

# 平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金 (燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発)」

## 平成27年度成果報告

平成28年4月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

# 1. 全体計画

## 1.1 「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発」の目的と目標

### 【燃料デブリ収納・移送・保管技術開発の目的】

TMI-2では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。

1Fでは燃料デブリがRPV外部にまで広がっていると考えられる。

1Fでは建屋損壊、原子炉周りは高線量/高汚染。発電所内の収納缶の保管敷地面積も限られる。

1Fでは海水導入、MCCI(コンクリートと溶融炉心が反応)した生成物等、燃料デブリも異なる。

1Fでは燃料の初期濃縮度、燃焼度が高い。

⇒工法が大きく制約され、これに伴って収納缶が対応すべき要求自体もより詳細、高度となる。

さらに、燃料デブリ性状等も大きく異なるため、TMI-2の収納缶のままでは1F向けに適用不可。

一方で情報が限られており、高線量廃棄物を含めた物量など1F廃炉工事の全体を最適化する

高い視点から、**収納缶への要求条件（インプット）を自ら設定し、知見の更新を踏まえて**

**都度反映することが重要。**

**(IRIDで燃料デブリの取り出し技術、燃料デブリ性状把握等、各専門チームとの連携体制を整備)**

本研究は、**収納缶への要求条件(インプット条件)、収納缶から取り出し側他への要求条件**を他の開発メンバーと連携して調整・設定することで**1Fの実情に適合した燃料デブリ収納缶及び収納缶取扱い技術を開発する。**

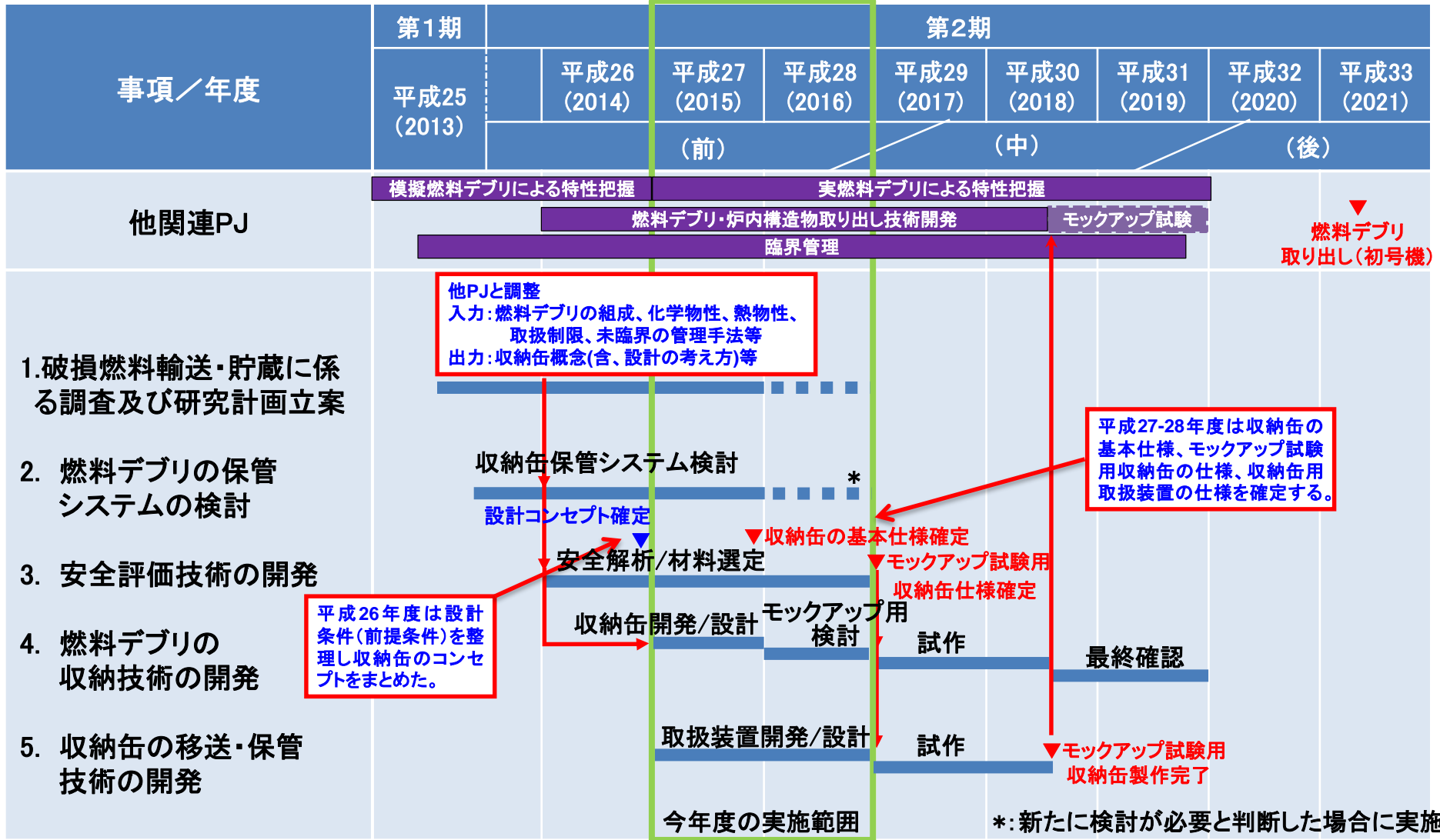
### 【開発全体の目標】

平成33年の燃料デブリの取り出しへ向けて、**燃料デブリの収納・移送・保管技術を確立する。**

# 1. 全体計画

## 1.2 ロードマップとの関係

平成33(2021)年中の初号機の燃料デブリの取り出しに向け、以下の工程で開発を進める。



## 2. 平成27～28年度実施内容の概要

### 【目的】

ロードマップでは平成30年頃に燃料デブリ取り出し工法のモックアップ試験が計画されておりプロトタイプとなる収納缶を準備する必要がある。そのため、平成27-28年度は、**収納缶の基本仕様、モックアップ試験用収納缶の仕様、収納缶用取扱装置の仕様を確定する。**

### 【実施内容】

#### ①破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

破損燃料輸送・貯蔵を調査し有効と考えられる既存事例を収集するとともに、他の技術開発や実プロジェクトの最新の検討状況・知見の情報収集を行い、開発計画に反映する。

#### ②燃料デブリの保管システムの検討

平成26年度の燃料デブリの保管コンセプトを現場の最新状況や他のプロジェクトからの情報、本事業で得られた知見を反映して見直す。また、他PJや実プロジェクトへの要求事項を更新する。

#### ③安全評価手法の開発

平成26年度に抽出の安全評価・対策技術の開発を行うとともに材料仕様(候補)を選定する。

#### ④燃料デブリの収納技術の開発

燃料デブリ収納缶の設計要求事項を精査し、燃料デブリ収納缶の基本仕様を確定し、モックアップ試験用収納缶の基本計画図を作成する。

#### ⑤収納缶の移送・保管技術の開発

燃料デブリ取り出し設備、移送・保管設備とのインターフェースを整理し、収納缶用取扱装置(遠隔、自動操作装置、乾燥装置)の仕様を決定するとともに実プロジェクト側への要求条件を明らかにする。

# 3.実施結果(1/39)

## 3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

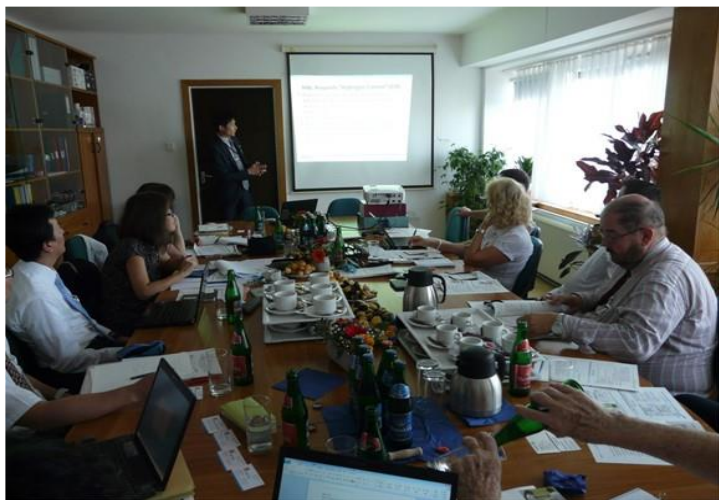
### 海外調査の実施

#### 1)ハンガリーPaks調査(9/17-18訪問)

- ・未臨界評価技術：損傷した燃料の最大初期濃縮度を設定する等、本PJで行った検討と同様の保守的な条件を設定して形状担保。評価条件設定の妥当性の参考となる。
- ・破損燃料の乾燥技術：乾燥技術確立のため模擬ペレット等を用いたコールド試験やウランを使用したホット試験を系統的に実施。今後の乾燥技術確立のためのプロセス構築の参考となる。
- ・水素逃し構造(Compensator)：破損燃料のプール保管において収納缶内の水素は放出しつつ、収納缶内の汚染水はプールに放出されないようにする構造を採用。湿式保管を選択した場合における有用な技術の一つとして参考となる。

#### 2)IAEA(9/21-22訪問)

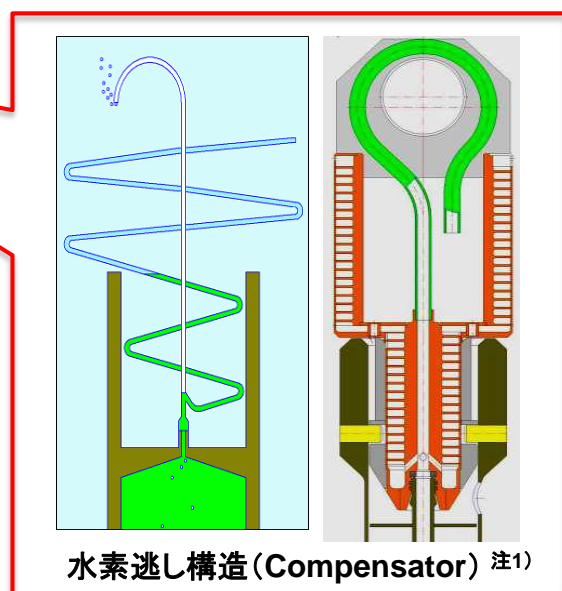
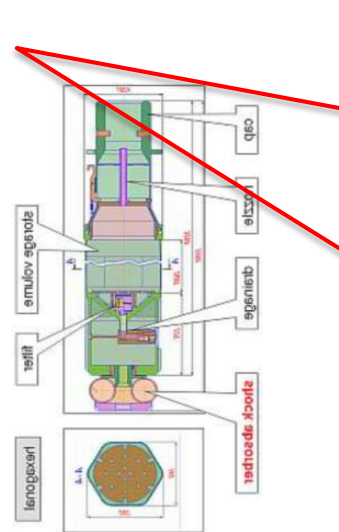
- ・今後の許認可を想定すると規制当局との対話や情報提供は互いに有効ではないかとの意見有。
- ・世界中の廃止措置技術に精通した有識者との意見交換：収納缶の設計条件として燃料デブリの最終形態の設定が重要との意見有。



Paks発電所でのMTG



Paks 収納缶 注1)



水素逃し構造(Compensator) 注1)

注1): L. Szóke, Managing of the damaged fuel at Paks NPP,  
Meeting in Vienna on Management of Severely Damaged Spent Fuel And Corium 2-4 September 2013

## 3.実施結果(2/39)

### 3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

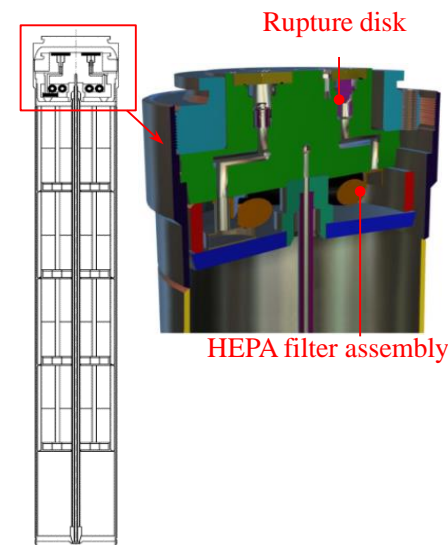
#### 1) 米国(PNNL, Hanford site)調査他(10/19-21、10/24)

- ・PNNL:放射線分解モデル(水素の二次反応)技術、スラッジの特性把握/水素発生低減技術
- ・Hanford site:低温真空乾燥技術、Multi-Canister Overpackの閉込め構造、スラッジの収納・移送・保管技術
- ・TMI-2燃料デブリ保管に関わった技術者との面談:  
少水分条件における水素発生(エネルギー吸収)量精査手法



Hanford Site 低温真空乾燥装置

出典:C. Miska, Hanford Cold Vacuum Drying, CHPRC-02756, October 19, 2015  
DOE, N Reactor (U-metal) Fuel Characteristics for Disposal Criticality Analysis, May 2000,



Hanford Site  
Multi-Canister Overpack

## 3.実施結果(3/39)

### 3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

燃料デブリ性状把握PJから提供された情報等に基づき、以下の条件を仮定した。

#### 【燃料デブリの性状】

- 燃料デブリ組成(MCCI生成物を除く):  
二酸化ウラン(照射に伴うFPを含む)、ジルコニウム合金、ステンレス、低合金鋼、Ni基合金、コンクリート、B4C、海水
- 塩分濃度:  
100ppm程度(滞留水の塩素濃度20ppmを保守的に設定)
- ジルコニウム:  
微量に金属状態で残留(火災の可能性を考慮するため)
- MCCI生成物の物性  
上記燃料デブリにコンクリートが混合したもの(燃料デブリの熱で結晶水喪失、ガス発生等の反応があったと考えられるが、評価上はコンクリート成分の物理的混濁と仮定。(後述))
- 燃料デブリの安定性(-20~300°C(窒素雰囲気)環境における安定性)  
燃料デブリが内包する成分の気化等による大幅な体積変動、腐食物質や放射性ガスの大量放出等の安全に大きく影響する挙動は生じないとする。(上記環境において物質は安定化されていると想定。)
- 形状  
塊状・粒状・粉状の固形物
- 防錆剤/中性子吸収材  
五ホウ酸ナトリウム、他(必要に応じて対応は協議)

## 3.実施結果(4/39)

### 3.1 破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案

燃料デブリ取り出しPJ、IRID内有識者等との議論を踏まえて以下の条件を仮定した。

#### 【燃料デブリの収納方法】

- 塊状、粒状の燃料デブリ  
掴む、掬う等の方法で回収して収納。
- 粉体状の燃料デブリ  
フィルター等で吸着して収納。  
なお、フィルターは焼結ステンレス網等の熱的安定性を有するものとする。

#### 【燃料デブリの移送方法】

- 収納缶による燃料デブリの移送  
塩化物イオン(海水由来)を含んだ水の放射線分解による水素ガス発生を想定。

#### 【燃料デブリの保管方法】

- 収納缶による燃料デブリの保管期間  
50年(ロードマップで設定の燃料デブリの最終処理/処分決定までの30年間を包絡する期間として設定。なお、使用済燃料乾式貯蔵施設では50年程度の保管期間と搬出入10年を想定して長期健全性に関するデータが整備されており、参考とできる可能性あり。)
- 燃料デブリの乾燥  
乾式保管の検討は、乾燥後も燃料デブリ内に水分が残留しているものとする。(完全乾燥できない可能性を考慮する。)



