JAEA-Technology 2017-007 DOI:10.11484/jaea-technology-2017-007



NSRR燃料棟燃料貯蔵庫の臨界解析

ー地震及び津波発生時を想定ー

Criticality Safety Evaluation of the Fresh Fuel Storage in NSRR --Under Consideration of Earthquake and Tsunami Occurrence--

> 求 惟子 村尾 裕之 Yuiko MOTOME and Hiroyuki MURAO

> > 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research

日本原子力研究開発機構

March 2017

Japan Atomic Energy Agency

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

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2017

NSRR 燃料棟燃料貯蔵庫の臨界解析 --地震及び津波発生時を想定---

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 研究炉加速器管理部 求 惟子、村尾 裕之

(2017年3月9日 受理)

Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) では、反応度事故時の原子炉燃料の安全性を研究 するため、燃料照射実験を行っている。NSRR 原子炉建家の附属建家である燃料棟の燃料貯蔵庫 は、燃料照射実験で使用する未照射の試験燃料及び新品の原子炉運転用の燃料要素を貯蔵する。

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震を受け、NSRRの核燃料物質使用施設が設計要求を超 える外的事象によって受ける影響を評価した。燃料貯蔵庫については、地震及び津波の重畳を考 慮した臨界評価を実施し、地震及び津波の重畳を考慮しても燃料貯蔵庫の臨界安全性は確保され ることを確認した。

Criticality Safety Evaluation of the Fresh Fuel Storage in NSRR - Under Consideration of Earthquake and Tsunami Occurrence -

Yuiko MOTOME and Hiroyuki MURAO

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 9, 2017)

Nuclear Safety Research Reactor (NSRR) facility has been utilized for fuel irradiation experiments to study the behaviors of nuclear fuels under reactivity initiated accident conditions. Unirradiated test fuels used in the experiments and fresh fuel rods for reactor operation are stored on the fresh fuel storage in the facility.

In response to the 2011 Great East Japan Earthquake, the impact of NSRR facility has been evaluated on external events beyond design requirements. The subcriticality of the storage has been confirmed in consideration of earthquake and following tsunami.

Keywords: NSRR, Fuel Storage Facility, Criticality Safety Evaluation, Monte Carlo Method

目 次

1.	緒	₫·	1
2.	燃	料棟燃料貯蔵庫の概要	1
3.	解	忻手法	1
	3.1	計算条件	1
	3.2	計算コード	2
	3.3	解析対象の燃料保管箱	2
	3.4	燃料保管箱の解析モデル	2
	3.5	試験燃料棒の解析モデル	3
	3.	5.1 試験燃料棒の配置	3
	3.	5.2 試験燃料棒の濃縮度及び数量	3
	3.6	水密度	3
	3.7	解析で使用する各領域の組成	3
4.	解	忻結果	4
	4.1	箱間隔及び濃縮度の無限増倍率への影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
	4.2	水密度の無限増倍率への影響	4
5.	結	≣	4
謝	辞		4
参	考文	ː献	4
付	録 A	A 粉末状の試験燃料の臨界解析結果1	0
付	録 I	3 燃料保管箱の短辺と試験燃料棒を平行に配置した場合の臨界解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
付	録(ン 試験燃料棒を稠密配置とした場合の臨界解析結果	6

Contents

1. Introduction1
2. General description of the flesh fuel storage in fuel building1
3. Analysis methods 1
3.1 Calculation conditions1
3.2 Calculation code2
3.3 Fuel storage box used in the analysis2
3.4 Analysis model of fuel storage box2
3.5 Analysis model of experimental fuel elements3
3.5.1 Arrangement of experimental fuel elements3
3.5.2 Enrichment and quantity of experimental fuel elements3
3.6 Water density3
3.7 Composition of each region used in the analysis3
4. Result of analysis 4
4.1 Influence of distance between the boxes and enrichment for infinite fuel systems 4
4.2 Influence of water density for infinite fuel systems 4
5. Conclusion4
Acknowledgements 4
References4
Appendix A Result of analysis of powdered experimental fuel 10
Appendix B Result of analysis of experimental fuel elements arranged in parallel with
narrow side of box 13
Appendix C Result of analysis of experimental fuel elements arranged densely 16

