JAEA-Research
2013-038

炉内構造物の放射化核種の主要な生成経路

（共同研究）

Main Generation Pathways of Activation Products for In-core Structure Materials
(Joint Research)

山本 健土　奥村 啓介　小嶋 健介　岡本 力
Kento YAMAMOTO, Keisuke OKUMURA, Kensuke KOJIMA and Tsutomu OKAMOTO

原子力基礎工学研究部門
核工学・炉工学ユニット
Division of Nuclear Data and Reactor Engineering
Nuclear Science and Engineering Directorate

February 2014
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2014

JAEA-Research 2013-038

炉内構造物の放射化核種の主要な生成経路

（共同研究）

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門　核工学・炉工学ユニット
山本 健士※1、奥村 啓介、小嶋 健介、岡本 力※2

（2013 年 11 月 19 日　受理）

放射化生成物の生成量の予測精度を向上させるためには、その生成起源となる初期組成元素及び生成経路上の核反応を正確に把握しておくことが重要である。

本検討では、ORIGEN2 コード及び JENDL-4.0 に基づく断面積ライブラリセット ORLIBJ40 を使用し、炉内構造物の材料であるジルカロイ、SUS304、インコネル 718 を対象として、初期組成元素の感度解析及び断面積の感度解析を行うことにより、放射化生成物の生成量に影響を与える初期組成元素及び核反応を定量的に明らかにした。感度解析の結果を用いて、炉内構造物の放射化評価において重要な核種について、主要な生成経路をまとめた。

本研究は日本原子力研究開発機構と日本原子力発電株式会社との共同研究に基づいて実施したものである。

原子力科学研究所(駐在)：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
※1　特定課題推進員
※2　技術開発協力員

JAEA-Research 2013-038

Main Generation Pathways of Activation Products for In-core Structure Materials

(Joint Research)

Kento YAMAMOTO※1, Keisuke OKUMURA, Kensuke KOJIMA
and Tsutomu OKAMOTO※2

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

(Received November 19, 2013)

Accurate information on main generation pathways of activation products is important to improve the accuracy of predicting the concentrations of activation products.

Using ORIGEN2 and ORLIBJ40, which is a set of the cross section libraries based on JENDL-4.0, the initial compositions and the cross sections which influence on the concentrations of activation products were clarified by executing the sensitivity analyses on them. Activations of cladding tubes, end-plugs and spacers of fuel assemblies and channel boxes, which were composed of Zircaloy, SUS304, and Inconel-718, were analyzed. The main generation pathways of some significant activation products were summarized from the results of sensitivity analyses.

Keyword: Activation Products, Sensitivity Study, Burnup Calculation, ORIGEN2, ORLIBJ40

This work has been performed in JAEA as a joint research with the Japan Atomic Power Company.

※1 Special Topic Engineer
※2 Collaborating Engineer

目　次

1.　はじめに 1
2.　生成経路の同定手法 3
2.1.　不純物ウランの核分裂生成物との区別 3
2.2.　感度解析の方法 3
3.　放射化計算 6
3.1.　計算条件 6
3.2.　評価対象核種 10
3.3.　放射化計算における主要核種の選択 11
3.4.　感度解析結果 19
3.5.　感度係数と生成経路の寄与率の関係 28
3.6.　解析結果の考察 36
3.7.　主要生成経路 40
4.　まとめ 52
参考文献 52
付録 53
A.1　ORLIBJ40 のリチウムの断面積に関する知見 53
A.2　分析値に基づく初期組成条件を使用した場合の感度解析 56
A.3　放射化核種生成量の時間変化 61
A.4　炉内構造物の放射化核種生成量の概算 83

Contents

1. Introduction 1
2. Methodology of identifying main generation pathway 3
2.1 Separation of fission products generated from impurity uranium 3
2.2 Method of sensitivity analysis 3
3. Result 6
3.1 Calculation condition 6
3.2 List of representative nuclides 10
3.3 Selection of remarkable activation products 11
3.4 Results of sensitivity analyses 19
3.5 The relationship between sensitivity coefficient and contribution fraction 28
3.6 Consideration of the results 36
3.7 Main generation pathways of activation products 40
4. Conclusion 52
References 52
Appendices 53
A.1 Information about cross section of Lithium in ORLIBJ40 53
A.1 Sensitivity analysis using the initial composition based on measurement 56
A.3 Time evolution of concentrations of activation products 61
A.4 Estimation of concentrations of activation products about in-core structure materials 83

1. はじめに

放射性廃棄物の管理、処理、処分においては、これらの安全性評価に資するため、放射化生成物の生成量を、実測や理論計算により評価する必要がある。理論計算の場合、生成量の予測精度を向上させるためには、着目する放射性核種の生成起源となる元素の初期組成を適切に与えるとともに、より正確な核データ（核反応断面積や半減期等）を使用することが重要である。これを実現するためには、先ず、着目する放射性核種の生成起源となる初期組成元素と主要な生成経路となる核反応や崩壊の経路を明らかにし、放射化核種の生成に対する寄与が大きい初期組成元素の分析精度を向上するとともに、関連する核データの精度向上を図ることが有効である。

放射化生成物の生成量の計算には、米国のオークリッジ研究所で 1980 年代に開発された ORIGEN2 コード[1)]などが広く利用されている。ORIGEN2 コードは、あらかじめ中性子輸送計算に基づいて作成された 1 群実効断面積と照射履歴を入力として、指数行列法によって燃焼方程式を解き核種組成を計算するコードである。原理的に多くの核種の燃焼を取扱うことができ、放射化反応によって多くの核種の生成が伴う体系に対しても適切に核種組成を求めることができる。一方、断面積ライブラリに関しては、2012 年に日本の最新の評価済み核データライブラリである JENDL-4.0[2)]を基とした ORIGEN2 用の断面積ライブラリセット、ORLIBJ40[3)]が開発されている。これは、様々な炉型および燃料仕様を条件として詳細群の中性子輸送計算を行い、得られた詳細群中性子スペクトルに基づき 1 群実効断面積を作成したものである。ORLIBJ40 ライブラリセットを利用することで、条件に応じたライブラリの設定により簡便にかつ高精度に核種組成燃焼計算を行うことが可能である。

そこで、本報では、ORLIBJ40 の精度が保証される炉内スペクトル場における放射化を対象とし、ジルカロイ、SUS304、インコネル 718 などの炉内構造物に関して、放射化生成物の生成起源となる初期組成元素と生成経路となる核反応や崩壊の経路を明らかにする。本報では、初期組成の感度係数及び断面積の感度係数を求めることによって、これを行う。前者は、ある元素の初期組成量を 1%変化させた場合に着目核種の生成量が何%変化するかを表した係数であり、得られた値から生成起源となる初期組成元素を判断することができる。また後者は、ある核反応の断面積を 1%変化させた場合に着目核種の生成量が何%変化するかを表した係数であり、得られた値から主要な生成経路を同定することができる。本報では、生成量が比較的大きい代表的な放射化生成物（ジルカロイについて 17 核種、SUS304 について 8 核種、インコネル 718 について 16 核種）に対し、感度解析の結果を報告し、感度係数が大きな核反応を含む経路、すなわち主要な生成経路を一覧できる形で整理する。また、材料中に含まれる不純物ウランの核分裂生成物の寄与についても評価を行う。

本報では、第 2 章において、感度係数の定義、不純物ウランの核分裂生成物の寄与に関する考え方など、主要な生成経路の同定方法を述べ、第 3 章において、放射化計算における計算条件、計算結果と考察、そして感度解析の結果を基にして、主要な生成経路につい

て一覧にまとめる。主要な生成経路の同定方法は、ここで扱った材料以外に対しても有効であり、他の材料の放射化評価での利用が期待される。また、主要な生成経路の一覧は、放射化評価において重要となる微量不純物及び、重要となる核反応に関する情報を提供するものであり、放射化生成物の生成量の評価精度向上に資することが期待される。

2. 生成経路の同定手法

一般に放射化核種の生成が起こりうる経路は複数存在しているが、そのうち生成量の大部分を占める主要な生成経路が存在する。本検討では、初期組成の感度係数及び断面積の感度係数を判断材料として、主要な生成経路を同定する。本章では生成経路の同定の手法として、不純物ウランの取扱いと感度解析の方法について述べる。

2.1. 不純物ウランの核分裂生成物との区別

本検討で対象とする材料には、不純物としてウランが含まれているものがある。ウランは核分裂性物質であり、中性子照射を受けることによって核分裂生成物が生成される。したがって、核種によっては放射化による生成経路だけではなく、核分裂の生成経路が存在するものもある。本検討では、不純物ウランの核分裂生成物と放射化生成物を明確に区別して取り扱うこととし、放射化の評価において注目すべき核種を抽出する。

具体的には、以下に述べる方法で取り扱う。初期組成から不純物ウランを除いた計算と、材料中の不純物ウランのみでの計算を行う。両者の生成量を比較し、放射化の評価において注目すべき核種であるかどうかを以下のように判断する。

(i) 放射化生成物が核分裂生成物より十分に大きい核種については、注目すべき核種として生成経路同定の対象とする。

(ii) 核分裂生成物が放射化生成物より十分に大きい核種については、核分裂生成物として生成量予測精度を向上させる方が適切であるため、生成経路同定の対象としない。

(iii) 放射化生成物と核分裂生成物が同程度である核種については、放射化による生成反応、核分裂による生成反応の両方の予測精度が重要となる。この核種についても、注目すべき核種として生成経路同定の対象とする。

2.2. 感度解析の方法

本検討では、初期組成の感度係数及び断面積の感度係数を判断材料として、主要な生成経路を同定する。感度係数は、ある入力値の変化量に対する着目核種の生成量の変化量であり、初期組成の感度係数が大きい元素や断面積の感度係数が大きい核反応ほど、着目核種の生成量への影響が大きいことを意味しており、感度係数の大小によって主要な生成経路を判断できる。

本検討の放射化計算には、ORIGEN2 コードを使用する。代表的な初期組成、照射履歴、及び断面積を入力値とした計算を基準ケースとして、この基準ケースに対し、ある入力値を変更した計算を行い、基準ケースからの変化量より感度係数を算出する。以下では、初期組成の感度解析、断面積の感度解析の方法について述べる。

(1)　初期組成の感度解析

基準ケースの初期組成の総重量を 1 トンとして、基準ケースの初期組成に対して、ある元素（または核種）の初期組成を変化させた計算を行い、感度係数S_1を以下のように求める。

$$S_1 = \frac{\Delta W / W_0}{\Delta X / X_0} \tag{2.2-1}$$

ここで、各変数の意味は以下の通りである。

W_0 ：　着目核種の生成量基準値 [g/ton]

$\Delta W (= W' - W_0)$ ：　着目核種の生成量の変化量 [g/ton]

X_0 ：　感度解析対象元素（または核種）の初期組成 [g/ton]

$\Delta X (= X' - X_0)$ ：　感度解析対象元素（または核種）の初期組成変化量 [g/ton]

初期組成を変化させた計算は、ORIGEN2 コードの入力ファイルを書き換えた計算を行うことに相当する。ある初期組成元素（または核種）の感度係数が 0 より大きいということは、その元素（または核種）が着目核種の生成由来であることを意味しており、主要な生成経路を同定する判断材料として利用できる。

(2)　断面積の感度解析

初期組成の感度解析同様に、基準ケースの 1 群断面積に対して、ある核種のある核反応の断面積を変化させた計算を行い、感度係数S_2を以下のように求める。

$$S_2 = \frac{\Delta W / W_0}{\Delta \sigma / \sigma_0} \tag{2.2-2}$$

ここで、各変数の意味は以下の通りである。

W_0 ：　着目核種の生成量基準値 [g/ton]

$\Delta W (= W' - W_0)$ ：　着目核種の生成量の変化量 [g/ton]

σ_0 ：　感度解析対象核反応の断面積 [barn]

$\Delta\sigma(=\sigma'-\sigma_0)$ ： 感度解析対象核反応の断面積変化量[barn]

断面積を変化させた計算は、ORIGEN2 の断面積ライブラリを書き換えた計算を行うことに相当する。また、ORIGEN2 の放射化ライブラリで取り扱われている核反応は、基底状態への(n,γ)反応、(n,2n)反応、(n,p)反応、(n,α)反応、励起状態への(n,γ)反応、(n,2n)反応の 6 種類である。本検討では、6 種類すべての核反応を感度解析の対象とする。

放射化核種の生成経路上にある核反応であれば、感度係数は正の値となるため、着目核種に対する複数ケースの感度係数 S_2 の値から、主要となる生成経路を判断することが可能である。

なお、断面積の感度解析において、全ての核種の全ての核反応を感度解析対象とすると、感度係数がゼロである部分の計算を膨大に行うことになり、非効率である。これを効率的に実施するために、以下の方法により感度解析対象を限定した。

- 着目核種の原子番号 Z 及び中性子数 N を設定する。
- その原子番号 Z と中性子数 N の付近の核種の断面積の感度解析を行う。例えば、原子番号が Z-2～Z+2、中性子数が N-3～N+3 など、原子番号及び中性子数の範囲を設定し、この範囲に該当する全ての核種及び全ての断面積について感度解析を行う。感度解析の結果からこの範囲を超える核種にも感度があると判断される場合には、改めて原子番号及び中性子数の範囲を設定して感度解析を行う。

3. 放射化計算

3.1. 計算条件

放射化核種の生成経路を同定するという目的では、PWR と BWR の条件の違いは本質的ではないため、ここでは代表的な例として、BWR の断面積ライブラリ及び照射履歴を使用する。以下に各種条件を示す。

➢ 評価対象材料

・ 被覆管（ジルカロイ 2、ジルカロイ 4）
・ 上部・下部タイプレート（SUS304）
・ スペーサ（ジルカロイ 2、ジルカロイ 4、インコネル 718）
・ チャンネルボックス（ジルカロイ 4）

➢ 断面積ライブラリ

断面積ライブラリには、ORLIBJ40 ライブラリを使用する。これは、JENDL-4.0 の断面積データに基づき、MOSRA-SRAC[4)]により求めた 1 群断面積が格納されているライブラリセットである。軸方向のボイド率分布の条件に整合するように以下のように設定する。

・ 被覆管・スペーサ・チャンネルボックス：BS340J40（ボイド率 40%）
・ 上部タイプレート：BS370J40（ボイド率 70%）
・ 下部タイプレート：BS300J40（ボイド率 0%）

➢ 照射履歴

代表的な照射履歴として、BWR の標準的な照射履歴を使用する。ただし、中性子束強度は照射期間中一定であると仮定する。冷却期間は放射性廃棄物の処理の開始時期を考慮し、10 年とする。照射履歴を図 3.1-1 に示す。

被覆管及びスペーサで使用する中性子束強度については、BWR の平均比出力に対応する値を使用し、タイプレート部分の中性子束強度については、炉内の軸方向 1 次元拡散計算で検討した結果に基づき、燃料部分の 5%とする。中性子束強度を表 3.1-1 に示す。

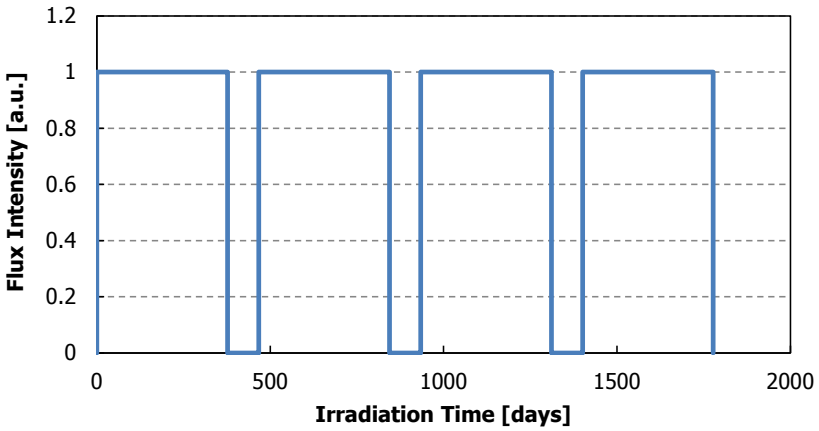


図 3.1-1　BWR の標準的な照射履歴

表 3.1-1　照射計算時の中性子束強度

	被覆管・スペーサ・チャンネルボックス	タイプレート
中性子束強度 [1/cm^{2}s]	1.994E+14	9.970E+12

➢　組成

BWR 燃料及び PWR 燃料の燃料集合体の構成材料を表 3.1-2 に示す。また、ジルカロイ 2 及びジルカロイ 4 の組成を表 3.1-3 に、SUS304 の組成を表 3.1-4 に、インコネルの組成を表 3.1-5 に示す。

表 3.1-3～表 3.1-5 の組成において、添加物については規格内の上限と下限の平均値を、不純物については上限値を入力値としている。

表 3.1-2　燃料集合体の構成材料 [5)]

項目	BWR燃料	PWR燃料
上部タイプレート（ノズル）	SUS304	SUS304
下部タイプレート（ノズル）	SUS304	SUS304
スペーサ（支持格子）	板材：ジルカロイ2 バネ：インコネル	ジルカロイ4 または インコネル
被覆管	ジルカロイ2	ジルカロイ4
チャンネルボックス	ジルカロイ4	-

表 3.1-3　ジルカロイ組成（JIS H 4751）

(a)　ジルカロイ 2

	規格[wt%]	入力値 [wt%]
H	0.0025 以下	0.0025
B	0.00005 以下	0.00005
C	0.027 以下	0.027
N	0.008 以下	0.008
Mg	0.002 以下	0.002
Al	0.0075 以下	0.0075
Si	0.012 以下	0.012
Ca	0.003 以下	0.003
Ti	0.005 以下	0.005
Cr	0.05 ～ 0.15	0.10
Mn	0.005 以下	0.005
Fe	0.07 ～ 0.20	0.135
Co	0.002 以下	0.002
Ni	0.03 ～ 0.08	0.055
Cu	0.005 以下	0.005
Zr	残部	98.1456
Nb	0.01 以下	0.01
Mo	0.005 以下	0.005
Cd	0.00005 以下	0.00005
Sn	1.20 ～ 1.70	1.45
Hf	0.01 以下	0.01
W	0.01 以下	0.01
U	0.00035 以下	0.00035

(b)　ジルカロイ 4

	規格[wt%]	入力値 [wt%]
H	0.0025 以下	0.0025
B	0.00005 以下	0.00005
C	0.027 以下	0.027
N	0.008 以下	0.008
Mg	0.002 以下	0.002
Al	0.0075 以下	0.0075
Si	0.012 以下	0.012
Ca	0.003 以下	0.003
Ti	0.005 以下	0.005
Cr	0.07 ～ 0.13	0.10
Mn	0.005 以下	0.005
Fe	0.18 ～ 0.24	0.21
Co	0.002 以下	0.002
Ni	0.007 以下	0.007
Cu	0.005 以下	0.005
Zr	残部	98.1186
Nb	0.01 以下	0.01
Mo	0.005 以下	0.005
Cd	0.00005 以下	0.00005
Sn	1.20 ～ 1.70	1.45
Hf	0.01 以下	0.01
W	0.01 以下	0.01
U	0.00035 以下	0.00035

表 3.1-4　SUS304 組成（JIS G 4303）

	規格[wt%]	入力値 [wt%]
C	0.08 以下	0.08
Si	1.00 以下	1.00
P	0.045 以下	0.05
S	0.030 以下	0.03
Cr	18.00 ～ 20.00	19.00
Mn	2.00 以下	2.00
Fe	残部	68.595
Ni	8.00 ～ 10.50	9.25

表 3.1-5　インコネル 718 組成（UNS N00718）

	規格[wt%]	入力値 [wt%]
B	0.006 以下	0.006
C	0.08 以下	0.08
Al	0.20 ～ 0.80	0.50
Si	0.35 以下	0.35
P	0.015 以下	0.015
S	0.015 以下	0.015
Ti	0.65 ～ 1.15	0.90
Cr	17.00 ～ 21.00	19.00
Mn	0.35 以下	0.35
Fe	残部	16.809
Co	1.00 以下	1.00
Ni	50.00 ～ 55.00	52.50
Cu	0.3 以下	0.30
Nb	4.75 ～ 5.50	5.125
Mo	2.80 ～ 3.30	3.05

3.2. 評価対象核種

本検討の評価対象とする核種とその半減期を表 3.2-1 に示す。表 3.2-1 には放射性廃棄物の管理、処理、処分において考慮すべき代表的な核種が含まれている。また、放射性廃棄物のインベントリ評価の観点からは必ずしも重要ではないが、分析実績を有しており、今後の放射化計算の妥当性確認に有用と考えられる核種も含めた。

表 3.2-1 評価対象核種 †

No.	Nuclide	Half-life	No.	Nuclide	Half-life	No.	Nuclide	Half-life
1	H-3	12.3 year	21	Se-79	377.0 E3 year	41	Cs-137	30.1 year
2	Be-10	1.5 E6 year	22	Rb-87	48.1 E9 year	42	Ba-133	10.5 year
3	C-14	5.7 E3 year	23	Sr-90	28.8 year	43	Sn-126	198.0 E3 year
4	Na-22	2.6 year	24	Nb-94	20.3 E3 year	44	Sb-124	60.2 day
5	Si-32	153.0 year	25	Nb-95	35.0 day	45	Sb-125	2.8 year
6	S-35	87.5 day	26	Mo-93	4.0 E3 year	46	Ce-141	32.5 day
7	Cl-36	301.0 E3 year	27	Mo-99	2.7 day	47	Ce-144	284.9 day
8	K-40	1.2 E9 year	28	Tc-99	211.1 E3 year	48	Eu-152	13.5 year
9	Sc-46	83.8 day	29	Tc-99m	6.0 hour	49	Eu-154	8.6 year
10	Ca-41	102.0 E3 year	30	Zr-93	1.5 E6 year	50	Eu-155	4.8 year
11	Cr-51	27.7 day	31	Zr-95	64.0 day	51	Gd-153	240.4 day
12	Mn-54	312.1 day	32	Ru-103	39.3 day	52	Ho-166m	1.2 E3 year
13	Fe-55	2.7 year	33	Ru-106	1.0 year	53	Hf-181	42.4 day
14	Fe-59	44.5 day	34	Ag-108m	438.0 year	54	Au-199	3.1 day
15	Co-57	271.7 day*	35	Ag-110m	249.8 day			
16	Co-58	70.9 day	36	I-129	15.7 E6 year			
17	Co-60	5.3 year	37	Cd-113m	14.1 year			
18	Ni-59	76.0 E3 year	38	I-131	8.0 day			
19	Ni-63	100.1 year	39	Cs-134	2.1 year			
20	Zn-65	244.1 day	40	Cs-135	2.3 E6 year			

*E3 year = 10^3 year、 E6 year = 10^6 year

†半減期は ORLIBJ40 の崩壊ライブラリより抜粋。Co-57 は ORLIBJ40 には含まれていないため、最新版として推奨される Tables of Nuclear Data (JENDL/TND-2012)[6)]より抜粋した。

3.3. 放射化計算における主要核種の選択

(1) 放射化核種の生成量

BWR の標準的な照射履歴で照射した後、10 年冷却した時点の放射化核種の生成量について、ジルカロイ 2 及びジルカロイ 4 の結果を表 3.3-1 に、SUS304 の結果を表 3.3-2 に、インコネル 718 の結果を表 3.3-3 にそれぞれ示す。なお、表 3.3-1～表 3.3-3 の生成量は、正確な定量を目的とした計算ではなく、あくまで放射化による主要な生成経路を明確にするための計算であり、不純物のウランを除いた初期組成で計算した結果であることと、構造物の腐食生成物の寄与などは考慮していない結果であることに注意が必要である。なお、不純物ウランの核分裂生成物との比較は 3.3(2)節で行う。

ジルカロイ 2 及びジルカロイ 4 の結果については両者の差異を、SUS304 の結果については上部タイプレートと下部タイプレートの比を示している。

表 3.3-1～表 3.3-3 より、以下の知見が得られる。

- SUS304 の結果については、ジルカロイやインコネル 718 の結果と比べると全体的に生成量が小さいが、これは上部・下部タイプレート部では中性子照射量が燃料部の 5%であり、これに比例して放射化核種の生成量も小さくなるためである。
- ジルカロイ 2 とジルカロイ 4 の初期組成の主な違いは、表 3.1-3 より鉄とニッケルであるが、これらを生成由来とする核種において生成量の違いが生じていることがわかる。詳細については 3.5 節で考察を行う。
- SUS304 の結果において、多くの核種で下部タイプレートの方が上部タイプレートよりも放射化核種の生成量が大きい。これは、ライブラリの違いによって生じており、下部タイプレートで使用したボイド率 0%の断面積ライブラリの方が熱中性子領域側の中性子束が大きい条件で作成されているため、中性子捕獲断面積が大きくなることによると考えられる。詳細については 3.5 節で考察を行う。

表 3.3-1　ジルカロイ 2 及びジルカロイ 4 の放射化核種生成量 ‡

	Nuclide	Concentration [g/ton] ①Zry2	Concentration [g/ton] ②Zry4	Diff. [%] (②－①)/①
1	Zr-93	1.9742E+02	1.9736E+02	-0.03
2	Ni-59	3.6740E+00	4.6760E-01	-87.27
3	Ni-63	6.5566E-01	8.8922E-02	-86.44
4	Co-60	5.1176E-01	5.1121E-01	-0.11
5	C-14	3.9648E-01	3.9648E-01	0.00
6	Nb-94	3.0420E-01	3.0420E-01	0.00
7	Sb-125	2.5318E-01	2.5318E-01	0.00
8	Ca-41	3.0361E-02	3.0361E-02	0.00
9	K-40	2.2142E-02	2.2142E-02	0.00
10	Fe-55	2.1315E-02	3.1830E-02	49.33
11	Tc-99	9.1023E-03	9.1022E-03	0.00
12	Mo-93	8.9272E-03	8.9272E-03	0.00
13	Be-10	4.0258E-05	4.0258E-05	0.00
14	Sr-90	2.3483E-05	2.3477E-05	-0.03
15	Mn-54	3.8968E-06	6.0547E-06	55.37
16	Ag-108m	3.2579E-07	3.2579E-07	0.00
17	Rb-87	1.0552E-07	1.0549E-07	-0.03
18	H-3	3.0344E-08	3.0343E-08	0.00
19	I-129	6.3755E-09	6.3755E-09	0.00
20	Zn-65	2.8002E-09	2.8007E-09	0.02
21	Si-32	1.9054E-10	1.9054E-10	0.00
22	Ag-110m	4.9701E-11	4.9701E-11	0.00
23	Cl-36	8.7377E-12	8.7377E-12	0.00
24	Na-22	3.8735E-15	3.8735E-15	0.00
25	Nb-95	3.8862E-17	3.8851E-17	-0.03
26	Zr-95	3.2254E-17	3.2244E-17	-0.03
27	Co-58	6.3217E-18	8.0546E-19	-87.26
28	Sc-46	3.1010E-18	3.1010E-18	0.00
29	Cs-134	3.1007E-19	3.1007E-19	0.00
30	Cs-135	2.0938E-19	2.0938E-19	0.00
31	Ru-106	8.0005E-20	8.0005E-20	0.00
32	Sb-124	2.1149E-21	2.1149E-21	0.00
33	S-35	3.5580E-25	3.5580E-25	0.00
34	Cs-137	2.9018E-26	2.9018E-26	0.00
35	Hf-181	1.0791E-27	1.0791E-27	0.00
36	Fe-59	1.4882E-28	2.1735E-28	46.05
37	Ru-103	2.2961E-35	2.2961E-35	0.00
38	Cr-51	8.7904E-42	8.7904E-42	0.00
39	Se-79	0.0000E+00	0.0000E+00	-
40	Mo-99	0.0000E+00	0.0000E+00	-
41	I-131	0.0000E+00	0.0000E+00	-
42	Ba-133	0.0000E+00	0.0000E+00	-
43	Ce-141	0.0000E+00	0.0000E+00	-
44	Ce-144	0.0000E+00	0.0000E+00	-
45	Eu-152	0.0000E+00	0.0000E+00	-
46	Eu-154	0.0000E+00	0.0000E+00	-
47	Eu-155	0.0000E+00	0.0000E+00	-
48	Gd-153	0.0000E+00	0.0000E+00	-
49	Ho-166m	0.0000E+00	0.0000E+00	-
50	Au-199	0.0000E+00	0.0000E+00	-
51	Co-57	-	-	-
52	Tc-99m	-	-	-
53	Cd-113m	-	-	-
54	Sn-126	-	-	-