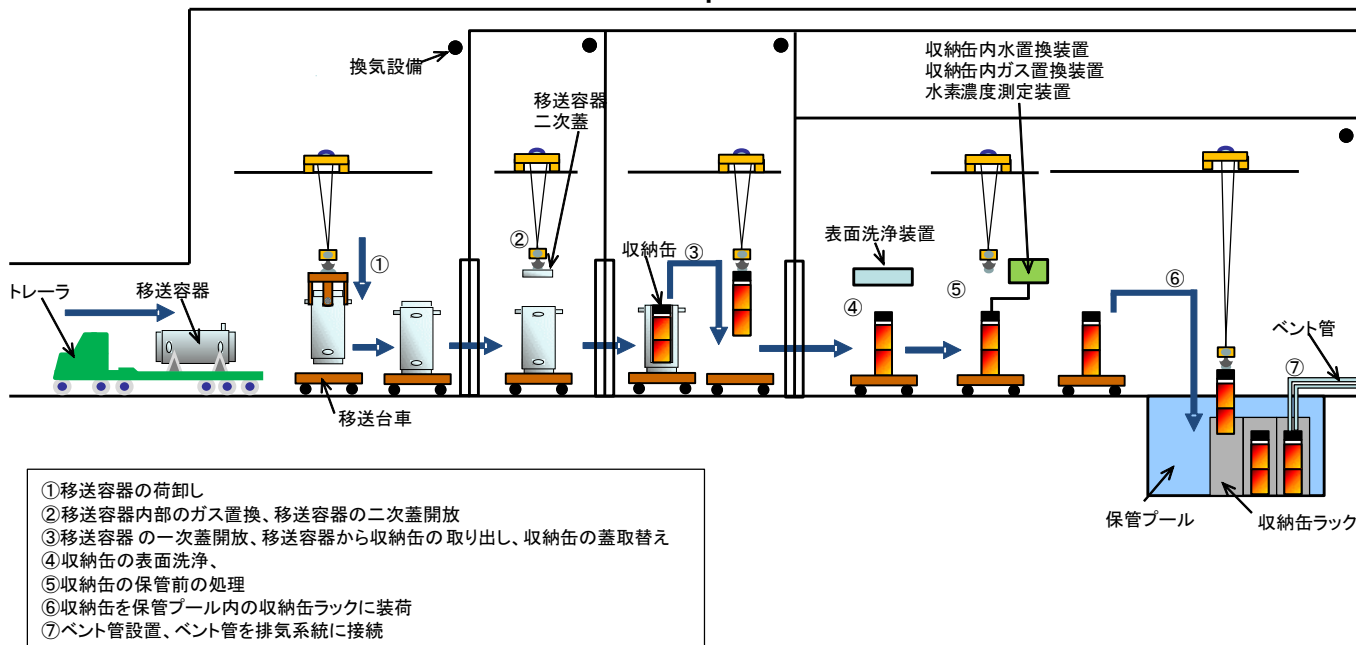
# 3.実施結果(5/39)

## 3.2 燃料デブリの保管システムの検討(湿式保管システム)

燃料デブリの保管は、乾式密封保管が目標であるが、燃料デブリの乾燥技術の開発、乾燥検証、乾式設備の確立等に時間を要することも想定されるため、湿式、乾式の両ケースについて検討する方針とし、他のPJの最新知見や海外知見も踏まえて平成26年度の概念について保管フローを検討した。

### 1)保管コンセプト案の更新

- ・米国Hanfordサイトの乾燥設備の規模を考慮すると、原子炉建屋内での乾燥作業場所の確保が困難であると想定される。湿式保管の位置付けとして、燃料デブリ収納缶を湿式保管施設に移送して、一時保管した後、収納缶内を乾燥させ、長期的な乾式保管に移行させていく案を候補とした。
- ・湿式保管方式としては、ベント式が主案と考えられる。また、収納缶内のFPガス発生量を測定しながら、Paks-2で使用されたような水素逃し構造(Compensator)の適用も考えられる。



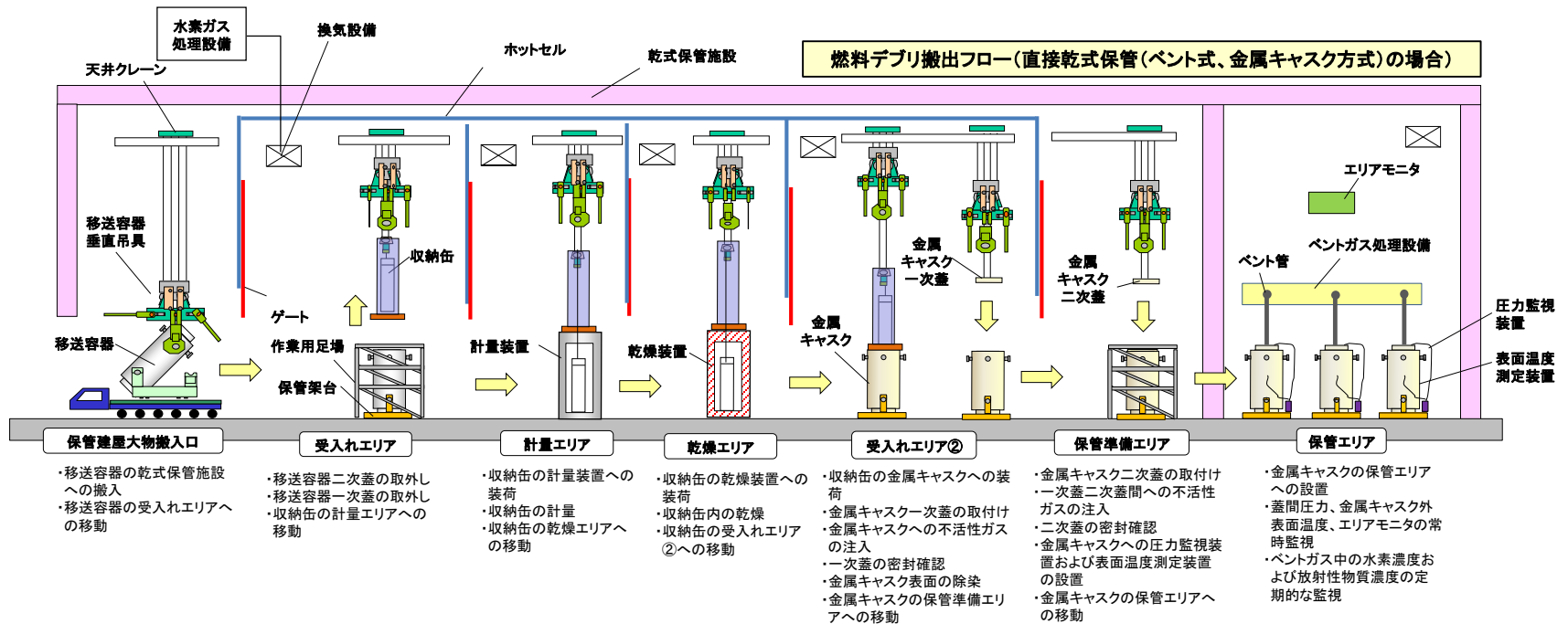
燃料デブリの湿式保管フロー案(一時湿式保管(ベント式)の場合)

# 3.実施結果(6/39)

## 3.2 燃料デブリの保管システムの検討(乾式保管システム)

### 1)保管コンセプト案の更新

- ・保管方式について、海外知見などの調査の結果、現時点では密封保管に必要な燃料デブリの完全乾燥は難しいと判断し、乾式貯蔵についてはベント式保管を有力候補とした。
- ・米国Hanfordサイトの乾燥設備の規模を考慮すると、原子炉建屋内での乾燥作業場所の確保が困難であると想定される。乾燥工程について、乾式保管建屋にて乾式保管前に実施する案を候補とした。



燃料デブリ取り出しフロー案(直接乾式保管(ベント式、金属キャスク方式)の場合)

# 3.実施結果(7/39)

## 3.2 燃料デブリの保管システムの検討(MCCIの影響)

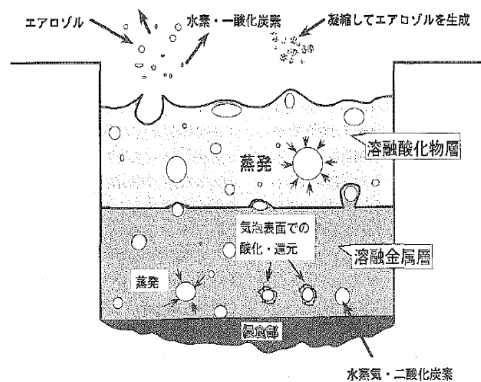
MCCI生成物の影響を保管の観点から検討した。

### MCCI生成物の特徴

- ・構成成分にコンクリート成分を含む。  
冷却水との接触により、コンクリート成分が溶出する。また空隙を形成して崩れやすい可能性がある。
- ・炭酸ガス及び水蒸気が多量に発生し、それらが周囲に逃げることで空隙を有する。  
空隙によっては乾燥が困難となる可能性がある。  
⇒安全評価(特に水の放射線分解や材料の健全性評価)に反映が必要

### MCCI生成物の保管における影響

- ・燃料成分(放射性物質)の偏在により、水の放射線分解で生じる過酸化水素の偏在。
- ・コンクリート成分が偏在することによるpH偏在
- ・金属相(ステンレス等に含まれるFe)の残留  
⇒安全評価(特に材料の健全性評価)に反映が必要



**溶融炉心とコンクリートの相互反応(MCCI)の概念**  
 出典: 成合英樹 他, シビアアクシデントに関する熱流動研究の最近の動向, 日本原子力学会誌, 第39巻, 第 6, p. 739, 1997

## 3.実施結果(9/39)

### 3.3 安全評価手法の開発(未臨界状態の維持機能評価)①実施内容

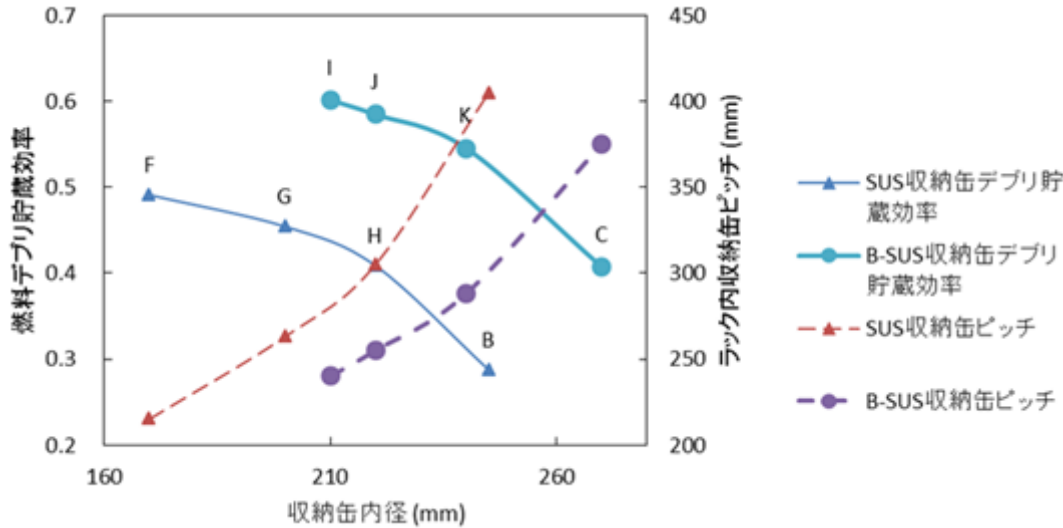
平成27年度は、収納缶の未臨界設計要求条件の整理を目的として、以下の検討を行った。

- 臨界安全の観点から**収納缶条件(中性子吸収材の適用等)とプール保管時の効率**をサーベイし、収納缶の内径案を策定
- 収納缶の燃料デブリが水素滞留防止フィルターからプールや移送容器内へ放出された場合の臨界影響を評価
- **燃料デブリ取り出しにおける燃料デブリ切削作業の負荷低減に向け、設計評価基準( $K_{\text{eff}}$ )の緩和、燃料条件( $U_{235}$ 濃縮度等)のクレジット採用、収納缶への中性子吸収材の適用による**収納缶内径の拡大効果をパラメータサーベイ****

# 3.実施結果(10/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(未臨界状態の維持機能評価) ②評価条件と評価結果

収納缶条件と臨界安全上のプール保管時の効率をサーベイした。



収納缶材料、収納缶内径、プール保管効率の関係例

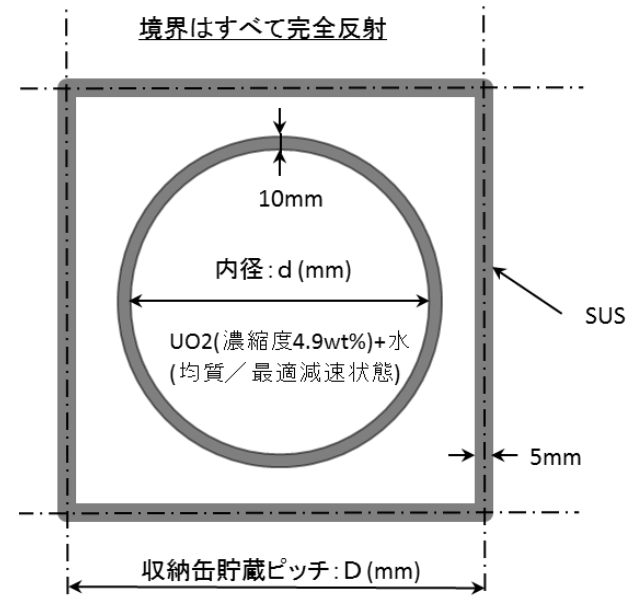
- ・**収納缶に中性子吸収材を適用する場合、SUS製の収納缶よりプール保管時のピッチを小さくできるため、プール保管効率が高い。**
- ・**収納缶内径を、臨界安全上の評価基準限度近傍まで拡大させた場合、収納缶ピッチも増加し、プール保管効率は低下する。**



収納缶内構造およびプール保管効率の観点から、収納缶を中空とし、内径220mmとすることを基本方針とする。

プール保管効率評価の収納缶条件

記号	収納缶		
	材質	内径[mm]	内部中性子吸収材
B	SUS	245	なし
C	B-SUS	270	なし
F	SUS	170	なし
G	SUS	200	なし
H	SUS	220	なし
I	B-SUS	210	なし
J	B-SUS	220	なし
K	B-SUS	240	なし