表リスト

表 3.1	試験燃料棒の濃縮度及び数量の関係	· 5
表 3.2	燃料保管箱の原子個数密度組成	· 5
表 3.3	各濃縮度における試験燃料棒の原子個数密度組成	· 5
表 3.4	各水密度の原子個数密度組成	· 6
表 4.1	箱間隔及び濃縮度と無限増倍率(k_{∞} +3 σ)の関係	· 6

図リスト

図 2.1	燃料貯蔵庫の平面図	7
図 2.2	燃料貯蔵棚(A)及び(B)の燃料保管箱の配置	7
図 2.3	燃料貯蔵棚(C)の燃料保管箱の配置	7
図 3.1	試験燃料用の燃料保管箱の形状	8
図 3.2	燃料保管箱の解析モデル	8
図 3.3	試験燃料棒の配置例(濃縮度 1.5wt%、本数 136 本)	9
図 4.1	箱間隔及び濃縮度と無限増倍率の関係	9
図 4.2	水密度と無限増倍率の関係(箱間隔 0mm、濃縮度 1.5wt%)	9

This is a blank page.

1. 緒言

原子炉安全性研究炉(NSRR: Nuclear Safety Research Reactor)では、反応度事故時の原子 炉燃料の安全性を研究するため、燃料照射実験を行っている。NSRR 原子炉建家の附属建家であ る燃料棟の燃料貯蔵庫は、燃料照射実験で使用する未照射の試験燃料及び新品の原子炉運転用の 燃料要素を貯蔵する。

東北地方太平洋沖地震の発生を受け、NSRRの核燃料物質使用施設が設計要求を超える外的事 象によって受ける影響を評価した。本報告書は、燃料貯蔵庫の地震及び津波の重畳を考慮した臨 界評価の結果について述べたものである。

なお、本評価結果は、平成27年度に核燃料物質使用施設の新規制基準に係る対応として、原子 力規制庁への「安全上重要な施設」に該当する構築物、系統及び機器を特定した結果の報告にも 使用している。

2. 燃料棟燃料貯蔵庫の概要

燃料貯蔵庫は鉄筋コンクリート製で、燃料照射実験で使用する未照射の試験燃料及び新品の原 子炉運転用の燃料要素を貯蔵する。図 2.1 に燃料貯蔵庫の平面図を示す。燃料貯蔵庫には、燃料 貯蔵棚(A)、(B)及び(C)が配置されている。燃料貯蔵棚(A)及び(B)は燃料要素及び試験 燃料用、燃料貯蔵棚(C)は計装燃料及び燃料フォロワ型制御棒用である。

燃料は、燃料貯蔵棚に配置された燃料保管箱に貯蔵される。図 2.2 に燃料貯蔵棚(A)及び(B) の燃料保管箱の配置を示す。燃料貯蔵棚(A)及び(B)に配置されている燃料保管箱は、未照射 の試験燃料用が 19 箱、燃料要素用が 6 箱である。燃料保管箱は、約 300mm の間隔をあけて配置 されている。図 2.3 に燃料貯蔵棚(C)の燃料保管箱の配置を示す。燃料貯蔵棚(C)に配置され ている計装燃料及び燃料フォロワ型制御棒用の燃料保管箱は 8 箱である。

試験燃料の核的制限値は、濃縮度 20wt%未満及び燃料保管箱毎に 0.5kg(U-235 量)以下である。燃料要素用の燃料保管箱に貯蔵可能な燃料要素は 6本、計装燃料及び燃料フォロワ型制御棒用の燃料保管箱に貯蔵可能な燃料要素は 8本である。

3. 解析手法

3.1 計算条件

地震及び津波の重畳を考慮して、燃料貯蔵庫の臨界解析を実施する。解析条件は、設計要 求を超える地震により燃料貯蔵庫の燃料貯蔵棚の形状が維持されないこと及び津波の到来に より燃料貯蔵庫が浸水することである。

本解析では、以下の3つをパラメータとして評価した。

・燃料保管箱の間隔

燃料貯蔵庫は燃料保管箱の間隔を制限することによって臨界にならないよう管理されていることから、X,Y,Z方向について、現状の箱間隔(約300mm)から燃料保管箱が

密着する状態(0mm)まで、燃料保管箱の間隔を変化させた。

試験燃料棒の濃縮度

燃料貯蔵庫の核的制限値は、濃縮度 20wt%未満及び燃料保管箱ごとに U-235 量で 0.5kg である。試験燃料棒の形状を一定、U-235 量は燃料保管箱あたりの制限値である 0.5kg とし、濃縮度を 20wt%未満で変化させると、濃縮度が小さくなるほど U-238 量が 増加し、試験燃料棒の本数が増加することになる。本解析モデルにおける試験燃料棒の 最大の本数を考慮し、濃縮度は 1.2wt%~20wt%の範囲で変化させた。