‡生成量に“-”と表記した核種は、ORLIBJ40 では取り扱っていない核種である。

表 3.3-2　SUS304 の放射化核種生成量

	Nuclide	Concentration [g/ton] ①Top	Concentration [g/ton] ②Bottom	Ratio ①／②
1	Ni-59	2.5658E+01	4.8070E+01	0.53
2	Ni-63	4.1055E+00	7.7460E+00	0.53
3	Fe-55	3.8710E-01	7.0480E-01	0.55
4	Co-60	4.9560E-03	5.2651E-03	0.94
5	Mn-54	9.9397E-05	9.8709E-05	1.01
6	Be-10	5.6769E-06	5.7261E-06	0.99
7	C-14	2.3458E-06	3.2089E-06	0.73
8	Cl-36	4.4225E-07	1.6230E-06	0.27
9	Si-32	5.4054E-11	6.1636E-11	0.88
10	H-3	3.1562E-14	1.1048E-13	0.29
11	Zn-65	2.6391E-15	1.1413E-14	0.23
12	Co-58	5.5911E-17	5.5312E-17	1.01
13	S-35	6.1457E-18	1.1701E-17	0.53
14	Na-22	1.8873E-21	1.9976E-21	0.94
15	K-40	5.0320E-23	7.5388E-22	0.07
16	Fe-59	2.6042E-27	4.3044E-27	0.61
17	Sc-46	2.7068E-30	3.5685E-30	0.76
18	Cr-51	6.1818E-41	1.1706E-40	0.53
19	Ca-41	0.0000E+00	0.0000E+00	-
20	Se-79	0.0000E+00	0.0000E+00	-
21	Rb-87	0.0000E+00	0.0000E+00	-
22	Sr-90	0.0000E+00	0.0000E+00	-
23	Nb-94	0.0000E+00	0.0000E+00	-
24	Nb-95	0.0000E+00	0.0000E+00	-
25	Mo-93	0.0000E+00	0.0000E+00	-
26	Mo-99	0.0000E+00	0.0000E+00	-
27	Tc-99	0.0000E+00	0.0000E+00	-
28	Zr-93	0.0000E+00	0.0000E+00	-
29	Zr-95	0.0000E+00	0.0000E+00	-
30	Ru-103	0.0000E+00	0.0000E+00	-
31	Ru-106	0.0000E+00	0.0000E+00	-
32	Ag-108m	0.0000E+00	0.0000E+00	-
33	Ag-110m	0.0000E+00	0.0000E+00	-
34	I-129	0.0000E+00	0.0000E+00	-
35	I-131	0.0000E+00	0.0000E+00	-
36	Cs-134	0.0000E+00	0.0000E+00	-
37	Cs-135	0.0000E+00	0.0000E+00	-
38	Cs-137	0.0000E+00	0.0000E+00	-
39	Ba-133	0.0000E+00	0.0000E+00	-
40	Sb-124	0.0000E+00	0.0000E+00	-
41	Sb-125	0.0000E+00	0.0000E+00	-
42	Ce-141	0.0000E+00	0.0000E+00	-
43	Ce-144	0.0000E+00	0.0000E+00	-
44	Eu-152	0.0000E+00	0.0000E+00	-
45	Eu-154	0.0000E+00	0.0000E+00	-
46	Eu-155	0.0000E+00	0.0000E+00	-
47	Gd-153	0.0000E+00	0.0000E+00	-
48	Ho-166m	0.0000E+00	0.0000E+00	-
49	Hf-181	0.0000E+00	0.0000E+00	-
50	Au-199	0.0000E+00	0.0000E+00	-
51	Co-57	-	-	-
52	Tc-99m	-	-	-
53	Cd-113m	-	-	-
54	Sn-126	-	-	-

表 3.3-3　インコネル 718 の放射化核種生成量

	Nuclide	Concentration [g/ton]
1	Ni-59	3.5070E+03
2	Ni-63	6.2024E+02
3	Co-60	2.5613E+02
4	Nb-94	1.5588E+02
5	Mo-93	5.4456E+00
6	Tc-99	5.3921E+00
7	Fe-55	3.4251E+00
8	Zr-93	1.3177E-01
9	Mn-54	4.8450E-04
10	Be-10	2.7650E-04
11	Cl-36	1.6820E-04
12	C-14	5.4365E-05
13	Zn-65	1.6829E-07
14	Sr-90	1.2971E-08
15	Si-32	7.8726E-09
16	H-3	1.7522E-09
17	Rb-87	3.4510E-14
18	Ca-41	8.0656E-15
19	Co-58	6.0338E-15
20	Sc-46	4.7353E-16
21	K-40	2.3093E-16
22	S-35	8.6163E-17
23	Ru-106	4.8794E-17
24	Na-22	5.1171E-18
25	Nb-95	3.2715E-22
26	Zr-95	2.7152E-22
27	Ag-108m	3.8018E-23
28	Ag-110m	3.2378E-23
29	Fe-59	2.6889E-26
30	Ru-103	1.3993E-32
31	Cr-51	1.6652E-39
32	SE79	0.0000E+00
33	MO99	0.0000E+00
34	I129	0.0000E+00
35	I131	0.0000E+00
36	CS134	0.0000E+00
37	CS135	0.0000E+00
38	CS137	0.0000E+00
39	BA133	0.0000E+00
40	SB124	0.0000E+00
41	SB125	0.0000E+00
42	CE141	0.0000E+00
43	CE144	0.0000E+00
44	EU152	0.0000E+00
45	EU154	0.0000E+00
46	EU155	0.0000E+00
47	GD153	0.0000E+00
48	HO166M	0.0000E+00
49	HF181	0.0000E+00
50	AU199	0.0000E+00
51	CO57	-
52	TC99M	-
53	CD113M	-
54	SN126	-

(2)　不純物ウランの核分裂生成物との比較

2 章で述べたように、材料中の不純物ウランの核分裂生成物及び放射化生成物の生成量を比較することにより、放射化評価において注目すべき核種を抽出する。

不純物ウランの組成については、表 3.3-4 の値を使用する。SUS304 については、JIS 規格では示されていないものの、NUREG/CR-3474[7)]によれば、微量ながら不純物ウランが存在することが示されている。

表 3.3-4　不純物ウランの組成

材料	不純物ウラン組成[wt%]	引用
ジルカロイ 2	0.00035	JIS H 4751
SUS304	0.0001	NUREG/CR-3474

初期組成から不純物ウランを除いた計算と、材料中の不純物ウランのみ（ジルカロイ 2 の場合ウラン 3.5g、SUS304 の場合ウラン 1.0g）での計算を行い、両者の計算結果を比較した。結果を表 3.3-5 に示す。

例として、表 3.3-5(a)のジルカロイ 2 の放射化核種の生成量上位核種のうち、Sr-90、Rb-87、I-129 などについては、核分裂生成物の生成量が放射化生成物の生成量よりも 1 桁以上大きく、放射化生成物の生成源となる不純物の正確な測定よりもむしろ初期組成中のウラン含有量の正確な測定が重要であることがわかる。

表 3.3-5 の“評価”欄には、「放射化」、「核分裂」のどちらの生成量が優位であるかを示した。両者でオーダーが同程度であるものについては、「放射化／核分裂」とした。また、両者で生成量が計算上の下限値以下である核種（すなわち生成量の計算値が 0 である核種）については、「生成量なし」とした。

なお、ジルカロイ 4 については、ジルカロイ 2 の場合と比較して生成量が大きく変化するのは、Ni-59、Ni-63、Fe-55、Mn-54 などの核種であり（表 3.3-1 参照）、またこれらの核種は核分裂生成物としての生成量は下限値以下である（表 3.3-5 参照）。そのため、ジルカロイ 4 においても、ジルカロイ 2 における放射化核種の生成量と核分裂生成物の生成量の大小関係が変わることはない。

表 3.3-5　不純物ウランとの生成量の比較(1/2)

(a)　ジルカロイ 2

	核種	①不純物Uなし Zry-2 [g/ton]	②不純物U [g/ton]	不純物Uの寄与 ②／(①＋②)	評価
1	Zr-93	1.9742E+02	1.2261E-03	0%	放射化
2	Ni-59	3.6740E+00			放射化
3	Ni-63	6.5566E-01			放射化
4	Co-60	5.1176E-01			放射化
5	C-14	3.9648E-01			放射化
6	Nb-94	3.0420E-01	3.2424E-09	0%	放射化
7	Sb-125	2.5318E-01	1.5045E-06	0%	放射化
8	Ca-41	3.0361E-02			放射化
9	K-40	2.2142E-02			放射化
10	Fe-55	2.1315E-02			放射化
11	Tc-99	9.1023E-03	1.6952E-03	16%	放射化／核分裂
12	Mo-93	8.9272E-03	3.4983E-14	0%	放射化
13	Be-10	4.0258E-05	2.2174E-08	0%	放射化
14	Sr-90	2.3483E-05	6.0056E-04	96%	核分裂
15	Mn-54	3.8968E-06			放射化
16	Ag-108m	3.2579E-07	5.5814E-12	0%	放射化
17	Rb-87	1.0552E-07	3.6759E-04	100%	核分裂
18	H-3	3.0344E-08	5.7987E-08	66%	放射化／核分裂
19	I-129	6.3755E-09	3.8548E-04	100%	核分裂
20	Zn-65	2.8002E-09			放射化
21	Si-32	1.9054E-10			放射化
22	Ag-110m	4.9701E-11	8.1136E-11	62%	放射化／核分裂
23	Cl-36	8.7377E-12			放射化
24	Na-22	3.8735E-15			放射化
25	Nb-95	3.8862E-17	7.8606E-22	0%	放射化
26	Zr-95	3.2254E-17	6.5239E-22	0%	放射化
27	Co-58	6.3217E-18			放射化
28	Sc-46	3.1010E-18			放射化
29	Cs-134	3.1007E-19	7.0651E-06	100%	核分裂
30	Cs-135	2.0938E-19	9.2847E-04	100%	核分裂
31	Ru-106	8.0005E-20	4.4101E-07	100%	核分裂
32	Sb-124	2.1149E-21	2.4677E-26	0%	放射化
33	S-35	3.5580E-25			放射化
34	Cs-137	2.9018E-26	2.0086E-03	100%	核分裂
35	Hf-181	1.0791E-27			放射化
36	Fe-59	1.4882E-28			放射化
37	Ru-103	2.2961E-35	8.7326E-33	100%	核分裂
38	Cr-51	8.7904E-42			放射化
39	Se-79	0.0000E+00	8.6498E-06	100%	核分裂
40	Mo-99	0.0000E+00	0.0000E+00		生成量なし
41	I-131	0.0000E+00	0.0000E+00		生成量なし
42	Ba-133	0.0000E+00	1.3353E-10	100%	核分裂
43	Ce-141	0.0000E+00	1.2321E-38	100%	核分裂
44	Ce-144	0.0000E+00	6.5012E-08	100%	核分裂
45	Eu-152	0.0000E+00	2.0686E-08	100%	核分裂
46	Eu-154	0.0000E+00	2.4503E-05	100%	核分裂
47	Eu-155	0.0000E+00	4.5989E-06	100%	核分裂
48	Gd-153	0.0000E+00	7.6367E-13	100%	核分裂
49	Ho-166m	0.0000E+00	2.3505E-09	100%	核分裂
50	Au-199	0.0000E+00			生成量なし
51	Co-57				生成量なし
52	Tc-99m		0.0000E+00		生成量なし
53	Cd-113m		2.2727E-07	100%	核分裂
54	Sn-126		5.1803E-05	100%	核分裂

表 3.3-5　不純物ウランとの生成量の比較(2/2)

(b)　SUS304（下部タイプレート）

	核種	①不純物Uなし SUS304[g/ton]	②不純物U [g/ton]	不純物Uの寄与 ②／(①＋②)	評価
1	Ni-59	4.8070E+01			放射化
2	Ni-63	7.7460E+00			放射化
3	Fe-55	7.0480E-01			放射化
4	Co-60	5.2651E-03			放射化
5	Mn-54	9.8709E-05			放射化
6	Be-10	5.7261E-06	2.0146E-10	0%	放射化
7	C-14	3.2089E-06			放射化
8	Cl-36	1.6230E-06			放射化
9	Si-32	6.1636E-11			放射化
10	H-3	1.1048E-13	5.5089E-10	100%	核分裂
11	Zn-65	1.1413E-14			放射化
12	Co-58	5.5312E-17			放射化
13	S-35	1.1701E-17			放射化
14	Na-22	1.9976E-21			放射化
15	K-40	7.5388E-22			放射化
16	Fe-59	4.3044E-27			放射化
17	Sc-46	3.5685E-30			放射化
18	Cr-51	1.1706E-40			放射化
19	Ca-41	0.0000E+00			生成量なし
20	Se-79	0.0000E+00	1.0481E-07	100%	核分裂
21	Rb-87	0.0000E+00	6.0371E-06	100%	核分裂
22	Sr-90	0.0000E+00	1.0141E-05	100%	核分裂
23	Nb-94	0.0000E+00	7.6500E-12	100%	核分裂
24	Nb-95	0.0000E+00	9.6810E-24	100%	核分裂
25	Mo-93	0.0000E+00	5.7213E-18	100%	核分裂
26	Mo-99	0.0000E+00	0.0000E+00		生成量なし
27	Tc-99	0.0000E+00	1.9171E-05	100%	核分裂
28	Zr-93	0.0000E+00	1.6806E-05	100%	核分裂
29	Zr-95	0.0000E+00	8.0348E-24	100%	核分裂
30	Ru-103	0.0000E+00	6.1216E-35	100%	核分裂
31	Ru-106	0.0000E+00	1.7591E-09	100%	核分裂
32	Ag-108m	0.0000E+00	1.3559E-14	100%	核分裂
33	Ag-110m	0.0000E+00	1.3122E-14	100%	核分裂
34	I-129	0.0000E+00	2.9619E-06	100%	核分裂
35	I-131	0.0000E+00	0.0000E+00		生成量なし
36	Cs-134	0.0000E+00	4.6056E-09	100%	核分裂
37	Cs-135	0.0000E+00	2.4746E-05	100%	核分裂
38	Cs-137	0.0000E+00	2.0249E-05	100%	核分裂
39	Ba-133	0.0000E+00	4.4942E-15	100%	核分裂
40	Sb-124	0.0000E+00	1.2608E-29	100%	生成量なし
41	Sb-125	0.0000E+00	9.3154E-09	100%	生成量なし
42	Ce-141	0.0000E+00	1.3475E-40	100%	核分裂
43	Ce-144	0.0000E+00	7.9294E-10	100%	核分裂
44	Eu-152	0.0000E+00	2.6782E-09	100%	核分裂
45	Eu-154	0.0000E+00	1.6462E-08	100%	核分裂
46	Eu-155	0.0000E+00	4.0054E-08	100%	核分裂
47	Gd-153	0.0000E+00	1.0463E-15	100%	核分裂
48	Ho-166m	0.0000E+00	2.2682E-13	100%	核分裂
49	Hf-181	0.0000E+00			生成量なし
50	Au-199	0.0000E+00			生成量なし
51	Co-57				生成量なし
52	Tc-99m		0.0000E+00		生成量なし
53	Cd-113m		9.2212E-10	100%	核分裂
54	Sn-126		2.9862E-07	100%	核分裂

(3)　対象核種の選択

生成量が極度に微量である核種は、計算条件によって生成経路が変わる可能性があるため、感度解析を行うにあたり対象核種を絞り込むこととする。表 3.3-5 の結果より、不純物ウランの核分裂生成物よりも放射化生成物の生成量が大きいか同程度である核種を対象とする。また、生成量が比較的大きい主要な核種のみに絞り込むため、本検討では生成量の下限値を 10^{-9}g/ton とし、下限値以下の核種については省略することとした。

以上をふまえ、感度解析対象とする核種を表 3.3-6 にまとめる。

表 3.3-6　主要放射化核種

	放射化評価において注目すべき核種
ジルカロイ 2・ジルカロイ 4（17 核種）	Zr-93、Ni-59、Ni-63、Co-60、C-14、Nb-94、Sb-125、Ca-41、K-40、Fe-55、Tc-99、Mo-93、Be-10、Mn-54、Ag-108m、H-3、Zn-65、
SUS304（8 核種）	Ni-59、Ni-63、Fe-55、Co-60、Mn-54、Be-10、C-14、Cl-36
インコネル 718（16 核種）	Ni-59、Ni-63、Co-60、Nb-94、Mo-93、Tc-99、Fe-55、Zr-93、Mn-54、Be-10、Cl-36、C-14、Zn-65、Sr-90、Si-32、H-3

3.4. 感度解析結果

(1) 初期組成の感度解析

表 3.3-6 に示した核種を対象として、初期組成の感度解析を行った。感度係数の定義については(2.2-1)式の通りであり、これにより得られる値は、初期組成を 1%変化させた場合に着目核種の生成量が何%変化するかを意味している。なお、SUS304 の感度解析には、放射化核種の生成量が大きい下部タイプレート計算時（ボイド率 0%のライブラリ）の条件を使用した。ジルカロイ 2、SUS304、インコネル 718 の感度解析結果を表 3.4-1、表 3.4-2、表 3.4-3 にそれぞれ示す。

感度解析の結果から、着目核種の生成由来となる元素が明らかとなる。例えば、表 3.4-1(a)より、ジルカロイ 2 における Fe-55 の場合、鉄及びニッケルの 2 元素から生成されており、鉄からの生成量の寄与がほとんどであることがわかる。

ジルカロイ 2 の感度解析結果において、Zr-93、Ni-59、Ni-63 など、着目核種と生成由来の元素が同一である場合には、生成経路を容易に推測できるが、Fe-55 のニッケルからの生成や Be-10 のホウ素や炭素からの生成などは、断面積の感度解析結果などを用いて生成起源となる核反応を調査する必要がある。断面積の感度解析については次節で述べる。

また、初期組成の感度係数は生成経路の同定だけでなく、例えば、ある不純物の測定に起因する不確かさが着目核種の生成量にどの程度影響するかを定量的に評価する際などに利用することができる。

表 3.4-1　ジルカロイ 2 の初期組成の感度係数

(a)　Zr-93～K-40

着目核種 / 変数とした元素	Zr-93	Ni-59	Ni-63	Co-60	C-14	Nb-94	Sb-125	Ca-41	K-40
H	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	0	0	0	0	1.0000	0	0	0	0
Mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Si	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca	0	0	0	0	0	0	0	1.0000	1.0000
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe	0	0	0	0.0004	0	0	0	0	0
Co	0	0	0	0.9980	0	0	0	0	0
Ni	0	1.0000	0.9904	0.0015	0	0	0	0	0
Cu	0	0	0.0096	0.0001	0	0	0	0	0
Zr	1.0000	0	0	0	0	0.0001	0	0	0
Mo	0	0	0	0	0	0.0001	0	0	0
Nb	0	0	0	0	0	0.9998	0	0	0
Cd	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sn	0	0	0	0	0	0	1.0000	0	0
Hf	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(b)　Fe-55～Zn-65

着目核種 / 変数とした元素	Fe-55	Tc-99	Mo-93	Be-10	Mn-54	Ag-108m	H-3	Zn-65
H	0	0	0	0	0	0	0.9995	0
B	0	0	0	0.0334	0	0	0	0
C	0	0	0	0.9666	0	0	0	0
N	0	0	0	0	0	0	0.0003	0
Mg	0	0	0	0	0	0	0	0
Al	0	0	0	0	0	0	0	0
Si	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0
Mn	0	0	0	0	0.0032	0	0	0
Fe	0.9564	0	0	0	0.9967	0	0	0
Co	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	0.0436	0	0	0	0	0	0	0.0001
Cu	0	0	0	0	0	0	0	0.9999
Zr	0	0.0289	0	0	0	0	0	0
Mo	0	0.9711	1.0000	0	0	0	0	0
Nb	0	0	0	0	0	0	0	0
Cd	0	0	0	0	0	1.0000	0	0
Sn	0	0	0	0	0	0	0	0
Hf	0	0	0	0	0	0	0	0
W	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3.4-2　SUS304 の初期組成の感度係数

着目核種 / 変数とした元素	Ni-59	Ni-63	Fe-55	Co-60	Mn-54	Be-10	C-14	Cl-36
C	0	0	0	0	0	1.0000	1.0000	0
Si	0	0	0	0	0	0	0	0
P	0	0	0	0	0	0	0	0
S	0	0	0	0	0	0	0	1.0000
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0
Mn	0	0	0	0	0.0027	0	0	0
Fe	0	0	0.9890	0.0819	0.9974	0	0	0
Ni	1.0000	1.0000	0.0110	0.9181	0	0	0	0

表 3.4-3　インコネル 718 の初期組成の感度係数

(a)　Ni-59～Zr-93

着目核種 / 変数とした元素	Ni-59	Ni-63	Co-60	Nb-94	Mo-93	Tc-99	Fe-55	Zr-93
B	0	0	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	0	0
Al	0	0	0	0	0	0	0	0
Si	0	0	0	0	0	0	0	0
P	0	0	0	0	0	0	0	0
S	0	0	0	0	0	0	0	0
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0
Mn	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe	0	0	0.0001	0	0	0	0.7411	0
Co	0	0	0.9970	0	0	0	0	0
Ni	1.0000	0.9994	0.0028	0	0	0	0.2589	0
Cu	0	0.0006	0	0	0	0	0	0
Nb	0	0	0	0.9999	0	0	0	0.9839
Mo	0	0	0	0.0001	1.0000	1.0000	0	0.0161

(b)　Mn-54～H-3

着目核種 / 変数とした元素	Mn-54	Be-10	Cl-36	C-14	Zn-65	Sr-90	Si-32	H-3
B	0	0.5830	0	0	0	0	0	0
C	0	0.4170	0	1.0000	0	0	0	0
Al	0	0	0	0	0	0	0	0.0012
Si	0	0	0	0	0	0	0.7059	0.0011
P	0	0	0	0	0	0	0.2926	0.0002
S	0	0	1.0000	0	0	0	0.0015	0.0005
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0.0007
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0.0121
Mn	0.0019	0	0	0	0	0	0	0.0001
Fe	0.9982	0	0	0	0	0	0	0.0258
Co	0	0	0	0	0	0	0	0.0004
Ni	0	0	0	0	0.0014	0	0	0.9557
Cu	0	0	0	0	0.9985	0	0	0.0012
Nb	0	0	0	0	0	0.9841	0	0.0003
Mo	0	0	0	0	0	0.0159	0	0.0008

(2)　断面積の感度解析結果

続いて、表 3.3-6 に示した核種を対象として断面積の感度解析を行った。感度係数の定義は(2.2-2)式の通りである。これにより得られる値は、1 群断面積を 1%変化させたことにより着目核種の生成量が何%変化するかを意味しており、この値が大きい核反応は主要な生成経路であると考えることができる。なお、感度解析時の断面積の変化量は基準値に対して+10%として解析を実施した（(2.2-2)式において$\Delta\sigma = 0.1\sigma_0$とした）。

ジルカロイ 2、SUS304、インコネル 718 の結果を表 3.4-4、表 3.4-5、表 3.4-6 にそれぞれ示す。表中の反応種類のうち、添字がない核反応については基底状態への核反応であることを示し、励起状態への核反応については添字 m を付した。また、表には感度係数が 0 でないものについて全ての核反応を記載している。なお、SUS304 の感度解析には、初期組成の感度解析同様、下部タイプレート計算時（ボイド率 0%のライブラリ）の条件を使用した。

一般に放射化核種の生成が起こりうる経路は複数存在しているが、有意な大きさの感度係数を有するのは 1 つか 2 つの反応であり、感度解析結果より主要な生成経路を絞り込むことが可能である。例えば、ジルカロイ 2 における Fe-55 の場合、表 3.4-4 より、Fe-54 の(n,γ)反応による生成、 Ni-58 の(n,α)反応による生成、Fe-56 の(n,2n)反応による生成が経路として考えられるが、感度解析の結果より、主要な生成経路は Fe-54 の基底状態への(n,γ)反応であることがわかる。

感度係数 S が正の場合は、その反応が起こることによって着目核種の生成量が増加することを意味し、負の場合はその逆の効果を意味する。感度係数が負となる例の一つに、着目核種の中性子との核反応がある。これは、自身の断面積が増加すると自身の生成量は減少することによる。その他、主要な生成経路上にある核種の主要経路以外の反応については感度係数が負となる。例えば、表 3.4-4 の Sb-125 の表において、Sn-124 の(n,2n)反応は感度係数が負である。この理由は、主要な生成経路以外の反応の断面積が増加することで Sn-124 の存在量が減少するため、主要経路の Sn-124 の(n,γ)反応および(n,γ)_m 反応の反応率が低下し、結果として Sb-125 の生成量が減少するためであると考えられる。

表 3.4-4　ジルカロイ 2 の断面積の感度係数(1/2)

Zr-93

	Nuclide	XS type	S
1	Zr-92	(n,γ)	0.97536
2	Zr-94	(n,2n)	0.02400
3	Zr-93	(n,γ)	-0.00957
4	Zr-91	(n,γ)	0.00238
5	Zr-93	(n,2n)	-0.00005

Ni-63

	Nuclide	XS type	S
1	Ni-62	(n,γ)	0.97135
2	Ni-63	(n,γ)	-0.03183
3	Cu-63	(n,p)	0.00956
4	Ni-61	(n,γ)	0.00122
5	Ni-60	(n,γ)	0.00008
6	Cu-63	(n,γ)	-0.00006
7	Ni-64	(n,2n)	0.00006

C-14

	Nuclide	XS type	S
1	N-14	(n,p)	0.99722
2	N-14	(n,α)	-0.00033
3	N-14	(n,γ)	-0.00008
4	C-13	(n,γ)	0.00005

Sb-125

	Nuclide	XS type	S
1	Sn-124	(n,γ)	0.55759
2	Sn-124	(n,γ)_m	0.48218
3	Sb-125	(n,γ)	-0.01967
4	Sb-125	(n,γ)_m	-0.00087
5	Sn-125	(n,γ)	-0.00008
6	Sb-124	(n,γ)	0.00004
7	Sb-123	(n,γ)	0.00004
8	Sn-124	(n,2n)	-0.00004
9	Sn-122	(n,γ)_m	0.00004

