#### 福島第一原子力発電所の廃止措置と 国際廃炉研究開発機構(IRID)

# 平成27年2月13日(金) 国際廃炉研究開発機構(IRID) 専務理事 菅沼 希一



発表内容

1. 福島第一原子力発電所の現状
 2. 福島第一廃炉・汚染水対策の役割分担
 3. 国際廃炉研究開発機構(IRID)について
 4. 中長期ロードマップの概要
 5. 廃炉に向けた研究開発
 6. 研究開発事例紹介(燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発から)



#### 1. 福島第一原子力発電所の現状

#### 廃炉・汚染水対策チーム事務局会合(H27.1.29)資料より

(<u>http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/hairo\_osensui/pdf/20150129\_01.pdf</u>)



#### 2. 福島第一廃炉・汚染水対策の役割分担



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

#### 3. 国際廃炉研究開発機構(IRID)について

#### く役割>

- ≻将来の廃炉に必要な技術及び関連技術の涵養・蓄積並び に高度化
- ≻当面は、緊急課題である福島第一原子力発電所の廃炉に 向けた技術の研究開発

く事業内容>

≻廃炉に関する研究開発

▶廃炉に関する国内外の関係機関との協力の推進

≻研究開発に関する人材育成



#### <組織概要>

名称: 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 International Research Institute for Nuclear Decommissioning (略称 IRID)

#### 設立: 平成25年8月1日(経済産業大臣認可)

理事長: 剱田 裕史

#### 組合員: 18法人

日本原子力研究開発機構、産業技術総合研究所 (株)東芝、日立GEニュークリア・エナジー(株)、三菱重工業(株) (株)アトックス、北海道電力(株)、東北電力(株)、東京電力(株)、 中部電力(株)、北陸電力(株)、関西電力(株)、中国電力(株)、 四国電力(株)、九州電力(株)、日本原子力発電(株)、 電源開発(株)、日本原燃(株)







#### 4. 中長期ロードマップの概要

#### 取り組むべき研究開発課題

- 使用済燃料プールからの燃料取り出し開始を受けた長期的視点での研究開発
   燃料デブリ取り出し準備の本格化に向けた多角的・重層的な工法・機器の開発
  (1) 冠水工法
  (2) 代替工法
  - 放射性廃棄物処理・処分、廃炉の在り方を見据えた研究開発の着実な推進





燃料デブリ取出し作業イメージ

- ■燃料デブリを冠水させた状態で取り出す方法が、作業被ばく低減の観点から 最も確実
- ■格納容器の水張りに向けた調査・補修技術に加え、燃料デブリ取り出し・収納・保管に必要な研究開発を推進
- ■燃料デブリ取出し代替工法について、国内外に技術情報提供依頼(RFI)、提 案募集(RFP)を実施。



an territoria de la construcción de

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

燃料デブリ取り出し(イメージ)



# 冠水工法と気中(代替)工法(イメージ)





#### TMI-2と福島第一との比較

■ 最終目標は原子炉建屋(R/B)から燃料を取り出すことである。

■ 燃料取り出し手順は、以下のような相違のために、TMI-2の場合よりもはるかに 複雑になると予想される。

	TMI-2	福島第一				
R/Bの損傷	限定的	水素爆発による損傷 (1、3、4号機)				
水バウンダリ	RVは健全なままだっ た	RPV/PCVはいずれも損傷してい る (1~3号機)				
燃料デブリ位置	RV内にとどまった	RPV外に落下したかもしれない				
容器の底部	構造物なし	制御棒駆動機構を伴う複雑な構 造				
■ TMI-2の経験は、廃止措置における燃料取り出し後の手順のためにより有効に						

■ TMI-2の経験は、廃止措置における燃料取り出し後の手順のためにより有効に 活用しうる。



## 5. 廃炉に向けた研究開発

中長期ロードマップで示された「取り組むべき重要課題」 に基づき、以下の3分野で研究開発を実施

- 1. 使用済燃料プール燃料取出しに係る研究開発
- 2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発
- 3. 固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発