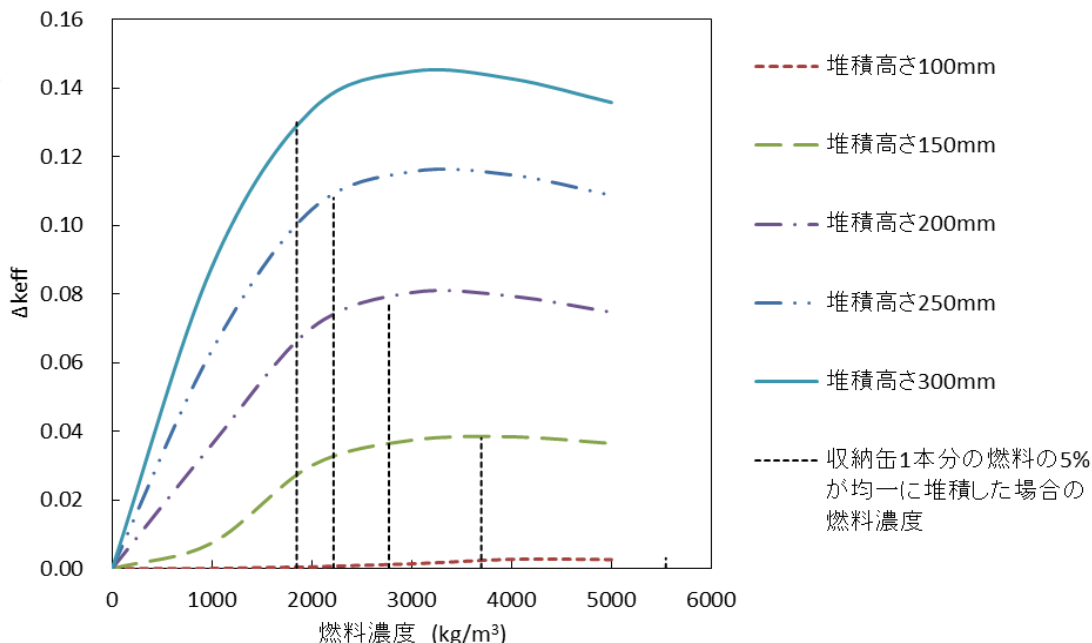
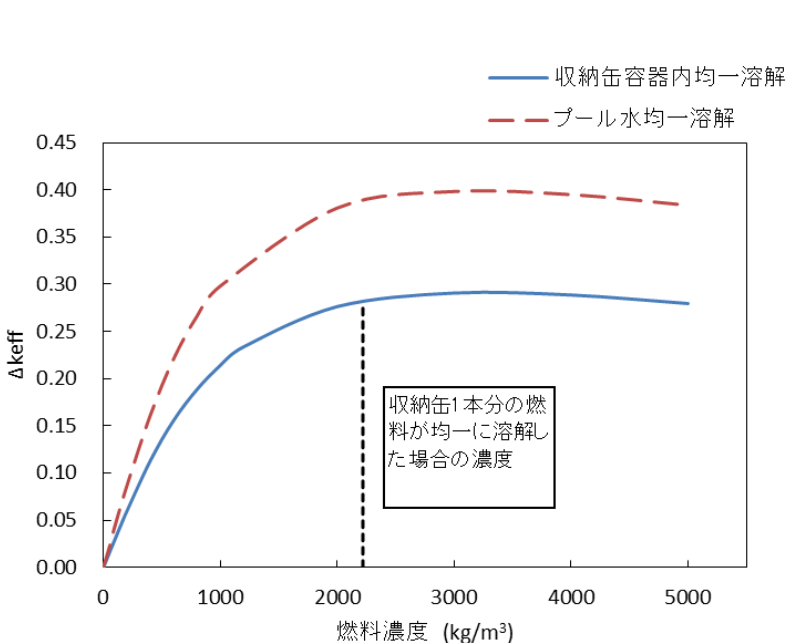
保管効率 = 収納缶面積 / ラック面積

# 3.実施結果(11/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(未臨界状態の維持機能評価) ②評価条件と評価結果

収納缶に水素ガスパージ用のフィルターを設置する場合を想定し、収納缶からの移送容器内水およびプール水への**燃料デブリ放出に対する臨界感度評価**を、以下の条件をベースに実施した。

- 収納缶条件は、SUS製、厚さ10mm、内径220mm、無限長
- 燃料デブリ条件は、ペレット最高濃縮度のUO<sub>2</sub>と水の最適減速状態
- 収納缶移送容器は、内径700mm、高さ5000mm、収納缶4本収納



移送容器内およびプール内に燃料デブリが均一溶解する場合

移送容器内に燃料デブリが堆積する場合

### 燃料デブリの放出に対する臨界感度評価例

- 評価基準( $k_{eff}$ )0.95の1.0に対する余裕である0.05程度に抑えるには、移送容器内への収納缶からの燃料デブリの放出許容量は、約100 kg/m<sup>3</sup>である。また、移送容器に燃料デブリが堆積する場合、許容高さは約170mmとなる。
- 燃料デブリ粒径分布等、収納物性状に応じたフィルター仕様の設定が必要である。

# 3.実施結果 (12/39)

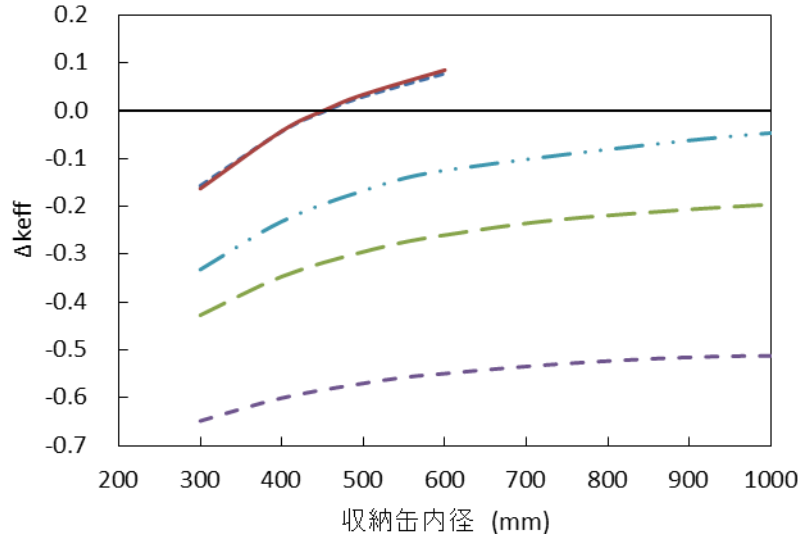
## 3.3 安全評価手法の開発(未臨界状態の維持機能評価)②評価条件と評価結果

燃料デブリ取り出しにおける燃料デブリ切削作業の負荷低減に向け、収納缶内径の拡大を検討した。RPV / PCV領域ごとに燃料デブリ条件を仮定し、臨界安全上の燃料デブリ収納缶内径を評価した。

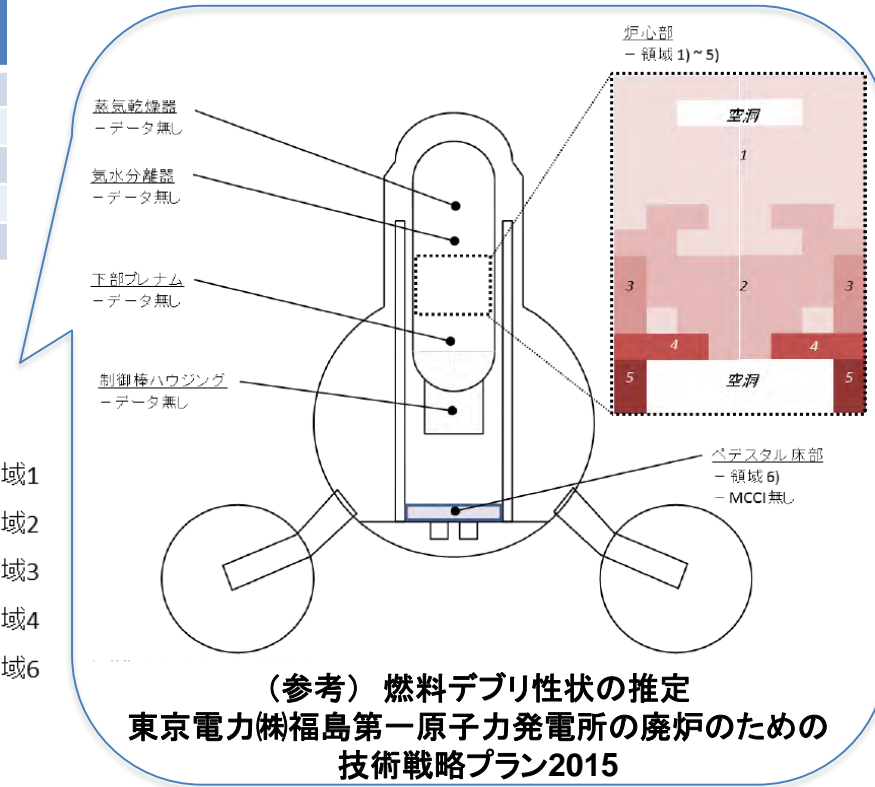
領域ごとに仮定した燃料デブリ条件

領域	含水率 (wt%)	UO <sub>2</sub> 濃度 (wt%)	SUS混合率 (wt%)	ZrO <sub>2</sub> 濃度 (wt%)
1 (上部)	9.3	86	0.05	4.65
2 (中心部)	12	68	0.51	19.49
3 (中心部外周)	12	43	33	12
4 (下部)	16	18	41.7	24.3
6 (ペDESTAL床部)	16	40	13	31

領域5は、U, Pu濃度が低いため、評価対象から除外



- 領域1
- 領域2
- 領域3
- 領域4
- · - 領域6



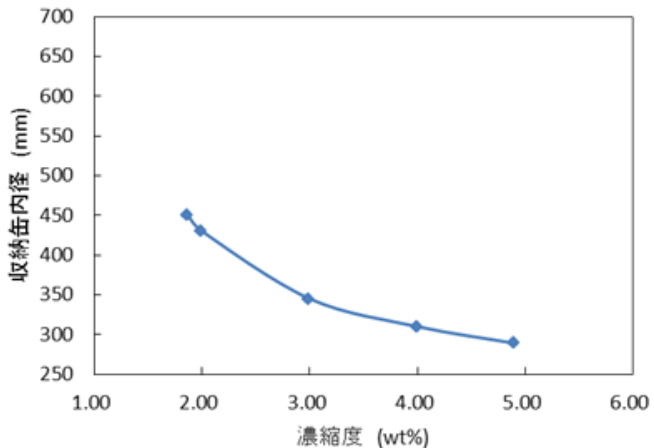
RPV / PCV領域ごとに燃料デブリ条件を仮定した場合の収納缶内径の臨界感度評価例 (U<sub>235</sub>濃縮度を炉内平均と設定)

- ・臨界安全上、領域1、2では約450mm、領域6では1000mm以上の収納缶内径を設定可能である。領域3、4では臨界安全上の収納缶内径に対する制限はない。

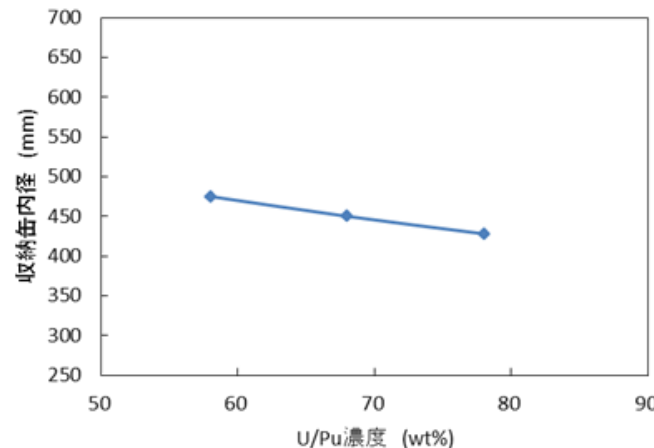
# 3.実施結果(13/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(未臨界状態の維持機能評価) ②評価条件と評価結果

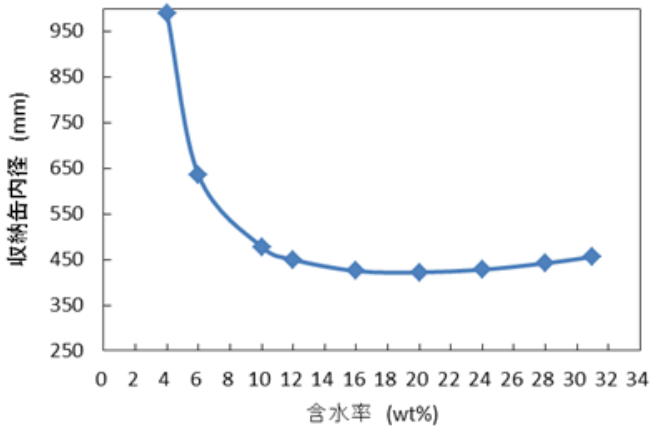
領域2の燃料デブリ条件をベースとした、燃料デブリ成分の収納缶内径への影響評価例を示す。  
(収納缶内径に対する感度が低いZrO<sub>2</sub>濃度で調整)



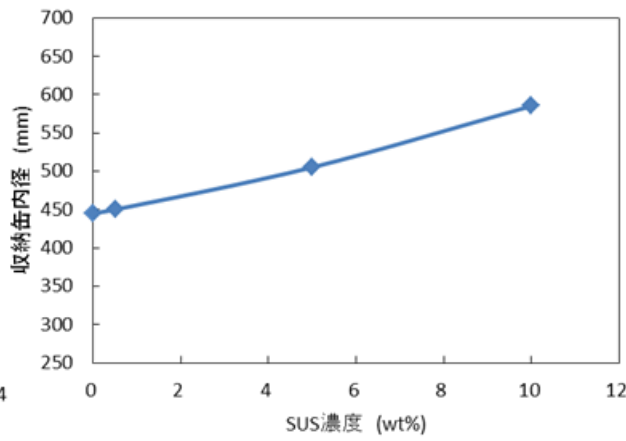
U<sub>235</sub>濃縮度の感度評価



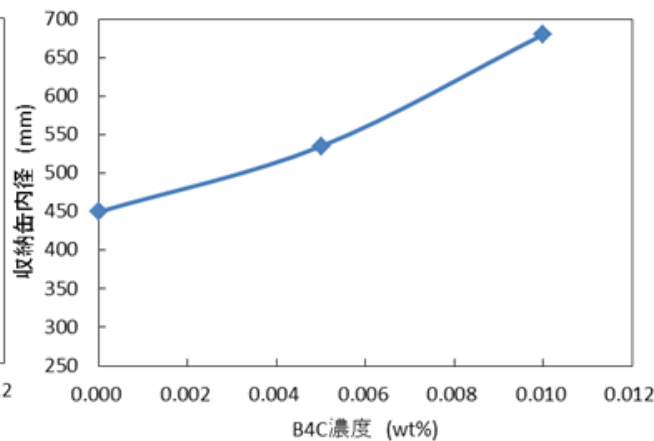
UO<sub>2</sub>濃度の感度評価



含水率の感度評価



SUS混合率の感度評価



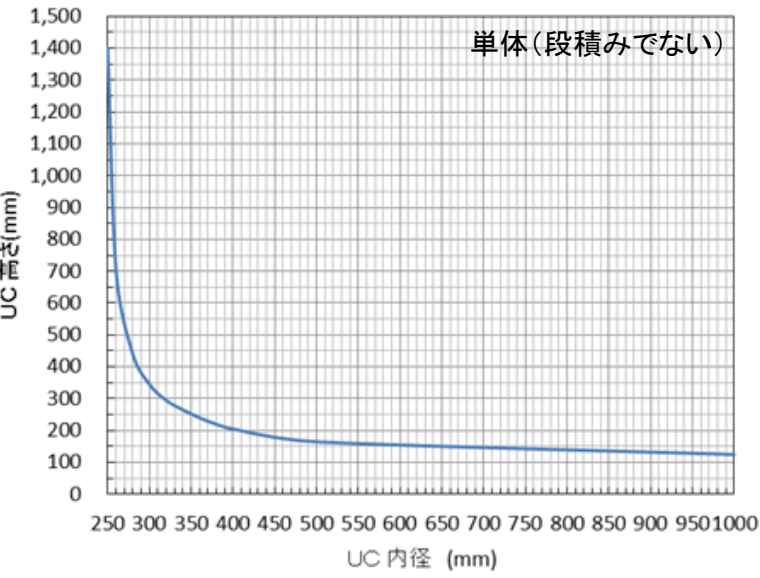
B<sub>4</sub>C濃度の感度評価



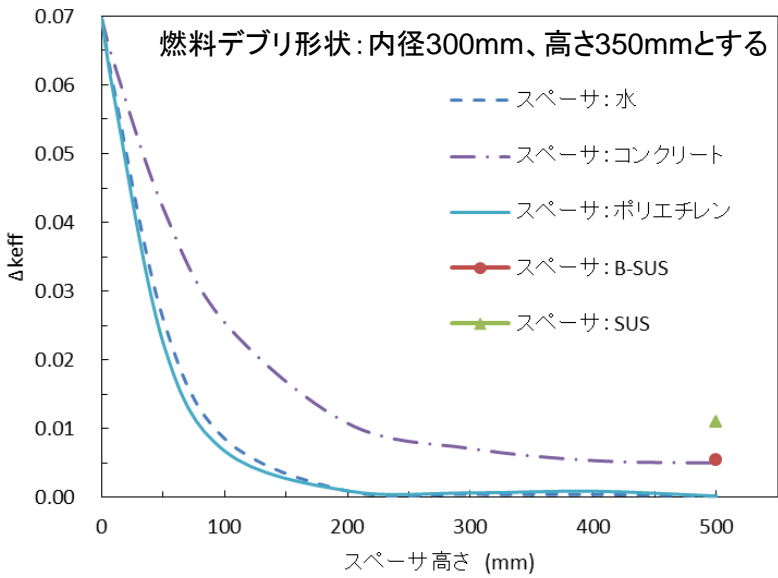
# 3.実施結果(14/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(未臨界状態の維持機能評価) ②評価条件と評価結果

