

臨界安全研究
福島第一原子力発電所
燃料デブリの臨界安全研究

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
燃料サイクル安全研究ディビジョン
臨界安全研究グループ

郡司 智

平成27年度 安全研究センター報告会
平成28年1月22日
富士ソフト アキバプラザ

※本発表の一部は原子力規制庁受託「平成26年度 原子力施設の臨界管理安全基盤強化委託費(東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備)事業」の成果です。

臨界安全研究グループ

□ 福島第一原子力発電所事故の燃料デブリの臨界安全研究

1. 燃料デブリの臨界特性の評価

- 炉心溶融によって生じた燃料デブリの臨界安全と安全規制に掛かる検討
- 燃料デブリの臨界特性データベース構築

2. 臨界実験装置を用いた解析手法の実験的検証

- 模擬燃料デブリを用いたベンチマーク試験による解析の妥当性評価

3. 臨界リスク評価手法の整備

- 臨界となる確率と影響の評価手法の整備

Contents

1. TMI-2事故処理での臨界管理
2. 福島燃料デブリの臨界管理の難しさ
3. 燃料デブリに対する研究活動
 - 臨界特性データベースの作成
 - STACY更新および実験計画
 - 臨界リスク評価
4. まとめと今後の計画

TMI-2*事故処理での臨界管理

*TMI-2: Three Mile Island 2号炉

□臨界防止

■設計評価

- ◆取り出し時も含め水中でのあらゆる水分量変化を包絡
- ◆あらゆる形状変化を許容
- 解析による増倍率の決定、核的制限値(ホウ素濃度)決定

■実機の管理

- ◆ホウ素濃度の監視、希釈要因の排除

□リスク評価

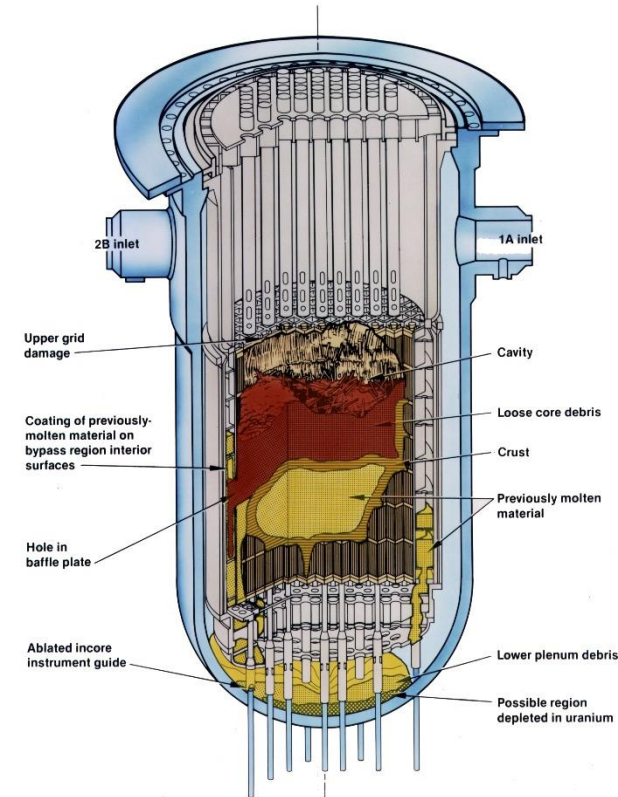
■評価

- ◆起因事象(ホウ素の希釈)

■低減策の検討

- ◆頻度低減や臨界監視の施策

TMI-2 Core End-State Configuration



https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Mile_Island_accident
Nucl. Technol. 87, p.1134 (1989)

