

令和7年度JAEA-NRA安全研究成果報告会

燃料デブリ取出し作業時の 安全性に関する影響評価手法の整備 ーデブリがもたらす「もしも」を見積もるー

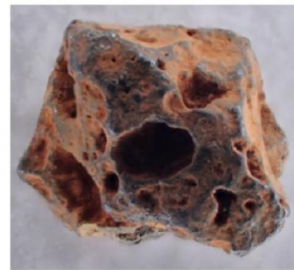
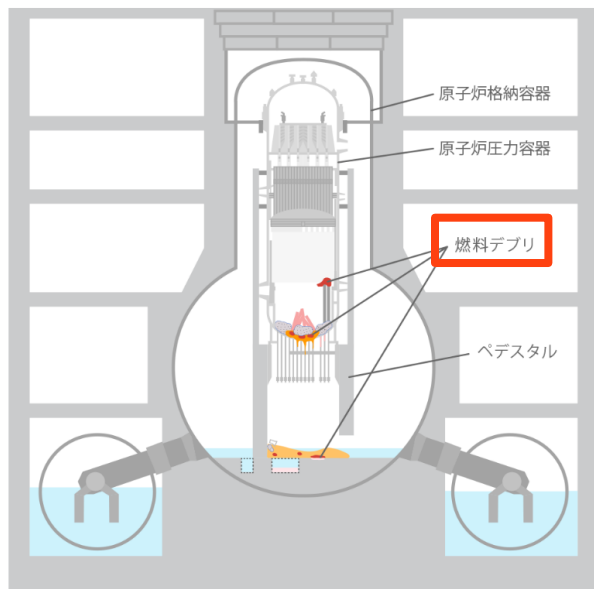
令和7年11月13日

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

福田 航大

「燃料デブリ」とは？

- 原子炉の冷却機能が失われ、核燃料や構造物が溶けた後に、**冷えて固まったもの**。
- 福島第一原子力発電所（以下、1F）事故で生じたデブリは約880トンと推定。
- デブリの**取出しは1F廃炉の中で重要なマイルストーン**。

