru102		Pd106
	Mo98	Ru104		Pd107
	Mo100	Ru106		Pd108
			Pd110	

表 A-14 Mo/PGM リスト(LWR-MOX)

	Mo-M	Ru-M	Rh-M	Pd-M
核種数	6	6	1	6
再現率	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
核種	Mo 94	Ru100	Rh103	Pd104
	Mo 95	Ru101		Pd105
	Mo 96	Ru102		Pd106
	Mo 97	Ru103		Pd107
	Mo 98	Ru104		Pd108
	Mo100	Ru106		Pd110

表 A-15 Mo/PGM リスト(FBR)

	Mo-F	Ru-F	Rh-F	Pd-F
核種数	5	5	1	6
再現率	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
核種	Mo 95	Ru100	Rh103	Pd104
	Mo 96	Ru101		Pd105
	Mo 97	Ru102		Pd106
	Mo 98	Ru104		Pd107
	Mo100	Ru106		Pd108
			Pd110	

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량	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
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

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

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI 接頭語

乗数	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	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/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, 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
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

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

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

表10. SIに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=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