福島燃料デブリの臨界管理の難しさ

□ 臨界防止

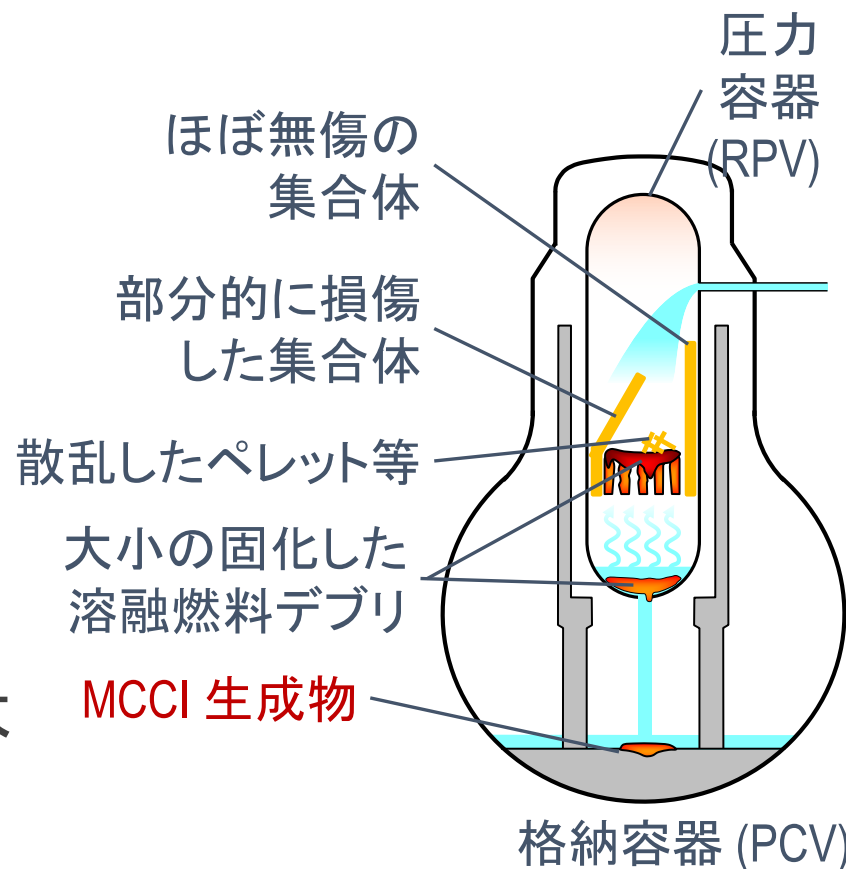
- 燃料の性状が不確か
- 空間的分布が不確か
- MCCI*生成物の存在可能性
- ホウ素による臨界管理が不可

□ リスク評価

- 起因事象が多岐に渡る
- 発生確率や規模の不確かさ大

□ 規制

- 現状をどう判断してどのような規制を行うのか
(核的制限値の設定など)



*MCCI: Molten Core Concrete Interaction
溶融炉心とコンクリートの反応

燃料デブリに対する研究活動

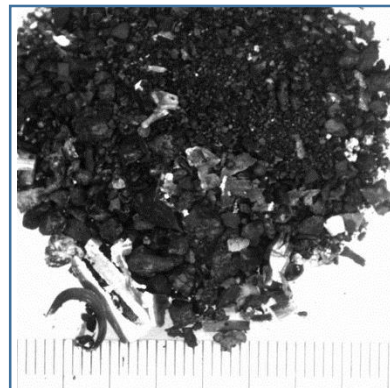
□燃料デブリの性状調査

■ルースデブリやMCCI生成物など

- ◆ 燃焼度(^{235}U 濃縮度)
- ◆ 中性子減速能
(水との混合割合、含水率、
粒径、空隙率など)

□規制支援の研究方針

1. 臨界特性を評価し、
データベース化
2. 模擬燃料デブリを用いた
臨界実験による検証
3. 臨界リスク評価手法の整備



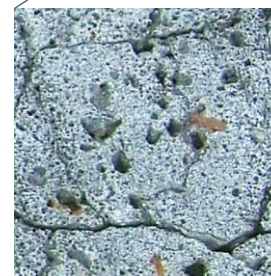
TMI-2圧力容器底部
から回収された
ルースデブリ

燃料と水、
コンクリートの混合物

KIT: 独カールスルーエ研究所

酸化物相の
拡大図

大小様々な
空孔を
有する



KITにおける
模擬MCCI実験の
生成物(例)

臨界特性データベースの作成(1/3)

