

Oral presentation | III. Fission Energy Engineering : 301-1 Reactor Physics, Utilization of Nuclear Data, Criticality Safety

📅 Thu. Sep 12, 2024 2:45 PM - 3:35 PM JST | Thu. Sep 12, 2024 5:45 AM - 6:35 AM UTC 🏢 Room D(Recture RoomsA 1F A106)

[2D10-12] Experiment Analysis 2

Chair: Rei Kimura (TOSHIBA ESS)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[2D10]

Neutronic Analysis of the Burnability of Geo-Reactor in the Proto-Earth Period

*Yuma Okawa¹, Naoyuki Takaki¹ (1. Tokyo City Univ.)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[2D11]

Study on distortion of power distribution using Gelbard's problem

*Keita Yoshikawa¹, Go Chiba¹, Kosuke Tsujita², Shuhei Miwa² (1. Hokkaido University, 2. Nuclear Engineering, Ltd)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[2D12]

Kinetics analysis based on reactivity change mechanism obtained by Monte Carlo and CFD calculation for Windscale Works criticality accident

*Kodai Fukuda¹ (1. JAEA)

3:30 PM - 3:35 PM JST | 6:30 AM - 6:35 AM UTC

Time reserved for Chair

原始地球における Geo-Reactor の燃焼可能性に関する中性子工学的解析

Neutronic Analysis of the Burnability of Geo-Reactor in the Proto-Earth Period

*大川 友悠馬¹, 高木 直行¹

¹ 東京都市大学

本研究では、惑星分化直後の 45 億年前に下部マントル最下部の D'層で核分裂連鎖反応が生じ、地球原子炉 Geo-Reactor が成立した可能性を臨界解析により調べると共に、燃焼計算によって臨界の持続性を検討する。

キーワード：ジオリアクター、原始地球、MVP、臨界性、燃焼

1. 緒言

地球深部で生じる天然原子炉 Geo-Reactor は 1993 年に J.M. Herndon により提案された^[1]。このモデルでは重力によってコアの中心に重元素が集まると仮定している。対して、これは殆どの地球科学モデルと矛盾し、さらに R.J. Meijer は Geo-Reactor がコア-マントル境界(CMB)に形成される可能性を指摘した^[2]。近年では、U が下部マントルの主要鉱物であるペロプスカイトと非相溶性であること^[3]、Al に富む Ca ペロプスカイト(Al-CaPv)が最大で 35 wt%の UO₂ を含有できることが実験で示された^[4]。これらは、原始地球の D'層で U-235 同位体比の高い U が Al-CaPv に選択的に濃縮され、Geo-Reactor を形成する可能性を示唆する。しかし、U を含んだ領域の臨界性は、M. Ravník らによってコアやマントルの平均的な物質でしか検討されてこなかった^[5]。そこで本研究では最新の高温高压科学に基づいて、Al-CaPv と U,Th の混合相(U,Th)-Al-CaPv の臨界・燃焼解析を行い、D'層で Geo-Reactor が長期間燃焼した可能性を検討した。

2. 解析手法

分化終了は地球誕生から 0.5 億年以内とし、U-235 同位体比は 45 億年前時点の 23.287%とした。D'層の高温高压条件における不明な鉱物相は、54 GPa での MAP 実験の結果^[4]から変化せず、(U,Th)-Al-CaPv であると仮定した。実験で用いられた初期の混合相と、圧縮後に变化した鉱物相の両方を満たすモル濃度を化学量論的に設定した。U と同様の特性で Al-CaPv に取り込まれる Th の割合も考慮した。密度は常圧から 25%圧縮を受けると仮定した。(U,Th)-Al-CaPv 中の UO₂+ThO₂割合と、UO₂+ThO₂に占める ThO₂の割合(Th 率)をパラメータとし解析した。数値解析には輸送計算コード MVP^[6]を、核データには JENDL-4^[7]を用いた。また、無限体系を用いて体系のサイズを無視した。

3. 結果と考察

Th 率 0%では 16 wt%以上の UO₂割合で臨界となり、Al-CaPv の UO₂含有限界である 35 wt%では、Th 率 23%以下が臨界条件である(図 1)。また現在の地球の発熱量から、原始地球 D'層の総熱出力を 200TW と仮定し算出した出力密度 1 mW/kg では、7000 万年間燃焼が可能である(図 2)。U-235 の中性子捕獲でできる U-236 が崩壊して Th-232 が生成され臨界性は低下する。Pu-239 は生成後すぐ燃焼・崩壊し平衡に達している。

4. 結論

Th の含有をほとんど許さない条件に限り、原始地球の D'層で Geo-Reactor が成立することを示した。燃焼計算では、長期間に渡って臨界が持続できることを導いた。