K-40

	Nuclide	XS type	S
1	Ca-40	(n,p)	0.99958
2	K-40	(n,γ)	-0.03550
3	K-40	(n,p)	-0.00474
4	K-40	(n,α)	-0.00135
5	Ca-40	(n,γ)	-0.00050
6	Ca-40	(n,α)	-0.00018

Ni-59

	Nuclide	XS type	S
1	Ni-58	(n,γ)	0.99342
2	Ni-59	(n,γ)	-0.11890
3	Ni-59	(n,α)	-0.01963
4	Ni-58	(n,p)	-0.00046
5	Ni-60	(n,2n)	0.00005
6	Ni-58	(n,α)	-0.00003

Co-60

	Nuclide	XS type	S
1	Co-59	(n,γ)_m	0.46379
2	Co-59	(n,γ)	0.42397
3	Co-60	(n,γ)	-0.00317
4	Ni-60	(n,p)	0.00113
5	Fe-58	(n,γ)	0.00043
6	Ni-58	(n,p)	0.00037
7	Co-58	(n,γ)	0.00033
8	Cu-63	(n,α)	0.00006

Nb-94

	Nuclide	XS type	S
1	Nb-93	(n,γ)	0.99800
2	Nb-94	(n,γ)	-0.05983
3	Nb-93	(n,γ)_m	-0.00511
4	Nb-94	(n,γ)_m	-0.00231
5	Nb-95	(n,2n)	0.00013
6	Zr-94	(n,γ)	0.00013
7	Mo-94	(n,p)	0.00007
8	Nb-94	(n,2n)	-0.00003

Ca-41

	Nuclide	XS type	S
1	Ca-40	(n,γ)	0.99942
2	Ca-40	(n,p)	-0.00040
3	Ca-40	(n,α)	-0.00016

Fe-55

	Nuclide	XS type	S
1	Fe-54	(n,γ)	0.94899
2	Ni-58	(n,α)	0.04358
3	Fe-56	(n,2n)	0.00385
4	Fe-54	(n,p)	-0.00038
5	Ni-58	(n,γ)	-0.00028

表 3.4-4　ジルカロイ 2 の断面積の感度係数(2/2)

Tc-99

	Nuclide	XS type	S
1	Mo-98	(n,γ)	0.99511
2	Tc-99	(n,γ)	-0.10990
3	Mo-97	(n,γ)	0.03262
4	Zr-96	(n,γ)	0.02885
5	Mo-100	(n,2n)	0.00147
6	Mo-99	(n,γ)	-0.00012
7	Mo-96	(n,γ)	0.00003
8	Mo-98	(n,2n)	-0.00002
9	Tc-99	(n,p)	-0.00001
10	Tc-99	(n,α)	-0.00001
11	Tc-99	(n,2n)	-0.00001
12	Mo-100	(n,γ)	-0.00001
13	Mo-98	(n,α)	-0.00001
14	Mo-97	(n,2n)	-0.00001
15	Zr-96	(n,2n)	-0.00001

Be-10

	Nuclide	XS type	S
1	C-13	(n,α)	0.96597
2	B-10	(n,p)	0.03336
3	B-10	(n,α)	-0.03031
4	C-12	(n,α)	0.00065
5	Be-9	(n,γ)	0.00065
6	C-12	(n,γ)	0.00040

Ag-108m

	Nuclide	XS type	S
1	Cd-106	(n,γ)	0.99538
2	Ag-107	(n,γ)_m	0.97148
3	Ag-107	(n,γ)	-0.04792
4	Cd-108	(n,2n)	0.00040

Zn-65

	Nuclide	XS type	S
1	Zn-64	(n,γ)	1.00040
2	Cu-63	(n,γ)	0.99559
3	Ni-62	(n,γ)	0.00311
4	Cu-65	(n,2n)	0.00250
5	Cu-63	(n,p)	0.00061
6	Zn-64	(n,α)	0.00036
7	Cu-63	(n,α)	0.00025
8	Cu-63	(n,2n)	-0.00007

Mo-93

	Nuclide	XS type	S
1	Mo-92	(n,γ)	0.99491
2	Mo-94	(n,2n)	0.00440
3	Mo-92	(n,p)	-0.00004

Mn-54

	Nuclide	XS type	S
1	Fe-54	(n,p)	0.99594
2	Mn-54	(n,γ)	-0.00726
3	Fe-54	(n,γ)	-0.00457
4	Mn-55	(n,2n)	0.00328
5	Mn-55	(n,γ)	-0.00046
6	Cr-54	(n,γ)	-0.00018
7	Fe-54	(n,α)	-0.00008

H-3

	Nuclide	XS type	S
1	H-2	(n,γ)	1.00000
2	H-1	(n,γ)	0.77656
3	He-3	(n,p)	0.01328
4	H-2	(n,2n)	-0.00003

表 3.4-5　SUS304 の断面積の感度係数

Ni-59

	Nuclide	XS type	S
1	Ni-58	(n,γ)	0.99952
2	Ni-59	(n,γ)	-0.00778
3	Ni-59	(n,α)	-0.00129
4	Ni-60	(n,2n)	0.00002
5	Ni-58	(n,p)	-0.00002

Fe-55

	Nuclide	XS type	S
1	Fe-54	(n,γ)	0.98574
2	Ni-58	(n,α)	0.01104
3	Fe-56	(n,2n)	0.00297
4	Fe-54	(n,p)	-0.00001

Mn-54

	Nuclide	XS type	S
1	Fe-54	(n,p)	0.99724
2	Mn-55	(n,2n)	0.00278
3	Mn-54	(n,γ)	-0.00023
4	Mn-55	(n,γ)	0.00015
5	Fe-54	(n,γ)	0.00006
6	Cr-54	(n,γ)	0.00004

C-14

	Nuclide	XS type	S
1	C-13	(n,γ)	0.99999
2	C-12	(n,γ)	0.00003

Ni-63

	Nuclide	XS type	S
1	Ni-62	(n,γ)	0.99866
2	Ni-63	(n,γ)	-0.00212
3	Ni-61	(n,γ)	0.00006
4	Ni-64	(n,2n)	0.00004

Co-60

	Nuclide	XS type	S
1	Ni-60	(n,p)	0.91683
2	Fe-58	(n,γ)	0.08192
3	Co-59	(n,γ)	0.03816
4	Co-59	(n,γ)_m	0.03805
5	Ni-58	(n,p)	0.00114
6	Co-58	(n,γ)	0.00110
7	Ni-60	(n,γ)	-0.00025
8	Co-60	(n,γ)	-0.00019
9	Ni-58	(n,γ)	0.00013
10	Fe-57	(n,γ)	0.00009
11	Ni-62	(n,α)	0.00002

Be-10

	Nuclide	XS type	S
1	C-13	(n,α)	0.99996
2	C-12	(n,α)	0.00005
3	Be-9	(n,γ)	0.00005
4	C-12	(n,γ)	0.00003

Cl-36

	Nuclide	XS type	S
1	S-34	(n,γ)	0.99993
2	Cl-35	(n,γ)	0.99759
3	Cl-36	(n,γ)	-0.00049

表 3.4-6　インコネル 718 の断面積の感度係数(1/2)

Ni-59

	Nuclide	XS type	S
1	Ni-58	(n,γ)	0.99342
2	Ni-59	(n,γ)	-0.11891
3	Ni-59	(n,α)	-0.01962
4	Ni-58	(n,p)	-0.00046
5	Ni-60	(n,2n)	0.00006
6	Ni-58	(n,α)	-0.00003

Co-60

	Nuclide	XS type	S
1	Co-59	(n,γ)_m	0.46337
2	Co-59	(n,γ)	0.42357
3	Co-60	(n,γ)	-0.00316
4	Ni-60	(n,p)	0.00215
5	Ni-58	(n,p)	0.00070
6	Co-58	(n,γ)	0.00066
7	Fe-58	(n,γ)	0.00012

Mo-93

	Nuclide	XS type	S
1	Mo-92	(n,γ)	0.99492
2	Mo-94	(n,2n)	0.00441
3	Mo-92	(n,p)	-0.00004

Fe-55

	Nuclide	XS type	S
1	Fe-54	(n,γ)	0.73538
2	Ni-58	(n,α)	0.25889
3	Fe-56	(n,2n)	0.00298
4	Ni-58	(n,γ)	-0.00178
5	Fe-54	(n,p)	-0.00029
6	Ni-58	(n,p)	-0.00015

Mn-54

	Nuclide	XS type	S
1	Fe-54	(n,p)	0.99747
2	Mn-54	(n,γ)	-0.00689
3	Fe-54	(n,γ)	-0.00411
4	Mn-55	(n,2n)	0.00194
5	Cr-54	(n,γ)	0.00027
6	Mn-55	(n,γ)	-0.00010
7	Fe-54	(n,α)	0.00004

Ni-63

	Nuclide	XS type	S
1	Ni-62	(n,γ)	0.98013
2	Ni-63	(n,γ)	-0.03183
3	Ni-61	(n,γ)	0.00124
4	Cu-63	(n,p)	0.00061
5	Ni-64	(n,2n)	0.00006
6	Ni-60	(n,γ)	0.00006

Nb-94

	Nuclide	XS type	S
1	Nb-93	(n,γ)	0.99813
2	Nb-94	(n,γ)	-0.05985
3	Nb-93	(n,γ)_m	-0.00512
4	Nb-94	(n,γ)_m	-0.00232
5	Mo-94	(n,p)	0.00006
6	Nb-94	(n,2n)	-0.00006

Tc-99

	Nuclide	XS type	S
1	Mo-98	(n,γ)	0.99500
2	Tc-99	(n,γ)	-0.11148
3	Mo-97	(n,γ)	0.00402
4	Mo-100	(n,2n)	0.00152
5	Mo-99	(n,γ)	-0.00011
6	Mo-96	(n,γ)	0.00004
7	Mo-98	(n,2n)	-0.00002

Zr-93

	Nuclide	XS type	S
1	Nb-93	(n,p)	0.98392
2	Mo-96	(n,α)	0.01609
3	Zr-93	(n,γ)	-0.00956
4	Nb-93	(n,γ)_m	-0.00489
5	Nb-93	(n,γ)	-0.00159
6	Mo-95	(n,γ)	0.00076
7	Mo-96	(n,γ)	-0.00008
8	Mo-95	(n,α)	0.00008
9	Zr-92	(n,γ)	0.00008

Be-10

	Nuclide	XS type	S
1	B-10	(n,p)	0.58300
2	B-10	(n,α)	-0.52958
3	C-13	(n,α)	0.41674
4	C-12	(n,α)	0.00029
5	Be-9	(n,γ)	0.00029
6	C-12	(n,γ)	0.00018
7	B-10	(n,γ)	-0.00007

表 3.4-6　インコネル 718 の断面積の感度係数(2/2)

Cl-36

	Nuclide	XS type	S
1	S-34	(n,γ)	0.99979
2	Cl-35	(n,γ)	0.96501
3	Cl-36	(n,γ)	-0.00761
4	Cl-35	(n,p)	-0.00012
5	Cl-35	(n,α)	-0.00012
6	S-36	(n,2n)	0.00006
7	S-33	(n,γ)	0.00006

C-14

	Nuclide	XS type	S
1	C-13	(n,γ)	0.99999
2	C-12	(n,γ)	0.00040
3	C-13	(n,α)	-0.00002

Si-32

	Nuclide	XS type	S
1	Si-31	(n,γ)	1.00000
2	Si-30	(n,γ)	0.70567
3	P-31	(n,p)	0.29269
4	S-34	(n,α)	0.00146
5	Si-29	(n,γ)	0.00018
6	P-31	(n,γ)	-0.00006
7	S-33	(n,α)	0.00003

Zn-65

	Nuclide	XS type	S
1	Zn-64	(n,γ)	0.99399
2	Cu-63	(n,γ)	0.99042
3	Zn-64	(n,α)	-0.00208
4	Cu-63	(n,p)	-0.00190
5	Ni-64	(n,γ)	-0.00149
6	Cu-65	(n,2n)	-0.00137
7	Ni-62	(n,γ)	0.00125
8	Cu-63	(n,α)	-0.00036
9	Cu-63	(n,2n)	-0.00030
10	Ni-63	(n,γ)	-0.00018

Sr-90

	Nuclide	XS type	S
1	Zr-93	(n,α)	0.99991
2	Nb-93	(n,p)	0.98407
3	Zr-93	(n,γ)	-0.00648
4	Nb-93	(n,γ)_m	-0.00335
5	Nb-93	(n,γ)	-0.00108
6	Nb-93	(n,2n)	-0.00008
7	Zr-93	(n,2n)	-0.00008
8	Sr-90	(n,2n)	-0.00008
9	Sr-90	(n,γ)	-0.00008

H-3

	Nuclide	XS type	S
1	H-2	(n,γ)	0.99999
2	H-1	(n,γ)	0.99977
3	Ni-58	(n,p)	0.94686
4	He-3	(n,p)	0.01107
5	Ni-60	(n,p)	0.00828
6	Ni-58	(n,γ)	-0.00268

(3)　感度係数に関する留意点

3.4 (1)節及び 3.4(2)節で示した感度係数は、3.1 節で設定した計算条件下において得られた値であり、計算条件が変化する場合には感度係数の値も変化することに注意が必要である。特に、初期組成条件については、JIS 規格に定められていない微量不純物が材料中に存在している場合も考えられ、そのような場合には放射化生成物の生成量が変化し、感度係数も変化することが予想される。

参考として、分析データに基づいて設定された初期組成条件を使用した場合の計算結果を付録 A.2 に示す。

3.5. 感度係数と生成経路の寄与率の関係

表 3.4-1～表 3.4-3 より、初期組成の感度係数の総和は 1 となり、表 3.4-4～表 3.4-6 より、1 回の核反応により生成される核種については、断面積の感度係数の総和は 1 に近い値となっていることがわかる。総和が 1 に近い値であることから、感度係数が着目核種の全生成量に対する当該生成経路の寄与率を示しているのではないかと推測される。

ここでは、感度係数と生成経路の寄与率の関係性を簡単な例を用いて説明する。

(1) 着目核種生成量の解析解

着目核種の生成量の解析解を得るため、簡単な例を用いて考察する。着目核種 i が、初期組成として存在する親核種 j の反応種類 x によって生成されるとし、親核種 j の生成及び崩壊による消滅がない場合を考える。また、着目核種 i の生成経路は親核種 j の反応種類 x の核反応のみとし、他の核種からの生成経路はないものとする。放射化計算の模式図を図 3.5-1 に示す。

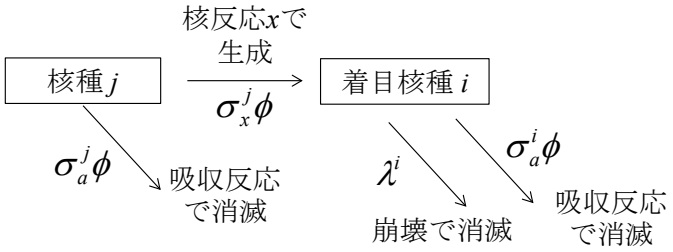


図 3.5-1 放射化計算の模式図

このとき、着目核種 i 及び親核種 j の生成量 N^i 及び N^j の時間変化は以下の式で表わされる。

$$\frac{dN^j}{dt} = -N^j \sigma_a^j \phi \tag{3.5-1}$$

$$\frac{dN^i}{dt} = N^j \sigma_x^j \phi - (\lambda^i + \sigma_a^i \phi) N^i \tag{3.5-2}$$

ここで、各変数を以下のように定義する。

σ_x^j ： 核種 j の反応種類 x の 1 群断面積 [barn]

σ_a^i ： 核種 i の 1 群吸収断面積 [barn]

σ_a^j ： 核種 j の 1 群吸収断面積 [barn]

ϕ ： 中性子束 [1/cm^{2}s]（照射期間中一定）

λ^i ：　核種 i の崩壊定数 [1/s]

(3.5-1)式を解くと以下のようになる。

$$N^j(t) = N_0^j \exp(-\sigma_a^j \phi\ t) \tag{3.5-3}$$

ここで、N_0^j は親核種 j の初期組成量である。さらに、(3.5-3)式を用いて、(3.5-2)式の微分方程式を解くと、以下のようになる。

$$N^i(t) = \left\{ C - \frac{N_0^j \sigma_x^j \phi}{\sigma_a^j \phi - \lambda^i - \sigma_a^i \phi} \exp\left\{ -(\sigma_a^j \phi - \lambda^i - \sigma_a^i \phi)t \right\} \right\} \exp\left\{ -(\lambda^i + \sigma_a^i \phi)t \right\} \tag{3.5-4}$$

ここで、C は積分定数であり、初期条件 $N^i(0) = 0$ より、以下のように求められる。

$$C = \frac{N_0^j \sigma_x^j \phi}{\sigma_a^j \phi - \lambda^i - \sigma_a^i \phi} \tag{3.5-5}$$

したがって、着目核種の生成量 N^i は以下の通りとなる。

$$N^i(t) = \frac{N_0^j \sigma_x^j \phi}{\sigma_a^j \phi - \lambda^i - \sigma_a^i \phi} \left[\exp\left\{ -(\lambda^i + \sigma_a^i \phi)t \right\} - \exp(-\sigma_a^j \phi\ t) \right] \tag{3.5-6}$$

(3.5-6)式より、着目核種の生成量 N^i は親核種の初期組成 N_0^j に比例することがわかる。

$$N^i(t) \propto N_0^j \tag{3.5-7}$$

一方、(3.5-6)式より、親核種 j から放射化核種 i への生成反応の断面積 σ_x^j については、σ_a^j が核種 j の吸収断面積であることから、σ_x^j が変化すると σ_a^j も変化するため、着目核種の生成量 N^i は σ_x^j に比例する形とはならないことがわかる。そこで、近似式を用いて、式を簡単化する。ここで、指数関数の引数が 1 に比べて十分に小さいとき、すなわち、

$$\begin{gathered} \sigma_a^j \phi\ t << 1 \\ (\lambda^i + \sigma_a^i \phi)t << 1 \end{gathered} \tag{3.5-8}$$

である場合には、指数関数に対し以下の近似式を適用することができる。

$$\exp(x) \approx 1 + x \tag{3.5-9}$$

(3.5-9)式を(3.5-6)式に代入すると、以下のように簡単化される。

$$\begin{aligned} N^i(t) &\approx \frac{N_0^j \sigma_x^j \phi}{\sigma_a^j \phi - \lambda^i - \sigma_a^i \phi} \left[1 - (\lambda^i + \sigma_a^i \phi) t - (1 - \sigma_a^j \phi\ t) \right] \\ &= N_0^j \sigma_x^j \phi\ t \end{aligned} \tag{3.5-10}$$

したがって、(3.5-9)式の近似が妥当である場合に限り、着目核種の生成量 N^i は生成反応の断面積 σ_x^j と時間積分照射量 $\phi\ t$ に比例する。

(2)　感度係数と生成経路の寄与率の関係

(i)　生成経路が 1 種類の場合

着目核種 i の生成経路が親核種 j の反応種類 x の核反応のみである場合について、感度係数を解析的に求める。

いま、感度解析対象としている核種が親核種 j である場合を考える。感度解析の変化率を b (-1 < b < 1) とし、感度解析対象核種 j の初期組成を N_0^j から $(1+b)N_0^j$ に変化させた場合、着目核種の生成量 W' は親核種の初期組成に比例するため、以下のように表される。

$$W' = (1+b)W_0 \tag{3.5-11}$$

ここで、W_0 は初期組成を変化させる前の着目核種の生成量である。感度係数を(2.2-1)式より求めると、

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{\Delta W / W_0}{\Delta X / X_0} = \frac{W' / W_0 - 1}{X' / X_0 - 1} \\ &= \frac{(1+b)-1}{(1+b)-1} = \frac{b}{b} = 1.0 \end{aligned} \tag{3.5-12}$$

となり、生成起源となる核種が 1 種類である場合には、感度係数は 1.0 となる。

また、断面積の感度係数については、(3.5-9)式の近似が妥当である場合に限り、着目核種の生成量 N^i が生成反応の断面積 σ_x^j に比例し、初期組成の感度係数と同様に、断面積の感度係数は 1.0 となる。(3.5-9)式の近似が妥当でない場合には、感度係数は 1.0 とならない。

(ii)　生成経路が複数ある場合

次に、着目核種 i の生成経路が複数存在する場合について、感度係数を求める。

着目核種 i に対し、生成起源となる核種が複数存在するとき、着目核種の生成量 W_{all} を以下のように表す。

$$W_{all} = \sum_j W^j \tag{3.5-13}$$

ここで、W^j は親核種 j を生成起源とする着目核種の生成量である。いま、感度解析対象の核種 k の初期組成を N_0^k から $(1+b)N_0^k$ に変化させた場合、核種 k を起源とする生成量 $W^{k'}$ は、以下のように表される。

$$W^{k'} = (1+b)W^k \tag{3.5-14}$$

このとき、全生成量W_{all}'は以下のように表される。

$$W_{all}' = W^{k'} + \sum_{j \neq k} W^j = (1+b)W^k + \sum_{j \neq k} W^j \tag{3.5-15}$$

したがって、

$$\Delta W = W_{all}' - W_{all} = bW^k \tag{3.5-16}$$

である。このとき、感度係数を(2.2-1)式より求めると、

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{\Delta W / W_0}{\Delta X / X_0} \\ &= \frac{bW^k / W_{all}}{b} = \frac{W^k}{W_{all}} \end{aligned} \tag{3.5-17}$$

となる。(3.5-17)式は、初期組成の感度係数が核種 k を生成起源とする生成量の全生成量に対する寄与率であることを示している。

断面積の感度係数の場合は、(3.5-9)式の近似が妥当である場合に限り、初期組成の感度解析の例と同様に、感度係数は核種 k の反応種類 x の核反応を生成経路とする寄与率を表す。

一方、感度解析対象の断面積を 0 として感度係数を求めた場合には、感度係数と生成経路の寄与率を関係づけることが可能である。

初期組成の感度係数の議論と同様に、着目核種 i に対し、生成経路となる核反応が複数存在するとき、着目核種の生成量W_{all} を以下のように表す。

$$W_{all} = \sum_j W^j \tag{3.5-18}$$

ここで、W^j は核反応 j を生成経路とする着目核種の生成量である。

いま核反応 k の断面積を 0 として生成経路を断ち切る計算を行った場合、その核反応を経由する生成量は 0 となる（$W^{k'} = 0$）ため、全生成量は以下のように表わされる。

$$W_{all}' = \sum_{j \neq k} W^j \tag{3.5-19}$$

したがって、

$$\Delta W = W_{all}' - W_{all} = -W^k \tag{3.5-20}$$

となる。断面積を 0 とすることは、断面積の変化率 b を b = -1.0 とすることと同義であるため、(2.2-2)式より感度係数は以下のように表わされる。

$$
\begin{aligned}
S_2 &= \frac{\Delta W / W_0}{\Delta \sigma / \sigma_0} \\
&= \frac{-W^k / W_{all}}{-1.0} = \frac{W^k}{W_{all}}
\end{aligned}
\tag{3.5-21}
$$

したがって、感度解析対象の核反応の断面積を 0 としたときの感度係数は、その核反応を生成経路とする生成量の全生成量に対する寄与率を表す。

(3)　全生成量に対する寄与率の計算例

断面積を 0 として全生成量に対する寄与率を計算した例として、ジルカロイ 2 における Fe-55 の例を示す。表 3.4-4 の感度係数の値から、Fe-55 の生成経路として図 3.5-2 に示す 3 種類の経路が考えられる。

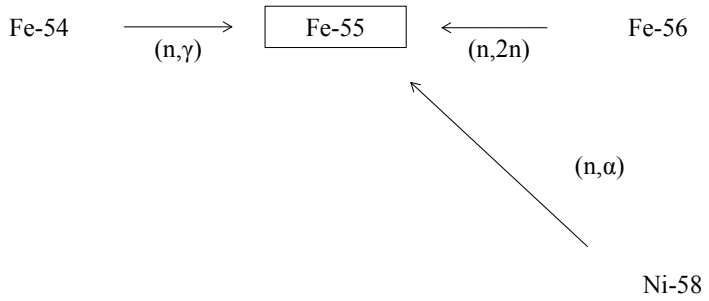


図 3.5-2　ジルカロイ 2 における Fe-55 の生成経路

3 種類の生成経路について生成反応の断面積を 0 として生成経路を断ち切る計算を行い、全生成量に対する寄与率を求めた。結果を表 3.5-1 に示す。また、表 3.4-1 の初期組成の感度係数から求めた各元素の全生成量に対する寄与率を表 3.5-2 に示す。表 3.5-1 及び表 3.5-2 より、両者の結果が整合していることが確認できる。

表 3.5-1　断面積を 0 とする方法で求めた寄与率

	全生成量に対する寄与率
Fe-54 (n,γ)	95.26%
Fe-56 (n,2n)	0.38%
Ni-58 (n,α)	4.36%

表 3.5-2　初期組成の感度係数から求めた寄与率

	全生成量に対する寄与率
Fe	95.64%
Ni	4.36%

なお、表 3.4-4 の感度係数（断面積の変化量を+10%とした場合）と断面積を 0 とする方法で求めた感度係数（断面積の変化量を-100%とした場合）とでは、表 3.5-3 に示すようにわずかに値が異なることが確認できる。表 3.4-4～表 3.4-6 の感度係数が全生成量に対する寄与率を表しているわけではないことに注意が必要である。

表 3.5-3　断面積変化量が異なる場合の感度係数の比較

	b = +10%とした場合の感度係数	b = -100%とした場合の感度係数
Fe-54 (n,γ)	0.94899	0.95259
Fe-56 (n,2n)	0.00385	0.00383
Ni-58 (n,α)	0.04358	0.04358

3.6. 解析結果の考察

(1) 初期組成の違いによる放射化核種生成量への影響

表 3.3-1 において、ジルカロイ 2 とジルカロイ 4 の放射化核種生成量の結果を示し、初期組成である鉄やニッケルの組成が変化することによって、それらを由来とする放射化核種の生成量が変化することを述べた。

一方、3.4 節で初期組成の感度解析を行ったが、この感度係数から生成量の変化量を求めることができる。言い換えると、初期組成の感度係数は、ある元素の初期組成が 1%変化した時の生成量の変化量であることから、感度係数に初期組成変化量を乗じることで生成量の変化量を求めることができる。

ジルカロイ 2 の放射化核種の初期組成の感度係数、ジルカロイ 2 をジルカロイ 4 としたときの初期組成変化量、及びそれらから求めた生成量の変化量を表 3.6-1 に示す。表 3.6-1 より、感度解析の結果から求めた生成量の変化量は、表 3.3-1 の結果と一致していることが確認できる。

また、ジルコニウムを生成源とする放射化核種についても、多くの核種で初期ジルコニウム組成に対する感度係数が 1.0 であることから、ジルコニウムの初期組成変化量と生成量変化量（-0.03%）が一致していることが確認できる。

表 3.6-1 ジルカロイ 2 の初期組成の感度係数から求めた生成量の変化量

着目核種	初期組成感度係数		初期組成変化量 [%]		生成量変化量 [%]
	Fe	Ni	Fe	Ni	
Ni-59	0.0000	1.0000	55.56	-87.27	-87.27
Ni-63	0.0000	0.9904			-86.44
Fe-55	0.9564	0.0436			49.33
Mn-54	0.9964	0.0000			55.35