平成26年度は合計で24件の研究開発を実施(詳細は参考参照)



#### 福島第一原発の廃炉・汚染水対策に係る研究開発等のフロー図



#### 【冠水工法(燃料デブリを冠水させた状態での取出し)】

 ①全部冠水(格納容器上部まで水張りできる場合)
 ②部分冠水(格納容器上部まで水は張れないが、 燃料デブリの取り扱いは水中で行う場合)









# 燃料デブリ取出し代替工法の概念検討と要素技 術の実現可能性検討についての提案公募(RFP)

燃料デブリ取り出し代替工法に関する提案公募を三菱総研が実施。 IRIDの燃料デブリ調査チームは本件に関する技術支援を行っている。

#### 事業説明

①燃料デブリ取出しの代替エ 法に関する概念検討事業	気中において、燃料デブリを安全かつ確実に取り出すための 工法の概念検討を行う。
②代替エ法のための視覚・計 測技術の実現可能性検討事業	過酷な条件の下、高線量下でも使用可能なコンパクトで軽量 の照明機能を有した内部観察のための視覚機材や、燃料デブ リ識別等のための計測機材の実用化検討を行う。
③代替工法のための燃料デブ リ切削・集塵技術の実現可能 性検討事業	燃料デブリの切削を可能とする機材(集塵機能も含む)の実 用化検討を行う。

注)工法に依存する度合いの強い搬送技術あるいはコンクリートや鋼鉄製壁面の切削技術等の 提案は工法が具体化してから必要に応じて募集するものとする。



6. 研究開発事例紹介 (燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発から)

# (1)原子炉格納容器水張りに向けた調査・ 補修(止水)技術の開発











【2号機】PCV下部の現状イメージ図



【3号機】PCV下部の現状イメージ図



# 格納容器補修技術の開発(補修対象箇所)





## (2)格納容器内部調査技術の開発



## 調査及び調査装置の開発方針

1~3号機の炉心・PCVの状況推定(\*1)より、開発方針を以下に設定



\*1:【出展元】東京電力殿ホームページ(平成25年12月13日)「福島第一原子力発電所1~3号機の炉心・ ©International Research Institute for Nuclear Decommissioning 格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討第1回進捗報告」より抜粋

各号機の開発ステップ(1号機)

- 【調査対象部位】ペデスタル(外)地下階作業員アクセスロ近傍
  【調査及び装置開発ステップ】
  (1) X-100Bペネからの調査(~2015年度) X-6ペネが高線量であり、現状接近可能なX-100B(Ф100mm)を使用して、優先度が高い以下のペデ スタル外からの調査を計画。
   ① PCV内の1階グレーチング上の情報(CRDレール使用可否の調査等)を取得。:B1
   ② 2013年11月の水上ボートによるトーラス室調査結果を受け、ペデスタル(外)地下階(作業員アクセ
- スロ及び近傍ベント管)の映像取得に特化した調査を計画。:B2(2) X-6からの調査(2016~2017年度)
  - ①ペデスタル(外)地下階に対して、デブリ形状計測装置を搭載し更なる状況把握を行う。:B3





(1) 装置概要

狭隘なアクセスロ(X-100Bペネ貫通口:内径φ100mm)からPCV内へ進入し、グレーチング上を安定走行可能な、形状変形機構を有するクローラ型装置



<ペデスタル外グレーチング上調査装置>

PCV内部調査のため、100mmの配管の通過、グレーチング(格子状の鋼材)平面の走行、凹凸のある面上の安定走行可能な、形状変化型ロボットを開発中





©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

各号機の開発ステップ(2号機)

【調査対象部位】:プラットホーム上(プラットホーム上面, CRDハウジング下部)及び下(地下階) 【調査及び装置開発ステップ】 (1) X-6ペネ(Φ115mm)からの調査(~2015年度/上) •X-6より、ペデスタル内部プラットホームの状況調査を2015年度/上に計画。:A2 (2) X-6(穴径拡大、またはペネ開放)からの調査(2016~2017年度):A3~A4 •デブリ可視化装置を投入し、ペデスタル内部の調査を行う。