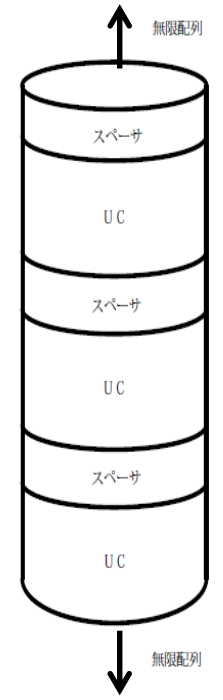
燃料デブリの軸方向高さを制限した場合の、臨界安全上の燃料デブリ収納缶内径を評価した。  
 (燃料デブリ条件は、「ペレット最高濃縮度のUO<sub>2</sub>と水の最適減速状態」)



未臨界維持可能な燃料デブリ外径と高さの関係評価例



収納缶軸方向に燃料デブリを段積みする場合の  
 スペーサ効果の評価例



スペーサ効果評価モデル

- ・収納缶単体で、高さを350mmにする場合、収納缶内径を約300mmにできる。また、高さが200mm以下であれば、収納缶内径を400mm以上にすることができる。
- ・径の大きな燃料デブリを段積みする場合、100～200mm程度の中性子隔離のためのスペーサが必要である。

# 3.実施結果(15/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(未臨界状態の維持機能評価)③まとめ

- プール保管効率も考慮した臨界安全のパラメータサーベイ結果より、平成26年度と同じ、収納缶内径を220mmとすることを提案する。今後、収納・移送・保管における方式(湿式、半乾式、乾式)の見直しがあれば、臨界評価への反映を検討する。
- 燃料デブリ条件の緩和は、臨界安全設計裕度増加の効果が大きく、収納缶内径の拡大につながると評価された。しかし、評価条件の妥当性や代表性の説明が難しく、現時点の燃料条件としては、「ペレット最高濃縮度の $UO_2$ と水の最適減速状態」の適用が適切と判断される。
- 先行例を考慮すると、臨界安全の評価基準の緩和は難しいと考えられる。収納缶の設計基準としては、「 $k_{eff} \leq 0.95$ 」の適用が適切と判断される。
- 今後、燃料デブリ・炉内構造物取り出し技術開発PJ、性状把握PJ等と、切削作業等からの収納缶形状の要求や、収納缶への収納時の現場測定・分析とあわせた収納缶取扱方法を調整する。また、収納缶内径拡大のため、臨界管理PJで検討中の臨界安全の評価基準や燃料デブリ条件のクレジット採用等について継続検討する。

# 3.実施結果(16/39)

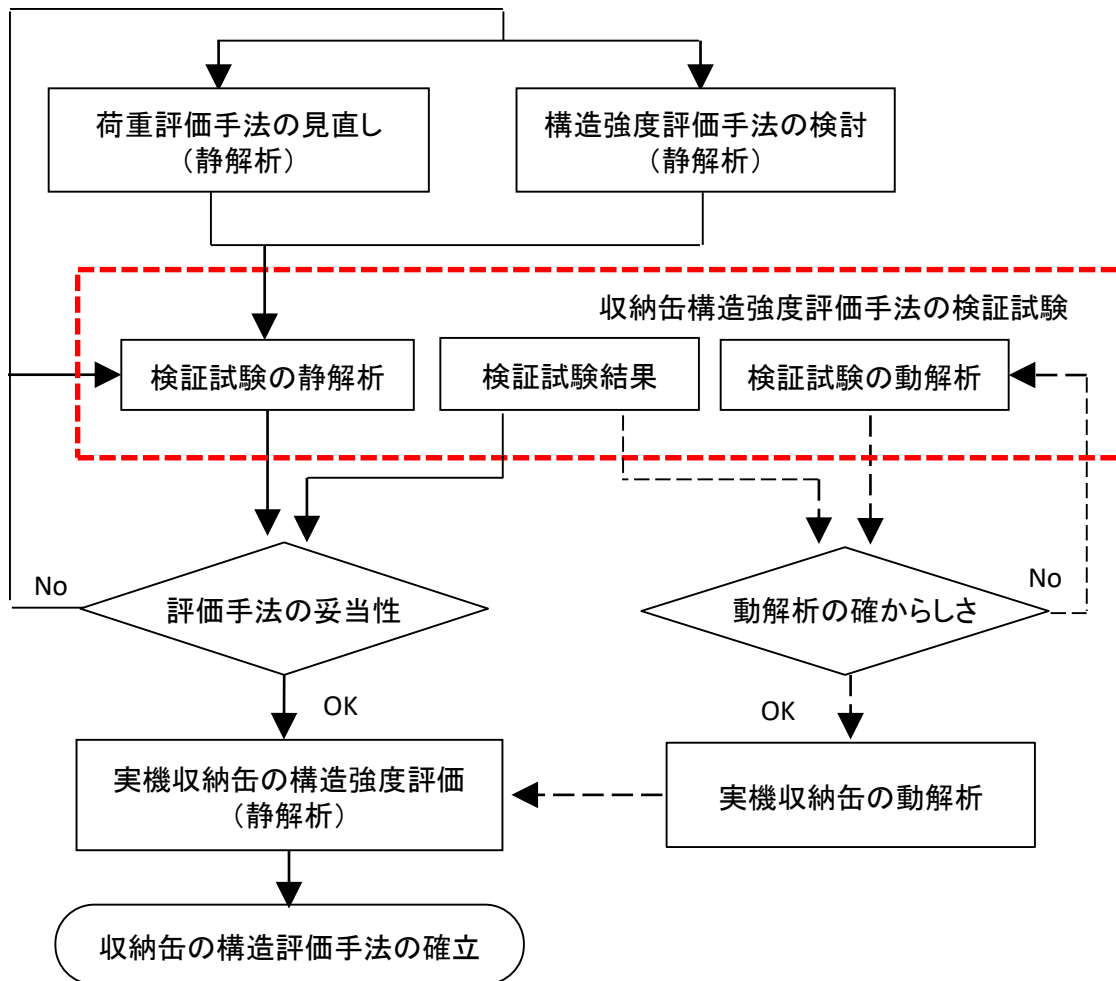
## 3.3 安全評価手法の開発(未臨界状態の維持機能評価)③まとめ

項目	平成27年度の評価内容	臨界安全上の影響評価結果	平成27年度末での方針	方針設定の考え方	
評価基準	評価基準( $k_{eff}$ )の緩和を検討	$k_{eff} \leq 0.98$ でも収納缶内径は有意に大きくならない	統計誤差(3 $\sigma$ )を含んだ $k_{eff} \leq 0.95$	1F燃料移送・共用プールラックの実施計画の設計評価基準を考慮	
燃料デブリ条件	$U_{235}$ 濃縮度	炉内平均～ペレット最高濃縮度で収納缶内径感度評価	ペレット最高濃縮度から炉内平均に下げること、約150mmの収納缶内径拡大可能	ペレット最高濃縮度	設定値を超えない可能性を否定できない
	U, Pu濃度	標準的な燃料デブリより、58～78%で収納缶内径感度評価	10wt%濃度を下げることで、約20mmの収納缶内径を拡大可能	燃料デブリを全量 $UO_2$ とする	燃料デブリ内のU, Pu濃度が不明であり、設定値を超えない可能性を否定できない
	SUS混合率	標準的な燃料デブリより、0～10wt%で収納缶内径感度評価	10wt%の混合で、収納缶内径を約140mm拡大可能	考慮しない	燃料デブリ内のSUS混合率が不明であり、設定値を限定できない
	含水率	・密度1000kg/m <sup>3</sup> ・最適減速状態を考慮 ・標準的な燃料デブリより、4～31%で収納缶内径感度評価	10%以下に下げること、収納缶内径を大幅に拡大可能	最適減速状態	燃料デブリ内の含水率が不明であり、設定値を限定できない
	B <sub>4</sub> C混合率	標準的な燃料デブリより、0～0.01%で収納缶内径感度評価	0.01wt%の混合で収納缶内径を約230mm拡大可能	考慮しない (Gd混合率も同様)	燃料デブリ内のB <sub>4</sub> C混合率が不明であり、設定値を限定できない
収納缶条件	収納缶材料	SUS、B-SUS(1%天然B添加)製 収納缶の内径感度評価	収納缶材料の考慮で約25mm、B添加材でさらに約25mm収納缶内径を拡大可能	収納缶材料には、中性子吸収材を使用しない	収納缶数、燃料デブリの収納性を考慮する
	収納缶内中性子吸収材設置	B-SUS板、B-SUS(1%天然B添加)格子、B <sub>4</sub> C(天然B)管設置による収納缶内径感度評価	収納缶中空部に吸収材を設置しない場合、最も大きな塊状の燃料デブリを収納可能	収納缶を中空とする (B添加板の貼付等は可)	燃料デブリの寸法を中性子吸収材の構造にあわせる必要がある
	軸方向+中性子隔離材	軸方向分割構造における収納缶内径評価	燃料デブリ高さ寸法を小さくすることで、設計余裕は増加し、収納缶内径を拡大化可能	考慮しない	収納缶内スペーサの健全性担保が困難
燃料デブリの放出	移送容器、プールへの均一溶解、堆積の評価	燃料デブリの放出許容量は、約100 kg/m <sup>3</sup>	収納缶からの放出量を限定する	評価基準( $k_{eff}$ )0.95の1.0に対する余裕である0.05とする	

# 3.実施結果(16/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(構造強度の評価) ①実施内容

平成27年度は収納缶の構造強度評価手法の確立を目的とした検討を行う。



- 平成26年度検討結果では荷重が大きく算出され、平成26年度の収納缶仕様では構造健全性が確保されなかった。
- 荷重が大きく算出された要因として、塑性変形を考慮していないことが考えられた。



- 塑性変形を考慮した荷重評価手法について検討する。
- 得られた荷重を条件とした静的評価による構造強度評価手法について検討する。
- 構造強度評価手法の検証を目的とした検証試験を実施する。

平成27年度 構造強度評価検討フロー  
(実線は静的評価の流れを、破線は動的評価の流れを示す。)

# 3.実施結果(17/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(構造強度の評価) ②試験条件(1/3)

### 1) 燃料デブリおよびUCの収納缶内への落下模擬試験

想定事象	試験条件							実機条件例(平成26年度検討結果)					
	試験体 スケール*1	収納缶 寸法*1 (mm)		落下物 外径*2 (mm)	落下物 重量*3 (kg)	落下 高さ*4 (m)	温度*5	収納缶 寸法 (mm)		落下物 外径 (mm)	落下物 重量 (kg)	落下 高さ (m)	温度 (°C)
		内径	高さ					内径	高さ				
燃料デブリの 収納缶内へ の落下	1/2	108	750	10.3	168	0.26	室温	220	4000	105	67	5.5	300
	1/2	108	750	51.5	168	0.26	室温						
UCの収納缶 内への落下	1/2	108	750	103.1	171	0.40	室温	220	4000	210	105	5.5	300

・平成26年度は収納缶の材質をSUS304Lとして評価を実施した。平成27年度は素材の入手性の観点から、収納缶試験体の材質はSUS304Lと同系統材料であるSUS304とした。材料の機械的物性は発電用原子力設備規格(JSME S NJ1-2012)およびキャスク構造解析研究分科会(JSME RC62)にもとづくものとした。

\*1 今回設定した試験設備の制約上、収納缶模擬体の内径および肉厚を実機の1/2スケールとした。収納缶模擬体の高さは、動解析による予備解析を行い、実機変形挙動を模擬できるために必要な高さを評価した。評価結果より、収納缶模擬体の高さは750 mmとした。

\*2 燃料デブリの衝突面積による違いを確認するため、燃料デブリ模擬体衝突部の外径は10.3 mmと51.5 mmの2種類とした。UC模擬体衝突部の外径は実機条件例の1/2スケールとした。

\*3 落下物重量は、今回選択した試験設備の制約にもとづき設定した。これらの重量は試験体の計画図から算出した値である。測定値は、燃料デブリ模擬体は167 kg、UC模擬体は169 kgであった。

\*4 落下高さは、実機条件例における落下物の落下エネルギーと試験条件における落下物の落下エネルギーが一致するように設定した。

\*5 300°Cで試験を実施した場合、温度ムラにより変形挙動が変わり模擬解析が困難になる可能性があるため、試験は室温で行うこととした。なお、300°Cにおける材料物性を評価条件とすることで解析により評価できるため、実機条件での試験は実施する必要はない。

# 3.実施結果(18/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(構造強度の評価) ②試験条件(2/3)

### 2) 収納缶の斜め45度落下模擬試験

想定事象	試験条件					実機条件例(平成26年度検討結果)			
	試験体 スケール*1	収納缶 内径*1 (mm)	落下物 重量*2 (kg)	落下 高さ*3 (m)	温度*4	収納缶 内径 (mm)	落下物 重量 (kg)	落下 高さ (m)	温度 (°C)
収納缶の 落下 (斜め45度)	1/2	108	140	1.5	室温	220	846	9	300

- ・収納缶の落下事象において、収納缶が斜めに傾いて落下することにより鉛直落下に比べ荷重や収納缶変形が大きくなる可能性が考えられることから、斜め落下を試験条件に加えることとした。本試験では、代表的な角度として45度傾いた条件とした。
- ・今回選択した試験設備の制約上、収納缶模擬体自身を45度の角度で落下させることはできなかつたため、収納缶を被衝突側として固定し、上から落下物を落下させる体系とした。
- ・1)と同じ理由により、収納缶試験体の材質はSUS304とした。材料の機械的物性は発電用原子力設備規格(JSME S NJ1-2012)およびキャスク構造解析研究分科会(JSME RC62)にもとづくものとした。
- \*1 1)と同様に、今回選択した試験設備の制約上、収納缶模擬体の内径および肉厚を実機の1/2スケールとした。収納缶模擬体を底部を斜め45度に傾けた状態で切り取った形状とし、支持板に溶接して固定した。
- \*2 1)と同様に、落下物重量は、今回選択した試験設備の制約にもとづき設定した。
- \*3 落下高さは、動解析による予備解析を行い、落下物の落下エネルギーが全て収納缶模擬体に吸収されるように落下高さを設定した。
- \*4 1)と同じ理由により、試験温度は室温とした。