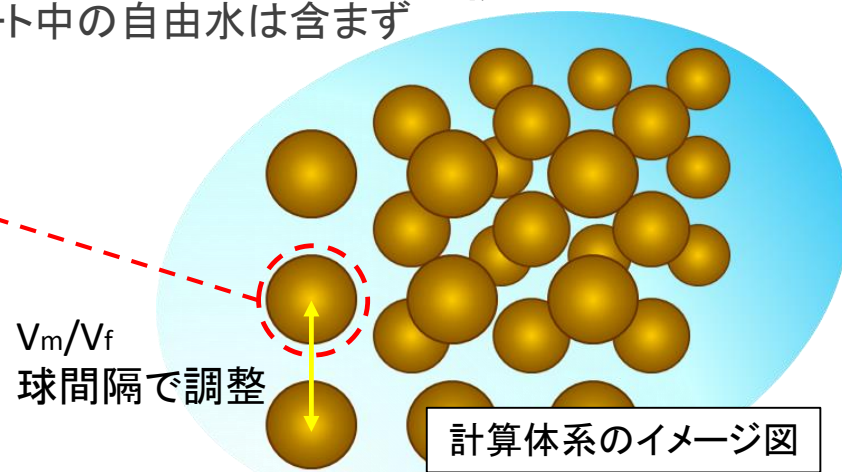
- モデル: MCCI生成物(燃料+普通コンクリート)+水
 - 新燃料(UO_2 ^{235}U 濃縮度: 3、4、5wt%)
 - 燃焼燃料(STEP3 OECD/NEA モデル、燃焼度14GWd/t)

■ コンクリート体積割合(%):
$$\frac{\text{コンクリート体積}}{\text{MCCI生成物全体の体積}} \times 100$$

■ V_m/V_f :
$$\frac{\text{水*体積}}{\text{MCCI生成物体積}}$$

*コンクリート中の自由水は含まず

- 体系:
 - 非均質体系: MCCI生成物球 (半径1cm)を水中に配列



臨界特性データベースの作成(2/3)

解析コード: MVP2.0 500万ヒストリ(10000×500)