#### (3) 圧力容器内部調査技術の開発



RPV内部へのアクセスルートの検討

#### 表 アクセス技術の開発計画(上部穴あけアクセスの例)

No	開発技術要素	課題	2014	2015	2016	2017	2018
1	穿孔技術	蒸気乾燥器、気水分離器の穴あけ					l
2	拡管技術	蒸気乾燥器、気水分離器の穴径拡管					1
3	遠隔操作技術	曲がり、狭隘部の通過、作業状態 の監視				]	
4	バウンダリ形成技術	オペレーションフロア(シールド プラグ)上でのバウンダリ再形成				]	



#### RPV内部調査アクセスルート(配管からのアクセス)





#### (4)事故進展解析技術の高度化による炉内状況 把握



MAAPのモデル改良・追加

#### MAAPコードの改良により、デブリ位置の推定、プラント挙動の評価精度を高める

注)

炉心

溶融炉心

炉心支持板

粒子状デブリ

余屋屆

溶融プール、 凝固クラスト

上段:改良前 下段:改良後

シュラウド

■MAAP5コードの改良と検証

- ●下記改良項目及びその高度化仕様に基づいた コード改良を米国EPRI委託にて実施
- ・ 炉心損傷進展モデル改良
  (溶融物の移行経路を複数考慮)
- 下部プレナム内デブリ挙動モデル改良 (堆積形態、構造物相互作用)
- 格納容器内デブリ挙動モデル改良 (拡がり挙動、コンクリート相互作用)
- ●改良されたコードの検証
- 個別現象のモデルを要素試験等により検証
- プラント全体挙動は実機試験等により検証





ΠH

単一移行パス

複数パス

ラエットポンプ

燃料支持金具

CRD配管

RPV壁

MAAPコードによる1号機事故解析



# (5) 原子炉内燃料デブリ検知技術の開発



# プロジェクトの概要(全体計画と目的)

●圧力容器内(①)と格納容器下部(②)
 の燃料デブリの位置、量の把握が重要
 ◆燃料集合体の損傷状態
 ◆狭隘部への溶融燃料の流れ込み有無
 ◆燃料デブリの密度等の詳細分布
 →取り出し手順や工法の具体化

圧力容器内部は 高放射線場で アクセス困難

ミュオンによる透視技術で 早期に燃料デブリ分布を 廃炉技術開発に提供







飛来方向の物質有無(2次元)

識別能力(燃料デブリ):1m程度

一つの小型ミュオン検出器(早期適用可)

散乱位置の物質有無(3次元)

識別能力(燃料デブリ):30cm程度

2つの大型ミュオン検出器(開発要)

ウラン等の重元素を識別可能

#### ミュオン透過法の測定試験

日本原子力発電東海第2原子力発電所にて、同規模の装置で測定 ・原子炉内には燃料がない ・使用済燃料プールには燃料があるとの測定結果。



#### 福島第一1号機で使用するミュオン測定装置



測定装置外観





IRID

#### ミュオン散乱法の識別試験

- ・福島第一原発の1/10スケールの研究炉でウラン識別試験
- ・シミュレーションは実験値と3%以内で一致
- ・福島第一原発で30~40cm識別能力の達成目途



ミュオン散乱法のシミュレーション



#### 数値シミュレーションを2号機の実規模体系で実施



## (6) 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発

#### 燃料デブリ収納・移送・保管技術開発の目的

1FではTMI-2と比較して以下に示すような条件に相違がある

- ・1F-1~3の燃料デブリはRPV下部、PCV内に存在。位置や性状が不明。
- ・建屋内は高線量で、人のアクセスが困難。
- ・燃料は、TMI-2より燃焼度・濃縮度が高く、収納・移送・保管条件が厳しい。
- ・炉内への海水注入により、腐食の進行も懸念。