# 3.実施結果(19/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(構造強度の評価) ②試験条件(3/3)

### 3) 収納缶の落下模擬試験

想定事象	試験条件							実機条件例(平成26年度検討結果)				
	試験体 スケール*1	収納缶 寸法*1 (mm)		落下物 重量*2 (kg)	落下 高さ*3 (m)	落下 角度*4 (度)	温度*5	収納缶 寸法 (mm)		落下物 重量 (kg)	落下 高さ (m)	温度 (°C)
		内径	高さ					内径	高さ			
収納缶の落下 (鉛直落下)	1/3	73.9	1347	32.1	9	0	室温	220	4000	846	9	300
収納缶の落下 (重心落下)	1/3	73.9	1347	32.1	9	3	室温					

・収納缶の落下事象において、収納缶が斜めに傾いて落下することにより鉛直落下に比べ荷重や収納缶変形が大きくなる可能性が考えられることから、斜め落下を試験条件に加えることとした。本試験では、収納缶衝突部において最も厳しい条件と考えられる、収納缶の重心軸上に底面端部が位置する姿勢で落下する条件(重心落下)とした。

・1)と同じ理由により、収納缶試験体の材質はSUS304とした。材料の機械的物性は発電用原子力設備規格(JSME S NJ1-2012)およびキャスク構造解析研究分科会(JSME RC62)にもとづくものとした。

\*1 今回選択した試験設備の制約上、収納缶模擬体の内径、肉厚、高さを実機の1/3スケールとした。なお、表に示した高さは収納缶胴部の高さであり、蓋の高さは含まれていない。

\*2 落下物重量は、実機条件例の(1/3)<sup>3</sup>となるように選択した。重量調整のため、収納缶模擬体にはバラストを挿入した。測定値は、31.5kg または31.7 kgであった。

\*3 落下高さは、実機条件例と同じ9 mとした。

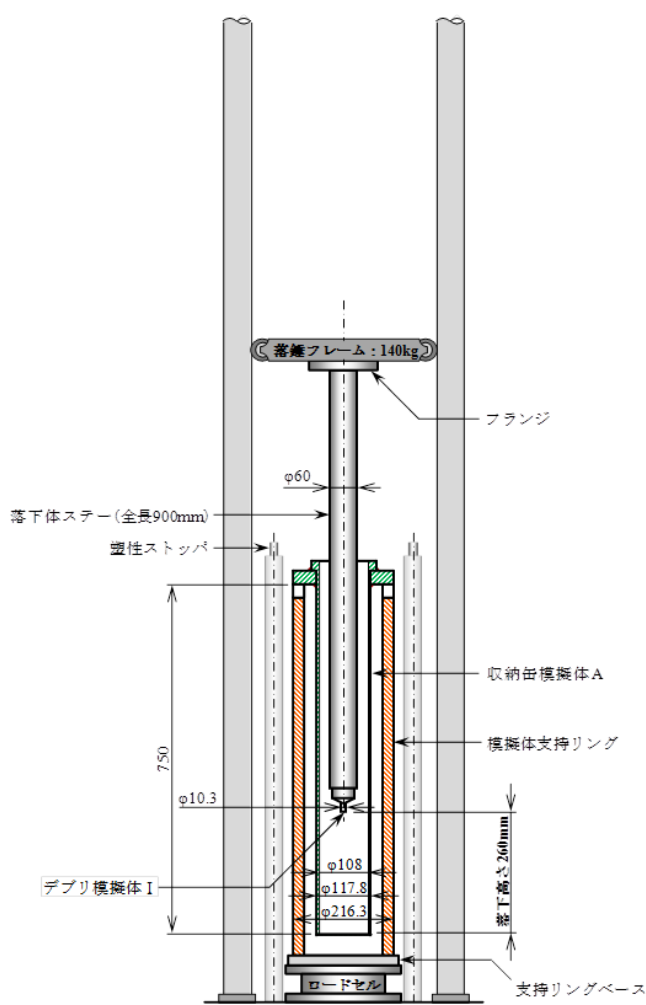
\*4 落下時の収納缶模擬体の落下角度は、鉛直落下は0度とし、重心落下は3度とした。重心落下の角度は収納缶密度が一定と仮定して算出した値であるが、実際の試験では落下角度は2度で行った。

\*5 1)と同じ理由により、試験温度は室温とした。

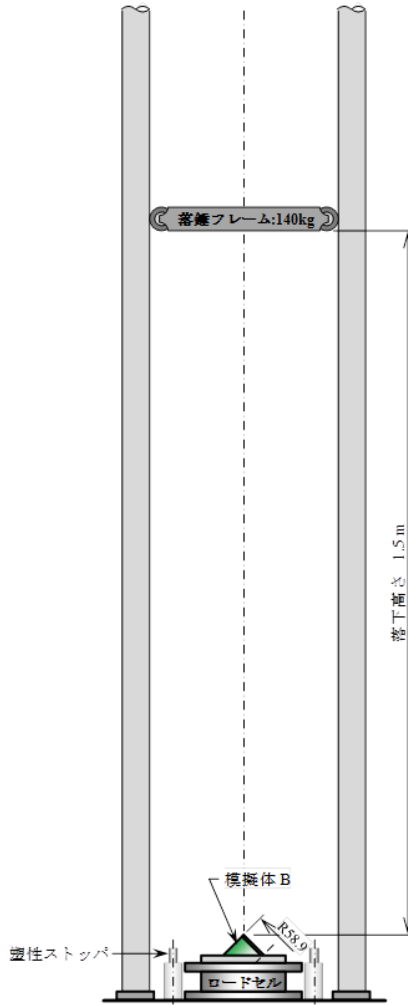
# 3.実施結果(20/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(構造強度の評価) ③試験方法

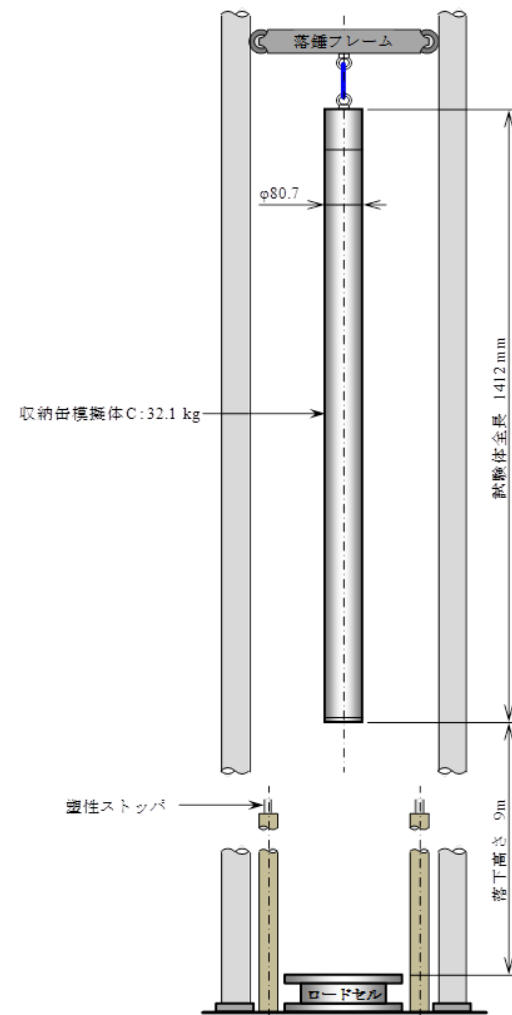
検証試験概略図を以下に示す。



燃料デブリおよびUCの収納缶内への落下模擬試験概略図例



収納缶の斜め45度落下模擬試験概略図

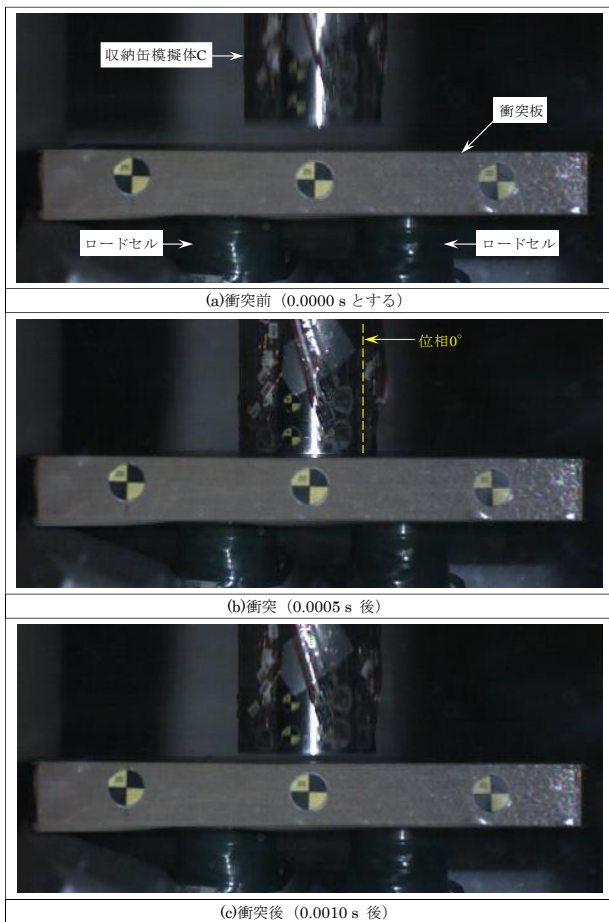


収納缶の鉛直落下模擬試験概略図

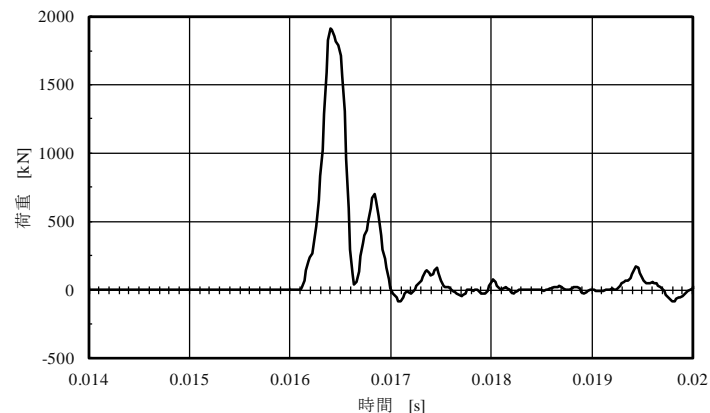


# 3.実施結果(21/39)

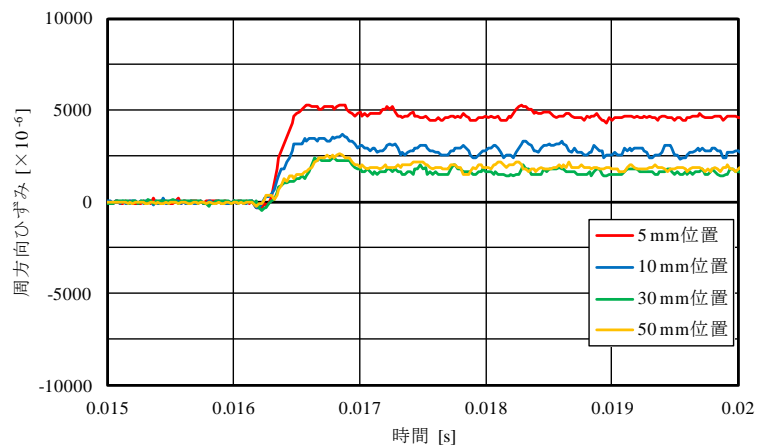
## 3.3 安全評価手法の開発(構造強度の評価) ④試験結果例



収納缶模擬体の鉛直落下試験状況



収納缶の鉛直落下試験における荷重の時刻歴例



収納缶の鉛直落下試験におけるひずみの時刻歴例

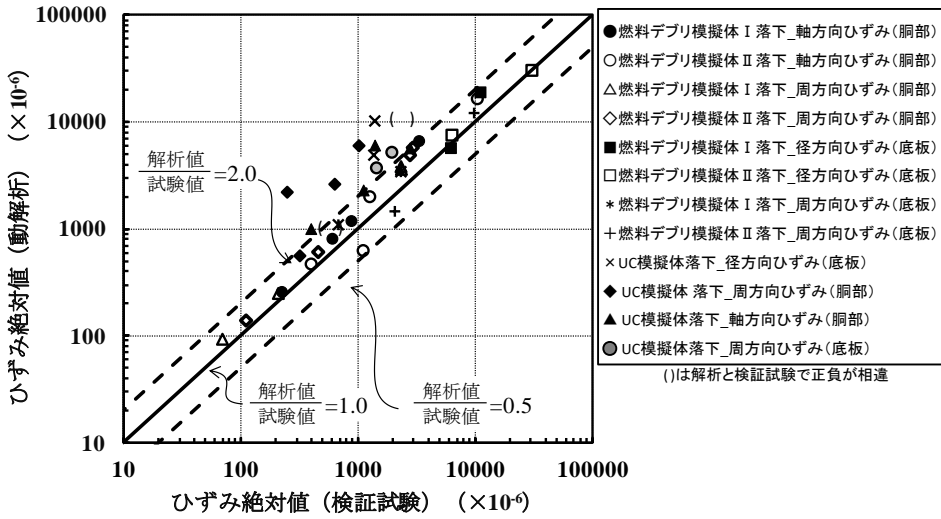
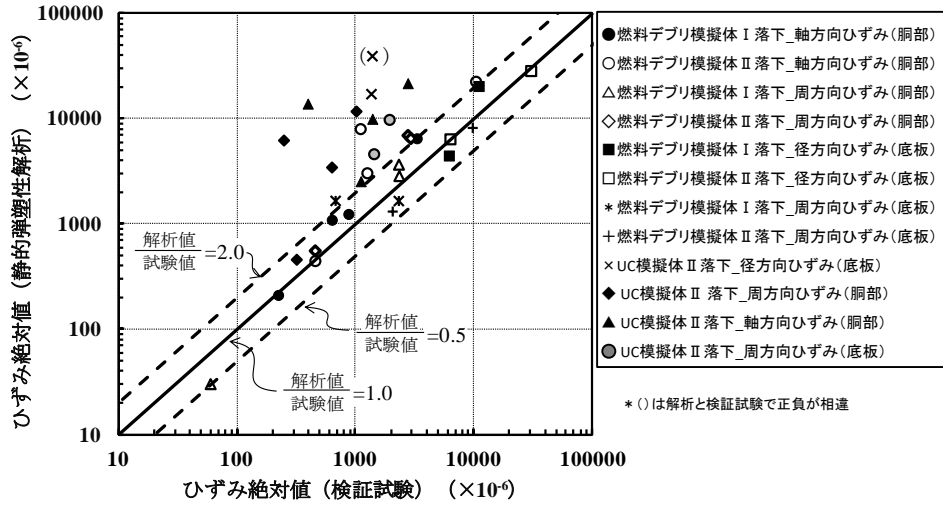
- ・解析の妥当性確認に資するデータが取得できた。
- ・平成26年度検討結果と同様に大きな荷重が発生した。
- ・試験体に大きな塑性変形が生じたが、目視で確認できる割れなどの破壊は発生しなかった。