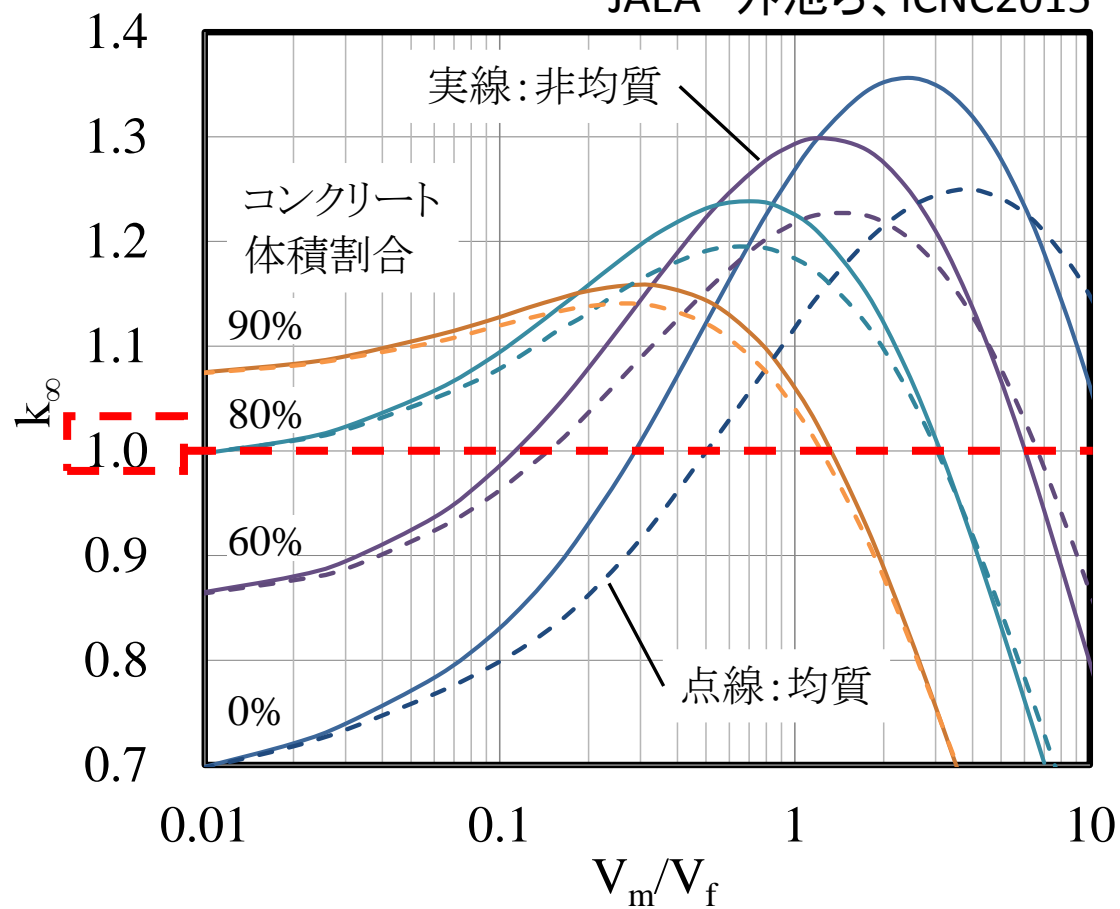
核データ: JENDL4 100サイクル捨て

□ 無限増倍率 (k_{∞})

- コンクリート中の水分が寄与
- 非均質効果

- 無限増倍率 > 1 となる条件はかなり広い。

JAEA 外池ら、ICNC2015



臨界特性データベースの作成(3/3)

解析コード: MVP2.0 500万ヒストリ(10000×500)

核データ: JENDL4 100サイクル捨て

□ 最小臨界寸法

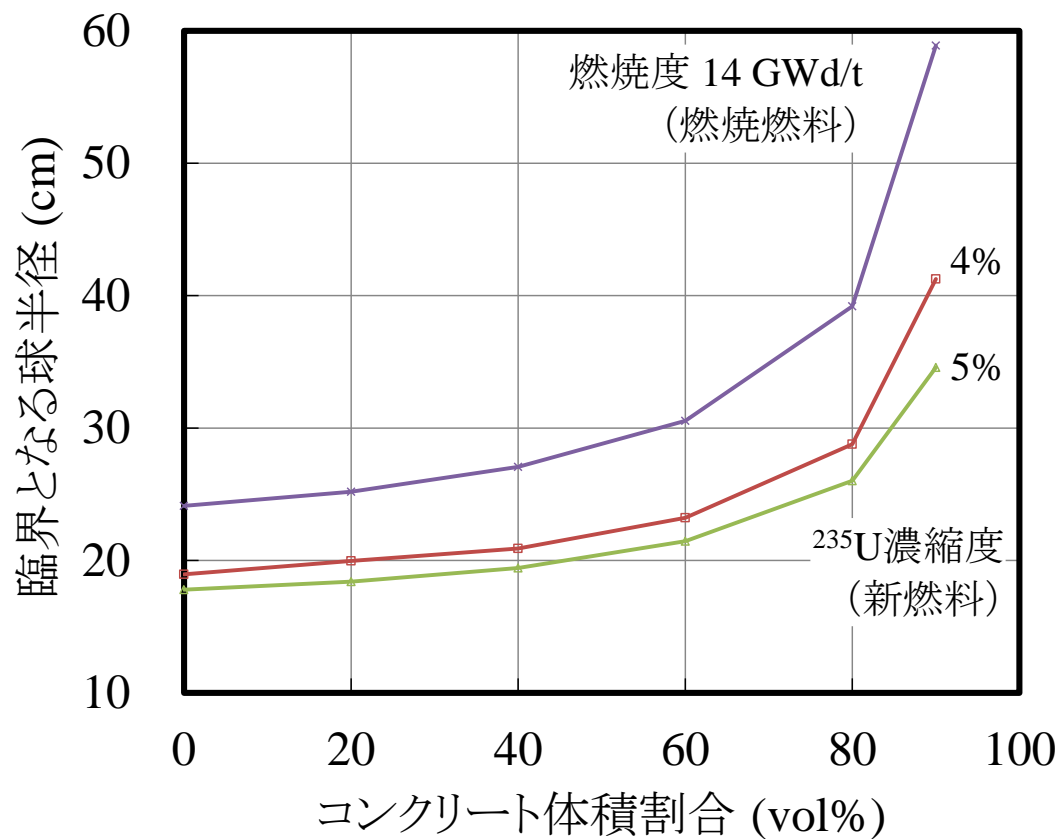
JAEA 外池ら、ICNC2015

■MCCI球を面心立方
格子に配置した空間
を球状に区切った

■水反射条件

■実効増倍率 > 1
となる寸法下限値

■半径20~25cmの
大きさでも臨界に
なる可能性が
否定できない



最小臨界半径の評価

STACY更新および実験計画(1/3)