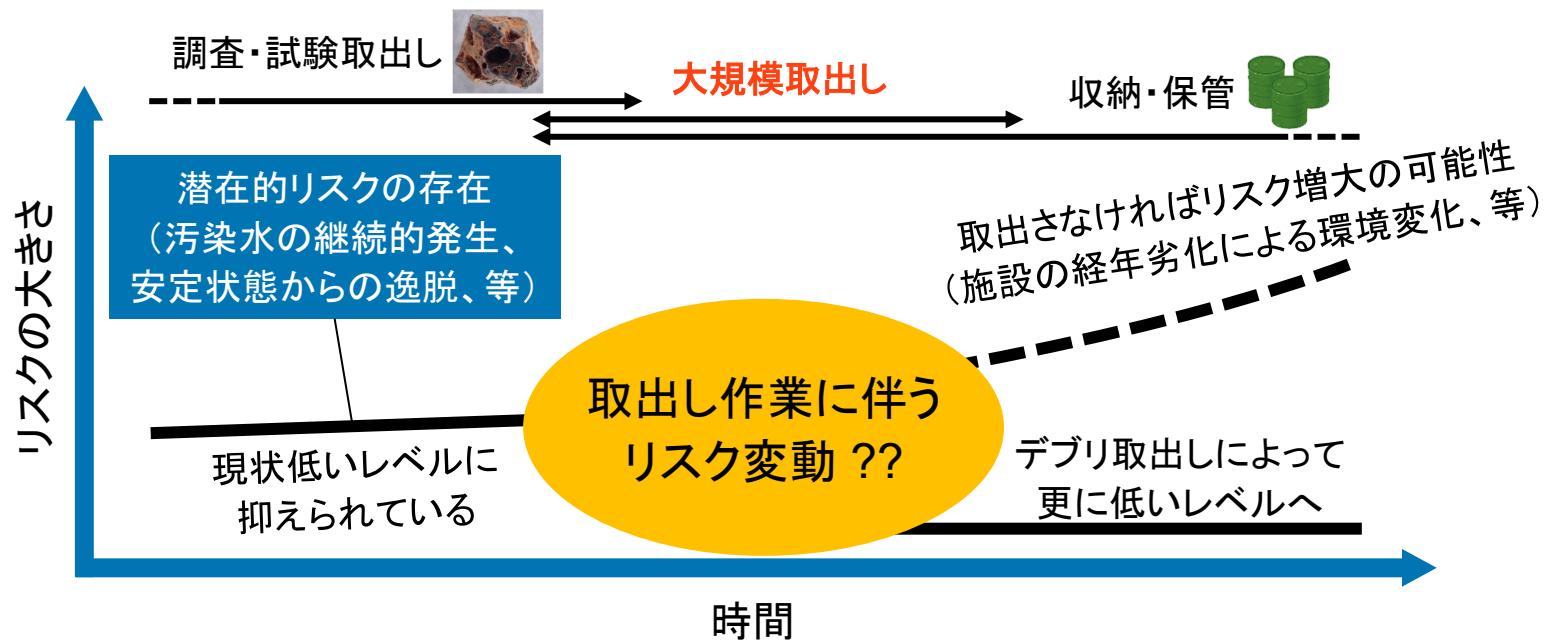


TEPCO HPより

1Fデブリに関する主なできごと

- | | |
|---------|-------------|
| 2011年 | 1F事故 |
| 2019年 | 接触調査 |
| 2024年 | 試験的取出し(1回目) |
| 2025年 | 試験的取出し(2回目) |
| 2037年以降 | 大規模取り出し開始 |

「デブリ取出し」の重要性



1Fデブリに潜むリスクの変動のイメージ

- デブリ取出しによって、デブリが持つ様々な潜在的リスクを低減し、**長期的な安全性を確保**できる見込み。
 - ただし、**デブリ取出し作業自体にもリスク**が存在。
→ 重要な課題として位置づけられている
- 「臨界」**という事象による被ばくリスクが本検討の対象。

「臨界」とは？

- 核分裂連鎖反応が一定の割合で続く状態。 $k = 1$ の状態。
- 核燃料の組成・配置や、減速材(例:水)・中性子吸収剤(例:制御棒)の存在等が k に影響。

$$\text{中性子増倍率 } k = \frac{\text{単位時間当たりの中性子生成数}}{\text{単位時間当たりの中性子消滅数}}$$

$k = 1$ 臨界状態

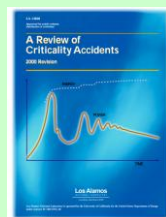
$k > 1$ 臨界超過状態(超臨界)

$k < 1$ 未臨界状態

意図的な $k = 1$
原子力発電



意図しない $k \geq 1$
臨界事故



- 1Fデブリによる臨界・臨界超過の可能性は小さいがゼロではない
- 「臨界を防ぐための評価・対策」
「万が一起きた時の影響評価・対策」
の両方が重要(影響=被ばく線量)

「デブリ臨界」を多重防護の考え方に照らすと...

臨界に至らせない

**臨界になっても
被害を最小限にする**

手段・対策の例

デブリの特性把握
廃炉環境整備
適切な工法・作業
臨界モニタリング

安全研究によるアプローチの例

「STACY(*)」による臨界実験

- デブリの核的特性解明
- 未臨界度測定手法開発

(*) ポスター展示にて紹介

未臨界措置
遮蔽・閉じ込め
緊急時対応

定量的な臨界影響評価

= “もしも”を見積もる

- 諸対策の有効性の検証
- 様々なパラメーターの被ばく線量への感度の把握

先行事例の数は限られており、評価手法は整理されていない

本検討の目的: **1Fにおけるデブリの取出し中に生じうる臨界の影響
(=敷地境界被ばく線量)を評価する手法を確立すること**

評価に必要な3種類の計算

動特性パラメーターを
求める
「臨界計算」

核分裂数を
求める
「動特性計算」
(= 時間依存の臨界挙動計算)