# 3.実施結果 (22/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(構造強度の評価) ⑤解析結果との比較例

### 静解析結果(ABAQUS)との比較例

### 動解析結果(LS-DYNA)との比較例



検証試験の最大ひずみと  
静的弾塑性解析のひずみの比較例

検証試験および動解析における最大ひずみの比較

- ・静的弾塑性解析により、検証試験結果で得られたひずみをおおむね評価できた。
- ・動解析により、検証試験で得られたひずみをおおむね評価できた。

### 3.実施結果(23/39)

#### 3.3 安全評価手法の開発(構造強度の評価) ⑥まとめ

- 静的弾塑性解析による荷重の見直しを実施した。本評価手法においても、荷重は非常に大きな値となった。
- 静的弾塑性解析および動解析により、検証試験結果で得られたひずみをおおむね評価できた。今後、これら評価手法の収納缶構造強度評価への適用性について検討する。
- 検証試験結果に対する静解析を実施した結果、本評価条件では平成26年度に設定した**収納缶設計に対策が必要**であることがわかった。平成28年度は荷重低減策(荷重低減構造等)の検討に加え、運用方法、構造強度評価(荷重評価手法、構造強度評価手法、評価基準の設定)などによる総合的な検討・判断を行い**収納缶設計の成立性を確認する**。

## 3.実施結果(24/39)

### 3.3 安全評価手法の開発(材料の経年劣化の評価)①評価の考え方

#### (1)検討の位置づけ

長期保管における環境条件を想定し、一般的に入手できる材料から経年劣化(腐食)を文献ベースで評価し、材料候補をスクリーニングする。

#### (2)環境条件の設定

・燃料デブリの保管期間:50年間

・想定する水質

塩化物イオン(燃料デブリ内の海水溶出等を想定):最大100ppm(PCV健全性評価等と同値)

水素イオン指数(pH):4~12程度(ホウ酸添加、Ca(コンクリート)による溶出等を想定)

過酸化水素水(水の放射線分解、微生物):最大85ppm(暫定:試算等を参考に設定)

その他:五ホウ酸ナトリウム、ホウ酸の添加を想定

・環境

収納缶内の燃料デブリは冠水(プール保管):65°C(プール水の管理温度を想定)

収納缶内の燃料デブリは非冠水(プール保管):80°C

(窒素パージにより乾燥が進むことを想定)

乾式保管(燃料デブリは真空乾燥等での乾燥を想定):~300°C

#### (3)材料

・炭素鋼(全面腐食、あるいは五ホウ酸ナトリウム添加による不動態化を想定)

・オーステナイト系ステンレス鋼と炭素鋼の組み合わせ(炭素鋼の犠牲陽極による防食)

・高耐食合金(オーステナイト系ステンレス鋼、二相ステンレス鋼、Ni基合金、Ti合金)

# 3.実施結果 (25/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(材料の経年劣化の評価)②腐食環境の検討

### (1)湿式環境

すきま腐食感受性を評価(孔食より保守的)するにあたり、文献に基づいて**腐食電位を推定**

- ・過酸化水素濃度(85ppm/150°C)の腐食電位: ~450mV vs SHE (SHE: 標準電極電位)
- ・温度補正(150°C⇒65°C): ~550mV vs SHE

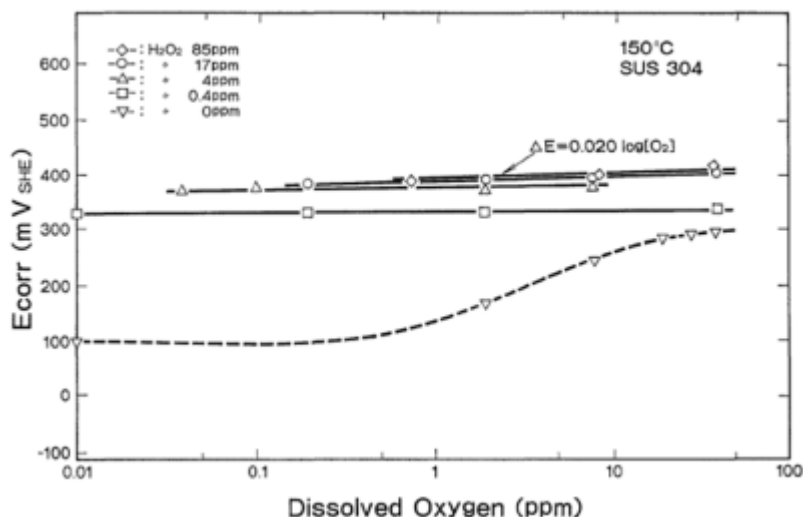
(20°C~90°Cの腐食電位が同等の結果を示すデータが※2の文献において示されている。(記載は省略))

### (2)半乾式

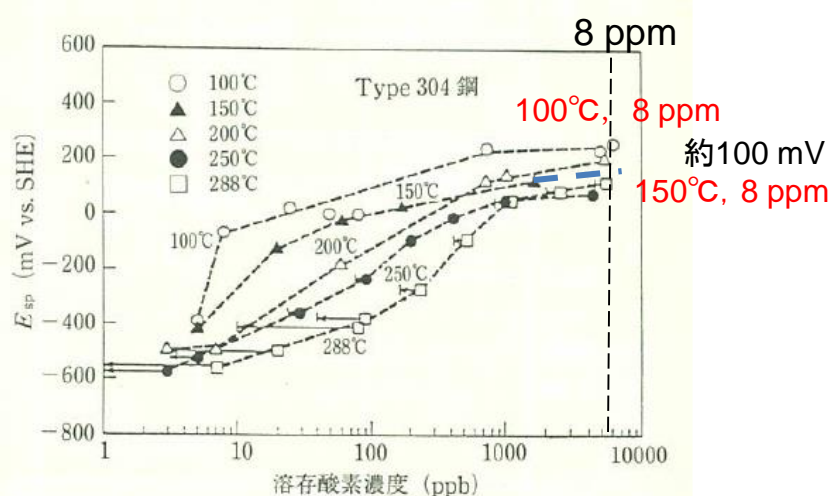
塩化物イオンの濃縮の観点で湿式よりも厳しい(定性的評価)

### (3)乾式

腐食の前提となる水はほとんどない(相対湿度の管理(40RH%以下)が前提)



(a)溶存酸素量と腐食電位の関係※1  
(過酸化水素毎の腐食電位)



(b)溶存酸素量と腐食電位の関係※2  
(温度毎の腐食電位)

※1: 菊池他(1987): “高温水中におけるSUS304ステンレス鋼の腐食電位に及ぼす過酸化水素および溶存酸素の影響”, 防食技術, Vol.36

※2: 腐食防食協会(2000): “腐食・防食ハンドブック”, 丸善

# 3.実施結果(26/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(材料の経年劣化の評価)③材料の耐食性の検討

### (1)炭素鋼

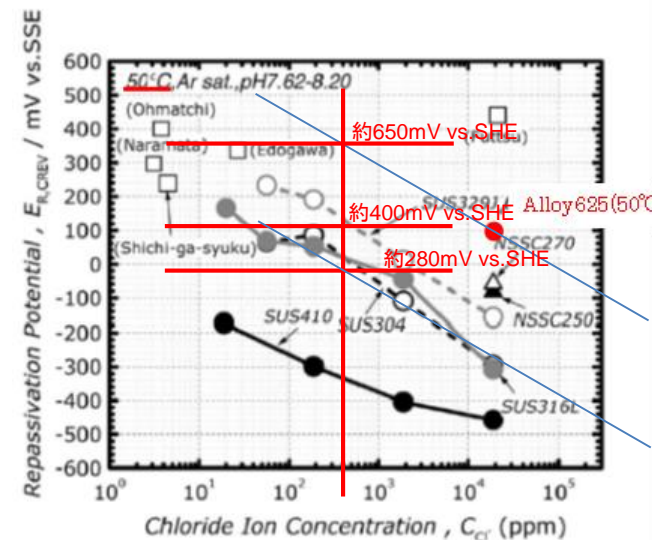
- ・一般環境:腐食量管理で対応可能(暴露時間に比例※1)  
ただし、プール保管では外面腐食があるので実質的に適用困難
- ・五ホウ酸ナトリウム(アルカリ性)添加:腐食抑制の可能性はあるが知見の蓄積が必要
- ・ホウ酸添加:酸性となり腐食進展速度が速まることから加速率の評価が必要

### (2)炭素鋼+オーステナイト系ステンレス鋼(外面をSUS316Lステンレス鋼)

- ・すきま部の鉄の加水分解によるpH低下は3~4程度※2であり、ステンレス鋼の不動態皮膜は維持される(SUS316鋼の脱不動態化pH2.2~1.8※3)
- ⇒ステンレス鋼は保護されると予想(炭素鋼がすきま部で犠牲陽極として作用する実証データが少ないため検証要)

### (3)高耐食性合金 (想定腐食電位~550mV vs SHEですきま腐食感受性を評価)

- ・オーステナイト系ステンレスSUS304、316の再不動態化電位は  
280mV vs SHE(塩化物イオン100ppm)程度と感受性あり  
(過酸化水素0.4ppm程度で塩化物イオン10ppm程度以下に管理が必要)
- ・二相ステンレスSUS329J4L:約400mV vs SHE(同)と  
感受性あり  
(過酸化水素10ppm程度で塩化物イオン10ppm程度以下に管理が必要)
- ・Ni基合金インコネル625™:650mV vs SHE(同)程度と健全
- ・Ti合金Ti-Gr.12:インコネル625以上の耐食性を有し健全



再不動態化電位と塩化物イオン濃度(50°C)※4

SSE: 銀塩化銀電極 +0.199 V vs. SHEの相当電位

※1: 腐食防食協会(1986):“腐食技術便覧”, 日刊工業新聞社

※2: 小若正倫(1983):“金属の腐食損傷と防食技術”, アグネ承風社

※3: ステンレス協会(2000):“ステンレス鋼データブック”, 日刊工業新聞社

※4: 松橋他(2009):“海水系環境中におけるステンレス鋼のすきま腐食寿命測定”, 新日鉄技報, 第389号

### 3.実施結果(27/39)

#### 3.3 安全評価手法の開発(材料の経年劣化の評価)④まとめ

海水成分の燃料デブリからの溶出、水の放射線分解等で生成される過酸化水素の影響を考慮すると、**ニッケル基合金以上の耐食材料の適用が必要。炭素鋼とステンレス鋼の組合せで耐食性向上が期待。過酸化水素の発生を想定した場合の評価**

	湿式環境	半乾式環境	乾式環境
炭素鋼 (全面腐食の腐食量管理またはアルカリによる不動態皮膜)	内面×～△:五ホウ酸ナトリウムを高濃度添加すると不働態皮膜が形成されるが、すき間腐食発生リスクが高い。	内面×:塩化物イオンの局所濃縮による腐食発生リスクは否定できない。	○ 腐食発生 の可能性 は低い
炭素鋼+オーステナイト系ステンレス (犠牲防食)	外面×:全面腐食するため特にプール水に接する外表面は美観上厳しい。	×:犠牲防食有効範囲が限定されるため、リスクあり。	
同上 (二重防御)	同上	△?:内面全面の炭素鋼では初期は炭素鋼と同様のリスクはあるがSUSとの二重防御で健全性維持の可能性あり。	
オーステナイト系ステンレス(不動態皮膜)	×:過酸化水素による腐食電位上昇の余裕がなく、すき間腐食発生リスク高。(過酸化水素0.4ppm程度でも塩化物イオン10ppm程度まで抑制する必要がある。)		
二相ステンレス (不動態皮膜)	△:過酸化水素等による腐食電位上昇の程度次第ですき間腐食発生可能性がある。(SUS329J4Lでは過酸化水素10ppmでも塩化物イオン20ppm程度まで抑制する必要がある。)		
ニッケル基合金 (不動態皮膜)	○:過酸化水素85ppmで塩素100ppm程度まで耐性が期待できる。(インコネル625™:外挿による類推)		
チタン及びチタン合金(不動態皮膜)	○:100ppm程度の低塩化物イオン濃度条件での、Ti-Gr.12の耐すき間腐食性はNi基合金より高く、すき間腐食発生可能性は低い。(チタンは水素脆化に対する感受性が高い材料だが、50年の使用期間では影響はないと推察。(評価要))		

暫定環境に基づき、以下の考え方で整理。

○:塩素イオン濃度100ppm、過酸化水素水濃度85ppmで耐食性が期待できる。

△:塩素イオン濃度10～100ppm、過酸化水素水濃度10～85ppmの環境で耐食性が期待できる。

×:塩素イオン濃度10ppm以下、過酸化水素水濃度10ppm以下の環境が必要と考えられる。

なお、半乾式環境における塩化物イオンの濃縮は不確定性を含んでおり検証が必要。(定性的に湿式よりも厳しい)

# 3.実施結果 (28/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(材料の経年劣化の評価)⑤今後の進め方

### (1)腐食環境の検討

#### ・移送・乾燥条件の想定

移送(湿式)、乾燥(加熱乾燥の場合)

短期だが高温環境下における塩化物イオンは材料の耐食性を著しく低下。(左図)

⇒状況に応じて移送中の環境緩和策を検討する。

#### ・保管環境条件

塩化物イオン濃度、過酸化水素水濃度

過酸化水素水は腐食電位の上昇への寄与大。

⇒水の放射線分解に関し、過酸化水素水の発生にも着目。

なお、過酸化水素水は有機物からも発生するのでこれら条件についても調整。

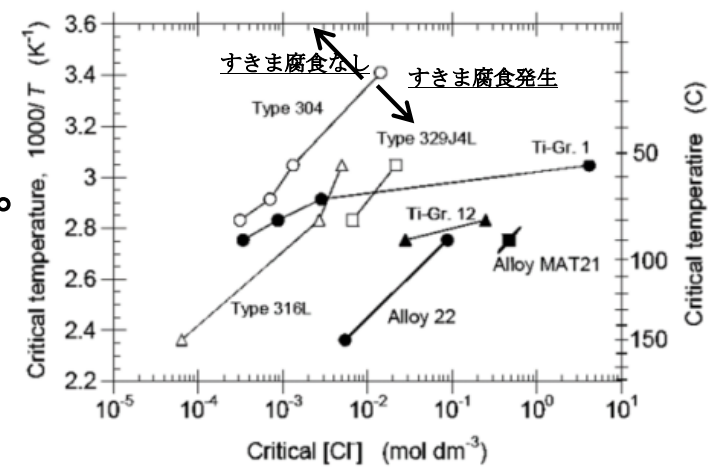
### (2)材料の試験も含めた知見の充実

#### ・保管、移送条件

オーステナイト系ステンレス鋼(SUS316L)+炭素鋼

保管条件に着目すると材料の入手、加工の観点で合理的選択

⇒すき間部で犠牲陽極として作用する炭素鋼の減肉に対する知見が乏しく試験による知見充実を計画。



すきま腐食発生における温度と塩化物濃度 (放射線によるH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>生成の影響がない場合)

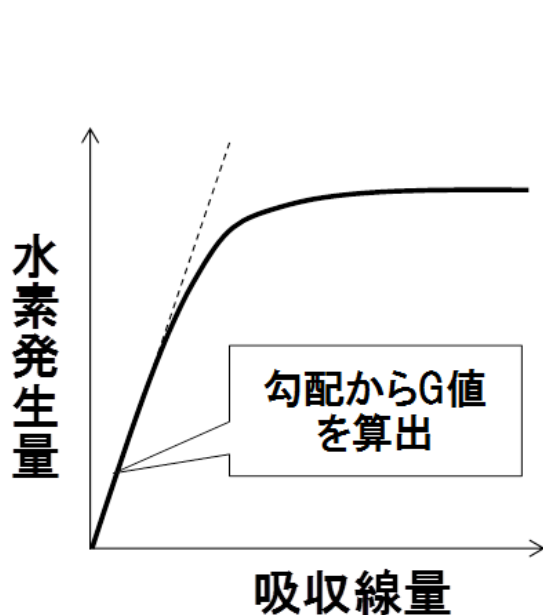
石川島播磨重工業㈱, 腐食防食協会, 腐食センター(2003): 革新的実用原子力技術開発フィジビリティースタディー分野平成14年度成果報告書「HLW処分容器材料としてのニッケル基合金の耐食性評価研究」, 財団法人 エネルギー総合研究所, p.14.