(2) 断面積ライブラリの違いによる放射化核種生成量への影響

表 3.3-2 において、上部タイプレート及び下部タイプレートの計算結果の違いは、使用しているライブラリ、つまり断面積が異なることによって生じる。そのため、断面積の感度係数から、生成量の違いを算出することができると考えられる。そこで、生成経路が 1 つの核反応から構成されるような単純な核種に限定し、断面積の感度係数から、生成量の比を算出する。

具体的な方法としては、2 つのライブラリ間の断面積の変化率を計算し、これに表 3.4-5 で求めた断面積の感度係数を乗じることで、生成量の変化率が求められる。この値から上部タイプレートと下部タイプレートでの生成量の比が算出される。計算結果を表 3.6-2 に示す。なお、Fe-55 については、Fe-54 の(n,γ)反応と Ni-58 の(n,α)反応の独立した 2 つの反応から生成されるため、それぞれの変化率を足し合わせた値が、Fe-55 全体の変化率であるとし

て計算した。

表 3.6-2 より、感度解析結果から求めた上部タイプレートにおける生成量（$W_0 + \Delta W$）と下部タイプレートにおける生成量（W_0）の比は、表 3.3-2 の結果と一致することが確認できる。

表 3.6-2　感度解析結果から求めた生成量の比率（SUS304）

着目核種	生成源の核種	断面積の種類	断面積 ①BS300J40 ボイド率70%	断面積 ②BS370J40 ボイド率0%	$\Delta\sigma/\sigma_0$ (①－②)／②	感度係数 S_2	$\Delta W/W_0$	Ratio (Top/Bottom)
Ni-59	Ni-58	(n,γ)	3.14.E-01	5.91.E-01	-0.47	0.99952	-0.468	0.53
Ni-63	Ni-62	(n,γ)	9.57.E-01	1.81.E+00	-0.47	0.99866	-0.470	0.53
Fe-55	Fe-54	(n,γ)	1.59.E-01	2.93.E-01	-0.46	0.98574	-0.451	0.55
	Ni-58	(n,α)	2.20.E-03	2.20.E-03	0.00	0.01104		
Mn-54	Fe-54	(n,p)	2.54.E-02	2.52.E-02	0.01	0.99724	0.007	1.01
C-14	C-13	(n,γ)	1.81.E-04	2.48.E-04	-0.27	1.00000	-0.269	0.73

また、表 3.6-2 の断面積の欄より、(n,γ)反応はライブラリ間で大きく変化があるのに対し、(n,p)反応や(n,α)反応などの荷電粒子反応はほとんど変化がないことがわかる。これは、以下の理由による。

(n,γ) 反応の断面積は、一般的に 1/v 則に従うため、熱中性子領域で比較的大きな断面積を有しており、スペクトルの軟らかいボイド率 0%のライブラリの方が、断面積が大きくなる。一方、荷電粒子放出反応の断面積は、中重核に対しては閾値反応であり、熱中性子領域には断面積を持たず、高速中性子領域にのみ断面積を有する構造である。したがって、本検討のような熱中性子領域のスペクトルが異なるライブラリにおいても、ほぼ同じ値をとることがわかる。

以上のことから、荷電粒子放出反応で生成される Mn-54 については、ライブラリ間で生成量にほぼ変化がない結果となった。

(3)　トリチウム（H-3）の生成に関する考察

H-3 の生成経路について、以下の疑問点が挙げられる。

① ジルカロイ 2 の放射化で生成される H-3 に関して、H-1 の(n,γ)反応で生成した H-2 が再び(n,γ)反応を起こすことで生成される経路と、初期組成として微量に存在する H-2 から直接(n,γ)反応により生成される経路の 2 通りが考えられるが、どちらが主要な経路であるか。

② インコネル 718 の放射化計算における H-3 の主要な生成経路は、断面積の感度解析の結果（表 3.4-6 参照）より、Ni-58 の(n,p)反応により生成される H-1 を起源とする経路であるが、複数核種の(n,p)反応のうち、Ni-58 の(n,p)反応の感度係数が突出して大きいのはなぜか。

以下では、①及び②の疑問点に関して追加の検討を行った結果を示す。

➢ H-3 の生成経路

①の疑問点に対し、H-1 と H-2 のどちらが H-3 の生成起源として主要なものであるかを明らかにするため、初期組成核種の感度解析を実施した。具体的には、本文中の計算では元素入力の初期組成を設定していたが、このうち水素元素についてのみ核種入力としたうえで、H-1 及び H-2 の初期組成の感度解析を実施した。

初期組成核種の感度解析用の入力値を表 3.6-3 に示す。これらを入力値として放射化計算を行い、H-3 の生成量の基準ケースからの変化量より感度係数を求めた。感度係数の定義は、式(2.2-1)の通りである。結果を表 3.6-4 に示す。

表 3.6-4 より、H-1 の感度係数の方が大きく、H-1 を由来とする生成経路の方が主要な反応であることが明らかとなった。

表 3.6-3 感度解析のための入力値

		基準ケース	H-1組成+10%	H-2組成+10%
初期組成	H-1	2.49943E+01	2.74937E+01	2.49943E+01
[g]	H-2	5.74934E-03	5.74934E-03	6.32427E-03

表 3.6-4 H-3 の初期組成核種の感度係数

	H-3生成量	感度係数
基準ケース	3.03351E-08	-
H-1組成+10%	3.26907E-08	0.777
H-2組成+10%	3.10124E-08	0.223

➢ インコネル 718 における H-3 の主要な生成経路

②の疑問点に対して、Ni-58 の(n,p)反応の感度係数が他の反応に比べて大きい理由を明らかにするために、インコネル 718 の初期組成に含まれる全ての核種について、組成量を図 3.6-1 に、(n,p)反応の断面積を図 3.6-2 に図示した。また、(n,p)反応の反応率に比例する値として、(n,p)反応の断面積と組成量から求めた原子数の積を求め、図 3.6-3 に示した。

図 3.6-1～図 3.6-3 より、Ni-58 は、初期組成量が比較的大きい点、及び(n,p)反応断面積が比較的大きい点から、(n,p)反応の反応率が他の核種の反応数に比べて 2 桁程度大きくなる。このため、Ni-58 の(n,p)反応の感度係数が大きくなる。

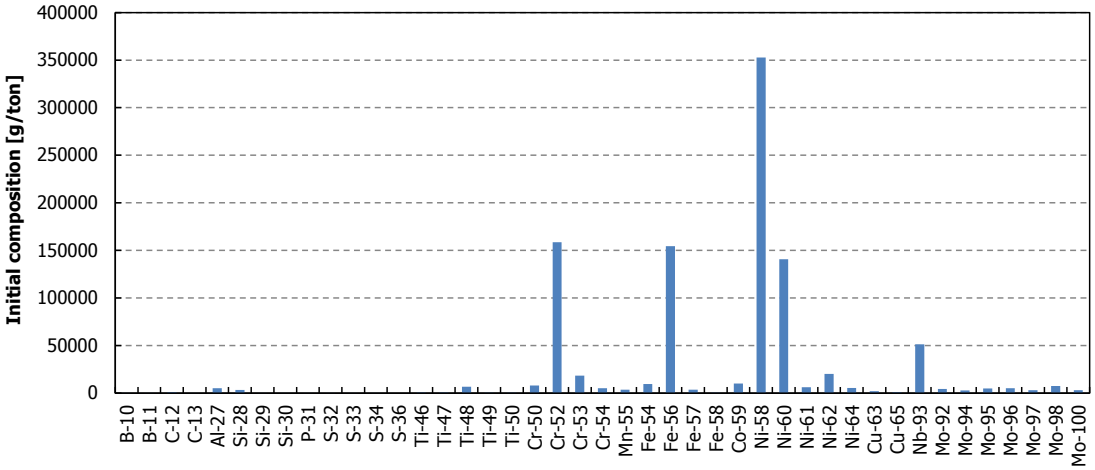


図 3.6-1　インコネル 718 の初期組成核種の組成量

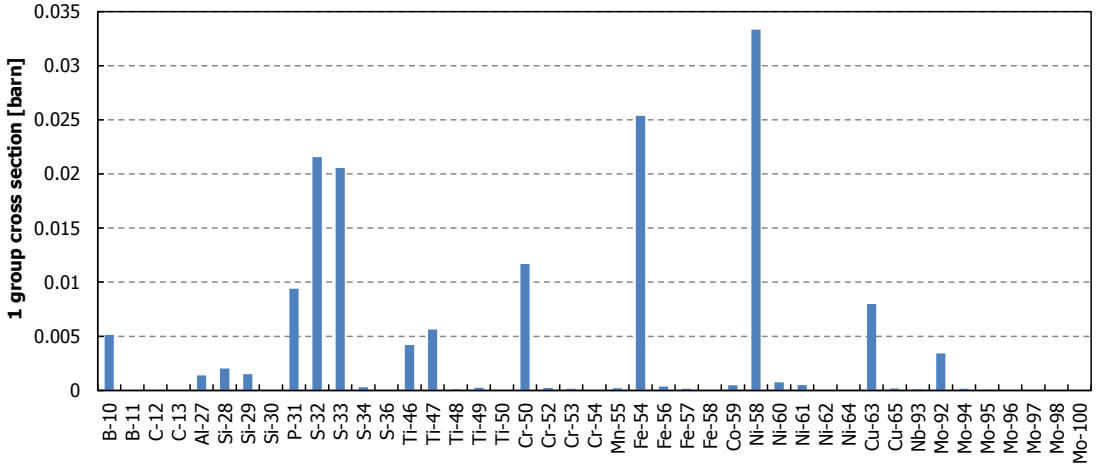


図 3.6-2　インコネル 718 の初期組成核種の(n,p)反応断面積

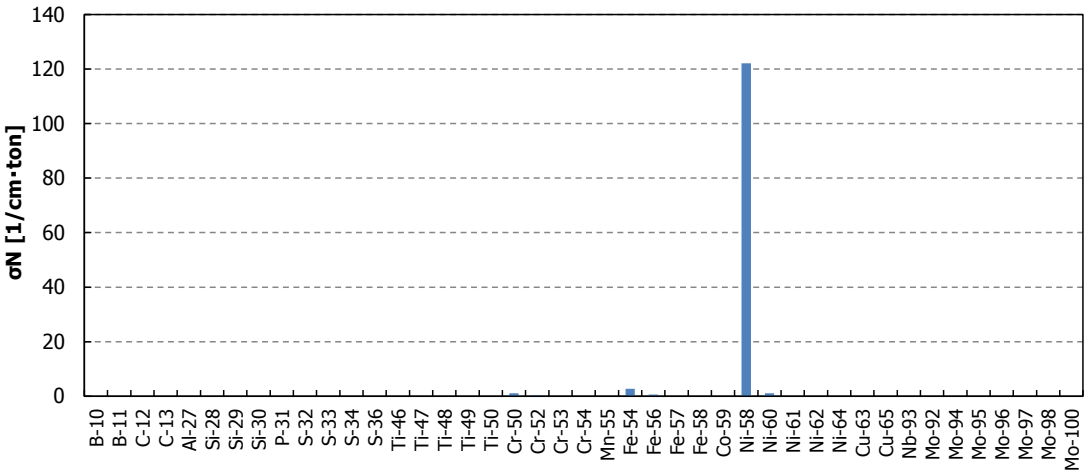


図 3.6-3　インコネル 718 の初期組成核種の(n,p)反応断面積と原子数の積

(4)　放射化核種生成量の時間変化

参考として、照射期間中及び冷却期間中の放射化核種の生成量の時間変化を図示し整理した。生成の振る舞いは、放射化核種の半減期によって特徴づけられる。照射期間が半減期よりも十分に長ければ、放射化による生成量と崩壊による消失量が釣り合い、平衡に達する。逆に、半減期が照射期間に比べて十分に長い場合には、生成量は単調増加の傾向を示す。表 3.3-6 に示した主要核種について、生成量の時間変化の図を付録 A.3 にまとめる。

3.7.　主要生成経路

感度係数、核種の崩壊に関する情報、及び初期組成から、主要な生成経路を同定した。ジルカロイ 2、SUS304、インコネル 718 の主要な放射化核種の生成経路を表 3.7-1、表 3.7-2、表 3.7-3 にそれぞれまとめる。

表中の主要生成経路には、断面積の感度係数が最も大きい反応を含む経路を記載した。また、その他の経路のうち、断面積の感度係数が 0.01 以上である反応を含む経路については、第二生成経路として記載した。また、不純物ウランの核分裂による生成量が放射化による生成量と同程度のオーダーであるものについても第二生成経路に記載した。なお、表中の天然存在比は Tables of Nuclear Data (JENDL/TND-2012)より引用し、小数点第 1 位までを記載した。

表 3.7-1　ジルカロイ 2 の放射化核種の生成経路(1/5)

No.	着目核種と 半減期	主要生成経路	第二生成経路
1	Zr-93 1.5×10^{6} 年	Zr-92（母材 Zr：98.175wt%、天然比 Zr-92 17.2%） ↓(n,γ) Zr-93	Zr-94（母材 Zr：98.175wt%、天然比 Zr-94　17.4%） ↓(n,2n) Zr-93
2	Ni-59 7.6×10^{4} 年	Ni-58（添加物 Ni：0.055wt%、天然比 Ni-58　68.1%） ↓(n,γ) Ni-59	
3	Ni-63 100 年	Ni-62（添加物 Ni：0.055wt%、天然比 Ni-62　3.6%） ↓(n,γ) Ni-63	Cu-63（不純物 Cu：0.005wt%、天然比 Cu-63　69.2%） ↓(n,p) Ni-63
4	Co-60 5.27 年	Co-59（不純物 Co：0.002wt%、天然比 Co-59　100%） ↓(n,γ)、(n,γ)_m [励起状態から基底状態への半減期：10.5 分] Co-60	
5	C-14 5.7×10^{3} 年	N-14（不純物 N：0.008wt%、天然比 N-14　99.6%） ↓(n,p) C-14	

表 3.7-1　ジルカロイ 2 の放射化核種の生成経路(2/5)

No.	着目核種と 半減期	主要生成経路	第二生成経路
6	Nb-94 2.0×10^{4} 年	Nb-93（不純物 Nb：0.01wt%、天然比 Nb-93　100%） ↓(n,γ) Nb-94	
7	Sb-125 2.76 年	Sn-124（添加物 Sn：1.45wt%、天然比 Sn-124　5.8%） ↓(n,γ) Sn-125 ↓β-崩壊 (9.6 日) Sb-125	Sn-124（添加物 Sn：1.45wt%、天然比 Sn-124　5.8%） ↓(n,γ)_m Sn-125m ↓β-崩壊 (9.5 分) Sb-125
8	Ca-41 1.02×10^{5} 年	Ca-40（不純物 Ca：0.003wt%、天然比 Ca-40　96.9%） ↓(n,γ) Ca-41	
9	K-40 1.25×10^{9} 年	Ca-40（不純物 Ca：0.003wt%、天然比 Ca-40　96.9%） ↓(n,p) K-40	
10	Fe-55 2.74 年	Fe-54（添加物 Fe：0.135wt%、天然比 Fe-54　5.8%） ↓(n,γ) Fe-55	Ni-58（添加物 Ni：0.055wt%、天然比 Ni-58　68.1%） ↓(n,α) Fe-55

表 3.7-1　ジルカロイ 2 の放射化核種の生成経路(3/5)

No.	着目核種と 半減期	主要生成経路	第二生成経路
11	Tc-99 2.1×10^{5} 年	Mo-98（不純物 Mo：0.005wt%、天然比 Mo-98　24.1%） ↓(n,γ) Mo-99 ↓β-崩壊 (2.7 日) Tc-99	Zr-96（母材 Zr：98.175wt%、天然比 Zr-96 2.8%） ↓(n,γ) Mo-97 ↓(n,γ) Mo-98 ↓(n,γ) Mo-99 ↓β-崩壊 (2.7 日) Tc-99 ※不純物ウランの核分裂による生成量と放射化による生成量のオーダーが同程度である（表 3.3-5 参照）。 U（不純物 U：0.00035wt%） ↓核分裂 Tc-99
12	Mo-93 4.0×10^{3} 年	Mo-92（不純物 Mo：0.005wt%、天然比 Mo-92　14.8%） ↓(n,γ) Mo-93	

表 3.7-1　ジルカロイ 2 の放射化核種の生成経路(4/5)

No.	着目核種と 半減期	主要生成経路	第二生成経路
13	Be-10 1.5×10^{6} 年	C-13（不純物 C：0.027wt%、天然比 C-13　1.1%） ↓(n,α) Be-10	B-10（不純物 B：0.00005wt%、天然比 B-10　19.9%） ↓(n,p) Be-10
14	Mn-54 312 日	Fe-54（添加物 Fe：0.135wt%、天然比 Fe-54　5.8%） ↓(n,p) Mn-54	
15	Ag-108m 438 年	Cd-106（不純物 Cd：0.00005wt%、天然比 Cd-106　1.3%） ↓(n,γ) Cd-107 ↓β+崩壊(6.5 時間) Ag-107 ↓(n,γ)_m Ag-108m	

表 3.7-1　ジルカロイ 2 の放射化核種の生成経路(5/5)

No.	着目核種と半減期	主要生成経路	第二生成経路
16	H-3 12.3 年	H-1（不純物 H：0.0025wt%、天然比 H-1　99.9885%） ↓(n,γ) H-2 ↓(n,γ) H-3	（第二生成経路） H-2（不純物 H：0.0025wt%、天然比 H-2　0.0115%） ↓(n,γ) H-3 （第三生成経路） He-3（H-3 の β-崩壊により生成） ↓(n,p) H-3 ※不純物ウランの核分裂による生成量と放射化による生成量のオーダーが同程度である（表 3.3-5 参照）。 U（不純物 U：0.00035wt%） ↓核分裂 H-3
17	Zn-65 244 日	Cu-63（不純物 Cu：0.005wt%、天然比 Cu-63　69.2%） ↓(n,γ) Cu-64 ↓β-崩壊 (12 時間) Zn-64 ↓(n,γ) Zn-65	

表 3.7-2　SUS304 の放射化核種の生成経路(1/2)

No.	着目核種と 半減期	主要生成経路	第二生成経路
1	Ni-59 7.6×10^4 年	Ni-58（添加物 Ni：9.25wt%、天然比 Ni-58　68.1%） ↓(n,γ) Ni-59	
2	Ni-63 100 年	Ni-62（添加物 Ni：9.25wt%、天然比 Ni-62　3.6%） ↓(n,γ) Ni-63	
3	Fe-55 2.74 年	Fe-54（主成分 Fe：68.595wt%、天然比 Fe-54　5.8%） ↓(n,γ) Fe-55	Ni-58（添加物 Ni：9.25wt%、天然比 Ni-58　68.1%） ↓(n,α) Fe-55
4	Co-60 5.27 年	Ni-60（添加物 Ni：9.25wt%、天然比 Ni-60　26.2%） ↓(n,p) Co-60	Fe-58（主成分 Fe：68.595wt%、天然比　Fe-58　0.3%） ↓(n,γ) Fe-59 ↓β-崩壊 (44.4 日) Co-59 ↓(n,γ)、(n,γ)_m [励起状態から基底状態への半減期：10.5 分] Co-60

表 3.7-2　SUS304 の放射化核種の生成経路(2/2)

No.	着目核種と 半減期	主要生成経路	第二生成経路
5	Mn-54 312 日	Fe-54（主成分 Fe：68.595wt%、天然比 Fe-54　5.845%） ↓(n,p) Mn-54	
6	Be-10 1.5×10^{6} 年	C-13（不純物 C：0.08wt%、天然比 C-13　1.1%） ↓(n,α) Be-10	
7	C-14 5.7×10^{3} 年	C-13（不純物 C：0.08wt%、天然比 C-13　1.1%） ↓(n,γ) C-14	
8	Cl-36 3.0×10^{5} 年	S-34（不純物 S：0.03wt%、天然比 S-34　4.3%） ↓(n,γ) S-35 ↓β-崩壊 (87.3 日) Cl-35 ↓(n,γ) Cl-36	

表 3.7-3　インコネル 718 の放射化核種の生成経路(1/4)

No.	着目核種と 半減期	主要生成経路	第二生成経路
1	Ni-59 7.6×10^4 年	Ni-58（添加物 Ni：52.50wt%、天然比 Ni-58　68.1%） ↓(n,γ) Ni-59	
2	Ni-63 100 年	Ni-62（添加物 Ni：52.50wt%、天然比 Ni-62　3.6%） ↓(n,γ) Ni-63	
3	Co-60 5.27 年	Co-59（不純物 Ni：1.00wt%、天然比 Co-59　100%） ↓(n,γ)、(n,γ)_m [励起状態から基底状態への半減期：10.5 分] Co-60	
4	Nb-94 2.0×10^4 年	Nb-93（不純物 Nb：5.13wt%、天然比 Nb-93　100%） ↓(n,γ) Nb-94	
5	Mo-93 4.0×10^3 年	Mo-92（不純物 Mo：3.05wt%、天然比 Mo-92　14.8%） ↓(n,γ) Mo-93	

表 3.7-3　インコネル 718 の放射化核種の生成経路(2/4)

No.	着目核種と 半減期	主要生成経路	第二生成経路
6	Tc-99 2.1×10^{5} 年	Mo-98（不純物 Mo：3.05wt%、天然比 Mo-98　24.1%） ↓(n,γ) Mo-99 ↓β-崩壊 (2.7 日) Tc-99	
7	Fe-55 2.74 年	Fe-54（主成分 Fe：18.68wt%、天然比 Fe-54　5.8%） ↓(n,γ) Fe-55	Ni-58（添加物 Ni：52.50wt%、天然比 Ni-58　68.1%） ↓(n,α) Fe-55
8	Zr-93 1.5×10^{6} 年	Nb-93（不純物 Nb：5.13wt%、天然比 Nb-93　100%） ↓(n,p) Zr-93	Mo-96（不純物 Mo：3.05wt%、天然比 Mo-96　16.7%） ↓(n,α) Zr-93
9	Mn-54 312 日	Fe-54（主成分 Fe：18.68wt%、天然比 Fe-54　5.8%） ↓(n,p) Mn-54	
10	Be-10 1.5×10^{6} 年	B-10（不純物 B：0.006wt%、天然比 B-10　19.9%） ↓(n,p) Be-10	C-13（不純物 C：0.08wt%、天然比 C-13　1.1%） ↓(n,α) Be-10

表 3.7-3　インコネル 718 の放射化核種の生成経路(3/4)

No.	着目核種と 半減期	主要生成経路	第二生成経路
11	Cl-36 3.0×10^{5} 年	S-34（不純物 S：0.015wt%、天然比 S-34　4.3%） ↓(n,γ) S-35 ↓β-崩壊 (87.3 日) Cl-35 ↓(n,γ) Cl-36	
12	C-14 5.7×10^{3} 年	C-13（不純物 C：0.08wt%、天然比 C-13　1.07%） ↓(n,γ) C-14	
13	Zn-65 244 日	Cu-63（不純物 Cu：0.3wt%、天然比 Cu-63　69.2%） ↓(n,γ) Cu-64 ↓β-崩壊 (12 時間) Zn-64 ↓(n,γ) Zn-65	

表 3.7-3　インコネル 718 の放射化核種の生成経路(4/4)

No.	着目核種と 半減期	主要生成経路	第二生成経路
14	Sr-90 28.8 年	Nb-93（不純物 Nb：5.13wt%、天然比 Nb-93　100%） ↓(n,p) Zr-93 ↓(n,α) Sr-90	
15	Si-32 153 年	Si-30（不純物 Si：0.35wt%、天然比 Si-30　3.09%） ↓(n,γ) Si-31 ↓(n,γ) Si-32	P-31（不純物 P：0.015wt%、天然比 P-31　100%） ↓(n,p) Si-31 ↓(n,γ) Si-32
16	H-3 12.3 年	Ni-58（添加物 Ni：52.50wt%、天然比 Ni-58　68.1%） ↓(n,p) H-1 ↓(n,γ) H-2 ↓(n,γ) H-3	（第二生成経路） He-3（H-3 の β-崩壊により生成） ↓(n,p) H-3 （その他） その他の核種の(n,p)反応による H-1 から生成される。

4. まとめ

燃料集合体の被覆管、上部タイプレート、下部タイプレート、スペーサの材料であるジルカロイ、SUS304、インコネルについて、ORIGEN2 コードにより放射化計算を行い、放射化核種の生成量を整理した。また、生成量が比較的大きい代表的な放射化核種について、初期組成の感度解析及び断面積の感度解析を行うことによって、主要な生成経路を同定することができた。初期組成の感度解析で得られる感度係数を使えば、初期組成の分析誤差が放射化核種の生成量に伝播する誤差も評価することができる。また、断面積の感度解析の結果は、今後の放射化断面積の高精度化において優先的に検討すべき核種や反応の情報を与えるものである。

本検討で使用した放射化感度解析の手法は、放射化生成物の評価において重要となる微量不純物、及び重要となる核反応に関する情報を与えるものとして有効であり、適切な中性子スペクトルで縮約した 1 群放射化断面積を用意すれば、炉外構造物などの放射化生成物の生成量評価にも応用することができる。

参考文献

1) S.B. Ludwig, A.G. Croff, “Revision to ORIGEN2 – Version 2.2”, Transmittal memo of CCC-0371/17, Oak Ridge National Laboratory (2002).
2) 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, J. Katakura, “JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering”, J. Nucl. Sci. Technol. 48 [1], pp.1-30 (2011).
JENDL-4.0 is available from http://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j40/j40.html (accessed 2013-9-21).
3) 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 (2012).
4) 奥村啓介, 小嶋健介, 岡本力, “MOSRA システムの燃焼計算モジュールの開発”, 日本原子力学会「2012 年秋の大会」要旨集, 広島大学, Q18 (2002).
5) 田辺朗, 土井荘一, “連載講座　核燃料工学の基礎 - 軽水炉燃料を中心に　第 4 回軽水炉燃料(3)”, 日本原子力学会誌,Vol.46, No.8, pp.566-572 (2004).
6) M. Namekawa, T. Fukahori, “Tables of Nuclear Data (JENDL/TND-2012)”, JAEA-Data/Code 2012-014 (2012).
7) J. C. Evans, E. L. Lepel, R. W. Sanders, C. L. Wilkerson, W. Silker, C. W. Thomas, K. H. Abel, D. R. Robertson, “Long-Lived Activation Products in Reactor Materials”, Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-3474 (1984).