敷地境界線量を
求める
「線量計算」

JAEA「臨界安全ハンドブック(JAERI1340)」

NRC「サイクル施設の事故解析ハンドブック(NUREG6410)」

JAEC「安全解析に関する気象指針」

NRA「原子力災害対策指針」

関連するガイドライン等の例とカバー範囲

- 3種類の計算を体系的に説明するガイドライン等はない
- 「デブリ」を対象としたガイドライン等はない

検討を進めるうえでのチャレンジ

動特性パラメーターを
求める
「臨界計算」

核分裂数を
求める
「動特性計算」

敷地境界線量を
求める
「線量計算」



乏しいガイド類
デブリを対象とした先行例の少なさ



豊富なガイド類
適切な既存コード

デブリに適した
手法の選定

デブリに適した
手法の開発

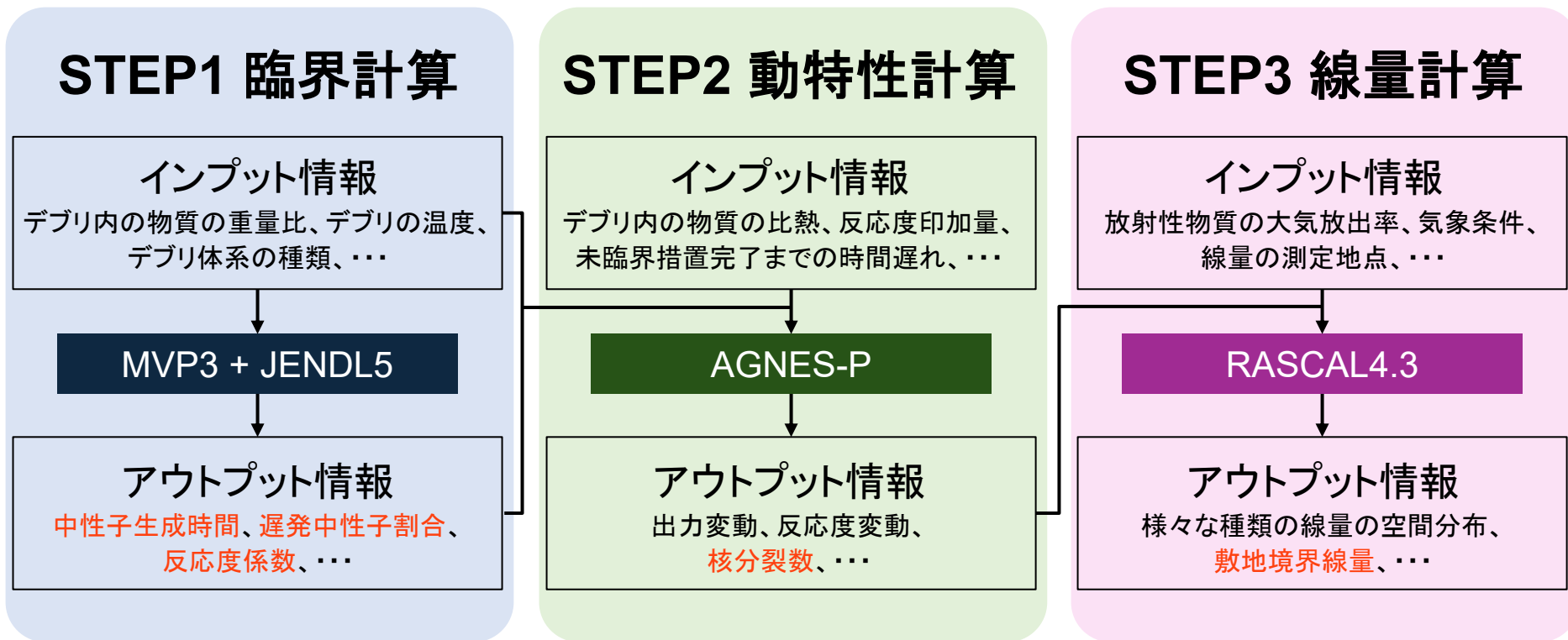
「臨界計算にモンテカルロ中性子輸送計算を活用」

一般的に動特性パラメーターの導出には決定論的手法が用いられるが、デブリ特有の性質(= 複雑な体系となりうる)をふまえ、より拡張性の高い手法を選定・活用。

「デブリ用動特性コードの開発」

既存のコードは主に溶液燃料用(= 再処理施設などを対象)。
デブリ臨界を取り扱うために、
解析可能な幾何形状や、考慮する
反応度フィードバック効果を拡張。

本検討で整理した線量評価手法の概略



- 3種類の計算の手順・留意点を、計算手法（計算コード）の例・入力値の例（次スライド）とともに整理。



「臨界」から「被ばく線量」までを一貫して評価できる手法を提示

入力例の整理

No.	入力名	どの計算に必要なか	入力値の例	設定方法・留意点
1	デブリ内の物質の重量比	臨界計算 動特性計算	<u>RPV底部</u> 燃:構:コン = 81.0 : 19.0 : 0 <u>PCV底部 (ペデスタル内側)</u> 燃:構:コン = 47.7 : 26.6 : 25.8	IRIDが公表している炉内状況予測解析結果より、3号機の各所在におけるデブリを構成する燃料、構造材及びコンクリートの予測重量を参照し、それらの比よりデブリの物質組成を決定した。RPV底部では代表値を引用し、燃料重量:構造材重量:コンクリート重量=17 t:4 t:0 tとし、重量比を算出した。PCV底部ペデスタル内側では、・・・ なお、単純化のために燃料は濃縮度4 wt.%の二酸化ウランとし、・・・