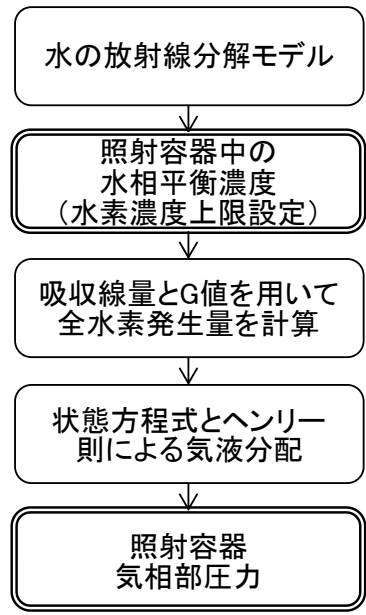
# 3.実施結果 (29/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(水素ガス発生に関する評価) ①実施内容

海水成分とヨウ素の共存体系における水素発生量への影響の評価を目的とした、海水成分とヨウ素の共存体系における水素発生量への影響評価試験を実施する。



G値の算出法の概要図



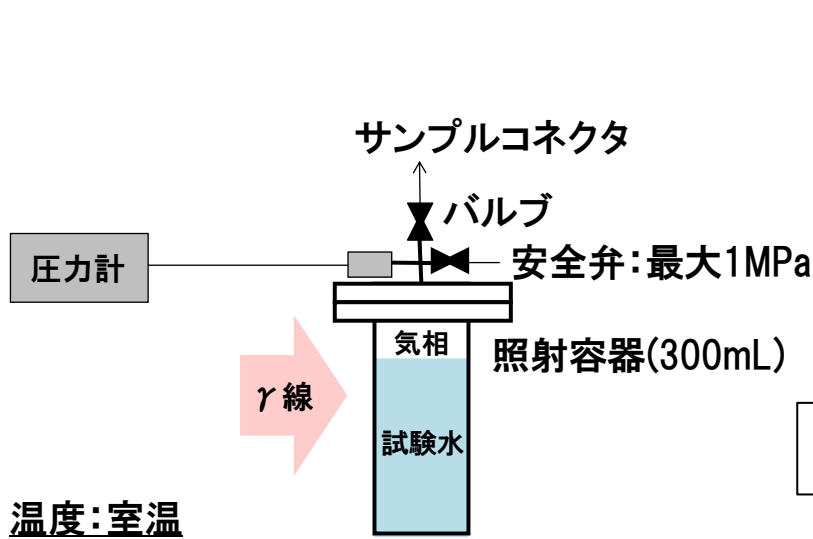
放射線分解モデルによる水素発生量評価フロー

- ・水の放射線分解による水素発生量として、試験時における照射容器内圧力変化を測定する。得られた吸収線量に対する圧力変化の勾配からG値を算出する。
- ・放射線分解モデルを用いて試験を模擬した解析を行い、照射容器気相部圧力から内圧増分を求める。
- ・放射線分解モデルによる解析結果と試験結果との比較を行い、解析結果の妥当性を検討する。

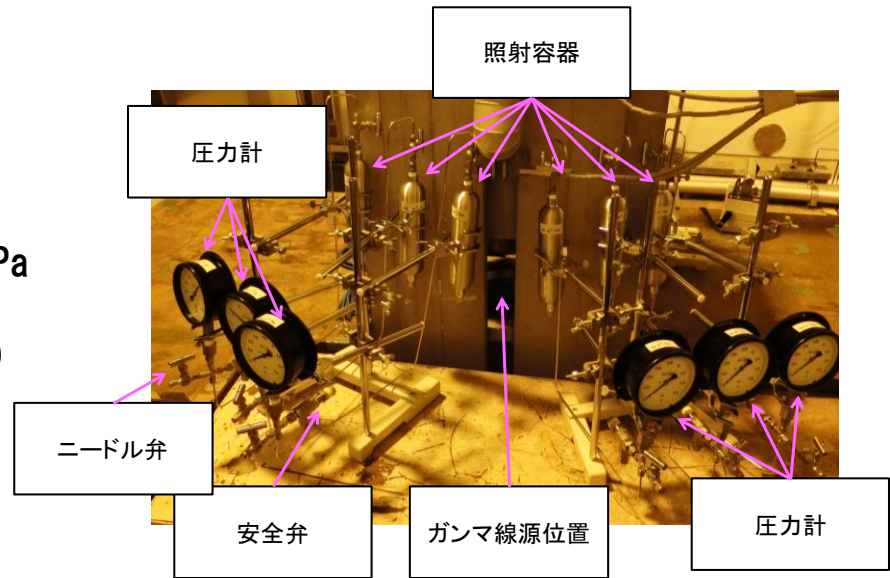
# 3.実施結果 (30/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(水素ガス発生に関する評価) ②試験方法

海水成分とヨウ素の共存体系における水素発生量への影響評価試験方法を示す。



海水成分とヨウ素の共存体系における水素発生への影響評価試験装置概略図



海水成分とヨウ素の共存体系における水素発生への影響評価試験装置

- ・水質を調整した試験水を所定の気液比(気相部体積/液相部体積比)で照射容器に入れ、γ線照射時における照射容器内圧力変化を測定した。
- ・圧力変化の上昇率が鈍化したところで水素の再結合反応が現れ始めたと判断し、γ線照射を終了した。圧力変化の上昇率が鈍化しない場合、照射時間が1,000時間に到達した時点で試験を終了した。

# 3.実施結果(31/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(水素ガス発生に関する評価) ③試験条件

海水成分とヨウ素の共存体系における水素発生量への影響評価試験条件を示す。

海水成分とヨウ素の共存体系における水素発生への影響評価試験マトリクス

ケース	温度	希釈人工海水濃度 (塩化物イオン濃度) (mol/L)	ヨウ化物イオン濃度 (mol/L)	気液比 (%) <sup>*1</sup>
①	室温	$2.8 \times 10^{-3}$	0	900
②		$2.8 \times 10^{-3}$	$10^{-4}$	900
③		$2.8 \times 10^{-3}$	$10^{-5}$	900
④		$2.8 \times 10^{-3}$	$10^{-7}$	900
⑤		$2.8 \times 10^{-3}$	$10^{-4}$	50
⑥		$2.8 \times 10^{-3}$	$10^{-4}$	約10

\*1 気相部体積／液相部体積

- ・海水成分は人工海水を用い、原子炉建屋滞留水の水質目安(塩化物イオン濃度 100 ppm未満)<sup>[1]</sup>にもとづき、塩化物イオン濃度で $2.8 \times 10^{-3}$  mol/L(100 ppmに相当)とした。
- ・ヨウ化物イオン濃度はパラメータとし、 $0 \sim 10^{-4}$  mol/Lとした。ヨウ化物イオン濃度の上限値は、炉内のヨウ素のインベントリ<sup>[2]</sup>に対する炉水への溶出割合を10%として、移送中の燃料デブリからヨウ素が放出されたときの濃度を最大 $10^{-4}$  mol/Lとした。また、放射線分解モデルの妥当性確認および水素発生に影響を与えないヨウ化物イオン濃度の確認を目的として低濃度側の範囲を設定した。
- ・半乾式移送を想定し、気液比をパラメータとして気液比が水素発生に及ぼす影響を評価した。気液比900%は半乾式移送の気液比を、気液比約10%は湿式移送の気液比を想定している。なお、気液比約10%のケースの実測値は13%であった。

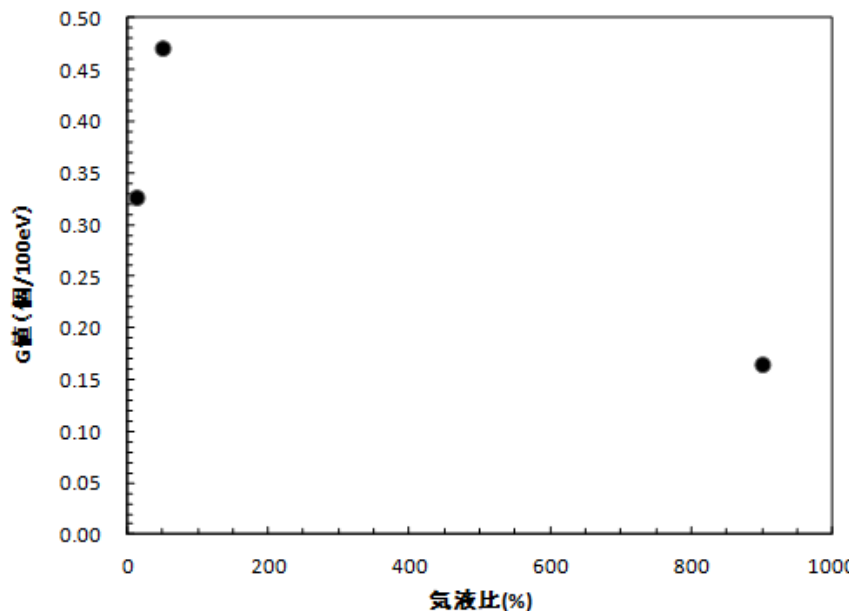
[1] 東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議 事務局会議(第1回) 資料3-1「建屋内循環ループの早期実現及び循環ライン縮小に向けた検討について」、東京電力株式会社、平成25年3月28日

[2] 西原ら、「JAEA-Data/Code 2012-18 福島第一原子力発電所の燃料組成評価」、日本原子力開発機構、2012年9月

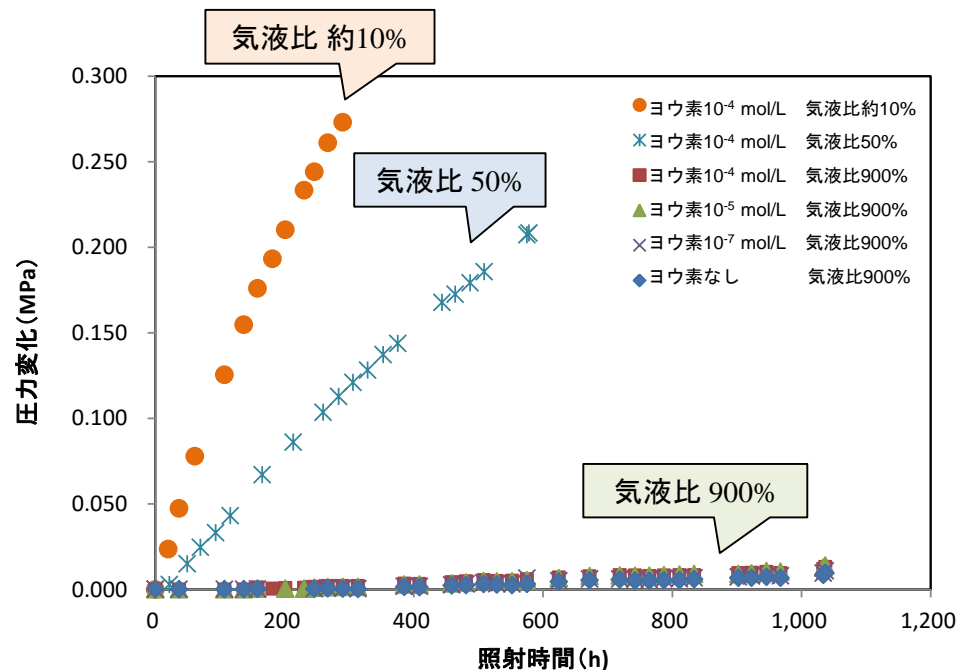
# 3.実施結果 (32/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(水素ガス発生に関する評価) ④試験結果例

海水成分とヨウ素の共存体系における水の放射線分解による水素発生量評価試験結果を示す。



G値の気液比依存性(ヨウ化物イオン濃度 $10^{-4}$  mol/L)



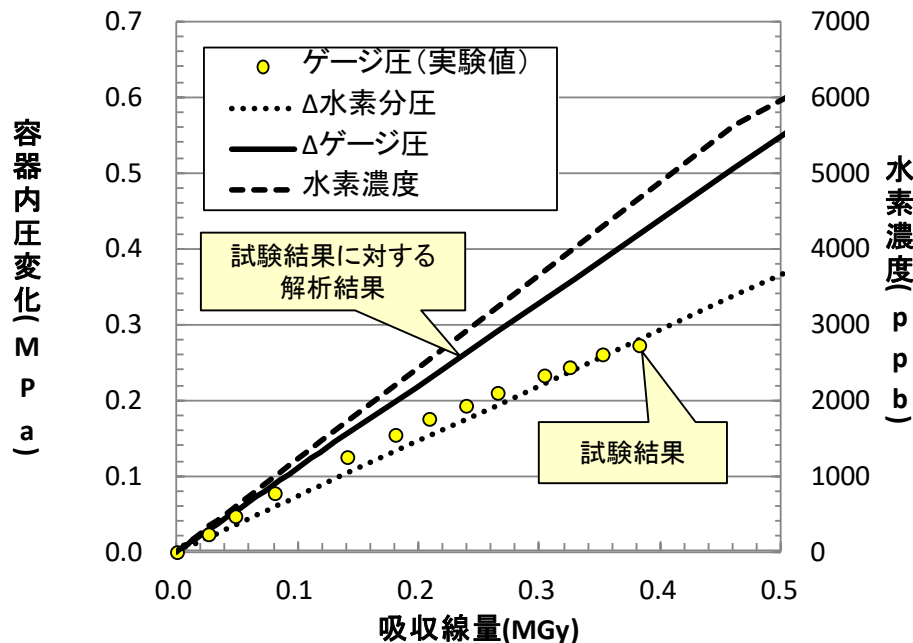
気相部圧力変化の照射開始からの時間依存性

- ・本試験条件では、 $\gamma$ 線による水素発生はおおむね初期G値0.45の範囲であった。
- ・気液比が900%のG値は、気液比が小さい場合のG値の1/2程度となった。気液比の大きな体系では見かけのG値が小さくなり移送時間に裕度を持たせられる可能性がある。

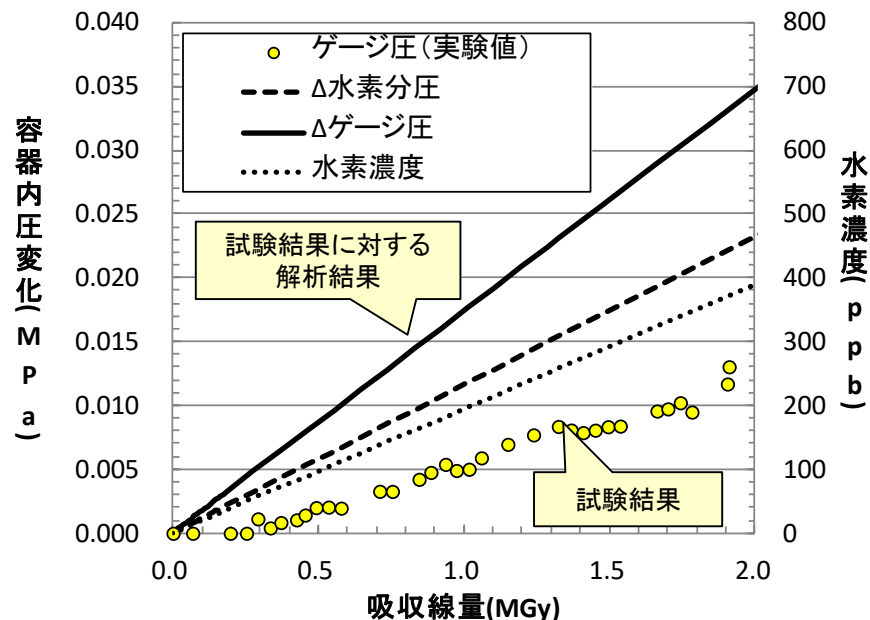
# 3.実施結果(33/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(水素ガス発生に関する評価) ⑤解析結果との比較例