TMI-2では専用の収納缶を開発、収納缶を使用して燃料デブリの収納・移送・保管作業 を実施。 収納作業は、RPV上部に作業台を設置、炉内で収納缶に燃料デブリを収納。

本研究は、1F燃料デブリの収納・移送・保管技術の開発として、TMI-2の実績等を参考

に、1Fの状況にあった燃料デブリ収納缶及び収納缶取扱い技術の開発を行う。

#### 開発の目標

1F実施計画に基づき、燃料デブリ取出しは、臨界未満に維持、安全な取出し、飛散防止、 適切な遮へい、冷却、貯蔵、作業員及び敷地内外の安全確保が求められる。

- ・1F燃料デブリ収納・移送・保管に適した収納缶要求仕様を設定、収納缶材料を選定
  ・燃料デブリ収納缶の安全性に関する評価手法を開発
- ・モックアップ試験用収納缶を設計・製作し、燃料デブリ取出モックアップ試験に供する

# 破損燃料移送・保管に関する調査(TMI-2燃料デブリ処置の概要)



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

# (7)模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ処置 技術の開発



# 模擬デブリを用いた特性の把握(研究開発の方針)





酸化雰囲気で (Ar-0.1%O,1500°C) (Zr,U)O₂(Zr-ricḇ) (合金及びZrB 酸化)

制御材(B<sub>4</sub>C +SUS)との反応(溶融固化物断面観察像の例)

アーク溶解

(制御棒と燃料が溶融した場合にできる固化物の組織等に係る知見を取得)



IRID

ZrB<sub>2</sub>(箔状又は

平板状結晶)

(Fe,Cr,Ni)<sub>2</sub> Zr,U)

(Fe<sub>2</sub>Zr型立方晶)

(デブリの化学系(ホウ化物、酸化物、金属)毎に硬度の分布を推定) 🔤

## (8)燃料デブリの臨界管理技術の開発



# 未臨界監視および再臨界検知の概要



- ➢ PCV内部と外部で臨界管理の要求は異 なるため、目的に応じて未臨界監視と再 臨界検知を使い分ける。 (デブリ取出し前の段階を想定)
- ➢ PCV外部の廃液処理、冷却設備におい ては、設備をメンテナンスする作業員の 臨界による被ばくリスクを未然に防ぐ必 要がある。

#### =>未臨界監視

➢ PCV/RPV内部において臨 界になった場合、直接放射 線はPCV壁外側に届かな いため、被ばくリスクは極 めて小さい。一方、比較的 広い範囲の状況を監視す ることが重要である。 =>再臨界検知 PCV内臨界時の中性子線分布



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

# (9) 圧力容器/格納容器の健全性評価技術の開発



# 健全性評価全体評価フロー





## (10)燃料デブリ・炉内構造物取出技術の開発



#### 研究方針

- ① 燃料デブリ取出工法
  - 燃料デブリ取出し工法は各プラント(1~3号機)の状態を考慮する必要 があるが、プラントごとに状態が異なり、各プラントに適した取出し工法 が定まっていない。
  - ⇒PCVを冠水させて取り出す工法(完全冠水)に加えて、冠水できない 場合の代替工法として、部分冠水(PCV上部まで水を張らない)また は気中で取り出す工法(部分気中、完全気中)を比較し評価する。現 状の1~3号機の状態及び推定情報を整理した上で、各プラントに対 する各工法の適用性を評価する。
  - ② 燃料デブリ取出し技術
    - 性状が不明確な燃料デブリや、溶融した炉内構造物を加工して取り出 す技術が必要となるが、1Fに適用可能な確立された技術がない。 ⇒前例として、TMI-2で実施した燃料デブリ取出しや、国内プラントに おける大型改造工事が挙げられる。これらの実績のある技術を中心 に、燃料デブリを模擬した試験体の加工試験を実施し、適用可能な技 術を選定する。炉内構造物の取出しに関しては、炉内構造物が設計 通りの状態ではない可能性があることから、このような状況を想定した 上で適用可能な技術の開発を行う。