付　録

A.1　ORLIBJ40 のリチウムの断面積に関する知見

(1)　Li-6 の(n,α)反応

H-3 の生成経路として考えられる反応を抽出する作業において、ORLIBJ40 [A.1-1)]の Li-6 の(n,α)反応の断面積に不適切な値が設定されている点が発見された。例として、ORLIBJ40 に収納されている BS340J40 の断面積ライブラリの Li-6 の断面積を表 A.1-1 に示す。(n,α)反応の断面積が 0 であることが確認できる。

表 A.1-1　Li-6 の断面積

ライブラリ名	(n,γ)	(n,2n)	(n,α)	(n,p)	(n,γ)_m	(n,2n)_m
BS340J40	0.003577	0.00007366	0	0.001278	0	0

Li-6(n,t)反応と Li-6(n,α)反応は同義であるが、ORIGEN2 では Li-6(n,α)反応として扱われる。この断面積は ORIGEN2 のオリジナルライブラリには収録されているが、JENDL を基に作成された ORLIBJ32 [A.1-2)]、ORLIBJ33 [A.1-3)]、ORLIBJ40 には、いずれもゼロ値が与えられており、これらのライブラリ使用時には Li-6 の放射化を正しく評価できない。Li-6 から H-3 が生成される反応は、核データ評価上は Li-6 (n,t)反応として表現されることが多いが、ORIGEN2 では Li-6(n,α)反応として扱っている事情からこの状況が発生したものと考えられる。

参考として、JENDL-4.0 [A.1-4)]に収録されている Li-6 の各反応の断面積を図 A.1-1 に示す。Li-6 の(n,t)反応は熱中性子エネルギー領域においても比較的大きな断面積を有しており、不純物としてリチウムを含む場合には、H-3 の生成量の評価においてその影響を考慮する必要があると考えられる。

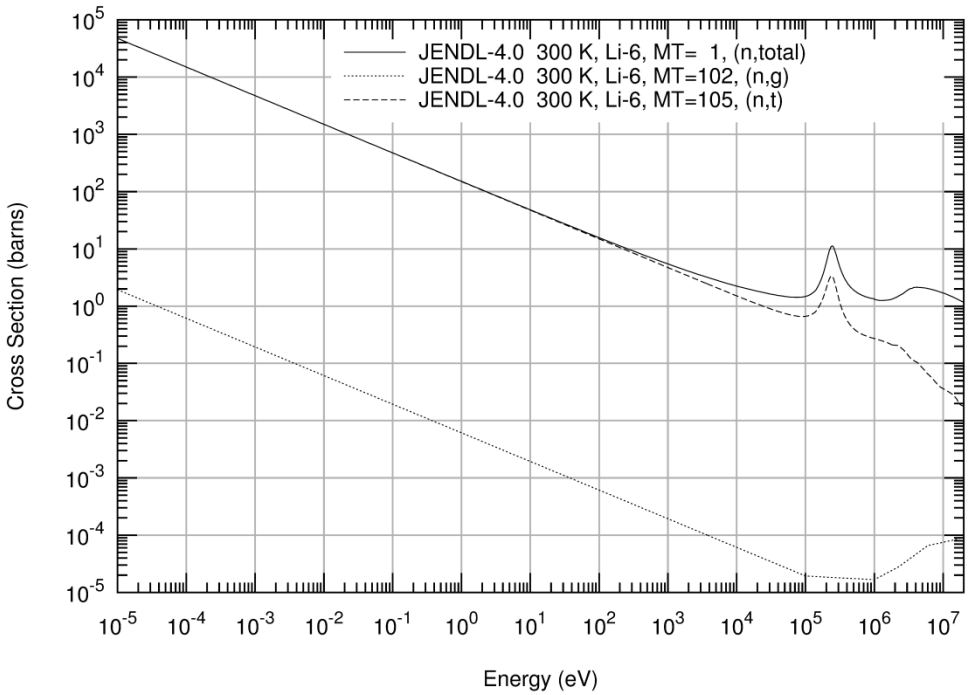


図 A.1-1　Li-6 の断面積

(2)　Li-7 の(n,α)反応

Li-7 から H-3 が生成する反応は以下の通りである。

$$^{7}_{3}\mathrm{Li}+^{1}_{0}\mathrm{n}\rightarrow^{3}_{1}\mathrm{H}+^{4}_{2}\mathrm{He}+^{1}_{0}\mathrm{n} \qquad \text{(A.1-1)}$$

ORIGEN コードにおいては、(A.1-1)式のような(n,nt)反応を取り扱っていないため、H-4 に対して非常に大きな(n,2n)断面積（9.9×10^{10} b）を与えることで、以下の 2 つの反応により再現している [A.1-5)]。

$$^{7}_{3}\mathrm{Li}+^{1}_{0}\mathrm{n}\rightarrow^{4}_{1}\mathrm{H}+^{4}_{2}\mathrm{He} \qquad \text{(A.1-2)}$$

$$^{4}_{1}\mathrm{H}+^{1}_{0}\mathrm{n}\rightarrow 2^{1}_{0}\mathrm{n}+^{3}_{1}\mathrm{H} \qquad \text{(A.1-3)}$$

H-4 の(n,2n)断面積が非常に大きく設定されていることから、(A.1-2)式及び(A.1-3)式の重ね合わせにより、(A.1-1)式の反応が精度良く再現される。

ORLIBJ40 では、(A.1-2)式に対応する Li-7 の(n,α)反応の断面積にはゼロ値が収録され、(A.1-3)式に対応する H-4 の(n,2n)反応の断面積にもゼロ値が与えられている。(A.1-1)式の反応は閾値反応 [A.1-6)]であり、軽水炉構造物の放射化計算における影響はそれほど大きくないと考えられるが、発生しうる反応として適切に取り扱う必要があると考えられる。

付録 A.1 の参考文献

A.1-1) 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 (2012).

A.1-2) 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).

A.1-3) 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).

A.1-4) 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. 48 [1], pp.1-30 (2011).

A.1-5) I. C. Gauld, B. D. Murphy, M. L. Williams, “ORIGEN-S Data Libraries”, ORNL/TM-2005/39, Section M6.2.7 (2009).

A.1-6) 長谷川晃, 土谷邦彦, 石塚悦男, “連載講座　よくわかる核融合炉のしくみ　第 7 回”, 日本原子力学会誌, Vol.47, No.8 (2005).

A.2　分析値に基づく初期組成条件を使用した場合の感度解析

本文においては、JIS 規格に基づいた初期組成を使用した放射化計算を行い、初期組成及び断面積の感度解析を実施した。しかしながら、規格には定められていないが材料中に含有している微量不純物が存在することも考えられ、そのような場合には感度係数が変化することが予想される。日本原子力学会が発行している学会標準「余裕深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順[A.2-1)]」においても、分析値に基づいた初期組成条件を使用した放射化評価が行われている。ここでは、分析値に基づいた初期組成条件を使用した場合の感度係数をまとめる。

(1)　計算条件

初期組成条件以外の、照射履歴、中性子束、及び断面積ライブラリの条件については 3.1 節で示した計算条件と同一とする。文献 A.2-1 において計算例として記載されているジルカロイ 4（ZrTN804D）及び SUS304 を検討の対象とする。

文献 A.2-1 では、表 A.2-1 に示す評価対象核種[‡]の主な発生源となる元素に対してのみ、初期組成条件を与えている。したがって、文献 A.2-1 では考慮されていないが JIS 規格で規定されている元素が数種類存在することに注意が必要である。

表 A.2-1　文献 A.2-1 における評価対象核種

評価対象核種
C-14、Cl-36、Co-60、Ni-63、Sr-90、Nb-94、Tc-99、I-129、Cs-137、α 線を放出する全放射性物質

文献 A.2-1 で設定されている初期組成条件を表 A.2-2 に示す。また、表 A.2-2 を基に本検討で入力値として使用した値を、JIS 規格を基に設定した値と併せて表 A.2-3 に示す。表 A.2-3 より、規格に基づいて設定した場合には、不純物については規格の上限値を与えているため、分析値を基に設定した場合に比べて大きめの値となっていることが確認できる。また、JIS 規格には定められていないが今回の計算では考慮されている元素として、ジルカロイ 4 における塩素や、SUS304 における窒素、塩素、コバルトなどが確認できる。

[‡]余裕深度処分及び浅地中ピット処分対象の申請核種を参考に選択されたものである。

表 A.2-2　分析値に基づいて設定された初期組成

(a)　ジルカロイ 4

元素	分布	平均値 [%]	標準偏差
N	対数正規分布	3.2E-03	0.2
O	対数正規分布	1.6E-01	0.1
S	対数正規分布	4.0E-03	0.5
Cl	対数正規分布	2.0E-04	0.2
K	対数正規分布	4.0E-05	0.2
Fe	一様分布	0.18-0.24	-
Co	対数正規分布	4.0E-04	0.2
Ni	正規分布	5.0E-03	7.0E-04
Cu	正規分布	2.0E-03	6.0E-04
Zr	一様分布	98-100	-
Nb	対数正規分布	2.0E-03	0.2
Mo	対数正規分布	4.0E-04	0.2
Th	対数正規分布	4.0E-06	0.2
U	対数正規分布	2.5E-04	0.5

(b)　SUS304

元素	分布	平均値 [%]	標準偏差
N	対数正規分布	5.0E-02	0.1
S	対数正規分布	4.0E-03	0.4
Cl	対数正規分布	1.0E-03	0.2
K	対数正規分布	4.0E-05	0.2
Fe	正規分布	72	4
Co	対数正規分布	1.0E-01	0.7
Ni	一様分布	8.0-10.5	-
Cu	対数正規分布	1.6E-01	0.9
Zr	対数正規分布	3.2E-04	0.8
Nb	対数正規分布	2.0E-02	0.5
Mo	対数正規分布	1.3E-01	0.7
Th	対数正規分布	2.0E-07	0.2
U	対数正規分布	2.0E-07	0.2

表 A.2-3　分析値に基づく初期組成と規格に基づく初期組成との比較

(a)　ジルカロイ 4

元素	①学会標準で使用された値*	②規格に基づいて設定した値	比 ①/②
H	-	0.0025	-
B	-	0.00005	-
C	-	0.027	-
N	0.0032	0.008	0.40
O	0.16	-	-
Mg	-	0.002	-
Al	-	0.0075	-
Si	-	0.012	-
S	0.004	-	-
Cl	0.0002	-	-
K	0.00004	-	-
Ca	-	0.003	-
Ti	-	0.005	-
Cr	-	0.1	-
Mn	-	0.005	-
Fe	0.21	0.21	1.00
Co	0.0004	0.002	0.20
Ni	0.005	0.007	0.71
Cu	0.002	0.005	0.40
Zr	99	98.119	1.01
Nb	0.002	0.01	0.20
Mo	0.0004	0.005	0.08
Cd	-	0.00005	-
Sn	-	1.45	-
Hf	-	0.01	-
W	-	0.01	-
Th	0.000004	-	-
U	0.00025	0.00035	0.71

*正規分布，対数正規分布，一様分布の平均値を記載

(b)　SUS304

元素	①学会標準で使用された値*	②規格に基づいて設定した値	比 ①/②
C	-	0.08	-
N	0.05	-	-
Si	-	1.00	-
P	-	0.045	-
S	0.004	0.030	0.13
Cl	0.001	-	-
K	4.0E-05	-	-
Cr	-	19.00	-
Mn	-	2.00	-
Fe	72	68.60	1.05
Co	0.1	-	-
Ni	9.25	9.25	1.00
Cu	0.16	-	-
Zr	0.00032	-	-
Nb	0.02	-	-
Mo	0.13	-	-
Th	2.0E-07	-	-
U	2.0E-07	0.0001	0.002

*正規分布，対数正規分布，一様分布の平均値を記載

(2)　計算結果

分析値に基づいた初期組成条件を使用した場合の評価対象核種の生成量を表 A.2-4 に示す。表 A.2-4 には放射化による生成量が 1×10^{-9} g/ton 以上である核種を抽出した。

表 A.2-4　評価対象核種の生成量

(a)　ジルカロイ 4

	核種	①不純物Th・Uなし Zry-4 [g/ton]	②不純物Th・U [g/ton]
1	Zr-93	1.9914E+02	9.1285E-04
2	Ni-59	3.3400E-01	
3	C-14	1.5923E-01	
4	Cl-36	1.4941E-01	
5	Co-60	1.0256E-01	
6	Ni-63	6.1544E-02	
7	Nb-94	6.0872E-02	2.3610E-09
8	Fe-55	3.1796E-02	
9	K-40	1.9409E-03	
10	Tc-99	9.7233E-04	1.2368E-03
11	Mo-93	7.1418E-04	2.5475E-14
12	Sr-90	2.3687E-05	4.5554E-04
13	Mn-54	6.0419E-06	
14	Be-10	5.4318E-07	1.6427E-08
15	Rb-87	1.0644E-07	2.8294E-04
16	Zn-65	1.1202E-09	

(b)　SUS304

	核種	①不純物Th・Uなし SUS304[g/ton]	②不純物Th・U [g/ton]
1	Ni-59	4.8330E+01	
2	Ni-63	7.7981E+00	
3	Co-60	1.6701E+00	
4	Fe-55	7.3944E-01	
5	C-14	1.6562E-01	
6	Cl-36	5.4154E-02	
7	Nb-94	3.3542E-02	2.2741E-14
8	Tc-99	1.2120E-02	4.6415E-08
9	Mo-93	1.1269E-02	1.4549E-20
10	K-40	1.8095E-04	
11	Mn-54	1.0334E-04	
12	Zr-93	6.6377E-05	4.5065E-08

表 A.2-1 に示した核種で、放射化生成物の生成量が比較的大きい核種（C-14、Cl-36、Co-60、Ni-63、Nb-94、Tc-99）に対して、断面積の感度解析を実施した。得られた感度係数のうち、分析値に基づく初期組成条件を使用した場合と規格に基づく初期組成条件を使用した場合とで感度係数の変化が大きい核種を抽出し、表 A.2-5 にまとめる。

表 A.2-5　SUS304 における断面積の感度係数

(a)　Co-60

（分析値に基づく初期組成条件）

Co-60

	Nuclide	XS type	S
1	Co-59	(n,γ)	0.45657
2	Co-59	(n,γ)_m	0.45537
3	Ni-60	(n,p)	0.00293
4	Fe-58	(n,γ)	0.00030
5	Co-60	(n,γ)	-0.00018
6	Cu-63	(n,α)	0.00006

（JIS 規格に基づく初期組成条件）

Co-60

	Nuclide	XS type	S
1	Ni-60	(n,p)	0.91683
2	Fe-58	(n,γ)	0.08192
3	Co-59	(n,γ)	0.03816
4	Co-59	(n,γ)_m	0.03805
5	Ni-58	(n,p)	0.00114
6	Co-58	(n,γ)	0.00110
7	Ni-60	(n,γ)	-0.00025
8	Co-60	(n,γ)	-0.00019
9	Ni-58	(n,γ)	0.00013
10	Fe-57	(n,γ)	0.00009
11	Ni-62	(n,α)	0.00002

(b)　C-14

（分析値に基づく初期組成条件）

C-14

	Nuclide	XS type	S
1	N-14	(n,p)	0.99986

（JIS 規格に基づく初期組成条件）

C-14

	Nuclide	XS type	S
1	C-13	(n,γ)	0.99999
2	C-12	(n,γ)	0.00003

(c)　Cl-36

（分析値に基づく初期組成条件）

Cl-36

	Nuclide	XS type	S
1	Cl-35	(n,γ)	0.99599
2	Cl-36	(n,γ)	-0.00083
3	K-39	(n,α)	0.00011
4	Cl-35	(n,p)	-0.00002
5	Cl-35	(n,α)	-0.00002

（JIS 規格に基づく初期組成条件）

Cl-36

	Nuclide	XS type	S
1	S-34	(n,γ)	0.99993
2	Cl-35	(n,γ)	0.99759
3	Cl-36	(n,γ)	-0.00049

表 A.2-5 より、いくつかの核種については初期組成条件が変化することにより主要な生成経路が変化することが確認できる。

以上より、本文で掲載した感度係数は JIS 規格に基づいて設定した条件においては有効であるが、実際の物理状況に基づいた感度係数を得るためには、微量不純物の分析データに基づく初期組成条件を使用した感度解析を行う必要がある。

付録 A.2 の参考文献

A.2-1)　日本原子力学会, “日本原子力学会標準　余裕深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順：2010”, AESJ-SC-F015:2010, (2010).

A.3　放射化核種生成量の時間変化

放射性核種の生成量を評価する際には、着目する核種が中性子照射により、どのような時間変化で生成するかといった特徴を把握しておくとよい。ここでは、ジルカロイ 2、SUS304、インコネル 718 の中性子照射により生成される代表的な放射化核種のインベントリの時間変化を、図 A.3-1、図 A.3-2、図 A.3-3 にそれぞれまとめる。

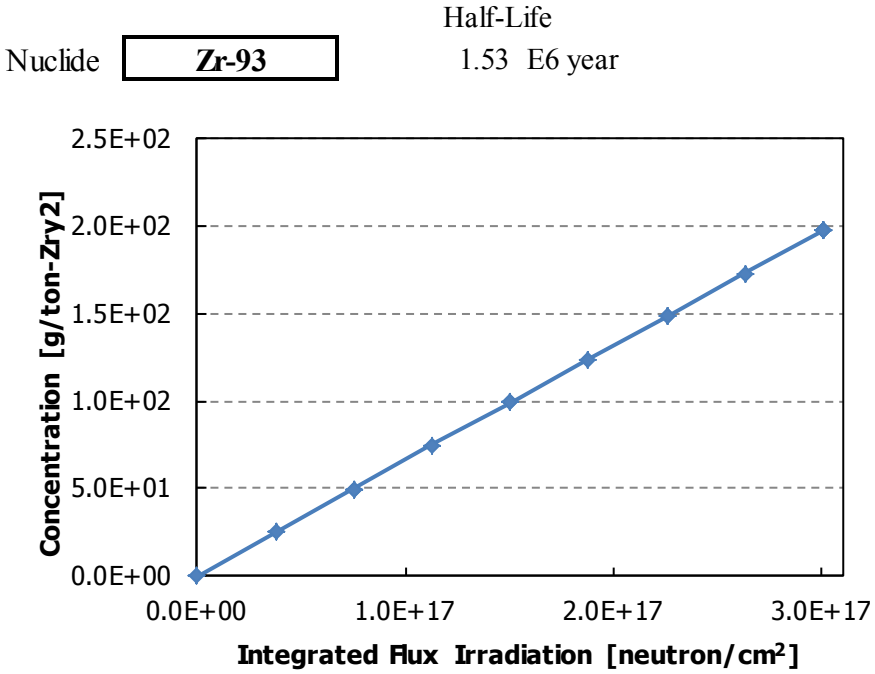
図中の横軸は中性子束と積算時間をかけた積算照射量としている。プロット点に対応する積算日数と積算照射量を表 A.3-1 に示す。サイクル間の冷却期間は 90 日、照射後の冷却期間は、 1 年、5 年、10 年に対応する。

表 A.3-1　積算日数と積算照射量

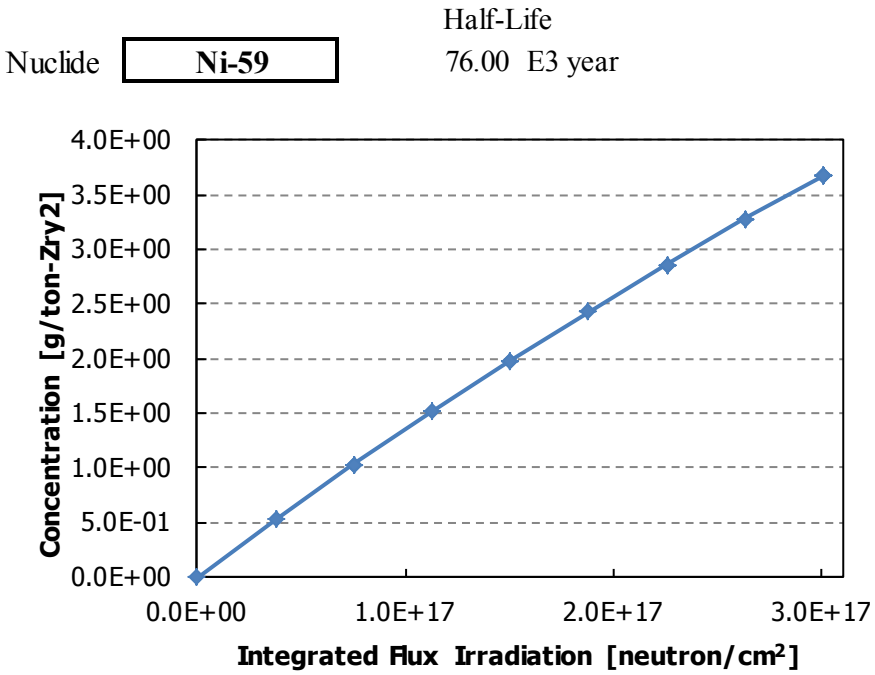
プロット点	積算日数 [days]	照射／冷却	積算照射量 [1/cm2]	
			ジルカロイ2・インコネル718	SUS304
1	0	-	0.00E+00	0.00E+00
2	188.46	照射	3.76E+16	1.88E+15
3	376.92	照射	7.52E+16	3.76E+15
4	466.92	冷却	7.52E+16	3.76E+15
5	655.38	照射	1.13E+17	5.64E+15
6	843.84	照射	1.50E+17	7.52E+15
7	933.84	冷却	1.50E+17	7.52E+15
8	1122.3	照射	1.88E+17	9.39E+15
9	1310.76	照射	2.25E+17	1.13E+16
10	1400.76	冷却	2.25E+17	1.13E+16
11	1589.22	照射	2.63E+17	1.32E+16
12	1777.68	照射	3.01E+17	1.50E+16
13	2142.93	冷却	3.01E+17	1.50E+16
14	3603.93	冷却	3.01E+17	1.50E+16
15	5430.18	冷却	3.01E+17	1.50E+16

なお、図 A.3-1、図 A.3-2、図 A.3-3 においては以下の点に注意が必要である。

- 半減期の長い核種では、サイクル間での冷却期間中の減衰がほとんどなく、プロット点が重なる。
- 照射後の冷却期間に対応するプロット点 13～15 は全てグラフの右端にあり、半減期の長い核種の場合にはプロット点 12 とプロット点 13～15 が重なっている。



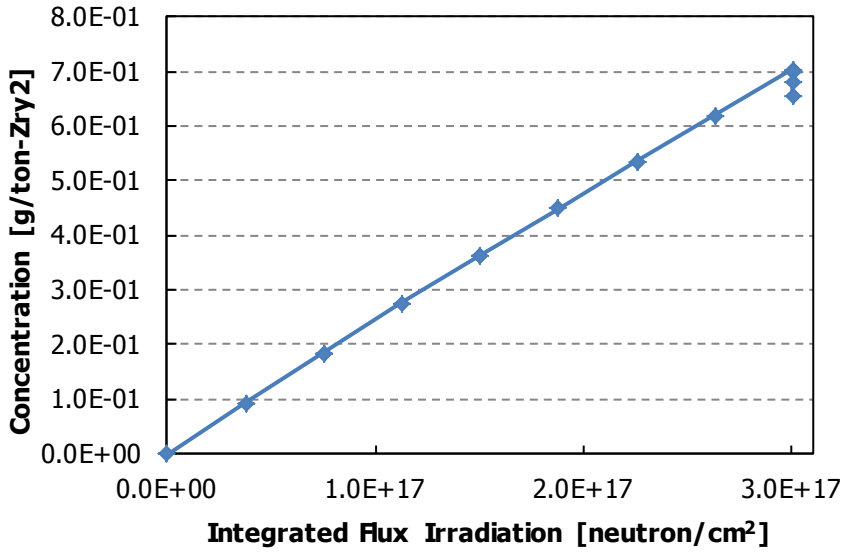
(a) Zr-93 の時間変化



(b) Ni-59 の時間変化

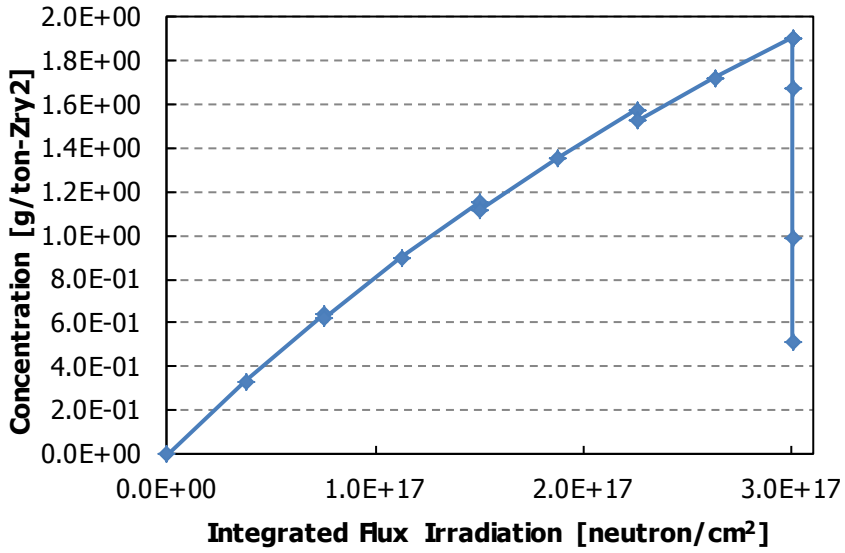
図 A.3-1 ジルカロイ 2 の主要放射化核種の時間変化(1/9)

Nuclide **Ni-63** Half-Life 100.10 year



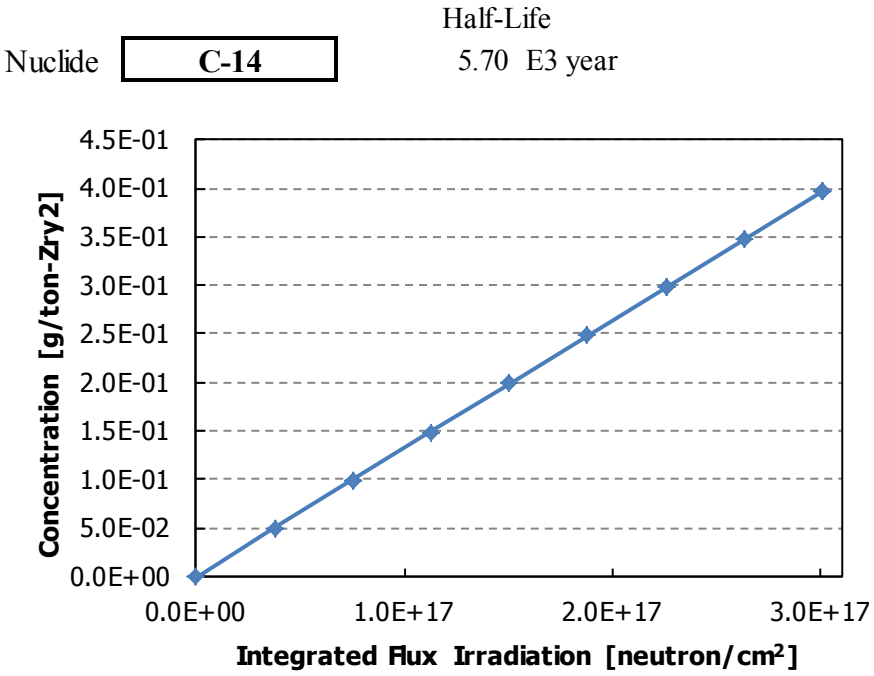
(c) Ni-63 の時間変化

Nuclide **Co-60** Half-Life 5.27 year

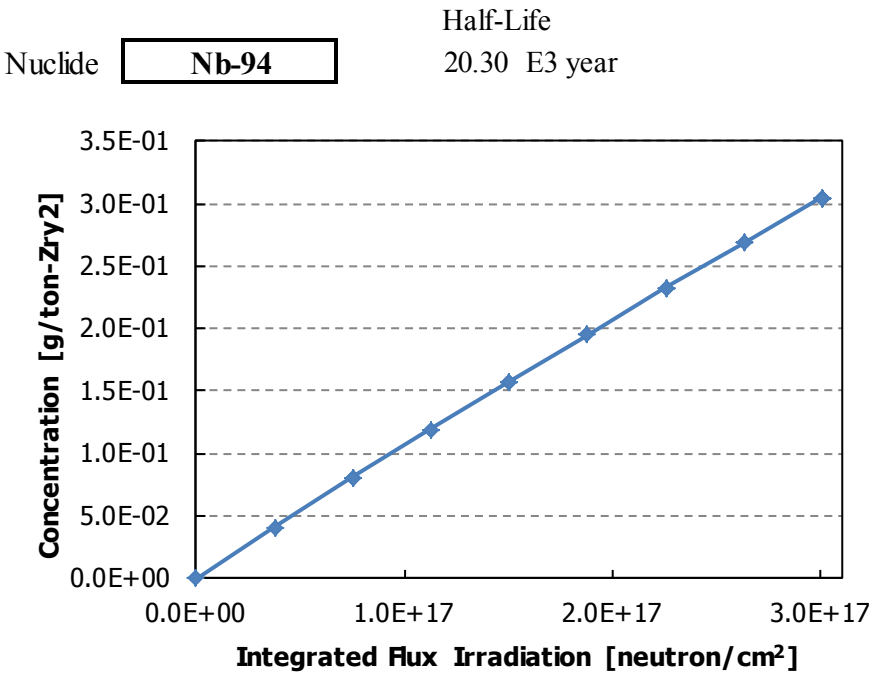


(d) Co-60 の時間変化

図 A.3-1 ジルカロイ 2 の主要放射化核種の時間変化(2/9)