□ 定常臨界実験装置(STACY)

■ 臨界特性データベースの検証

- ◆ 模擬燃料デブリを調整、装荷して臨界特性を測定
- ◆ 化学分析設備も備える

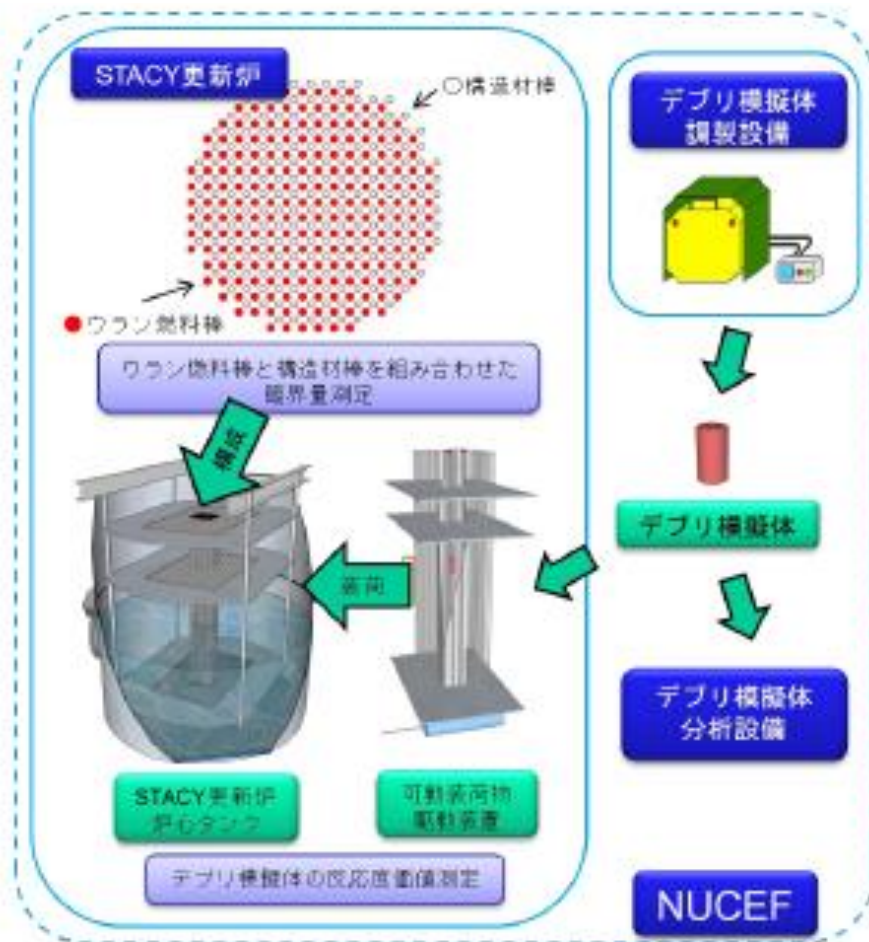
- ◆ 臨界に近い状態 ($k_{eff} > 0.98$) の検証

- ◆ 燃料デブリの不確かさ・解析の不確かさを考慮

→ 計算コード、核データライブラリの検証用ベンチマークデータの取得

■ 現在更新手続き中

→ 平成30年度の初臨界を予定



STACY更新計画

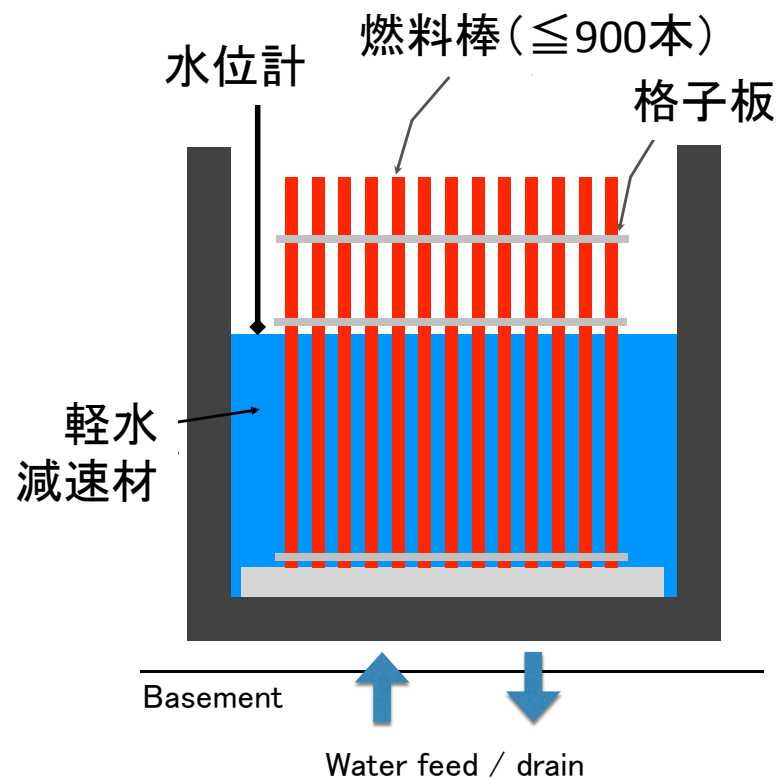
STACY更新および実験計画(2/3)

□ 運転方法

- 水減速材/反射体の水位を調整することで炉心の大きさを変える
- 燃料棒の配列間隔を変えて燃料デブリのとりうる様々な減速条件を実現

諸元 (許可範囲)

燃料棒装荷本数:	900本以下
^{235}U 濃縮度:	10wt%未満
実効臨界水位:	40~140cm
減速材温度:	70°C以下
熱出力:	200W以下