・水密度の変化

津波による浸水によって、燃料保管箱の周囲及び内部は水で満たされるとし、水密度 は 0~1.00×10³kg/m³の範囲において 2.00×10²kg/m³ずつ変化させた。このとき、海水 中には中性子吸収断面積の大きい不純物が含まれているが、本解析では保守的に不純物 を考慮せず、水の組成で評価した。

体系の境界条件として周期境界条件を指定することで、無限体系として解析した。解析結果に標準偏差の3倍を加えた値に対して判定を行った。

3.2 計算コード

本解析においては、連続エネルギー法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコ ード MVP¹⁾を使用し、核データライブラリは JENDL-4.0²⁾を使用した。

3.3 解析対象の燃料保管箱

本解析では、燃料貯蔵棚(A)及び(B)に配置されている試験燃料用の燃料保管箱を対象 とした。

図 3.1 に試験燃料用の燃料保管箱の形状を示す。試験燃料用の燃料保管箱は、幅 350mm、 長さ 800mm、高さ 60mm(足を含めると 85mm)で、その内部の試験燃料が入る空間の高 さは 50mm である。箱の板厚は 1mm、箱の材質は鉄である。試験燃料用の燃料保管箱は、 燃料要素を貯蔵できないような仕切り板が設けられている。また、試験燃料の入っていない 空間には、スペーサーを入れることにより、試験燃料が燃料保管箱内で移動しないよう管理 をしている。

3.4 燃料保管箱の解析モデル

図 3.2 に燃料保管箱の解析モデルを示す。解析モデルの燃料保管箱の形状は、幅 350mm、 長さ 800mm、高さ 60mm、板厚 1mm の直方体の箱に、燃料保管箱の足を考慮し、Z 方向に 25mm の間隔を設けたものとした。解析モデルの燃料保管箱の外側には、箱間隔に相当する 水の壁(0mm~300mm)が X, Y, Z 方向に存在するとし、水の壁の外側を境界条件とした。 燃料保管箱内部の試験燃料及び燃料保管箱以外は、すべて水とした。 3.5 試験燃料棒の解析モデル

試験燃料は二酸化ウランとし、NSRR で使用する一般的な試験燃料棒(直径 10mm、長さ 300mm の円柱)とした。なお、燃料貯蔵庫では粉末状の燃料も貯蔵されている。粉末状の 試験燃料の臨界解析結果を付録 A に示す。

3.5.1 試験燃料棒の配置

試験燃料棒は、燃料保管箱の長辺と平行になるように配置し、試験燃料棒同士は密着 するとした。試験燃料棒の配置の例(濃縮度:1.5wt%、本数:136本)を図3.3に示す。 燃料保管箱の試験燃料が入る空間の幅は348mm、高さは50mmであることから、直径 10mmの試験燃料棒は1段あたりに34本配置され、最大で5段積むことができるとし た。

試験燃料棒は、1段目から順番に、燃料保管箱の中央を軸にして左右対象に配置した。 また、下段が34本埋まってから、次の段に積まれるとした。

なお、試験燃料棒の配置を変更した場合の臨界解析結果を付録 B 及び付録 C に示す。

3.5.2 試験燃料棒の濃縮度及び数量

燃料貯蔵庫の核的制限値は、濃縮度 20wt%未満及び燃料保管箱ごとに U-235 量で 0.5kg である。試験燃料棒の形状を一定とし、U-235 量は燃料保管箱あたりの制限値で ある 0.5kg とし、濃縮度を 20wt%未満で変化させると、濃縮度が小さくなるほど U-238 量が増加し、試験燃料棒の本数が増加することになる。

本解析での試験燃料棒の配置では、最大で 170 本 (34 本×5 段) 配置可能である。濃 縮度 1.2wt%の試験燃料棒が 170 本あるとすると、燃料保管箱あたりの U-235 量は約 0.501kg となる。保守的な結果となるように、燃料保管箱あたりの U-235 量は 0.5kg 未 満とならないよう濃縮度を設定した。