2	デブリの密度	臨界計算 動特性計算	<u>RPV底部</u> 9.89 g/cm ³ <u>PCV底部 (ペデスタル内側)</u> 燃:構:コン = 5.30 g/cm ³	燃料(二酸化ウラン)の密度を10.96 g/cm ³ 、構造材(SUS304)の密度を8.00 g/cm ³ 、コンクリート(普通コンクリート)の密度を2.30 g/cm ³ とした。これらの値とNo.1の重量比を用いた場合、デブリの密度は、・・・
...	...	...	...	...

- 限定的な情報から、保守性・合理性のバランスをとった入力例を導出し、入力セット例を整備。
- ケーススタディや将来的な詳細解析等、様々な用途に展開可能。

1Fを対象としたケーススタディの紹介

■ 本検討で整理した線量評価手法の活用例として 1Fデブリを対象としたケーススタディを実施。

	RPV底部	PCV底部
デブリ内の物質の重量比(燃:構:コン)	81.0 : 19.0 : 0	47.7 : 26.6 : 25.8
デブリの密度	9.89 g/cm ³	5.30 g/cm ³
デブリの比熱	285 J/kg/K	472 J/kg/K
デブリの熱伝導率	10.5 W/m/K	5.83 W/m/K
デブリの核種組成	省略	
デブリ・水の温度	300 K	
体系の種類	かたまり状態 or 分散状態	
水孔半径(かたまり)	1 cm	
デブリ半径(分散)	1 cm	
デブリ・水の熱伝達率	1000 W/m ² /K	
初期出力密度	0.006 W/m ³	0.002 W/m ³



大気放出率	希ガス100%、ヨウ素25%、その他0.05%
換気効率	4 %/h
排気高さ	20 m

0.1% Δk/kの反応度印加
(ステップ or ランプ)

大気拡散(ガウスプルームモデル)



パスکیل安定度	F
風速	1.8 m/s
気温	13℃
湿度	80%
降水・降雪	無し

クラウドシャイン線量

吸入預託
実効線量当量線量

臨界検知に要する時間	30分
検知後未臨界までの時間	10分
線量測定時間	60分

敷地境界までの距離: 1km

グラウンド
シャイン線量

沈着

臨界計算時...