STACY更新炉心の概要

JAEA 井澤ら、ICNC2015

STACY更新および実験計画(3/3)

□ サンプル駆動装置

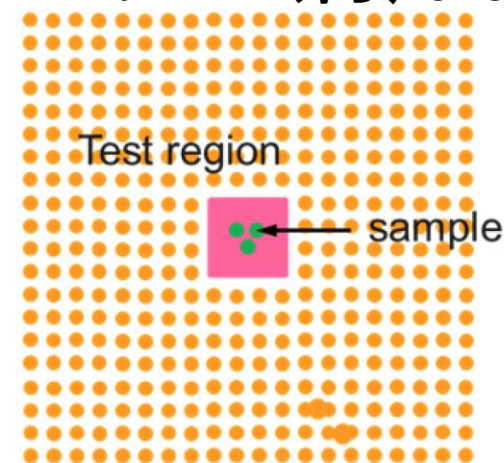
- 模擬燃料デブリなどのサンプルを出し入れする駆動機構を整備
- 燃料棒と同形状で装荷が可能

□ 模擬燃料デブリ装荷炉心

- 局所的に減速条件を変えた2領域炉心
- 炉心構造材の模擬材を減速材中に配置した炉心

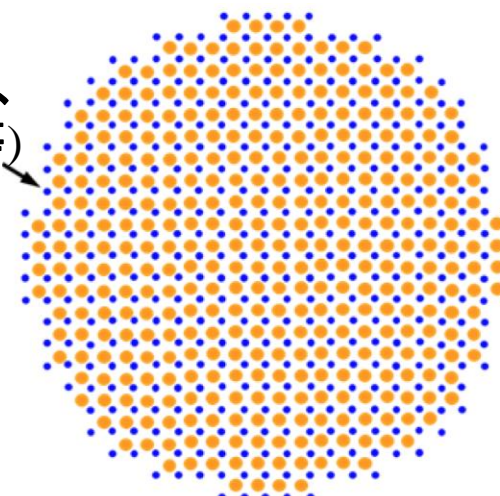
◆ 本日ポスター発表でも紹介

JAEA 三好ら、ICNC2015



2領域炉心の例

(SUS、
コンクリート等)



構造材模擬材の配置例

臨界リスク評価(1/4)

□ 目的

- 工程・工法が提示された時の規制判断に資する
- 臨界となった場合の公衆・作業者のリスク評価手法を整備する

□ 課題

- 発生確率や影響の不確かさが大きい

□ 全体計画

- 臨界リスク評価の手順を開発して提案する
- 同手順を容易に行うための支援ツールを開発する

臨界リスク評価(2/4)