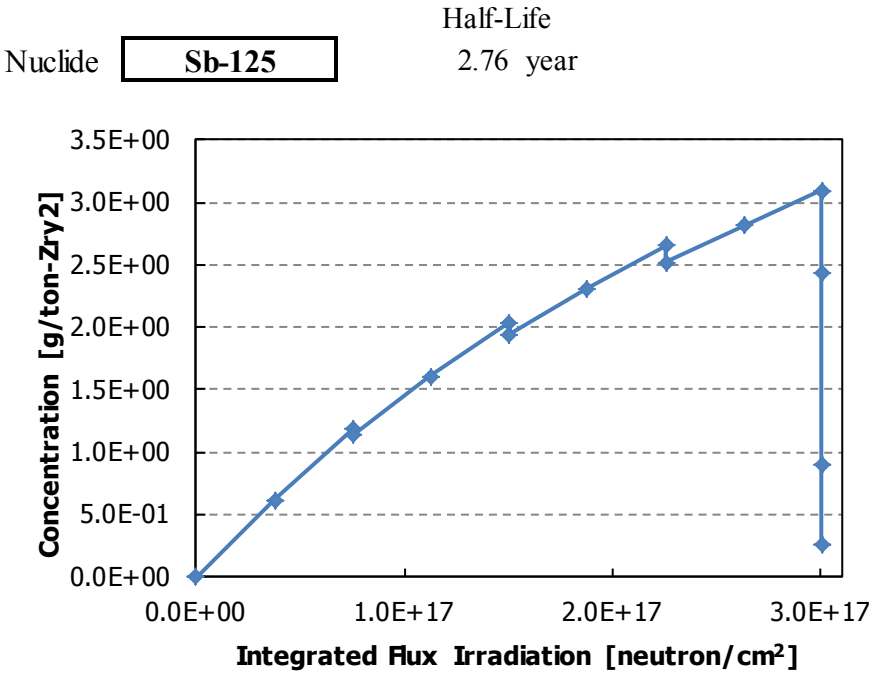


(e)　C-14 の時間変化

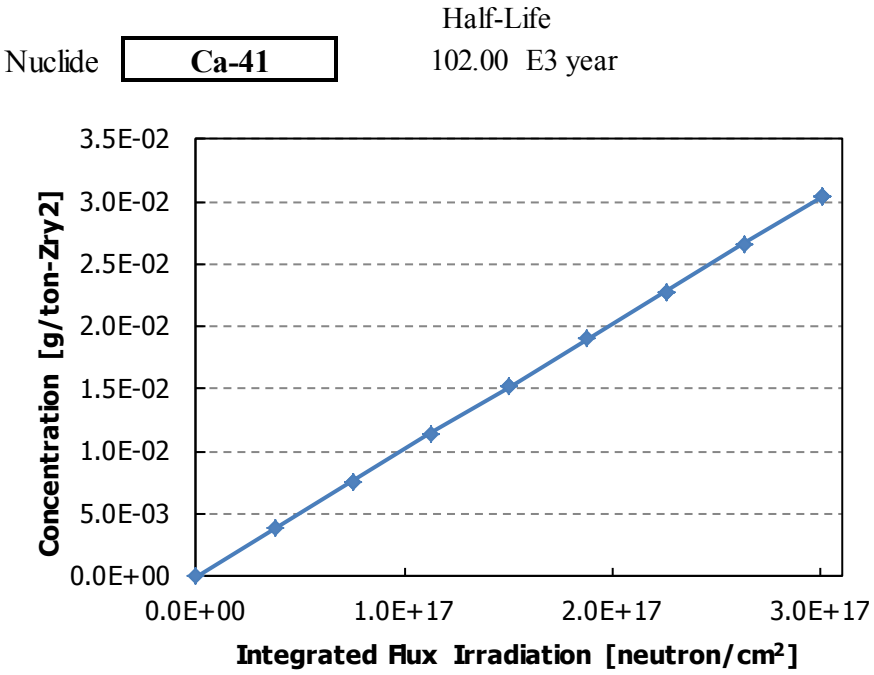


(f)　Nb-94 の時間変化

図 A.3-1　ジルカロイ 2 の主要放射化核種の時間変化(3/9)

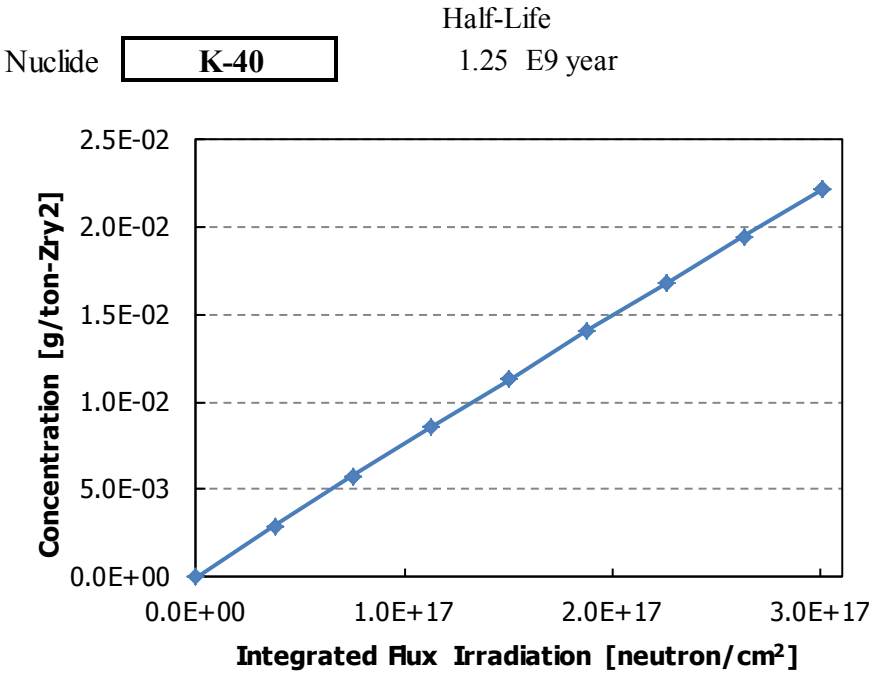


(g)　Sb-125 の時間変化

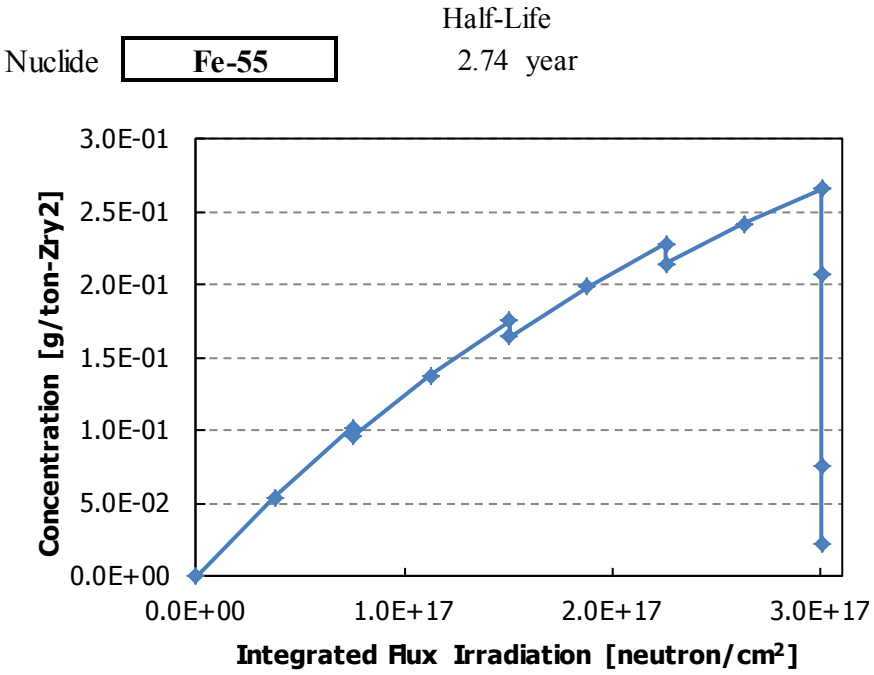


(h)　Ca-41 の時間変化

図 A.3-1　ジルカロイ 2 の主要放射化核種の時間変化(4/9)

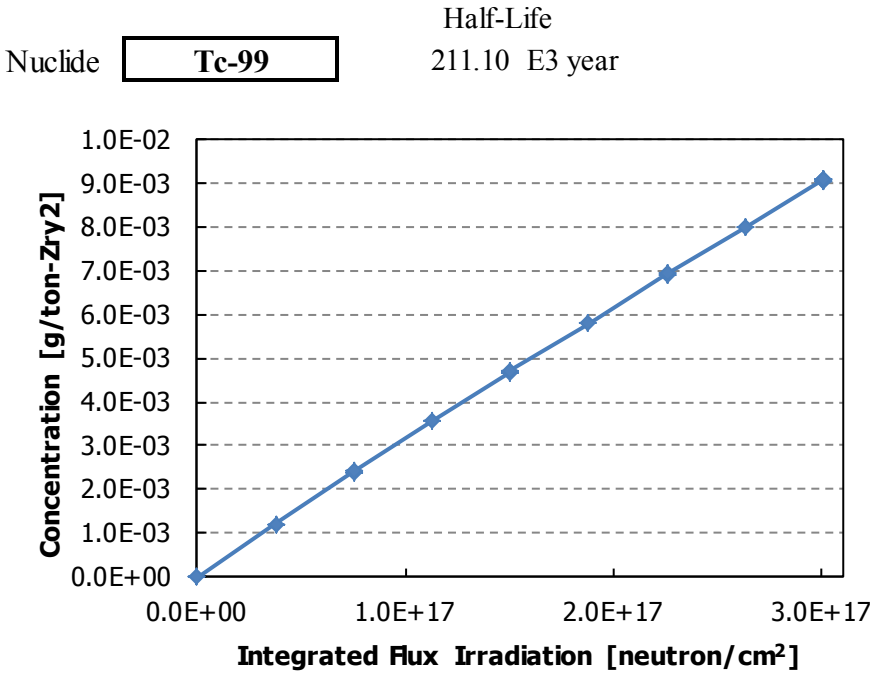


(i)　K-40 の時間変化

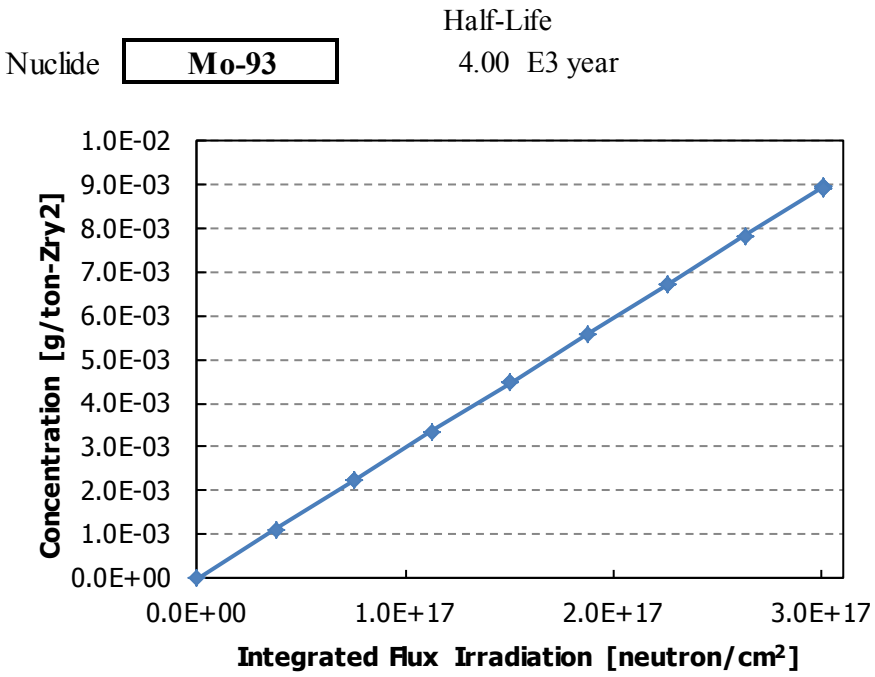


(j)　Fe-55 の時間変化

図 A.3-1　ジルカロイ 2 の主要放射化核種の時間変化(5/9)



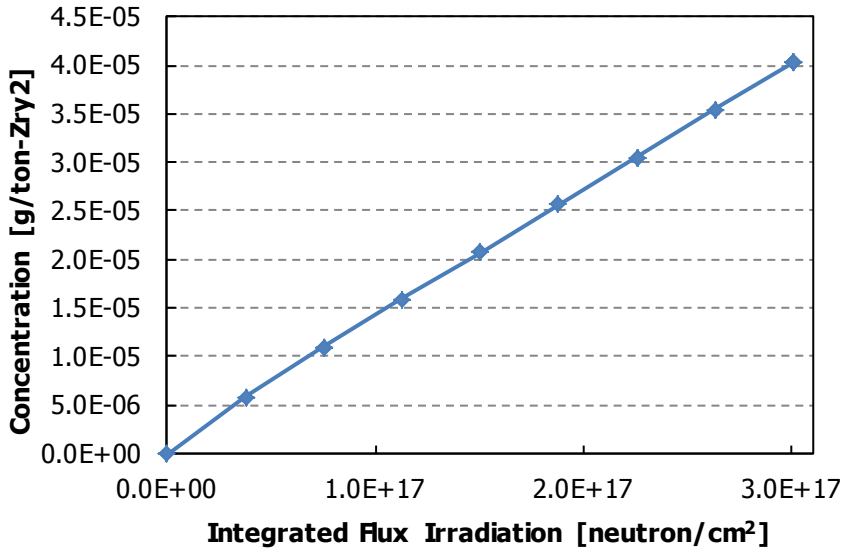
(k) Tc-99 の時間変化



(l) Mo-93 の時間変化

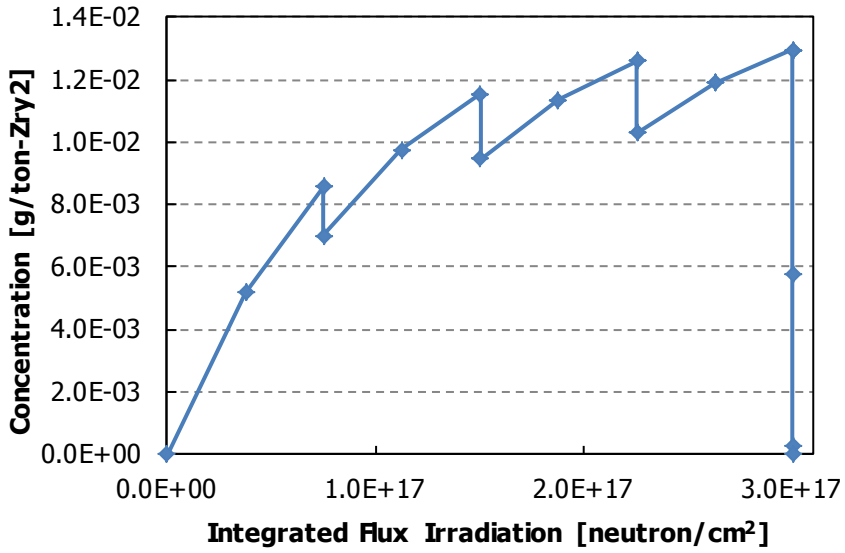
図 A.3-1 ジルカロイ 2 の主要放射化核種の時間変化(6/9)

Nuclide **Be-10** Half-Life 1.51 E6 year



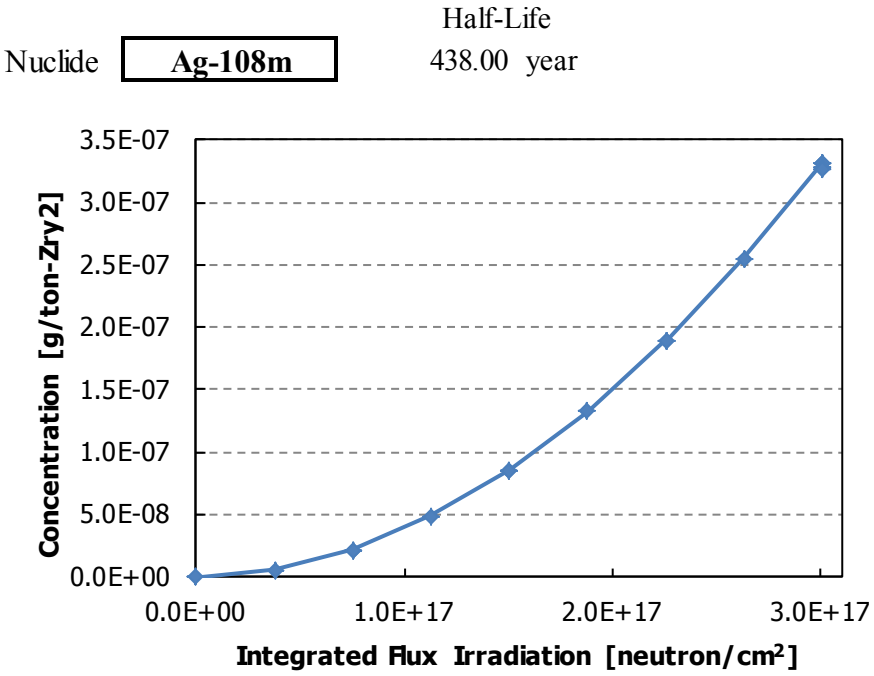
(m) Be-10 の時間変化

Nuclide **Mn-54** Half-Life 312.05 day

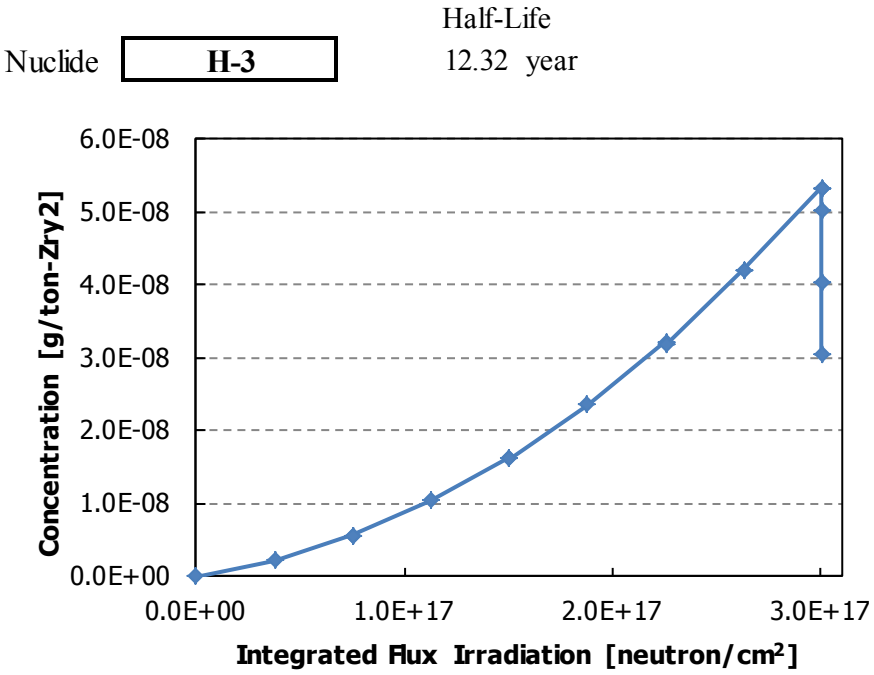


(n) Mn-54 の時間変化

図 A.3-1 ジルカロイ 2 の主要放射化核種の時間変化(7/9)



(p)　Ag-108m の時間変化

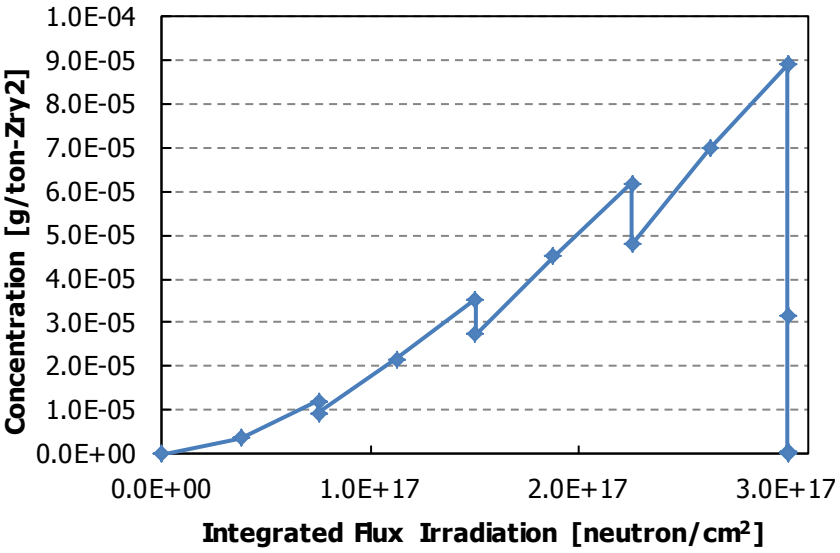


(q)　H-3 の時間変化

図 A.3-1　ジルカロイ 2 の主要放射化核種の時間変化(8/9)

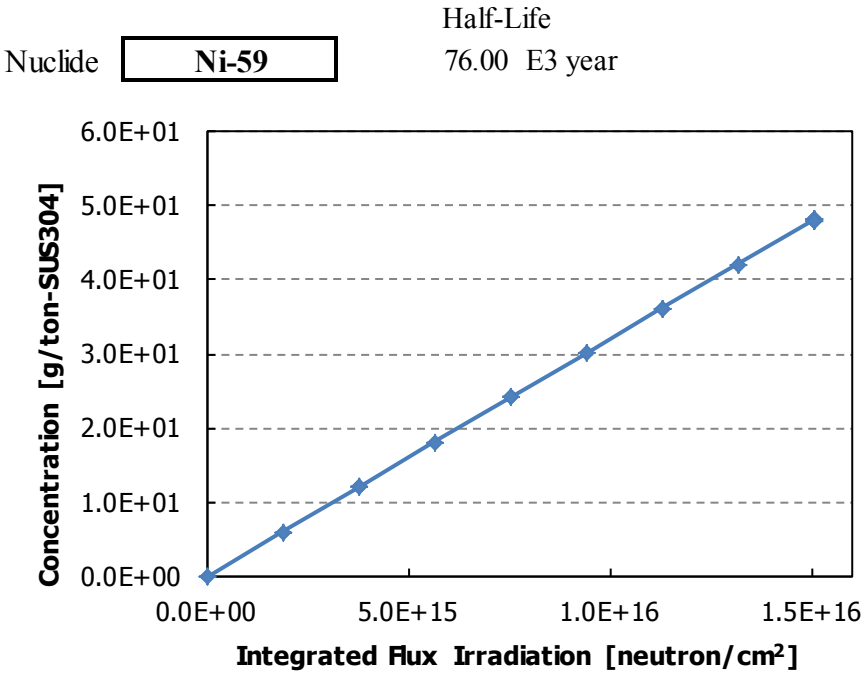
Nuclide **Zn-65**

Half-Life
244.06 day

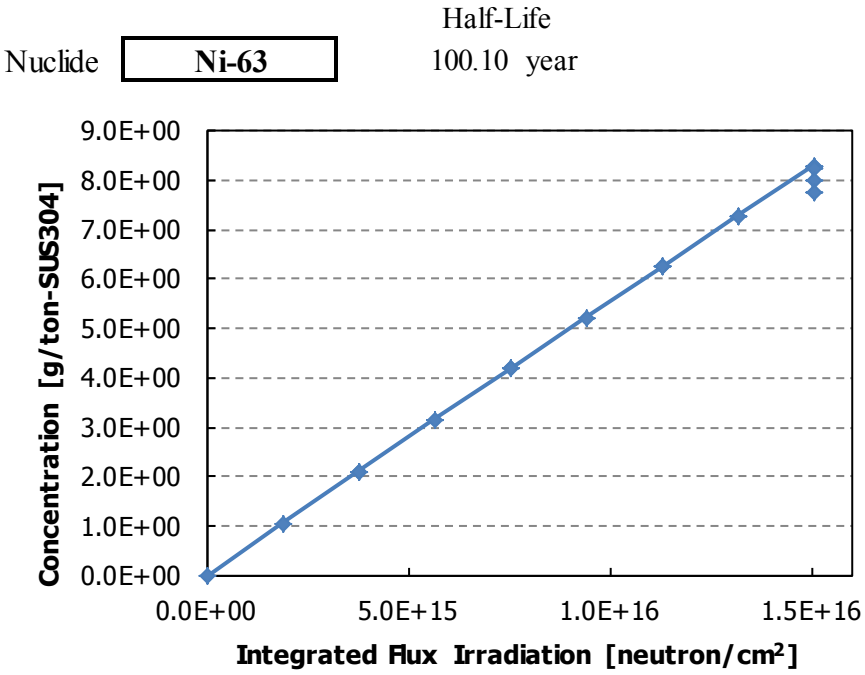


(r) Zn-65 の時間変化

図 A.3-1 ジルカロイ 2 の主要放射化核種の時間変化(9/9)