参考文献

[1] J. Marvin Herndon, 1993, "Feasibility of a Nuclear Fission Reactor at the Center of the Earth as the Energy Source for the Geomagnetic Field", Journal of geomagnetism and geoelectricity, Volume 45, Issue 5, p. 423-437.
[2] R.J. Meijer, 2008, "The feasibility and implications of nuclear georeactors in Earth's core-mantle boundary region", South African Journal of Science, Volume 104, p. 111-118.
[3] Elise Knittle, 1998, "The Solid/Liquid Partitioning of Major and Radiogenic Elements at Lower Mantle Pressures: Implications for the Core-Mantle Boundary Region", Geodynamics Series, The Core - Mantle Boundary Region, Volume 28, p. 119-130.
[4] Steeve Gréaux, et al., 2009, "Experimental high pressure and high temperature study of the incorporation of uranium in Al-rich CaSiO₃ perovskite", Physics of the Earth and Planetary Interiors, Volume 174, Issue 1-4, p. 254-263.
[5] M. Ravník and R. Jeraj, 2005, "Criticality analyses of regions containing uranium in the Earth history." Kerntechnik 70, p. 146-152
[6] Y. Nagaya, K. Okumura, T. Sakurai, T. Mori, 2017, "MVP/GMVP Version 3: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations Based on Continuous Energy and Multigroup Methods" JAEA-Data/Code 2016-018.
[7] K. Shibata, et al., 2011, "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering", Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 48(1), p. 1-30.

^{*}Yuma Okawa¹, Naoyuki Takaki¹

¹Tokyo City Univ.

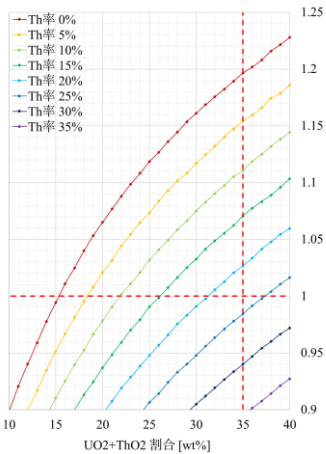
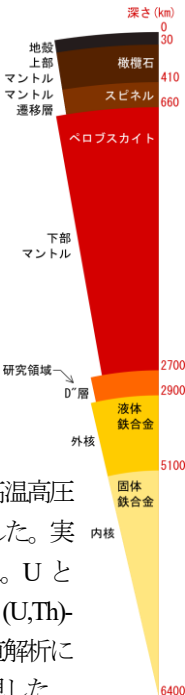


図1 UO₂+ThO₂割合と無限増倍率の関係 (Th 率0~35%, 温度3000 K)

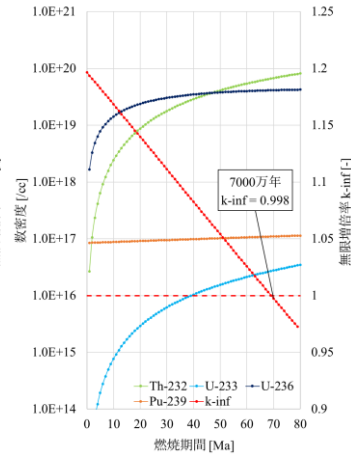


図2 燃焼期間と数密度および無限増倍率の関係 (Th 率0% 出力密度1 mW/kg 温度3000 K)

Gelbard の問題を用いた出力分布の歪みに関する検討

Study on distortion of power distribution using Gelbard's problem

*吉川 敬太¹, 千葉 豪¹, 辻田 浩介², 三輪 周平²

¹北大, ²原子力エンジ

Gelbard の問題を基に、より実際の軽水炉に近い炉心体系を構築し、1 次元炉心と 2 次元炉心において出力チルトが発生する条件を考察することで、軽水炉実機で見られる出力チルトの発生メカニズムについて検討を行った。

キーワード：軽水炉、出力チルト、Gelbard の問題

1. 背景・目的 軽水炉を運転する際には、炉心水平方向の出力チルト（歪み）が一定の範囲内に収まるように制御が行われている。出力チルトの発生要因は様々なものが考えられており、本研究はその発生メカニズムについて、Gelbard の問題[1]を用いて検討することを目的とする。Gelbard の問題は、燃料、吸収材、減速材からなる非対称な単位セルが複数配置された特殊な炉心において、出力分布に大きなチルトが発生するというものである。本研究では Gelbard の問題を基に、より実際の原子炉に近い炉心体系を構築し、一次元炉心と二次元炉心において出力チルトが発生する条件について考察し、軽水炉実機で見られる出力チルトの発生メカニズムについて検討を行った。