以上のことから、濃縮度の変化の範囲は 1.2wt%~20.0wt%とした。試験燃料棒の濃縮 度及び数量の関係を表 3.1 に示す。

3.6 水密度

燃料保管箱内部及び外側を同一の水密度として解析した。水密度は 0~1.00×10³kg/m³の 範囲において 2.00×10²kg/m³ずつ変化させた。

3.7 解析で使用する各領域の組成

燃料保管箱の組成を表 3.2 に、各濃縮度における試験燃料棒の組成を表 3.3 に示す。

また、水領域については、水密度をパラメータとして解析を行った。各水密度に対する組 成を表 3.4 に示す。

4. 解析結果

4.1 箱間隔及び濃縮度の無限増倍率への影響

モンテカルロ計算の結果については、標準偏差の3倍を加えて判定する。箱間隔及び濃縮 度と無限増倍率(k_{∞} +3 σ)の関係を表4.1及び図4.1に示す。すべての濃縮度において、箱 間隔0mmの箱同士が密着した状態の無限増倍率が最大となった。また、濃縮度は1.5wt%近 傍で最大となった。最大となる場合でも無限増倍率は0.83であり、未臨界性は確保される。

4.2 水密度の無限増倍率への影響

箱間隔 0mm 及び濃縮度 1.5wt%の場合における、水密度と無限増倍率の関係を図 4.2 に示 す。図に示すとおり、水密度 8.00×10²kg/m³近傍で無限増倍率が最大 0.84 であり、未臨界 性は確保される。

5. 結言

本報告書では、燃料貯蔵庫について、設計要求を超える地震及び津波の重畳を考慮し、臨界解 析を実施した。解析では、燃料保管箱の間隔、試験燃料棒の濃縮度及び水密度による影響を考慮 した。その結果、無限増倍率は最大でも

 $k_{\infty} + 3\sigma = 0.84$

であり、無限体系の推定下限増倍率 0.98³⁾を下回ることから、設計要求を超える地震及び津波の 重畳を考慮しても、燃料貯蔵庫は臨界安全性を確保できることを確認した。

謝辞

本臨界解析にあたって、安全研究センター燃料安全サイクルディビジョンサイクル安全研究グ ループの山根祐一博士並びに原子炉安全性研究ディビジョン燃料安全研究グループの宇田川豊博 士及び三部昌彦氏には多くの技術的な助言を頂きました。ここに深謝の意を表します。

参考文献

- Nagaya, Y., Okumura, K., Mori, T. and Nakagawa, M., MVP/GMVP Version 2 : General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods, JAERI 1348, 2005, 388p.
- 2) Shibata, K., Iwamoto, O., Nakagawa, T., Iwamoto, N., Ichihara, A., Kunieda, S., Chiba, S., Furutaka, K., Otuka, N., Ohsawa, T., Murata, T., Matsunobu, H. Zukeran, A., Kamada, S. and Katakura, J., JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, J. Nucl. Sci. Technol. vol.48, no.1, 2011, pp.1-30.
- 3) 日本原子力研究所,臨界安全ハンドブック第2版, JAERI 1340, 1999, 189p.

JAEA-Technology 2017-007

濃縮度 *** 是[+]		各段の数量[本]				
[wt%]	<u> </u>	1段	2段	3段	4段	5段
1.2	170	34	34	34	34	34
1.5	136	34	34	34	34	—
2.0	102	34	34	34	—	—
3.0	68	34	34	_	—	—
5.0	42	34	8	—	—	—
6.0	34	34	_	_	_	_
10.2	20	$\overline{20}$	_	_	_	_
20.0	11	11	_	_	_	_

表 3.1 試験燃料棒の濃縮度及び数量の関係

表 3.2 燃料保管箱の原子個数密度組成

	[atoms/b-cm]
核種	組成
$^{54}\mathrm{Fe}$	5.137×10^{-3}
$^{56}\mathrm{Fe}$	7.778×10^{-2}
$^{57}\mathrm{Fe}$	1.766×10^{-3}
$^{58}\mathrm{Fe}$	2.293×10 ⁻⁴

[atoms/b-am]