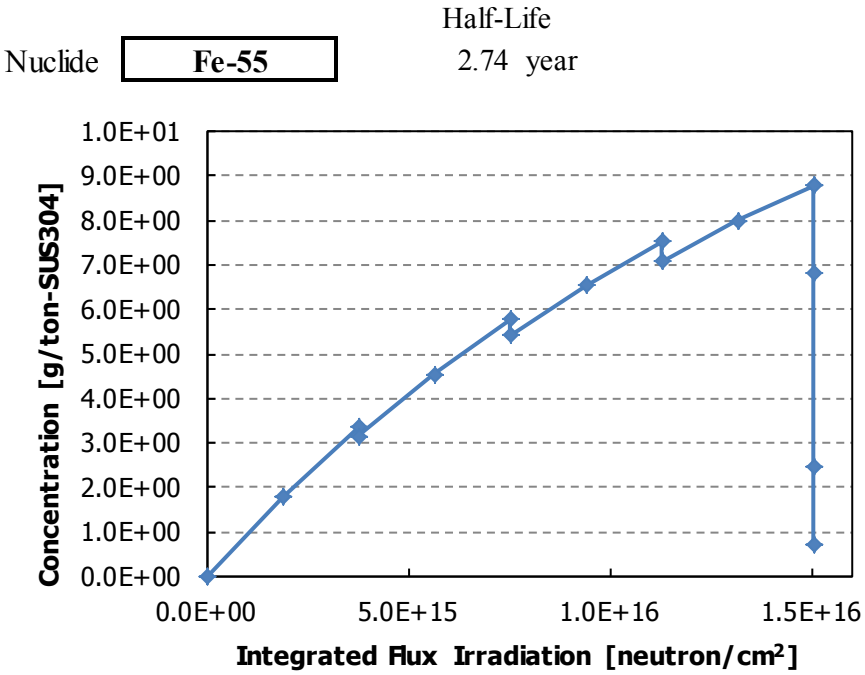


(a) Ni-59 の時間変化

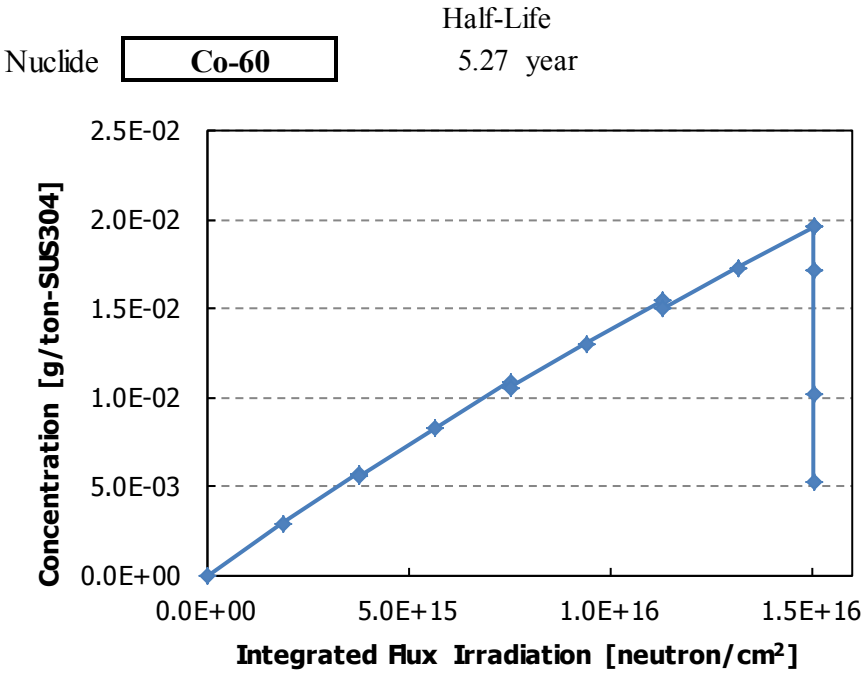


(b) Ni-63 の時間変化

図 A.3-2 SUS304 の主要放射化核種の時間変化(1/4)

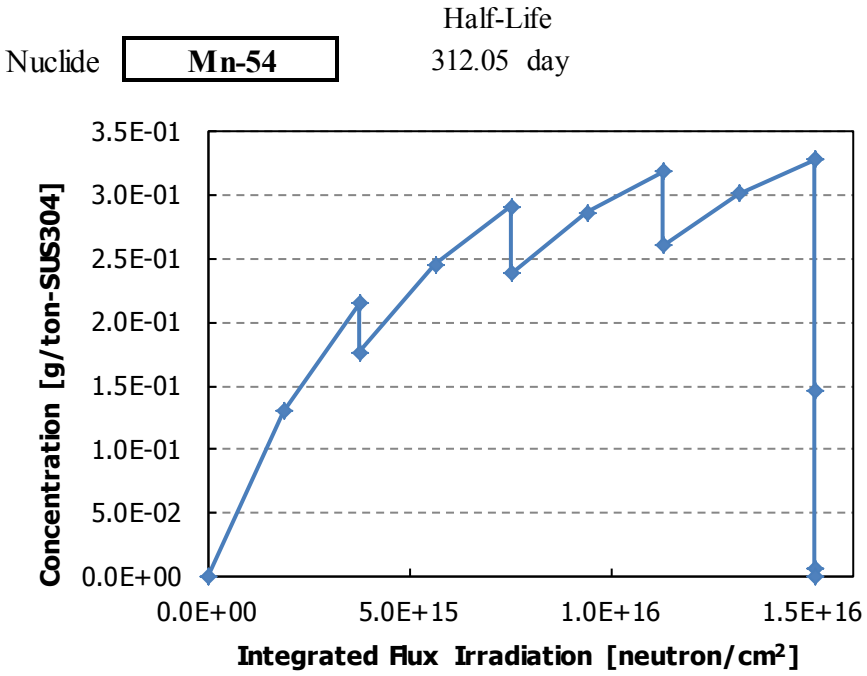


(c)　Fe-55 の時間変化

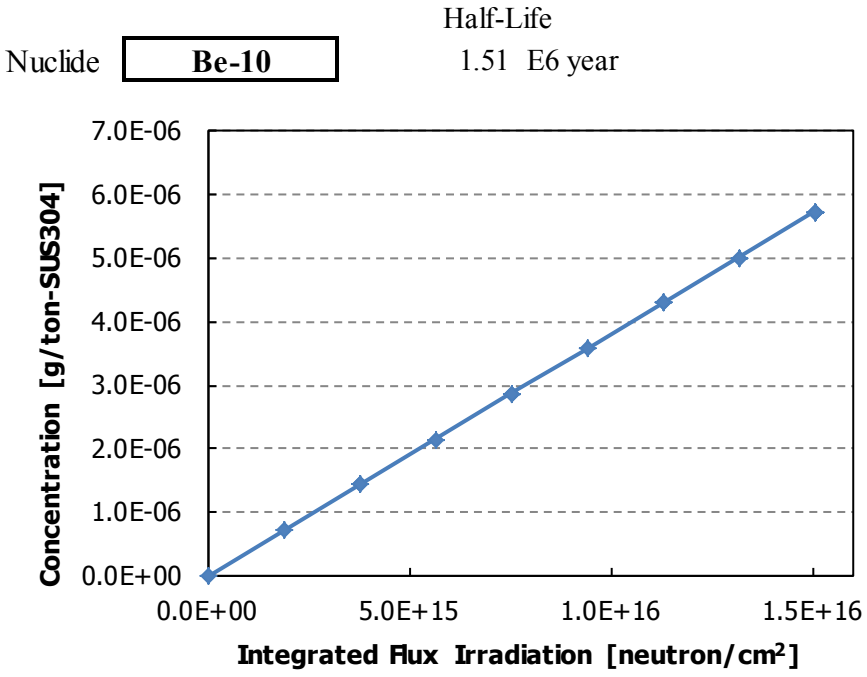


(d)　Co-60 の時間変化

図 A.3-2　SUS304 の主要放射化核種の時間変化(2/4)

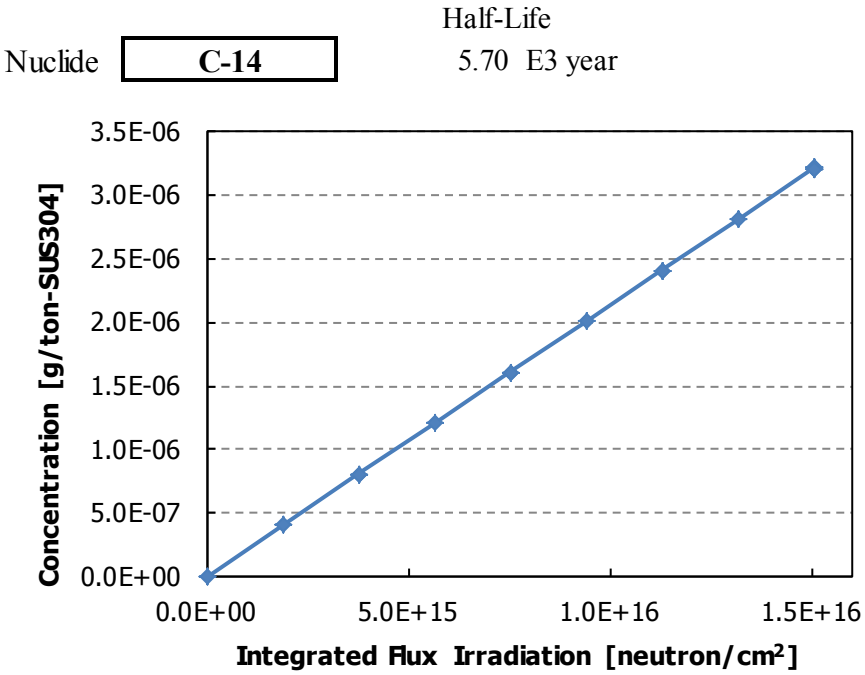


(e)　Mn-54 の時間変化

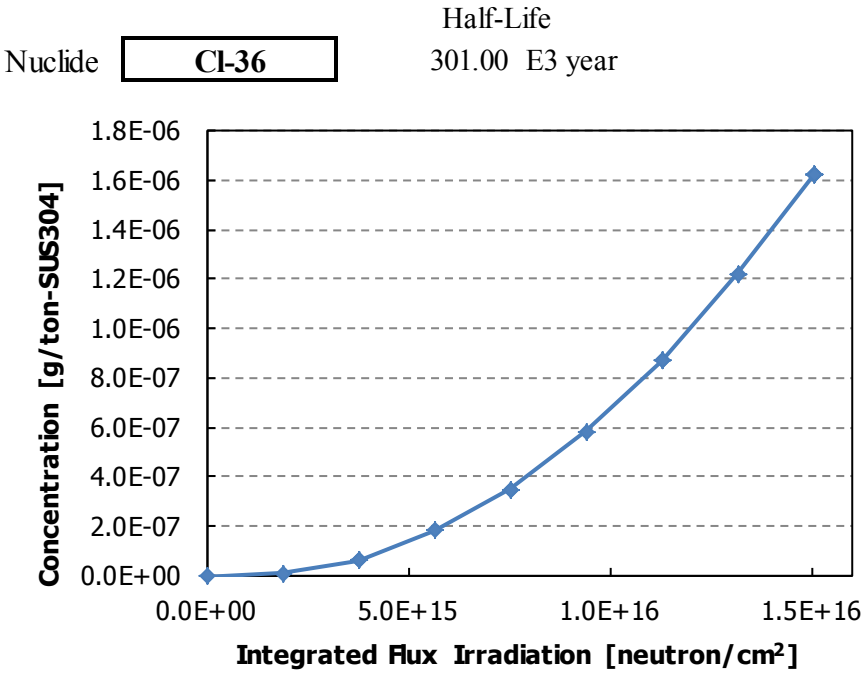


(f)　Be-10 の時間変化

図 A.3-2　SUS304 の主要放射化核種の時間変化(3/4)

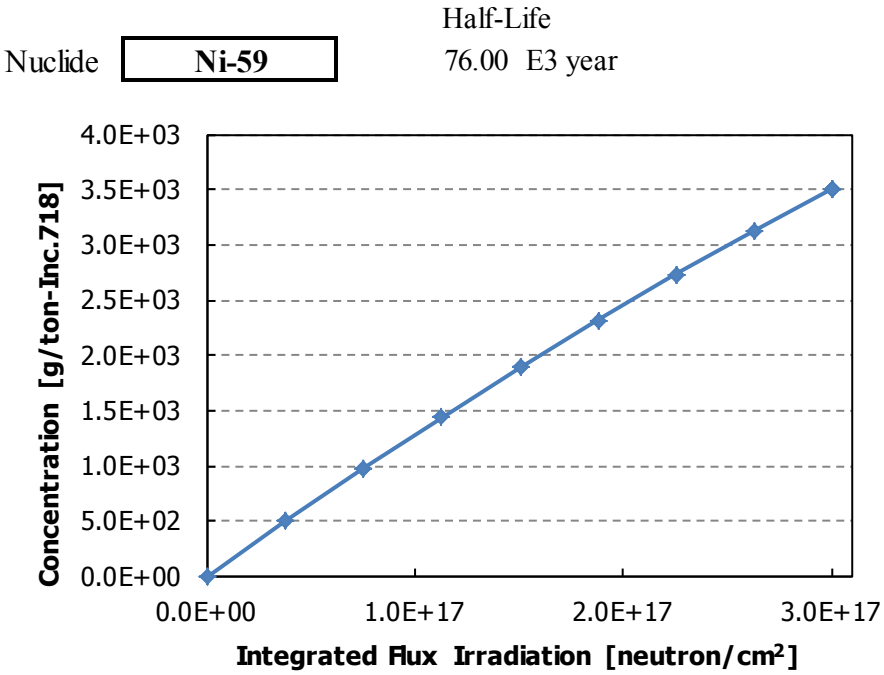


(g)　C-14 の時間変化

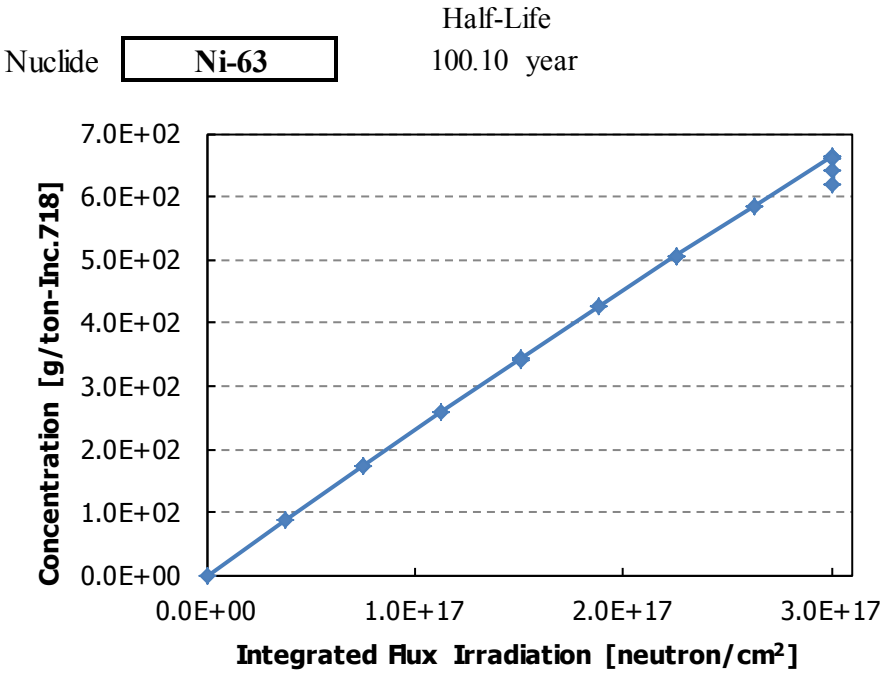


(h)　Cl-36 の時間変化

図 A.3-2　SUS304 の主要放射化核種の時間変化(4/4)

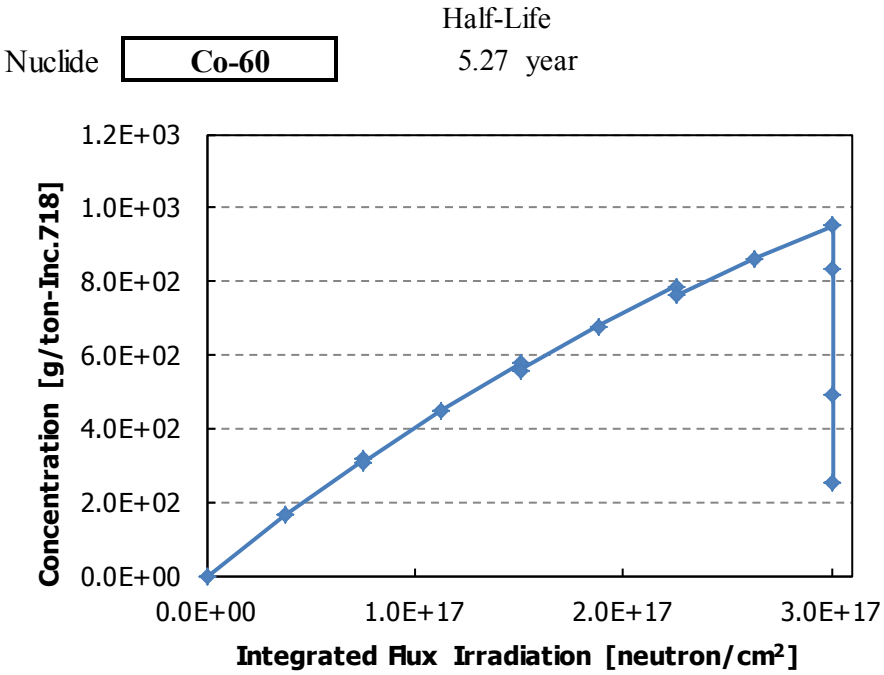


(a) Ni-59 の時間変化

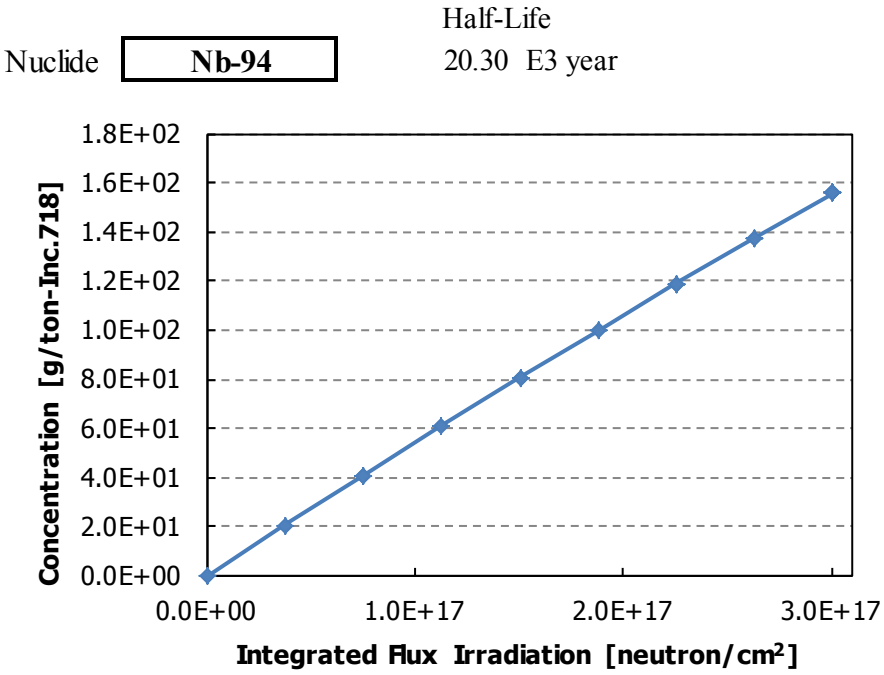


(b) Ni-63 の時間変化

図 A.3-3 インコネル 718 の放射化核種の時間変化(1/8)

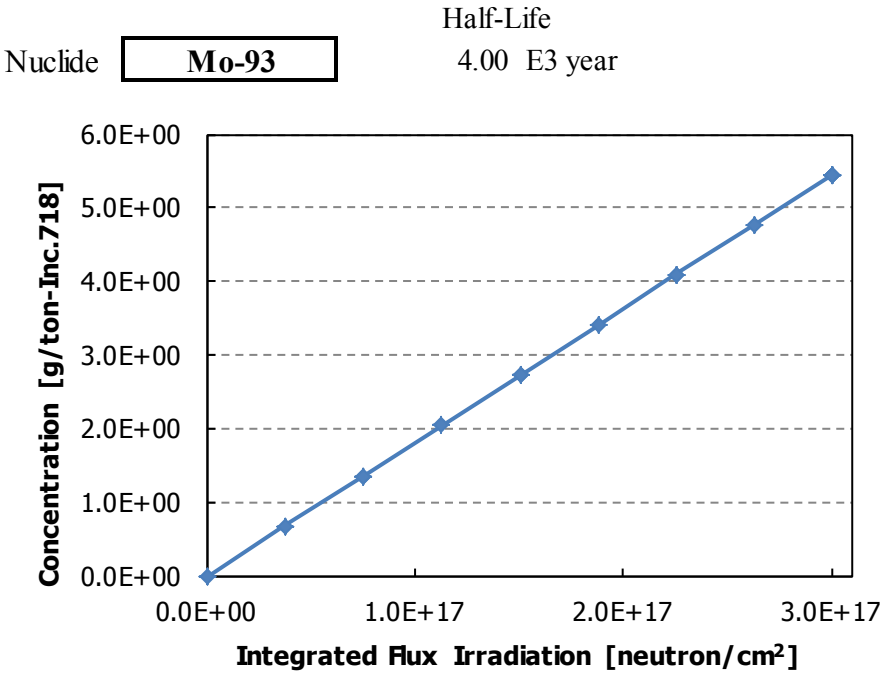


(c)　Co-60 の時間変化

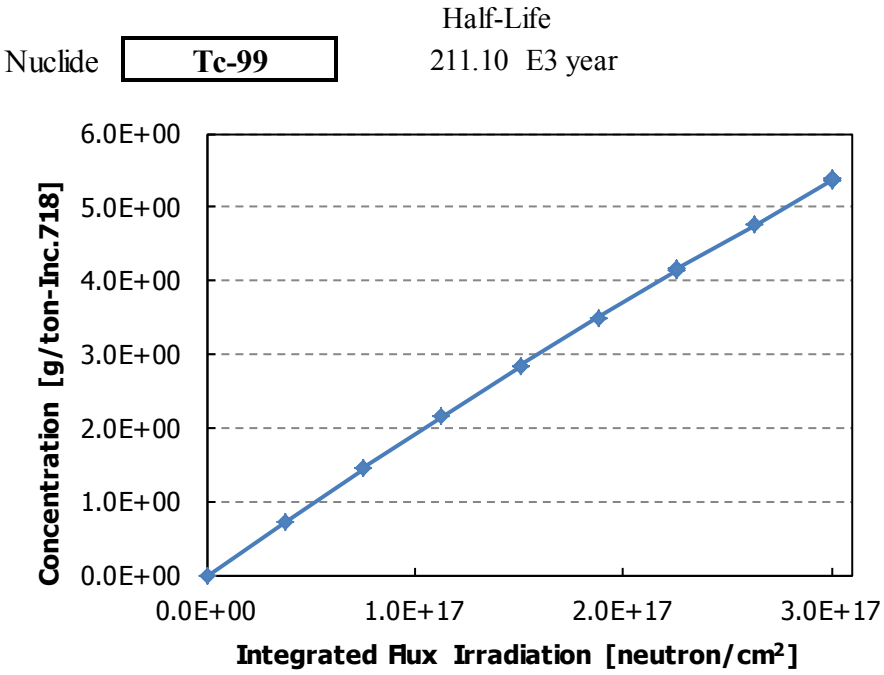


(d)　Nb-94 の時間変化

図 A.3-3　インコネル 718 の放射化核種の時間変化(2/8)



(e) Mo-93 の時間変化

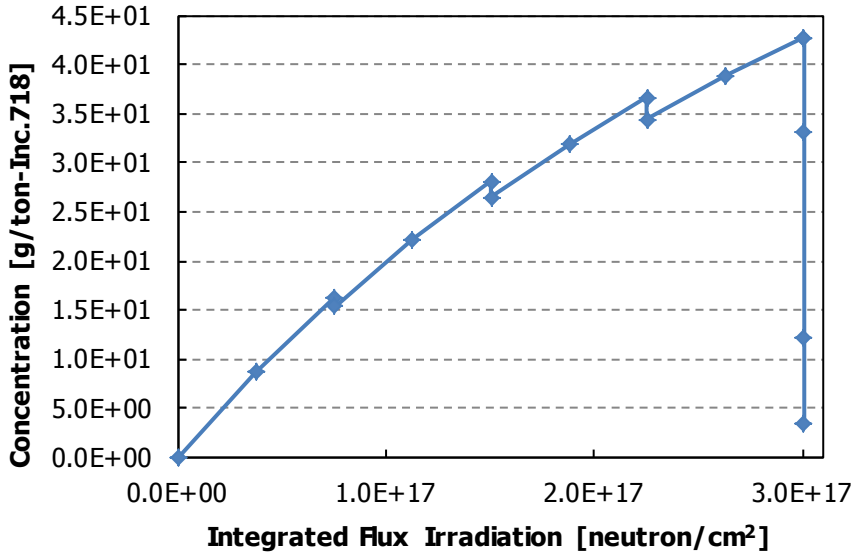


(f) Tc-99 の時間変化

図 A.3-3 インコネル 718 の放射化核種の時間変化(3/8)