□ リスク評価手順

- 網羅的な検討と起因事象の明確化

□ STEP1

- 炉・燃料デブリを時間・空間的に区切り
検討対象を「セル」化する

□ STEP2

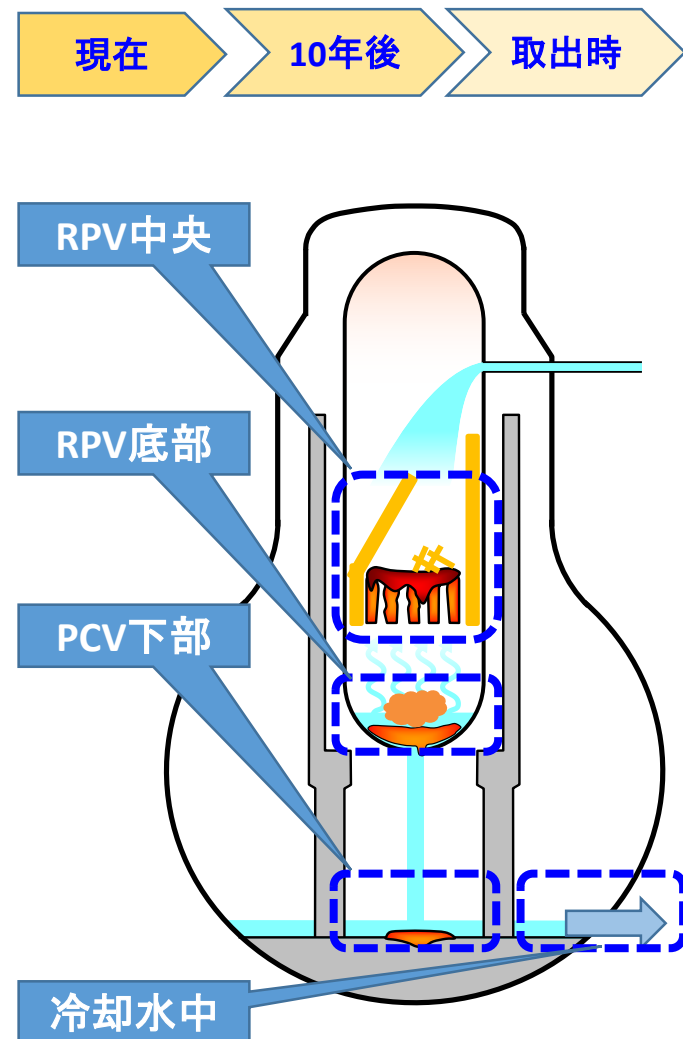
- 各セルの中で起因事象を想定する

□ STEP3

- 無限増倍率、実効増倍率の評価

□ STEP4

- 発生確率、公衆・作業員への影響評価
によるリスクの定量化



臨界リスク評価 (3/4)