表 3.3 各濃縮度における試験燃料棒の原子個数密度組成

濃縮度 [wt%]	235U	$^{238}\mathrm{U}$	¹⁶ O
1.2	2.833×10^{-4}	$2.294 imes 10^{-2}$	4.644×10^{-2}
1.5	3.530×10^{-4}	2.287×10^{-2}	4.645×10^{-2}
2.0	4.714×10^{-4}	2.275×10^{-2}	4.645×10^{-2}
3.0	7.061×10^{-4}	2.252×10^{-2}	4.645×10^{-2}
5.0	1.176×10^{-3}	2.206×10^{-2}	4.646×10^{-2}
6.0	1.410×10 ⁻³	2.182×10^{-2}	4.647×10^{-2}
10.2	2.399×10^{-3}	2.085×10^{-2}	4.649×10 ⁻²
20.0	4.701×10 ⁻³	4.654×10^{-2}	4.701×10^{-2}

表 3.4 各水密度の原子個数密度組成

		[atoms/b-cm]
水密度 [kg/m ³]	$^{1}\mathrm{H}$	¹⁶ O
0	0	0
2.00×10^{2}	1.334×10^{-2}	6.672×10^{-3}
4.00×10^{2}	2.669×10^{-2}	1.334×10^{-2}
6.00×10^2	4.003×10^{-2}	2.002×10^{-2}
8.00×10^2	5.338×10^{-2}	2.669×10^{-2}
1.00×10^{3}	6.672×10^{-2}	3.336×10^{-2}

表 4.1 箱間隔及び濃縮度と無限増倍率(k∞+3σ)の関係

箱間隔 [mm] 濃縮度 [wt%]	300	150	30	15	5	0
1.2	0.37	0.39	0.67	0.75	0.80	0.82
1.5	0.37	0.39	0.65	0.74	0.80	0.83
2.0	0.38	0.40	0.64	0.73	0.79	0.82
3.0	0.39	0.40	0.62	0.71	0.77	0.81
5.0	0.40	0.41	0.61	0.69	0.76	0.79
6.0	0.40	0.40	0.60	0.68	0.74	0.78
10.2	0.39	0.40	0.55	0.61	0.67	0.69
20.0	0.36	0.37	0.49	0.54	0.59	0.61



図 2.1 燃料貯蔵庫の平面図



図 2.2 燃料貯蔵棚(A)及び(B)の燃料保管箱の配置





図 3.1 試験燃料用の燃料保管箱の形状









図 4.1 箱間隔及び濃縮度と無限増倍率の関係

図 4.2 水密度と無限増倍率の関係(箱間隔 0mm、濃縮度 1.5wt%)

付録 A 粉末状の試験燃料の臨界解析結果

粉末状の試験燃料の臨界解析結果を以下に示す。

1. 解析条件

1.1 解析対象の試験燃料

燃料貯蔵庫では粉末状の燃料も貯蔵されている。粉末状の燃料はステンレス製の保管容器 に収納された状態で燃料保管箱に貯蔵されている。保管容器は円筒形で、外径 45mm、長さ 311mmの保管容器(大)と外径 25mm、長さ 300mmの保管容器(小)の2種類である。 保管容器の厚さはどちらも 1.5mm である。

本解析では、保管容器(大)及び保管容器(小)に収納されている粉末状の試験燃料を解析対象とした。

1.2 燃料保管箱の解析モデル

燃料保管箱の解析モデルは本文で述べたものと同一とした。

1.3 粉末状の試験燃料及び保管容器の解析モデル

保管容器は、燃料保管箱の長辺と保管容器が平行になるように配置し、保管容器同士は密着するとした。燃料保管箱の試験燃料が入る空間の幅は348mm、高さは50mmであることから、外径45mmの保管容器(大)は6個を1段積みとし、外径25mmの保管容器(小)は1段あたりに13個配置され、最大で2段積むことができるとした。

保管容器(小)は、1段目から順番に、燃料保管箱の中央を軸にして左右対象に配置する。 また、1段目が13個埋まってから、2段目に積まれるとした。

本解析での保管容器の配置では、保管容器(大)は最大で6個、保管容器(小)は最大で 26個(13個×2段)配置可能である。濃縮度9.01wt%の粉末状の燃料が収納された保管容器

(大)が6個あるとすると、燃料保管箱あたりのU-235量は約0.504kgとなる。また、濃縮度7.5wt%の粉末状の燃料が収納された保管容器(小)が26個あるとすると、燃料保管箱あたりのU-235量は約0.504kgとなる。保守的な結果となるように、燃料保管箱あたりのU-235量は0.5kg未満とならないよう濃縮度を設定した。