2. 一次元平板体系における検討 全長 1.0cm の単位セルを想定し、この単位セルを 40 個並べた炉心を設定した。単位セルの構造は、中心に燃料を、その左右両側に同一長さの減速材を配置したものとし、燃料領域右側の減速材の一部における高速中性子吸収断面積 Σ_f と熱中性子吸収断面積 Σ_t を変化させ、発生する出力チルトの大きさについて評価した。出力チルトの大きさは、炉心中心より左半分の出力の合計値を P1、右半分の出力の合計値を P2 としたときの $(P1-P2)/(P1+P2)$ として定義した出力分布のオフセット(PO)を用いて定量的に評価した。図 1 に、 Σ_f 、 Σ_t 、PO の関係を示す。 Σ_f が 10[1/cm]であるとき、 Σ_t が増加してある値を超えたときに PO の

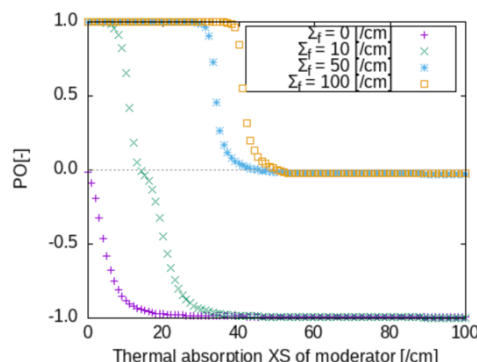


図 1:一次元平板体系での Σ_f 、 Σ_t 、PO の関係

符号が反転した。これは、単位セル内における Σ_f の偏りが大きい場合には、燃料領域から減速材領域に移動する高速中性子の量が減少し、 Σ_t の偏りが大きい場合には、減速材領域から燃料領域に移動する熱中性子の量が減少することで、燃料領域に移動する熱中性子の量が燃料領域左側境界と右側境界とで不均等になるためであると考えられる。

3. 二次元体系における検討 一次元体系での検討結果を基に、0.2cm 四方の領域を 5×5 に配置した単位セルを 40×40 個並べた炉心を設定した。単位セルの構造は、5×5 領域の中心の 1 領域に燃料を、それ以外の領域に減速材を配置したものとし、そのうち一部の減速材における Σ_t を変化させるものとした。それぞれの単位セル構造、 Σ_t における PO を算出し、発生する出力チルトの大きさについて評価した。図 2 に、ある体系における熱中性子束分布を示すが、体系内で熱中性子束分布に偏りが発生していることが分かる。さらに、出力チルトは一次元平板体系同様、 Σ_t の増加に伴って大きくなった。以上の結果より、二次元体系においても、中性子吸収断面積が単位セル内で偏ることにより出力チルトが発生する可能性があると考えられる。

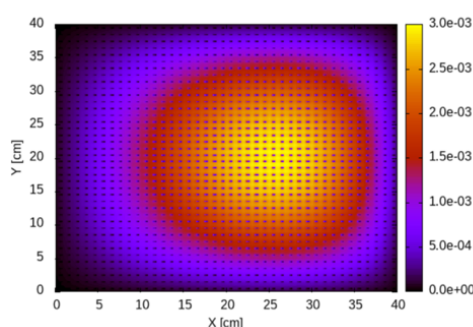


図 2:二次元炉心体系での熱中性子束分布の例

参考文献 [1] Ely M. Gelbard, Richard Lell, NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING: 63, 9-23 (1977)

*Keita Yoshikawa¹, Go Chiba¹, Kosuke Tsujita², Shuhei Miwa²

¹Hokkaido Univ., ²NEL

CFD-MC 計算結果に基づく反応度変化傾向を考慮した
Windscale Works 臨界事故を対象とする動特性解析

Kinetics analysis based on reactivity change mechanism obtained by Monte Carlo and CFD calculation for
Windscale Works criticality accident

*福田 航大
JAEA

Windscale Works 臨界事故における臨界シナリオを明らかにすることを目的として、混相流 CFD 計算、モンテカルロ中性子輸送計算、一点炉動特性計算を順に実施した。その結果、過去に報告されている核分裂数と一致する条件が存在することが示され、臨界シナリオ特定に重要な知見が得られた。