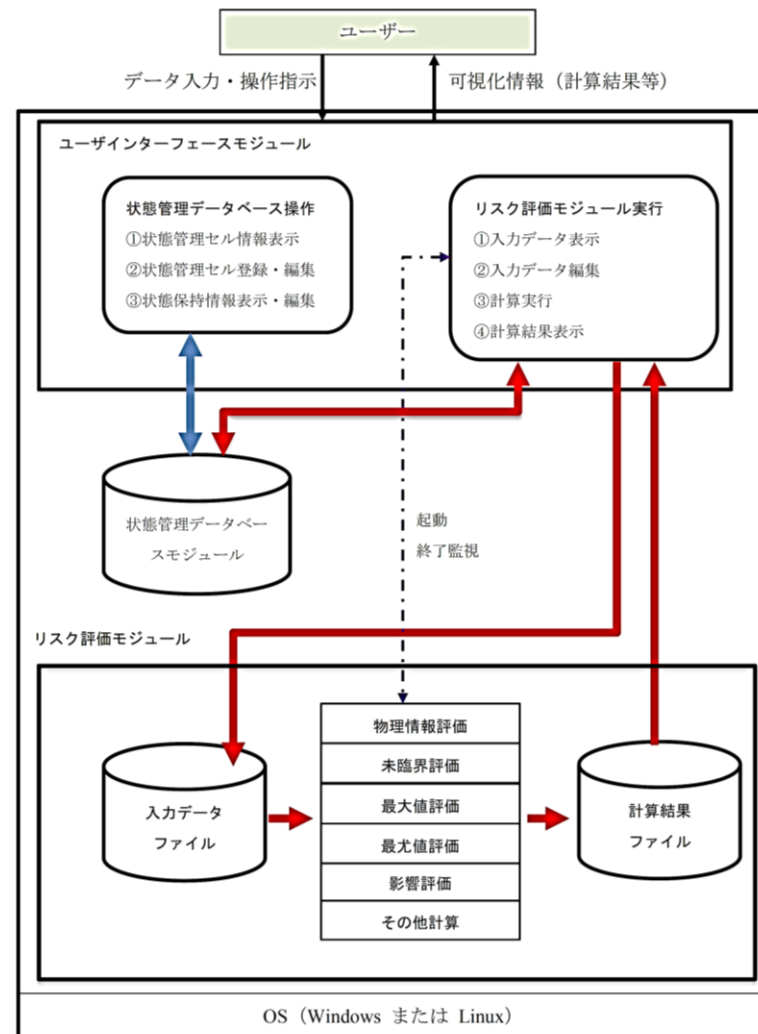
□ 評価支援ツールの開発

■ 利用者がSTEP1-4の手順に沿って評価を行うための支援

■ 炉・燃料デブリの状態をデータベース化

■ シビアアクシデント解析コードの結果などから発生確率をインポート

■ 可視化による補助



評価支援ツールの概念図

臨界リスク評価(4/4)

□ 今後の課題

- 各STEPにおける個別事象の検討においては、プラントの技術情報が継続的に必要
- リスクの定量化とその活用にあたっては、評価結果について規制当局、事業者、有識者が妥当性について認識を一致させることが必要

まとめと今後の計画

□ 解析およびSTACY試験による規制支援

- 臨界マップ: 鉄含有燃料デブリなど他の組成、反射条件についても評価を進める
- STACY更新: 施設更新のための作業継続
- リスク評価: 支援システムの開発

アクティビティ	FY2015	FY2016	FY2017	FY2018	FY2019	FY2020
臨界特性の評価 (臨界マップ)	システム構築、DB整備	★リリース		デブリサンプルの評価盛り込みなど適宜改訂		
臨界実験装置による検証 (STACY更新)	許認可対応、旧設備撤去 燃料調達 模擬デブリ製造装置導入	建設、諸試験		★初臨界	特性試験、模擬デブリ装荷	
リスク評価手法の開発 (評価支援ツール)			★リリース		リスクアセスメント(実機測定ベース)	

参考文献

- K. Tonoike, et al., “Major Safety and Operational Concerns for Fuel Debris Criticality Control,” *Proceeding of GLOBAL 2013*, Salt Lake City, Utah, USA, September 29–October 3, pp. 729–735 (2013)
- K. Tonoike, et al., “Options of Principles of Fuel Debris Criticality Control in Fukushima Daiichi Reactors,” *Nuclear Back-end and Transmutation Technology for Waste Disposal*, Chap. 21, pp.251–259, Springer, (2015)
- H. Sono, et al., “Modification of the STACY Critical Facility for Experimental Study on Fuel Debris Criticality Control,” *Nuclear Back-end and Transmutation Technology for Waste Disposal*, Chap. 22, pp.261–268, Springer, (2015)
- K. Tonoike, et al., “Study on Criticality Control of Fuel Debris by Japan Atomic Energy Agency to Support Nuclear Regulation Authority of Japan,” *Proceeding of ICNC 2015*, Charlotte, North Carolina, USA, September 13–17, pp. 20–27 (2015)
- K. Tonoike, et al., “Criticality Characteristics of MCCI Products Possibly Produced in Reactors of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station,” *Proceeding of ICNC 2015*, Charlotte, North Carolina, USA, September 13–17, pp. 292–300 (2015)
- K. Izawa, et al., “Design of Water–Moderated Heterogeneous Cores in New STACY Facility through JAEA/IRSN Collaboration,” *Proceeding of ICNC 2015*, Charlotte, North Carolina, USA, September 13–17, pp. 965–976 (2015)
- Y. Yamane, et al., “Development of Criticality Risk Evaluation Method for Fuel Debris in Fukushima–Daiichi NPS,” *Proceeding of ICNC 2015*, Charlotte, North Carolina, USA, September 13–17, pp. 1517–1528 (2015)