# 燃料デブリ・炉内構造物取出技術開発の概要





#### く気中でオペフロに遮蔽プラグを設置し取り出すエ法>



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

<気中でオペフロから装置本体を降ろしながら取り出す工法>



### く気中で側面から取り出すエ法>



#### ~燃料デブリ取り出しに向けて~

➢福島第一における燃料デブリ取出し作業は、TMI-2と比較して一層の 困難が予想される。作業の全体戦略、取出し工法、デブリ取出しツー ルの開発については、国内外の叡智を結集する必要がある。

- ▶燃料デブリ取り出し達成のためには、関連する各プロジェクトの目的・ ゴールを明確にした上で、部分最適ではなく、全体最適となるように計 画し、柔軟に技術開発を行う必要がある。
- ▶戦略の策定にあたっては、End-State(最終的にどうしたいか)を考え、 実現可能な様々なオプションを検討し、その結果、第一案だけでなく 必ず代替案を準備しておくことが重要である。

#### ご清聴ありがとうございました。







#### IRIDの研究開発テーマ(平成26年度)

#### 1. 使用済燃料プール燃料取出しに係る研究開発

- ・使用済燃料プールから取り出した燃料集合体他の長期健全性評価
- ・使用済燃料プールから取り出した損傷燃料等の処理方法の検討

#### 2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発

- ・格納容器漏えい箇所特定技術・補修技術の開発
- ・原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発(1階床面・壁面低所)
- ・原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発(1階天井・壁面高所及び原子炉建屋上部階)
- ・原子炉格納容器内部調査技術の開発(アクセス方法、被ばく対策、調査装置検討等)
- ・原子炉圧力容器/格納容器の健全性評価技術の開発
- ・燃料デブリ臨界管理技術の開発
- ・原子炉建屋内汚染サンプルの分析
- ・過酷事故解析コードを活用した炉内状況把握
- ・燃料デブリ性状把握・処置技術の開発
- ・原子炉内燃料デブリ検知技術の開発
- ・燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発



#### 2. 燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発(続き)

- ・燃料デブリ・炉内構造物の取出技術の開発
- ・原子炉圧力容器内部調査技術の開発
- ・圧力容器/格納容器の健全性評価技術の開発
- ・原子炉格納容器漏えい箇所の補修・止水技術の開発
- ・原子炉格納容器漏えい個所の補修・止水技術の実規模試験
- ・燃料デブリ臨界管理技術の開発
- ・原子炉建屋内の遠隔除染技術の開発(高所、上部階用除染装置開発、地下階除染)
  ・実デブリ性状分析
- ・サプレッションチェンバー等に堆積した放射性物質の非破壊検知技術の開発
- ・原子炉格納容器内部調査技術の開発(調査計画、調査装置開発等)
- ・原子炉建屋内の遠隔除染技術の信頼性評価(その1)※
- 3. 固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発

・事故廃棄物処理・処分技術の開発

※IRIDの自主研究。それ以外は資源エネルギー庁公募の補助金事業



## 燃料デブリ取り出し代替工法に関する公募結果

- 1. 燃料デブリ取り出しの代替工法に関する概念検討(4件)
  - •株式会社IHI
  - ALEVA ATOX D&D SOLUTIONS
  - ・Cavendish Nuclear Limitecd(英)、(株)ビー・ジー・イー、清水建設(株)
  - ・公益財団法人原子カバックエンド推進センター、木村化工機(株)一般財団法人日本クリーン 環境推進機構
- 2. 代替工法のための視覚・計測技術の実現可能性検討(4件)
  - ・(株)キュー・アイ
  - •Createc Technologies Limited, Oliver Crispin Robotics Limited(英)
  - ・浜松ホトニクス(株)
  - ・(株)フジクラ
- 3. 代替工法のための燃料デブリ切削・集塵技術の実現可能性検討(3件)
  - •(株)IHI
  - •ONET TECHNOLOGIES NUCLEAR DECOMMISSIONING OTND (仏)
  - ·大成建設(株)