以上のことから、保管容器(大)は濃縮度 9.01wt%のみ、保管容器(小)は 7.5wt%~20.0wt% の範囲で濃縮度を変化させた。なお、粉末状の試験燃料の二酸化ウラン密度は約 2.5× 10³kg/m³で一定とした。

試験燃料の濃縮度及び保管容器の数量の関係を表 A-1.1 に、配置の例(保管容器(大)(濃縮度: 9.01wt%)及び保管容器(小)(濃縮度: 7.50wt%))を図 A-1.1 及び図 A-1.2 に示す。

本文と同様に、燃料保管箱内部の試験燃料以外の部分は、スペーサーを含めてすべて水と し、体系の境界条件として周期境界条件を指定することで無限体系として解析する。箱間隔 は 0mm(密着状態)とする。モンテカルロ計算の結果については、標準偏差の3倍を加えて 判定する。

		保管容器の数量	各段の数量[個]		
	辰相度[₩170]	[個]	1段	2段	
保管容器 (大)	9.01	6	6	—	
	19.80	10	10	—	
保管容器(小)	9.01	22	13	9	
	7.50	26	13	13	

表 A-1.1 試験燃料の濃縮度及び保管容器の数量の関係



図 A-1.1 保管容器(大)の配置例(濃縮度: 9.01wt%)



図 A-1.2 保管容器(小)の配置例(濃縮度: 7.50wt%)

2. 解析結果

濃縮度と無限増倍率(k_∞+3σ)の関係を表 A-2.1 に示す。

保管容器(大)の無限増倍率は0.75であり、未臨界性は確保される。保管容器(小)は、濃縮 度が7.50wt%で、無限増倍率が最大0.80であり、未臨界性は確保される。

	濃縮度[wt%]	k_{∞} + 3σ
保管容器(大)	9.01	0.75
	19.80	0.69
保管容器(小)	9.01	0.78
	7.50	0.80

表 A-2.1 濃縮度と無限増倍率(k_∞+3σ)の関係

付録 B 燃料保管箱の短辺と試験燃料棒を平行に配置した場合の臨界解析結果

燃料保管箱の短辺と試験燃料棒が平行になるように配置した場合の臨界解析結果を以下に示す。

1.解析条件

- 1.1 解析対象の試験燃料棒 試験燃料の解析モデルは本文で述べたものと同一とした。
- 1.2 燃料保管箱の解析モデル

燃料保管箱の解析モデルは本文で述べたものと同一とした。

1.3 試験燃料棒の解析モデル

試験燃料棒は、燃料保管箱の短辺と試験燃料棒が平行になるように配置し、試験燃料棒同 士は密着するとした。燃料保管箱の試験燃料が入る空間の長さは 798mm、高さは 50mm で あることから、直径 10mm の試験燃料棒は 1 段あたりに 78 本配置され、最大で 5 段積むこ とができるとした。

試験燃料棒は、1 段目から順番に、燃料保管箱の中央を軸にして左右対象に配置する。また、下段が 78 本埋まってから、次の段に積まれるとした。

本解析での試験燃料棒の配置では、試験燃料棒を最大で 390 本(78 本×5 段) 配置可能で ある。濃縮度 0.53wt%の試験燃料棒が 390 本あるとすると、燃料保管箱あたりの U-235 量 は約 0.507kg となる。保守的な結果となるように、燃料保管箱あたりの U-235 量は 0.5kg 未 満とならないよう濃縮度を設定した。

以上のことから、濃縮度の変化の範囲は、試験燃料棒の配置を考慮し 0.53wt%~2.62wt% とした。試験燃料棒の濃縮度及び数量の関係を表 B-1.1 に、配置の例(濃縮度: 0.66wt%) を図 B-1.1 に示す。

本文と同様に、燃料保管箱内部の試験燃料以外の部分は、スペーサーを含めてすべて水と し、体系の境界条件として周期境界条件を指定することで無限体系として解析する。箱間隔 は 0mm(密着状態)とする。モンテカルロ計算の結果については、標準偏差の 3 倍を加えて 判定する。

濃縮度	数量							
[wt%]	[本]	1段	2段	3段	4段	5段		
0.53	390	78	78	78	78	78		
0.66	312	78	78	78	78	—		
0.88	234	78	78	78	_	_		
1.31	156	78	78	_	—	_		
2.62	78	78	_	_	_	_		

表 B-1.1 試験燃料棒の濃縮度及び数量の関係



図 B-1.1 試験燃料棒の配置例(濃縮度: 0.66wt%)