キーワード：臨界事故解析, CFD 計算, モンテカルロ計算, 動特性解析, マルチフィジックス

1. 緒言

過去に起きた臨界事故のシナリオ（反応度変化の機構や生じた核分裂数）を特定することは核燃料プロセス施設の臨界安全性向上のために重要である。Windscale Works 臨界事故（英国、1970 年）は、プルトニウム濃度や密度が異なる水溶液と有機溶媒が混合したことで発生した^[1]。先行研究^{[2][3]}によって臨界シナリオ特定に資する知見が着実に蓄積されてはいるものの、流体力学的な不確かさの大きさが障壁となり、正確な臨界シナリオの特定には至っていない。本研究では、多相 CFD 計算やモンテカルロ中性子輸送計算を活用し、当事故の臨界シナリオ、特に反応度変化の機構を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

公開文献の記述に基づき、事故当時の状況を可能な限り模擬する CFD 計算を、VOF 法に基づく多相ソルバ `multiphaseInterFoam` (OpenFOAM) を用いて実施した。乱流モデルには LES、k 方程式モデルを用いた。体系は 5 度の 3 次元楔形であり、メッシュ依存性解析に基づきメッシュ数は 2,470,500 とした。次に、CFD 計算で得られる時間・空間依存の物質分布（有機溶媒、水溶液、空気の体積存在比分布）を用いたモンテカルロ中性子輸送計算を `Serpent2` にて実施した。断面積ライブラリには JENDL5 を用いたが、計算メモリの制限から TSL は考慮されていない。得られた反応度変化の傾向を溶液系臨界事故解析コード AGNES2 の入力とし、一点炉動特性計算を実施して核分裂数を求めた。

3. 結果

図 1 に CFD 計算で得られた物質分布の例を示す。白色が有機溶媒、青色が水溶液、赤色が空気に概ね相当する。水溶液流入前にはそれぞれが分離しているが、流入中には複雑な物質分布となっている。

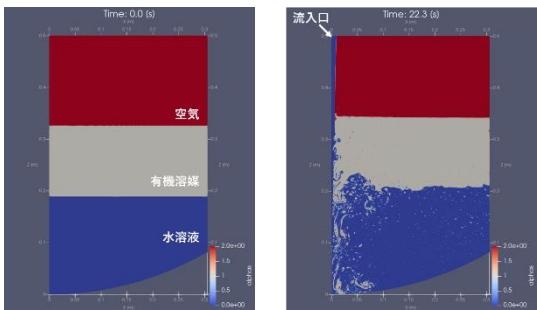


図 1 有機溶媒・水溶液・空気の分布
(左：水溶液流入前、右：流入中)

続いて、図 2 には実効増倍率が臨界近傍にて約 1.6 秒の周期で波状に変化（振動）している様子を示している。これは流体の周期的な空間分布変化に起因している。この結果を基に、反応度が正弦関数的に変化すると仮定して実施した動特性計算の結果得られた核分裂数を図 3 に示す。ここでは最大過剰反応度、反応度が印加される周期数をパラメータとしている。過去のレポート^[1]では当事故で約 10^{15} の核分裂数が生じたとされているが、図 3 より核分裂数がその程度となっている条件が存在することが示されている。以上より、Windscale Works 臨界事故が流体の分布変化に起因する波状の反応度変化に支配された可能性があることが示唆され、臨界シナリオの特定に重要な知見が得られた。

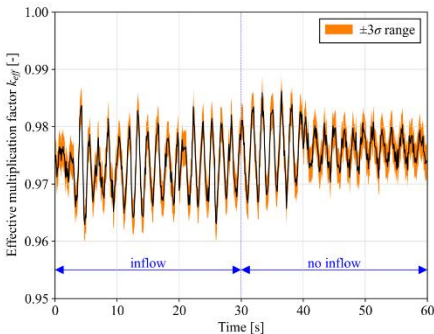


図 2 実効増倍率の時間変化

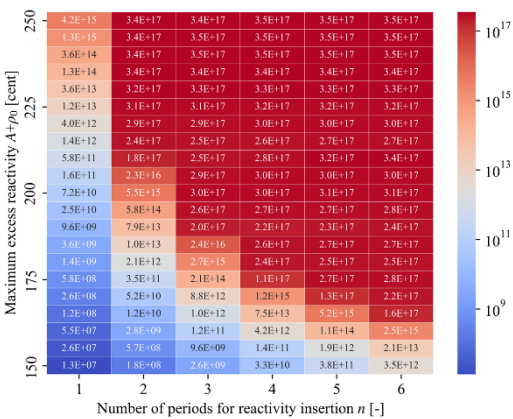


図 3 波状反応度変化時の核分裂数

参考文献

[1] T. P. McLaughlin et al., LA-13638 (2000). [2] E. Sayce et al., ICNC2023 (2023).
[3] J. T. Daniels et al., *Prog. Nucl. Energy*, 169, 105046 (2024).

*Kodai Fukuda

Nuclear Safety Research Center, Japan Atomic Energy Agency