- FCC配置・最適減速・最小臨界を仮定
- 100000ヒストリー/バッチ、120バッチ(内20捨て)

動特性計算時...

- ドップラーフィードバック考慮
- ボイドフィードバック考慮
- 沸騰後の再臨界非考慮

線量計算時...

- 動特性計算で求めた核分裂数分のFPが測定開始時に全て発生すると仮定
- デブリからの直達線非考慮

ランプ状反応度印加の場合：
 体系によって線量(および核分裂数)に差が出ない
 ← 過渡中の出力が低いため温度変化が小さく、
 熱伝達効率の差異による効果が現れにくいため

線量の違い
 境界線量※
 スタル内側)



本検討で整理した線量評価手法を活用することで
 このような定量的解析・考察が可能に

今後の学術論文発表を見据えて
 公開資料では簡略化しております。

ステップ状反応度印加の場合：
 分散状態の線量(および核分裂数)の方が数倍大きい
 ← 分散状態の場合、デブリから水への熱伝達効率が良い(デブリ体積当たりの
 表面積が大きく)、ドップラー反応度フィードバック効果が効きにくいため

※ 本検討で示した評価手法を、3号機で予想されるデブリ組成情報をはじめとした解析条件に対して、
 ケーススタディ的に適用した結果を示したものである。起こりうる臨界影響の期待値や中央値を示したものではない。

結果例：特定の入力パラメータのインパクト

- 他の20以上の入力と比較して「印加反応度」と「未臨界措置完了までの時間遅れ」という入力が敷地境界線量（及び核分裂数）に大きな感度を持ちうることが判明。

→ この2種の入力を
振った評価を実施。

特に感度の大きい2種の入力を大きくしても敷地境界線量は小さい(0.1 mSv以下)可能性

この2種の入力を小さくできれば臨界になったとしても敷地境界線量を非常に小さく(1μSv以下)

今後の学術論文発表を見据えて
公開資料では簡略化しております。

本検討で整理した線量評価手法を活用することで
このような定量的解析・考察が可能に

まとめ

- 1Fの燃料デブリ取出し時に万が一臨界となった場合を想定した定量的な影響評価(=“もしも”を見積もる)は重要
 - 上記のような影響(本検討では、敷地境界被ばく線量と定義)を評価する手法を確立することを目的として、
 - 「臨界計算」「動特性計算」「線量計算」からなる一連の計算手順を整理
 - それぞれの計算に必要な入力の例や設定時の考え方を整理
- 定量的な解析・考察が可能に**
- 適用例としてケーススタディを実施
 - 臨界条件による線量の違いや、一部の入力パラメーターが線量に与えるインパクトを把握

ご清聴ありがとうございました

参考文献

- 原子力損害賠償・廃炉等支援機構、「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2024」(2024).
https://dd-ndf.s2.kuroco-edge.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20240927_SP2024FT.pdf
- 東京電力ホームページ.
<https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/fuel-debris/>
- T. P. McLaughlin, et al., “A Review of Criticality Accidents 2000 Revision,” LA-13638 (2000).
<https://www.nrc.gov/docs/ml0037/ML003731912.pdf>
- 原子力規制委員会、「原子力災害対策指針」(2024).
<https://www.nra.go.jp/data/000473921.pdf>
- 原子力委員会、「「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」について」(1982).
<https://www.aec.go.jp/kettei/ugoki/geppou/V22/N06/197703V22N06.html>
- 日本原子力研究所、「臨界安全ハンドブック第2版」、JAERI-1340 (1999).
<https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAERI-1340.pdf>
- U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook,” NUREG/CR-6410 (1998).
<https://www.nrc.gov/docs/ML0720/ML072000468.pdf>