2.解析結果

濃縮度と無限増倍率(k∞+3o)の関係を表 B-2.1 に示す。濃縮度が 0.88wt%近傍で、無限増倍率が最大 0.68 であり、未臨界性は確保される。

濃縮度 [wt%]	k∞+3σ
0.53	0.67
0.66	0.68
0.88	0.68
1.31	0.68
2.62	0.67

表 B-2.1 濃縮度と無限増倍率(k_∞+3σ)の関係

付録 C 試験燃料棒を稠密配置とした場合の臨界解析結果

試験燃料棒を稠密配置とした場合の臨界解析結果を以下に示す。

1. 解析条件

- 1.1 解析対象の試験燃料棒 燃料保管棒の解析モデルは本文で述べたものと同一とした。
- 1.2 燃料保管箱の解析モデル

燃料保管箱の解析モデルは本文で述べたものと同一とした。

1.3 試験燃料棒の解析モデル

試験燃料棒は、燃料保管箱の長辺と試験燃料棒が平行になるように配置し、試験燃料棒同 士は密着するとした。稠密配置とするため、奇数段は最大で34本、偶数段は最大で33本配 列されるとした。

試験燃料棒は、1段目から順番に、燃料保管箱の中央を軸にして左右対象に配置する。また、下段がすべて埋まってから、次の段に積まれるとした。

本解析での試験燃料棒の配置では、試験燃料棒を最大で 168 本(5 段) 配置可能である。 濃縮度 1.22wt%の試験燃料棒が 168 本あるとすると、燃料保管箱あたりの U-235 量は約 0.503kg となる。保守的な結果となるように、燃料保管箱あたりの U-235 量は 0.5kg 未満と ならないよう濃縮度を設定した。

以上のことから、濃縮度の変化の範囲は、試験燃料棒の配置を考慮し、1.22wt%~5.00wt% とした。試験燃料棒の濃縮度及び数量の関係を表 C-1.1 に、配置の例(濃縮度: 5.0wt%)を 図 C-1.1 に示す。

本文と同様に、燃料保管箱内部の試験燃料以外の部分は、スペーサーを含めてすべて水と し、体系の境界条件として周期境界条件を指定することで無限体系として解析する。箱間隔 は 0mm(密着状態)とする。モンテカルロ計算の結果については、標準偏差の 3 倍を加えて 判定する。

濃縮度	数量							
[wt%]	[本]	1段	2段	3段	4段	5段		
1.22	168	34	33	34	33	34		
1.53	134	34	33	34	33	—		
2.02	101	34	33	34	—	—		
3.05	67	34	33	_	—	—		
5.00	42	34	_	_		_		

表 C-1.1 試験燃料棒の濃縮度及び数量の関係



図 C-1.1 試験燃料棒の配置例(濃縮度: 3.05wt%)

2. 解析結果

濃縮度と無限増倍率(k∞+3o)の関係を表 C-2.1 に示す。濃縮度が 1.53wt%近傍で、無限増倍率が最大 0.80 であり、未臨界性は確保される。

濃縮度 [wt%]	k∞+3σ
1.22	0.80
1.53	0.80
2.02	0.80
3.05	0.79
5.00	0.78

表 C-2.1 濃縮度と無限増倍率(k_∞+3σ)の関係

_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本ì	単位			
本平里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単	位の例
AI 立 是 SI 組 立 単位	
名称	記号
面 積 平方メートル	m ²
体 積 立方メートル	m ³
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2
波 数 毎メートル	m ⁻¹
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1
比 透 磁 率 ^(b) (数字の) 1	1
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では	t物質濃度

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

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 旭立車位				
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方	
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2	
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹	
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²	
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$	
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$	
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³	
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$	
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	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{-2} A^{-1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd	
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	
吸収線量,比エネルギー分与, 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	

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²	
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$	
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A	
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A	
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A	
誘 電 辛	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A	
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$	

表 5. SI 接頭語					
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60 s			
時	h	1 h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(π/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad			
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1 t=10^3 kg$			

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの						
名称 記			記号	SI 単位で表される数値		
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J		
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg		
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da		
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m		

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な間径は
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値				
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J				
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s				
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$				
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$				
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx				
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²				
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T				
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹				
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≦ 」						

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例							
名称				記号	SI 単位で表される数値		
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq	
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ				k	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy	
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv	
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$	
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m	
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg	
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa	
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa	
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J	
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)	
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$	