Nuclide **Fe-55**

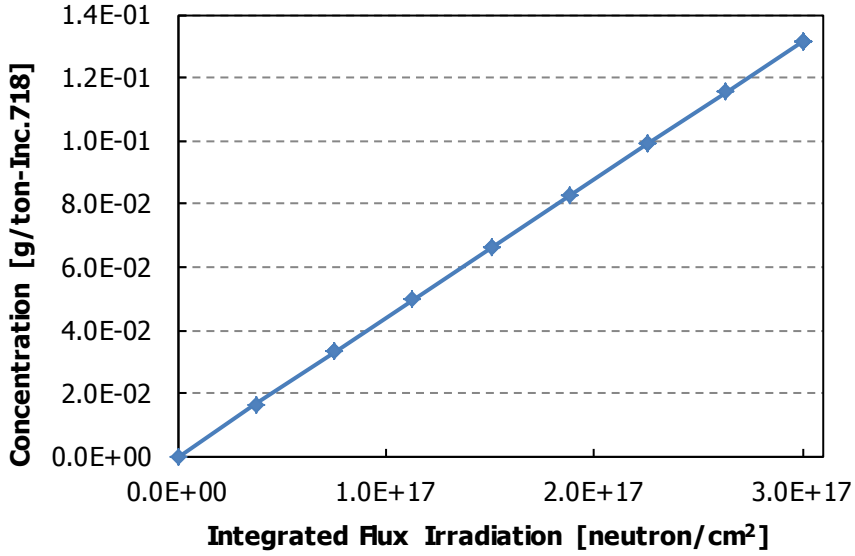
Half-Life
2.74 year



(g) Fe-55 の時間変化

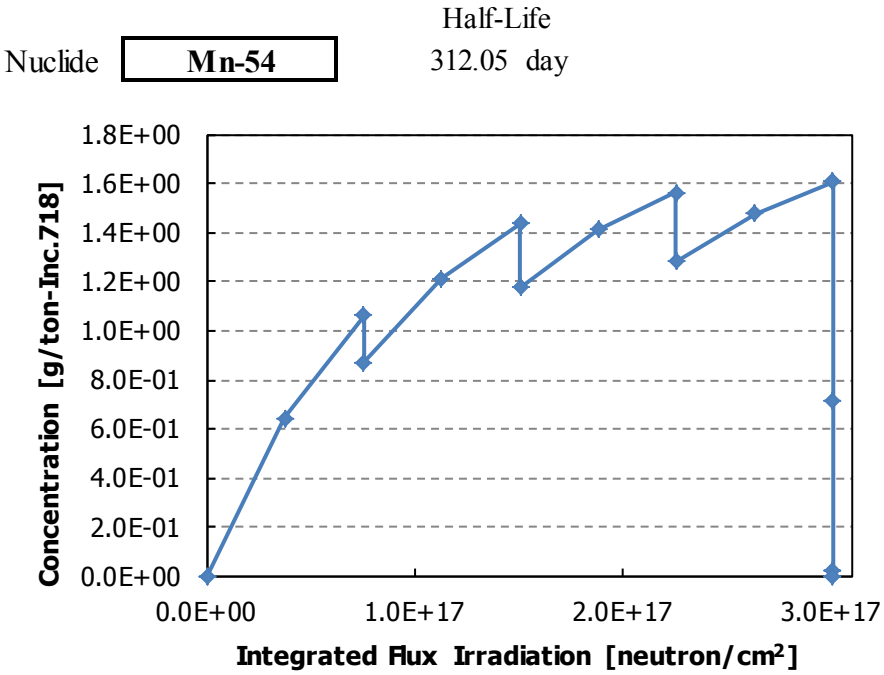
Nuclide **Zr-93**

Half-Life
1.53 E6 year

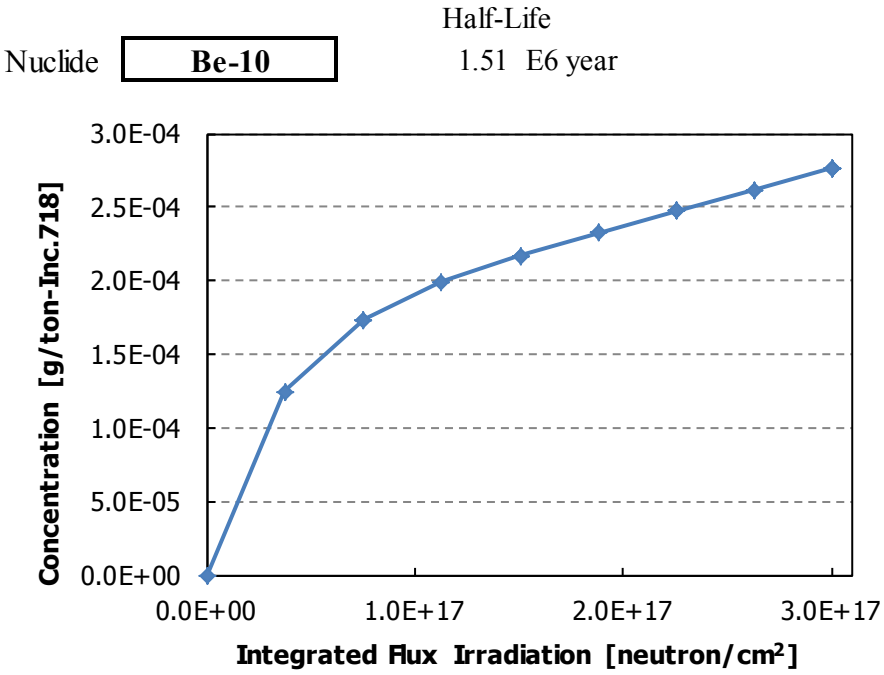


(h) Zr-93 の時間変化

図 A.3-3 インコネル 718 の放射化核種の時間変化(4/8)

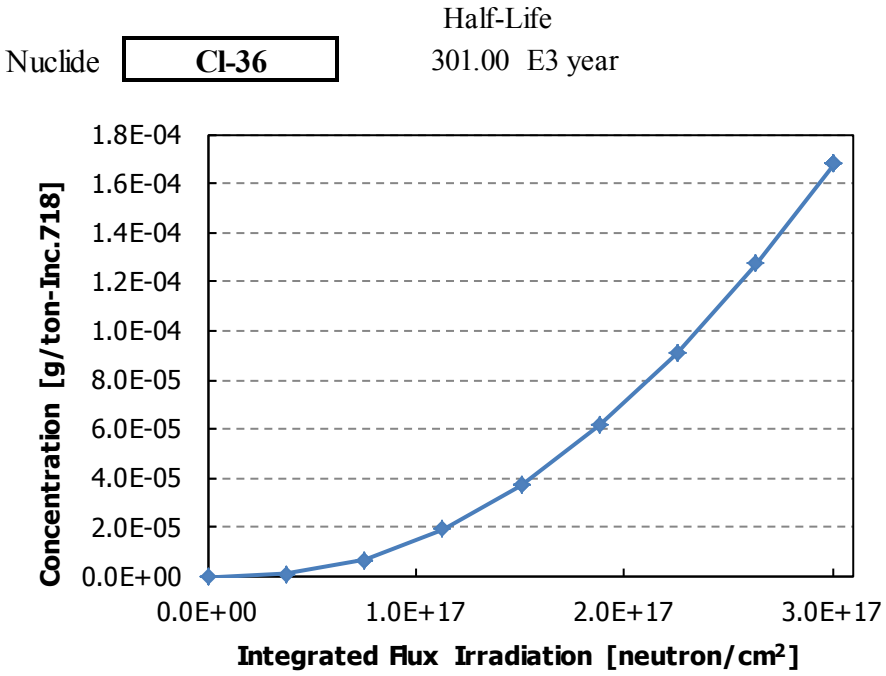


(i)　Mn-54 の時間変化

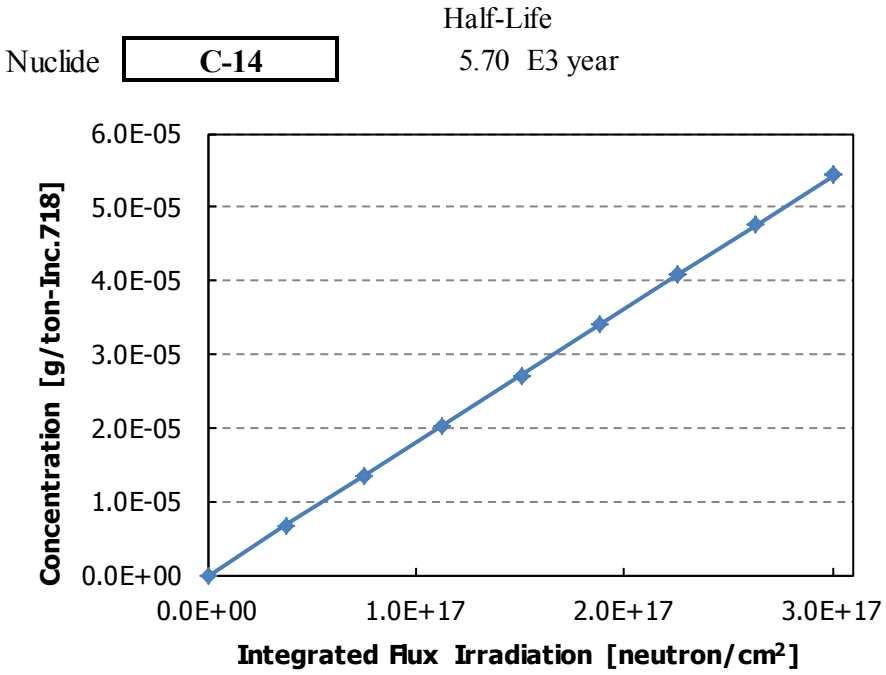


(j)　Be-10 の時間変化

図 A.3-3　インコネル 718 の放射化核種の時間変化(5/8)

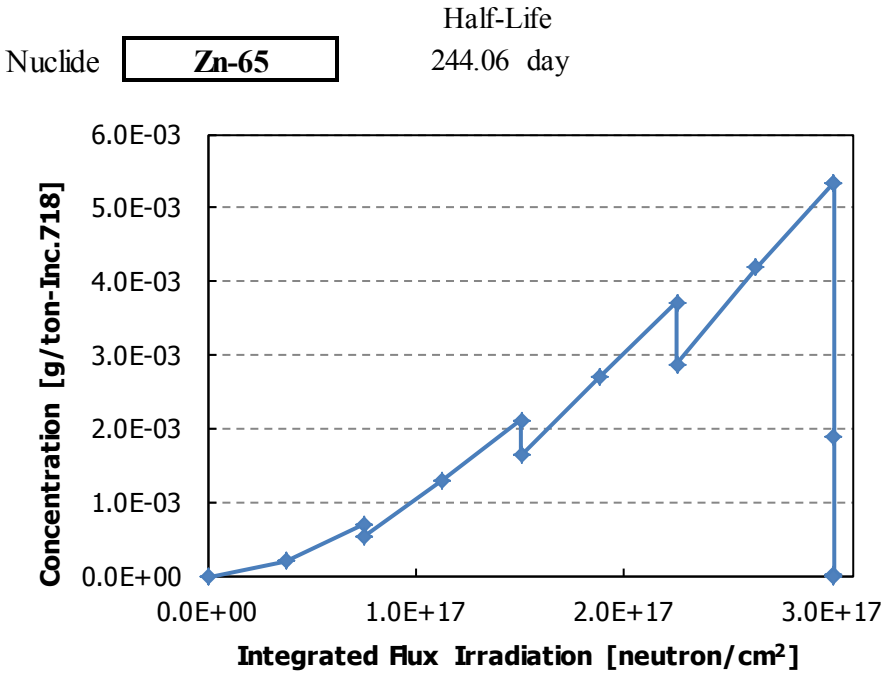


(k)　Cl-36 の時間変化

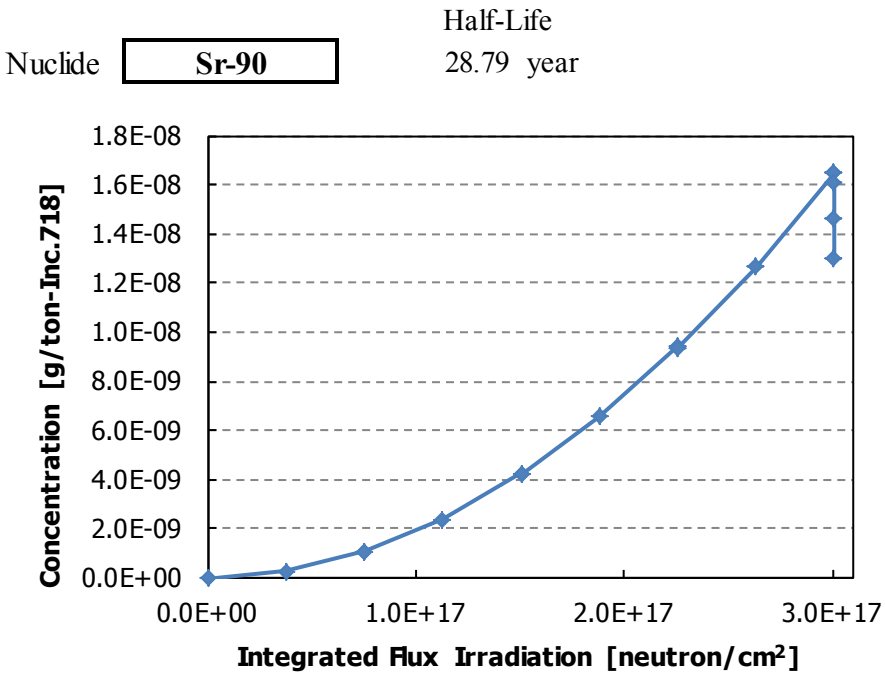


(l)　C-14 の時間変化

図 A.3-3　インコネル 718 の放射化核種の時間変化(6/8)

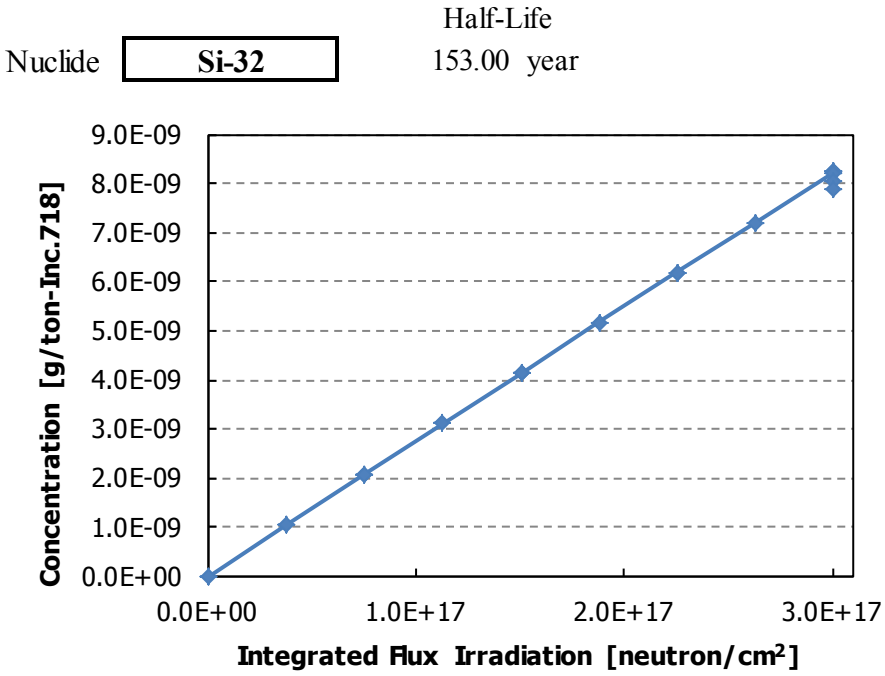


(m)　Zn-65 の時間変化

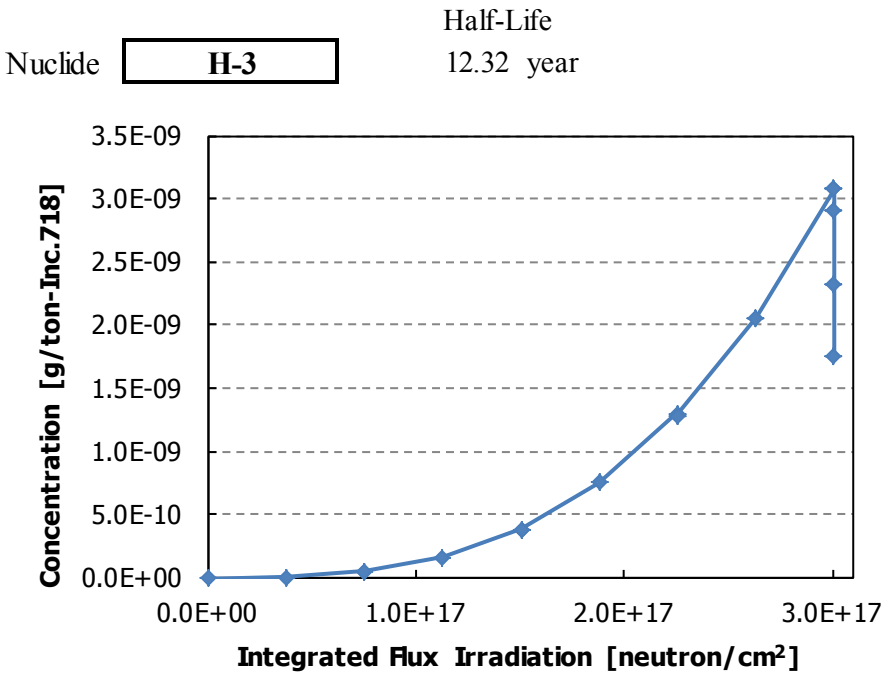


(n)　Sr-90 の時間変化

図 A.3-3　インコネル 718 の放射化核種の時間変化(7/8)



(p)　Si-32 の時間変化



(q)　H-3 の時間変化

図 A.3-3　インコネル 718 の放射化核種の時間変化(8/8)

A.4　炉内構造物の放射化核種生成量の概算

種々の公開文献より燃料集合体の各部材の重量を算出し、燃料集合体 1 体あたりの放射化核種の生成量を概算した。各部材の体積の算出のために使用した燃料集合体の諸元を表 A.4-1 に示す。そして、算出した体積と密度から重量を求め、本文表 3.3-1～表 3.3-3 の材料 1 トンあたりの生成量をかけることで、各部材の放射化核種の生成量を概算した。計算結果を表 A.4-2 に示す。

なお、PWR の各部材については、BWR の照射履歴及び BWR の断面積ライブラリを使用した結果を用いて算出している。より正確な評価には、照射履歴及び断面積ライブラリを適切なものに設定する必要があるが、ここでは概略的な評価を目的として、PWR 燃料集合体の構成材料及び重量のみを考慮し、議論を進める。また、BWR のスペーサのバネについては、スペーサ全体の重量に比べて十分に小さいため、ここでは評価を省略した。

また、参考として、ハル・エンドピースの評価として、被覆管、スペーサ、タイプレートの放射化核種の生成量及び放射能の積算値を表 A.4-3 にまとめた。また、BWR 及び PWR 燃料集合体では、その重量が異なることから、これらの比較を行いやすいように、ハル・エンドピース 1kg あたりの放射能を表 A.4-4 に示す。

表 A.4-2～表 A.4-4 より得られる知見と考察を以下に示す。

- PWR 燃料集合体と BWR 燃料集合体の結果の主な違いは、インコネル材の有無によって生じている。インコネル材は、ニッケル、モリブデン、ニオブを添加物として含んでおり、これらを起源元素とする Ni-59、Ni-63、Mo-93、Nb-94、Tc-99 などにおいて PWR と BWR で大きな差異がある。

表 A.4-1　燃料集合体の諸元(1/2)

(a)　BWR 燃料集合体（9×9 型燃料(A 型)）

被覆管

	値	引用
材質	ジルカロイ2	
密度	6.5 g/cm^3	b
被覆管内径	0.978 cm	a
被覆管外径	1.12 cm	a
被覆管長さ	407 cm	a
燃料棒本数	74 本	a
体積	7047 cm^3	
重量	46 kg	

タイプレート

	値	引用
材質	SUS304	c
密度	7.93 g/cm^3	e
上部タイプレート体積	327 cm^3	c※1
下部タイプレート体積	541 cm^3	c※1
上部タイプレート重量	2.6 kg	
下部タイプレート重量	4.3 kg	

スペーサ

	値	引用
材質	ジルカロイ2	
密度	6.5 g/cm^3	b
幅	13.4 cm	c
板厚	0.05 cm	c
高さ	4.2 cm	c
体積	113 cm^3	c※1
スペーサ個数	7 個/体	c
全体積	788 cm^3	
全重量	5.1 kg	

チャンネルボックス

	値	引用
材質	ジルカロイ4	
密度	6.5 g/cm^3	b
外寸法	13.8 cm	c
板厚	0.25 cm	c
高さ	430 cm	d
体積	5934 cm^3	
重量	39 kg	

表 A.4-1　燃料集合体の諸元(2/2)

(b)　PWR 燃料集合体（17×17 型燃料）

被覆管

	値	引用
材質	ジルカロイ4	
密度	6.5 g/cm^3	b
被覆管内径	0.836 cm	a
被覆管外径	0.95 cm	a
被覆管長さ	390 cm	a
燃料棒本数	289 本 （シンブル管含む）	a
体積	18023 cm^3	
重量	117 kg	

ノズル

	値	引用
材質	SUS304	c
密度	7.93 g/cm^3	e
上部ノズル体積	2465 cm^3	a※1
下部ノズル体積	700 cm^3	a※1
上部ノズル重量	19.5 kg	
下部ノズル重量	5.6 kg	

グリッド

	ジルカロイ4グリッド	インコネルグリッド	引用
密度	6.5 g/cm^3	8.2 g/cm^3	b,f
幅	21.6 cm	21.6 cm	a※1
板厚	0.05 cm	0.05 cm	※2
高さ	4.9 cm	4.9 cm	a※1
体積	192 cm^3	192 cm^3	a※1
グリッド個数	7 個/体	2 個/体	
全体積	1341 cm^3	383 cm^3	
全重量	8.7 kg	3.1 kg	

引用元

a:　付録 A.4 の参考文献 A.4-1)
b:　付録 A.4 の参考文献 A.4-2)
c:　付録 A.4 の参考文献 A.4-3)
d:　付録 A.4 の参考文献 A.4-4)
e:　JIS G4303
f:　UNS N07718
※1:　資料を基に概算
※2:　PWR グリッドの板厚については、公開データが入手できなかったため BWR スペーサの板厚で代用した。

表 A.4-2　燃料集合体 1 体あたりの部材ごとの放射化核種生成量

(a)　BWR 燃料集合体

	被覆管	上部タイプレート	下部タイプレート	スペーサ	チャンネルボックス
重量 [kg]	46	2.6	4.3	5.1	39
生成量 [g]					
ZR93	9.08E+00			1.01E+00	7.70E+00
NI59	1.69E-01	6.69E-02	2.07E-01	1.87E-02	1.82E-02
NI63	3.02E-02	1.07E-02	3.34E-02	3.34E-03	3.47E-03
CO60	2.35E-02	1.29E-05	2.27E-05	2.61E-03	1.99E-02
C14	1.82E-02	6.12E-09	1.38E-08	2.02E-03	1.55E-02
NB94	1.40E-02			1.55E-03	1.19E-02
SB125	1.16E-02			1.29E-03	9.87E-03
CA41	1.40E-03			1.55E-04	1.18E-03
K40	1.02E-03			1.13E-04	8.64E-04
FE55	9.80E-04	1.01E-03	3.04E-03	1.09E-04	1.24E-03
TC99	4.19E-04			4.64E-05	3.55E-04
MO93	4.11E-04			4.55E-05	3.48E-04
BE10	1.85E-06	1.48E-08	2.47E-08	2.05E-07	1.57E-06
MN54	1.79E-07	2.59E-07	4.26E-07	1.99E-08	2.36E-07
AG108M	1.50E-08			1.66E-09	1.27E-08
H3	1.40E-09			1.55E-10	1.18E-09
ZN65	1.29E-10			1.43E-11	1.09E-10
CL36		1.16E-09	7.02E-09		

(b)　PWR 燃料集合体

	被覆管	上部ノズル	下部ノズル	Zry4グリッド	Inc.グリッド
重量 [kg]	117	19.5	5.6	8.7	3.1
生成量 [g]					
ZR93	2.31E+01			1.72E+00	4.08E-04
NI59	5.47E-02	5.02E-01	2.70E-01	4.07E-03	1.09E+01
NI63	1.04E-02	8.03E-02	4.35E-02	7.74E-04	1.92E+00
CO60	5.98E-02	9.69E-05	2.96E-05	4.45E-03	7.94E-01
C14	4.64E-02	4.59E-08	1.80E-08	3.45E-03	1.69E-07
NB94	3.56E-02			2.65E-03	4.83E-01
SB125	2.96E-02			2.20E-03	
CA41	3.55E-03			2.64E-04	
K40	2.59E-03			1.93E-04	
FE55	3.72E-03	7.57E-03	3.96E-03	2.77E-04	1.06E-02
TC99	1.06E-03			7.92E-05	1.67E-02
MO93	1.04E-03			7.77E-05	1.69E-02
BE10	4.71E-06	1.11E-07	3.22E-08	3.50E-07	8.57E-07
MN54	7.08E-07	1.94E-06	5.54E-07	5.27E-08	1.50E-06
AG108M	3.81E-08			2.83E-09	
H3	3.55E-09			2.64E-10	
ZN65	3.28E-10			2.44E-11	5.22E-10
CL36		8.67E-09	9.14E-09		5.21E-07
SI32	2.23E-11				2.44E-11

表 A.4-3　ハル・エンドピースの放射化核種の全生成量と全放射能

(a)　BWR 燃料集合体

（チャンネルボックスを除く）

	生成量 [g/1体]	放射能 [Bq/1体]
ZR93	1.0E+01	9.4E+08
NI59	4.6E-01	1.4E+09
NI63	7.8E-02	1.6E+11
CO60	2.6E-02	1.1E+12
C14	2.0E-02	3.4E+09
NB94	1.6E-02	1.1E+08
SB125	1.3E-02	5.0E+11
FE55	5.1E-03	4.5E+11
CA41	1.6E-03	4.9E+06
K40	1.1E-03	3.0E+02
TC99	4.7E-04	2.9E+05
MO93	4.6E-04	1.6E+07
BE10	2.1E-06	1.8E+03
MN54	8.8E-07	2.5E+08
AG108M	1.7E-08	4.7E+03
CL36	8.2E-09	1.0E+01
H3	1.6E-09	5.5E+05
ZN65	1.4E-10	4.4E+04

(b)　PWR 燃料集合体

	生成量 [g/1体]	放射能 [Bq/1体]
ZR93	2.5E+01	2.3E+09
NI59	1.2E+01	3.5E+10
NI63	2.1E+00	4.3E+12
CO60	8.6E-01	3.6E+13
NB94	5.2E-01	3.6E+09
C14	5.0E-02	8.3E+09
SB125	3.2E-02	1.2E+12
FE55	2.6E-02	2.3E+12
MO93	1.8E-02	6.4E+08
TC99	1.8E-02	1.1E+07
CA41	3.8E-03	1.2E+07
K40	2.8E-03	7.4E+02
BE10	6.1E-06	5.3E+03
MN54	4.8E-06	1.4E+09
CL36	5.4E-07	6.6E+02
AG108M	4.1E-08	1.1E+04
H3	3.8E-09	1.4E+06
ZN65	8.7E-10	2.7E+05
SI32	4.7E-11	1.3E+02

表 A.4-4　ハル・エンドピース 1kg あたりの放射能

	1kgあたりの放射能 [Bq/kg]	
	BWR	PWR
ZR93	1.6E+07	1.5E+07
NI59	2.3E+07	2.2E+08
NI63	2.8E+09	2.8E+10
CO60	1.9E+10	2.3E+11
C14	5.8E+07	5.4E+07
NB94	1.9E+06	2.3E+07
SB125	8.6E+09	7.9E+09
FE55	7.8E+09	1.5E+10
CA41	8.5E+04	7.8E+04
K40	5.2E+00	4.8E+00
TC99	5.1E+03	7.3E+04
MO93	2.8E+05	4.2E+06
BE10	3.2E+01	3.4E+01
MN54	4.4E+06	8.9E+06
AG108M	8.0E+01	7.4E+01
CL36	1.7E-01	4.3E+00
H3	9.6E+03	8.9E+03
ZN65	7.5E+02	1.7E+03
SI32	-	8.2E-01

付録 A.4 の参考文献

A.4-1) 広瀬勉, 土井荘一「核燃料工学の基礎, 第 2 回　軽水炉燃料(1)」, 日本原子力学会誌, Vol.46, No.6 (2004).

A.4-2) 原子力安全小委員会, 「PWR 燃料の高燃焼度化（ステップ 2）及び燃料の高燃焼度化に係る安全研究の現状と課題について」, 経済産業省　原子力安全・保安部会　原子力安全小委員会燃料ワーキンググループ, p.20 (2001).

A.4-3) 原子力安全基盤機構, 「金属キャスク落下時の使用済み燃料被覆管の構造健全性解析手法検討に関する報告書（平成 18 年度）」, JNES/SAE07-004 07 解部報-0004, pp.2-19 (2007).

A.4-4) 中国電力株式会社, 「島根原子力発電所におけるチャンネルボックス上部（クリップ）の一部欠損に係る調査結果について（別紙）」, 添付資料 1, 中国電力株式会社 (2013).

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 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[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) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	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]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, 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	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

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

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ 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	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

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	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=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
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

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

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」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	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
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=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu\ =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています