



令和4年度
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門
合同研究成果報告会

Windscale Works 臨界事故に関する検討解析

— 事象進展による反応度変化 —

令和4年 11月 22日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門 安全研究センター
臨界安全研究グループ

福田 航大

“臨界事故 (Criticality Accident)”とは

- 核分裂性物質が意図せずに臨界状態 ($k_{\text{eff}} \geq 1$) となる事故
- 再処理施設で想定すべき“重大事故”の1つとして位置付けられる*1
- 事故防止の対策 (e.g. 形状管理、濃度管理等)はもちろん、
事故発生時の備え (e.g. 未臨界への移行設備、影響評価等) も重要
→ 過去の臨界事故解析が重要な役割を果たす

*1 “使用済燃料の再処理の事業に関する規則”

“過去の臨界事故解析”の重要性

- 事故の臨界超過条件、反応度フィードバックの機構、その他重要なパラメーター等の知見を得ることができる可能性
得られた知見を...

- 技術資料*2、安全規制への反映*3
→ 核燃料施設の安全性向上
- 臨界事故の影響評価に備えた手法の整備
→ 臨界事故発生時の正確な影響評価

*2 “臨界安全ハンドブック”等

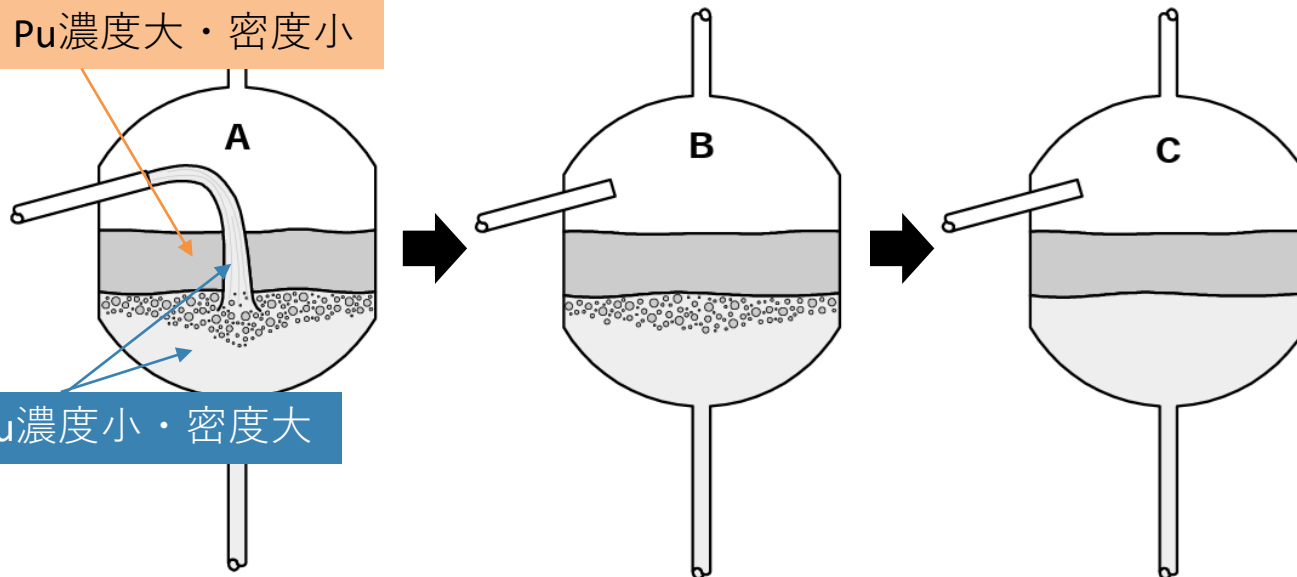
*3 “再処理施設の技術基準に関する規則”等

Windscale Works 臨界事故の特徴 [1]

- 過去の臨界事故の中でも**唯一の有機溶媒-水溶液系**の事例
- 1970年に英国Windscale WorksのPu回収工場で発生
- 負傷者等は無し、数秒間に約 10^{15} 回核分裂が起きたと推定
(参考：JCOでは20時間に 2.5×10^{18} 回核分裂が発生)
- Pu抽出工程の移送容器で臨界となったとみられている

有機溶媒：Pu濃度大・密度小

水溶液：Pu濃度小・密度大



事故後モックアップ実験によって視認された事象進展の様子[1]

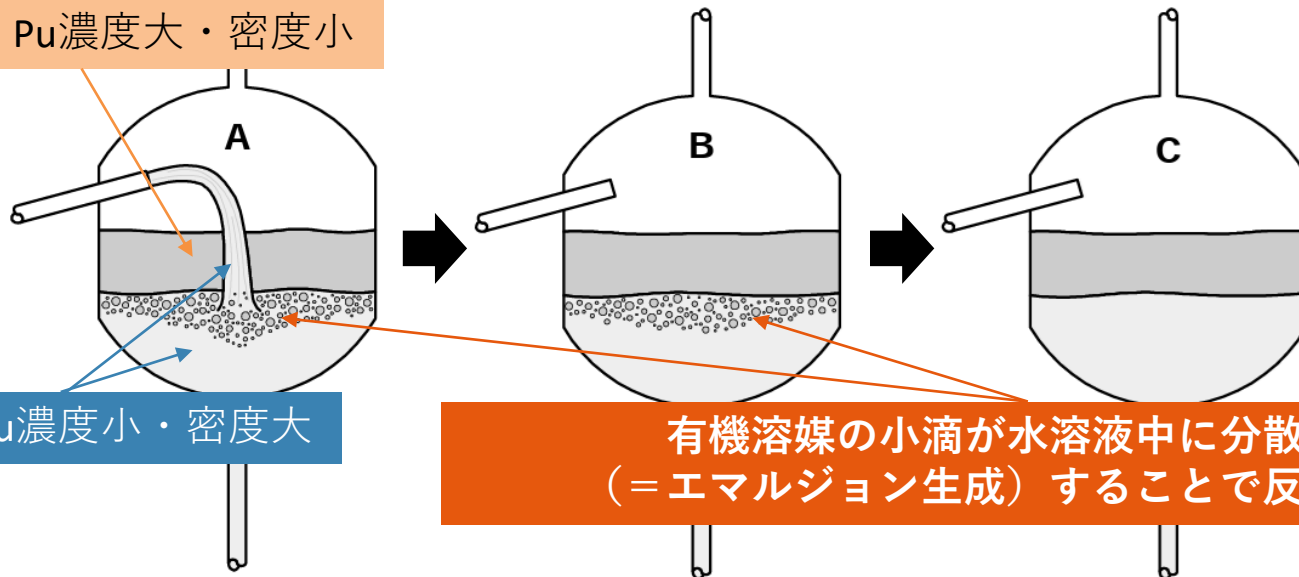
- 事故当時、透明容器モックアップ試験での視認+モンテカルロ中性子輸送計算によって反応度変化の要因が検討された

しかし...

- 事故の分析を詳細に行うために必要な”動特性解析“は未実施
 - ✓ 動特性解析： 反応度変化による核分裂の発生やフィードバックを考慮し、出力・燃料温度の時間的变化や総核分裂数等を求める解析

有機溶媒：Pu濃度大・密度小

水溶液：Pu濃度小・密度大



有機溶媒の小滴が水溶液中に分散配置
(=エマルジョン生成) することで反応度大?

事故後モックアップ実験によって視認された事象進展の様子^[1]

- この事故について“動特性解析”を行う場合、**溶液の流動によって** 変化する反応度を追うことができる**マルチフィジックス解析**が求められる
 - ✓ 解析手法・コンピューター能力の制限から事故当時に行われなかった
 - ✓ 近年、現実的な所要時間での実施が可能になりつつある [2][3]

国際的な場でも注目されており...

- OECD/NEAのWPNCS*4 SG-4は2019年の会合においてWindscale Works 臨界事故の解析実施を参加者/参加国間で検討 [4]

*4 Working Party on Nuclear Criticality Safety: 原子力科学委員会臨界安全性ワーキングパーティー

しかし...

- Windscale Works臨界事故を対象とした上記のような解析は**行われていない**



本検討の目的：動特性解析の前段階として、
溶液の流動をマルチフィジックス解析によって詳細に考慮したうえで、
過去に報告されているエマルジョン生成や反応度の増加傾向を確認する

[2] C.C. Pain, et al. “Transient Analysis and Dosimetry of the Tokaimura Criticality Incident”. Nucl. Technol. 144:1, 16-33 (2003)

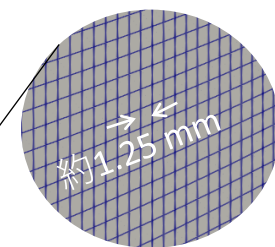
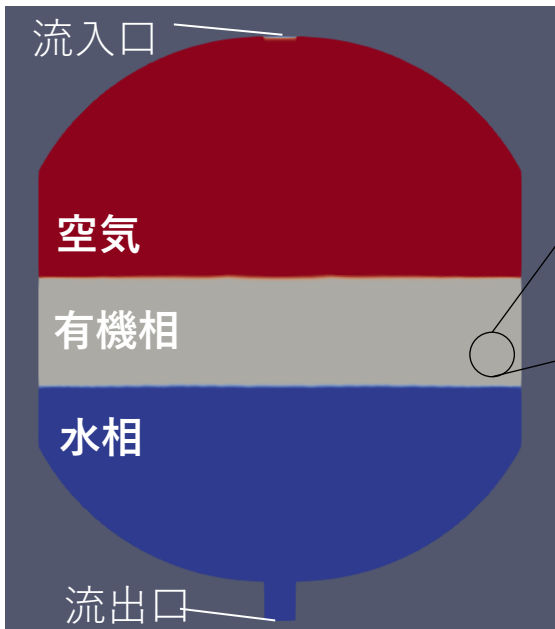
[3] M. Aufiero, et al. “Serpent-OpenFOAM coupling in transient mode: simulation of a Godiva prompt critical burst”. M&C 2015. Tennessee, America (2015)

[4] S. Tsuda, et al. “Status of the NEA international activities on nuclear criticality safety”. ICNC 2019. Paris, France (2019)

2. 解析方法・条件 (1/2)

CFD計算: OpenFOAM [5]

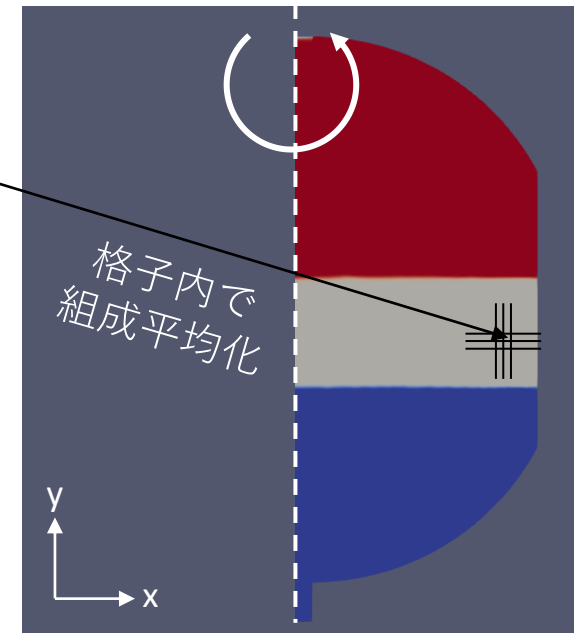
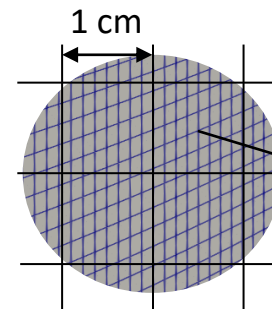
- Windscale Worksの移送容器を模擬
- 1.25 mm × 1.25 mmベースのセルで構成される2次元体系 (計算コストの観点から3次元体系は断念)
- 既存の混相流ソルバを使用



OpenFOAM出力から
MVP入力を生成するプログラム

連続エネルギーモンテカルロ 中性子輸送計算: MVP3.0 [6]

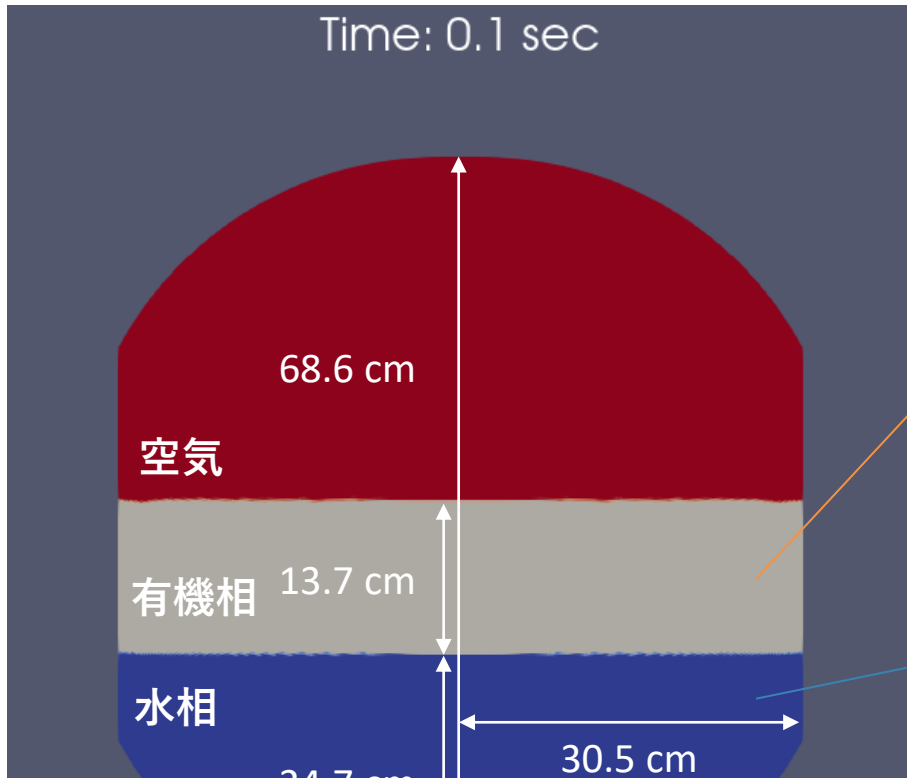
- 1 cm × 1 cmの格子を設定 ($x \geq 0$)
- 格子内に中心が存在するセルについて各相の存在比 (CDF計算結果) を格子内で平均化 → 格子の組成決定
- y軸を中心に回転し3次元体系へ



[5] OpenCFD Ltd. "OpenFOAM v2006". (2020)

[6] Nagaya, et al. "MVP/GMVP Version 3 : General Purpose Monte Carlo Codes". JAEA-Data/Code 2016-019 (2016)

2. 解析方法・条件 (2/2)



- TBP20%-ケロシン
- Pu濃度 55g Pu/L
- 比重 0.96
- 約40 L

[1][7]

- 7M 硝酸水溶液
- Pu濃度 6 Pu/L
- 比重 1.3
- 約50 L

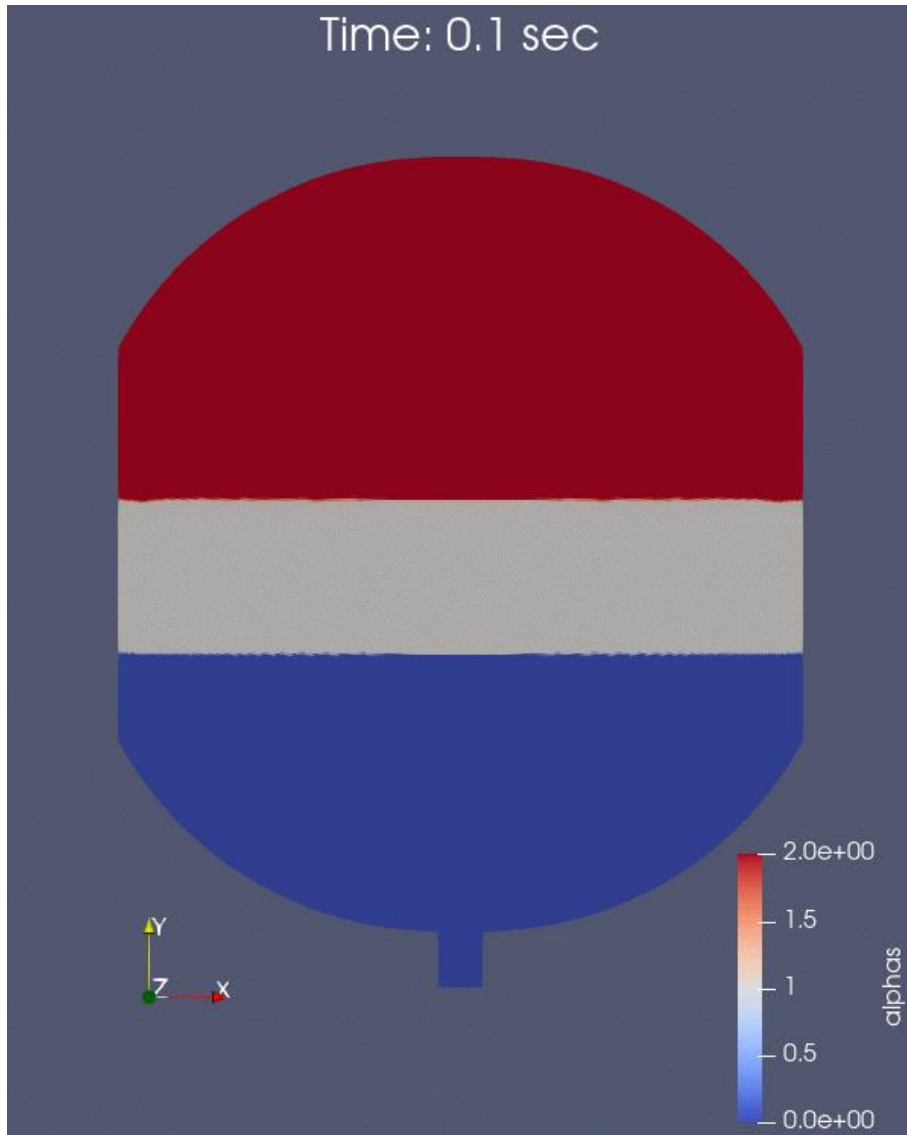
任意に定めた条件（文献情報が無いため）

- 流入口・流出口の位置と大きさ
- 各流体の粘度、流体間の表面張力
- Pu同位体組成比（BWR使用済み燃料, 燃焼度：13000MWdt [8]）

[7] J. T. Daniels, et al. "CRITICALITY INCIDENT: AUGUST 24, 1970, WINDSCALE WORKS.," Trans. Am. Nucl. Soc. 14 1, 35 (1971)

[8] H.H. Van Tuyt, Calculation of Gamma Dose Rates at Surface of Plutonium Oxide Sources, BNWL-1259 (1970)

3. 解析結果 (1/2)



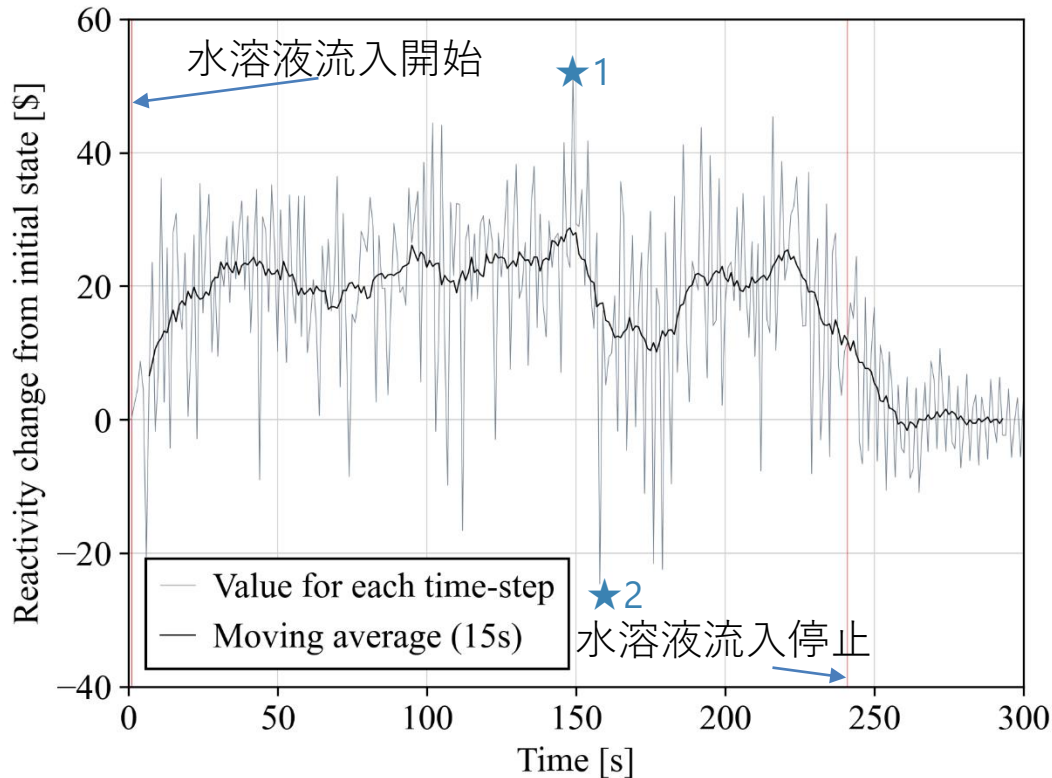
- 0 ~ 300 秒をCFD計算
- 参考: 16並列で80h程度所要
- 水溶液流入は1 ~ 241 秒の4分間 [1]
- 左図では0 ~ 30 秒を表示

- 有機溶媒・水溶液・空気が複雑に混合する様子を観察可能
- エマルジョンの生成を確認
(水溶液小滴 in 有機溶媒、
有機溶媒小滴 in 水溶液の両方)

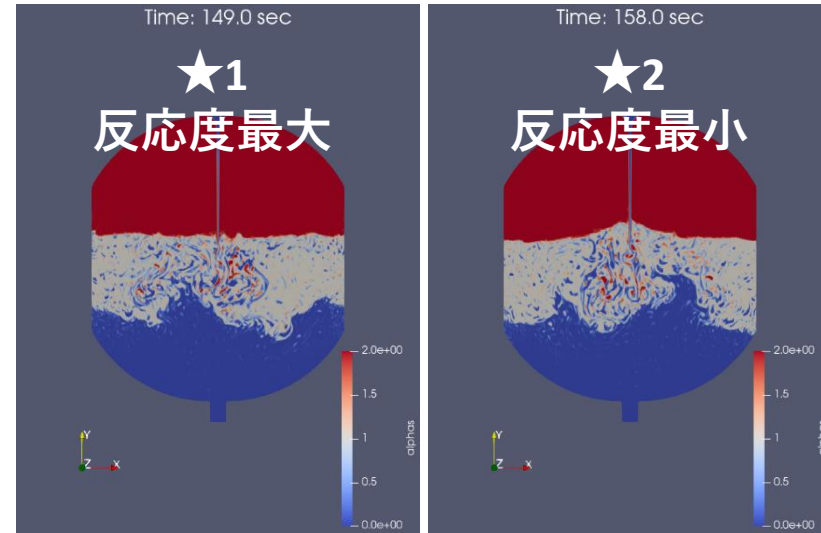
CFD計算結果 (GIF)

3. 解析結果 (2/2)

- 0 ~ 300 秒を1秒毎にモンテカルロ計算
- 参考: 16並列で50h程度所要



水溶液流入による初期状態からの反応度変化



左図★時点での溶液の様子

- 水溶液・有機溶媒の混合により反応度増加
- 液面形状による中性子の漏れ量の反応度への影響が大？



水溶液の流入による反応度の増加傾向を確認

まとめ

- Windscale Works 臨界事故を対象に
CFD計算 + 連続エネルギーモンテカルロ中性子輸送計算を実施
- 溶液の詳細な流動を考慮したうえで反応度の経時変化を確認
- 過去に報告されている内容と整合する
エマルジョン生成の様子及び反応度の増加傾向を確認

今後の展開

- 計算の妥当性検討
 - ✓ 任意に定めた条件（e.g. 流体の粘度、計算解像度等）が流動の様子やその結果としての反応度の経時変化に与える影響の解明
- 動特性解析への展開
- 安全上重要な知見が明らかとなれば臨界安全ハンドブック等へ反映
- CFD + モンテカルロ結合スキームの他事故への応用、汎用化