海水成分とヨウ素の共存体系における水素発生への影響試験結果と放射線分解モデルによる解析結果との比較を示す。



(1) ケース⑥(気液比13%、ヨウ化物イオン濃度 $10^{-4}$  mol/L)



(2) ケース②(気液比900%、ヨウ化物イオン濃度 $10^{-4}$  mol/L)

水素発生量の計算結果と実測値との比較

- ・ G値0.45を用いて放射線分解モデルによる解析を行った結果、試験結果で得られた水素発生量を保守的に評価できた。

## 3.実施結果(34/39)

### 3.3 安全評価手法の開発(水素ガス発生に関する評価) ⑥まとめ

- 海水成分とヨウ素の共存体系において、半乾式移送を模擬した気液比の大きい条件でも水素の初期G値0.45を用いることで水素発生量を保守的に評価できる見通しを得た。
- 気液比の大きい条件では、移送時間に裕度を持たせられる可能性がある。しかし、海水成分とヨウ素の共存体系における水素の発生速度が速いため、安全対策として再結合触媒の効果の検討を行う。
- MCCIの影響評価として、セメント系成分の水素発生への影響について検討する。

## 3.実施結果(35/39)

### 3.3 安全評価手法の開発(水素触媒の検討)①評価の考え方

#### (1)検討の位置づけ

第一段階として燃料デブリ移送中(密閉空間)における放射線分解で生ずる水素対策(防爆)として、触媒水素吸着合金についての情報収集と選定のために必要となる因子を整理する。

#### (2)環境条件の設定

- ・許容水素濃度:化学量論より水素濃度10[%]制限とする。  
(移送容器は蓋締め後、窒素パージするため)
- ・崩壊熱による温度上昇:常温~300°Cまでを考慮(暫定)
- ・想定する水質:ハロゲンイオン(塩素イオン、ヨウ素イオン等)
- ・その他:結露環境(半乾式(燃料デブリが濡れた状態))  
高放射線環境  
移送容器での移送を想定した耐衝撃性

#### (3)触媒の調査

- ・排ガス処理等で実績のある白金系、パラジウム系を調査

# 3.実施結果(36/39)

## 3.3 安全評価手法の開発(水素触媒の検討)②調査結果

### 代表的な触媒の仕様

メーカー	触媒成分など	性状	使用条件	備考
A社	パラジウム(Pd)系	・φ3~5球状	・温度:常温~400°C ・圧力:常圧~ ・GHSV:1,000~5,000h <sup>-1</sup>	・酸素を含むガス中の微量の水素の処理
	白金(Pt)系	・φ4~6球状 150□×50Hハニカム	・温度:200~400°C ・GHSV(球):≤30,000h <sup>-1</sup> ・GHSV(ハニカム): 5,000~50,000h <sup>-1</sup>	・活性と耐熱性に優れる。
	パラジウム(Pd)系	・φ4~6球状	・温度:200~450°C ・GHSV:≤30,000h <sup>-1</sup>	
	パラジウム(Pd)系 (アルミナ担体)	・2.5CDS型押し出し	・温度:200~450°C ・GHSV:≤30,000h <sup>-1</sup>	
B社	白金(Pt)系	・φ3球状		
	パラジウム(Pd)系	不明		・蒸気中の水素の酸化
C社	白金(Pt)系	・ハニカム	・推奨入口温度:350°C~	・耐ハロゲン触媒
D社	白金(Pt), パラジウム(Pd)などの貴金属	・ハニカム ・φ3~5(球状)		
E社	白金(Pt)系/メタルハニカム(Fe-Cr-Al)	・メタルハニカム	・温度:常温(水素) ・GHSV:30,000~60,000h <sup>-1</sup>	・金属で構成された触媒構造体のため,落下等の物理的強度が高い。

GHSV: Gas Hourly Apace Velocity (1時間あたりのガス供給流量に対する触媒体積)



## 3.実施結果(37/39)

### 3.3 安全評価手法の開発(水素触媒の検討)③今後の進め方

触媒は有効に作用できる環境が限定されることから使用環境条件側の対応策、触媒の情報収集を進め判断する。

(触媒が発火源となるリスクもあり採用しない選択も想定。)

#### (1)環境条件の整理

- ・ガス流動条件:ガスの触媒との接触が重要であり内部のガス流量を検討
- ・不純物:ハロゲン以外の条件の整理

#### (2)触媒の調査

- ・耐結露機能の検討
- ・水素吸着合金による補完

(触媒はある程度の温度条件で機能するため、  
低い温度で効果が期待できる水素吸着合金を調査)

# 3.実施結果(38/39)

## 3.4 燃料デブリの収納技術の開発

### 収納缶設計要求事項の精査

収納缶の設計要求事項案を以下まとめた。

#### ・安全評価上の要求事項

未臨界: 収納缶の直径と保管効率の観点から  $\Phi 220\text{mm}$  とする

除熱: 燃料デブリ温度  $300^\circ\text{C}$

閉込め: 水素除去や遠隔での蓋取り付けを考慮し

**閉じ込め機能は移送容器等の他の機器で担う**

遮蔽: 軽量化の観点で移送容器等の他の機器で担う

水素発生: **フィルターを設置**

火災防止: **窒素雰囲気/冠水での取扱**

#### ・取扱い上の要求

湿式保管、乾式保管のどちらにも対応できること

50年間の保管に対応できること

**(現実的な材料選定とし、不確定部分は点検等に対応)**

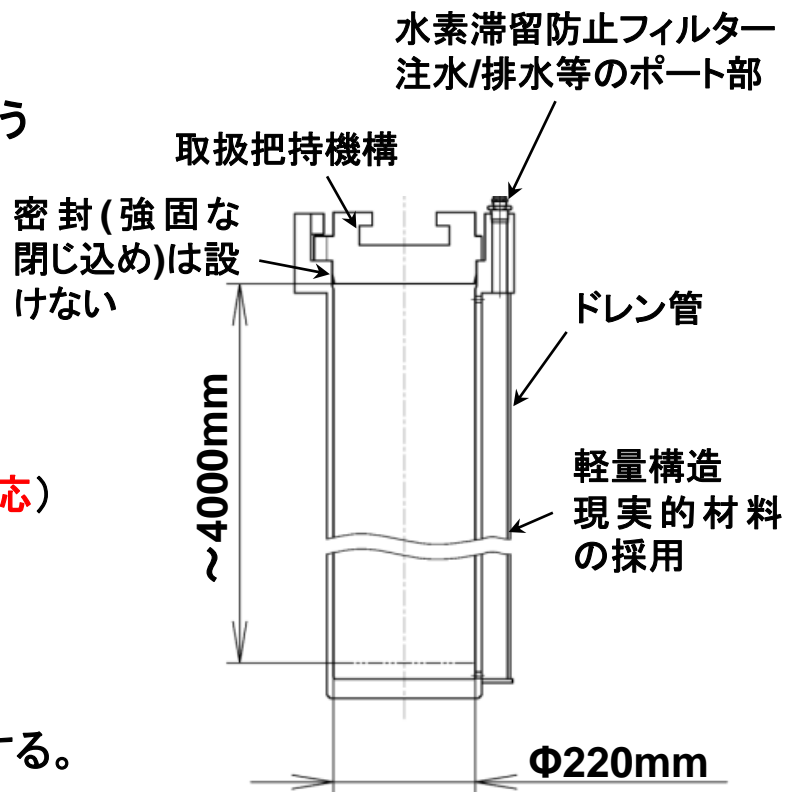
水の注水、排水、プール保管時のベント管取付等に

対応できること(**ポート部、ドレン管の設置**)

蓋は遠隔操作で取扱い可能なこと

把持ができること(**取扱把持機構の設置**)。

**既存施設との流用を想定し、長さは $\sim 4000\text{mm}$ 程度とする。**



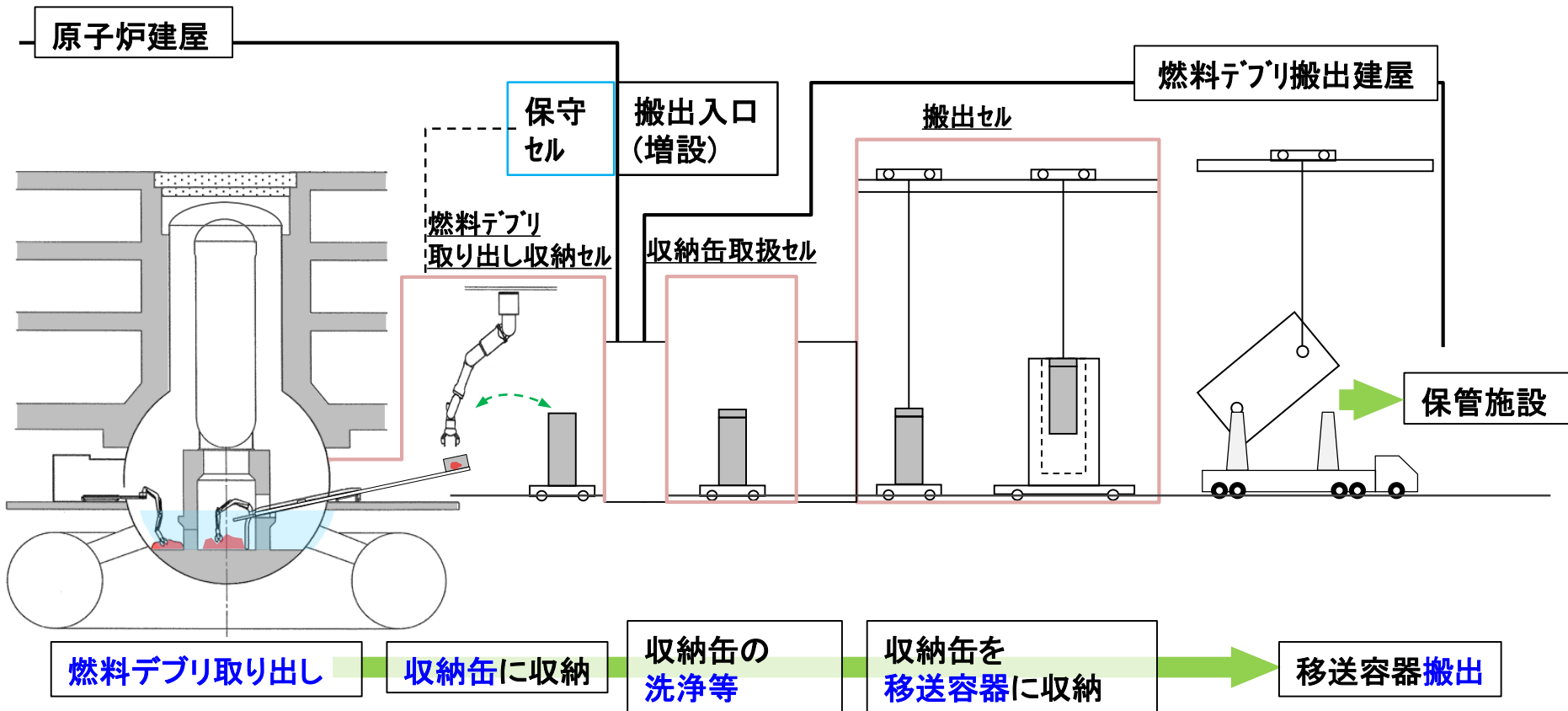
収納缶のコンセプト見直し案

# 3.実施結果(39/39)

## 3.5 収納缶の移送・保管技術の開発

燃料デブリ等の環境への放出を防止するため以下の観点で整理し、案を策定した。

- ・燃料デブリは早期に収納缶に収納する。
- ・作業エリアを区切って処置を講ずることで収納缶外の燃料デブリが収納缶に付随して下流のエリアへ移動されにくいようにする。



原子炉建屋側面からの非冠水収納工法の例

# 4.実施結果と今後の予定(1/4)

平成27年度成果と今後の予定(課題)をまとめた。

実施内容	平成27年度成果	今後の予定(課題)
1.破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案		
①海外調査		
<ul style="list-style-type: none"> <li>・未臨界評価技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Paks、Hanford Siteにおける収納缶の臨界評価条件や臨界管理方法の情報入手。</li> <li>・INLにおけるプール保管時の収納缶の臨界評価内部レポートを入手。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・臨界評価条件、臨界管理方法、プール水喪失事故対応等の参考として活用。</li> <li>・入手文献の継続調査の実施。</li> <li>・必要に応じ、英国等の知見を調査。(暫定)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・乾燥技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Paks/Hanford Siteの乾燥設備の概略系統図やPaksでは乾燥技術確立のため模擬ペレット等を用いたコールド試験やウランを使用したホット試験を系統的に実施したアプローチ等の情報を入手。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・今後の真空乾燥技術検討の参考とする。(Paksのアプローチ、Hanford Siteで用いられた水による恒温手法等)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・水素ガス対策</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Paksの水素逃し構造を用いた収納缶の設計情報を入手。</li> <li>・PNNL/Hanfordの水素発生量評価手法やスラッジの水素滞留対策に関する知見を入手。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・PNNL/Hanford評価手法の1Fへの適用性を確認する。</li> <li>・必要に応じて水素対策技術やその有効性の確認方法のさらなる知見を収集する。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・その他</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Paks、Hanford Siteで用いられた収納缶の設計情報を入手。</li> <li>・Hanford Siteのスラッジ取扱技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Paksで用いられた水素逃し構造(Compensator)を評価し採否を判断する。</li> <li>・収納缶設計そのものや粉状燃料デブリの収納缶開発の参考とする。</li> </ul>
②計画立案	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現行計画の妥当性を確認</li> </ul>	

# 4.実施結果と今後の予定(2/4)

実施内容	平成27年度成果	今後の予定(課題)
2.燃料デブリの保管システムの検討		
①湿式保管システム	<ul style="list-style-type: none"><li>・原子炉建屋では乾燥作業場所の確保が困難と想定し、主案としてベント式で一時湿式保管、長期的な乾式保管に移行するフローを設定。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・安全評価等の進捗や関連PJの動向に基づき、保管コンセプト案や保管するフローを更新。</li></ul>
②乾式保管システム	<ul style="list-style-type: none"><li>・湿式保管や原子炉建屋から収納缶が持ち込まれ、施設内で乾燥することを想定。</li><li>・また、完全乾燥の確立に時間を要することを想定しベント式保管を前提にフローを設定。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ベント式保管を採用する場合の収納缶設計に対する課題の抽出とその対策の検討。</li><li>・密閉式保管を実施するための乾燥技術に関する調査。</li></ul>
③MCCI生成物の保管	<ul style="list-style-type: none"><li>・MCCI生成物固有の特徴として、以下が抽出。<ul style="list-style-type: none"><li>- Ca化合物の成分溶出の可能性</li><li>- 通常の燃料デブリよりも空隙の多い構造となる可能性</li><li>- 燃料物質の偏在等、長期保管時の収納缶健全性に影響を受ける可能性</li></ul></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・左記特徴を踏まえたMCCI生成物の影響を安全評価等へ反映(燃料物質の偏在等の影響は平成27年度の評価で影響の少ないことを確認。)</li></ul>

# 4.実施結果と今後の予定(3/4)

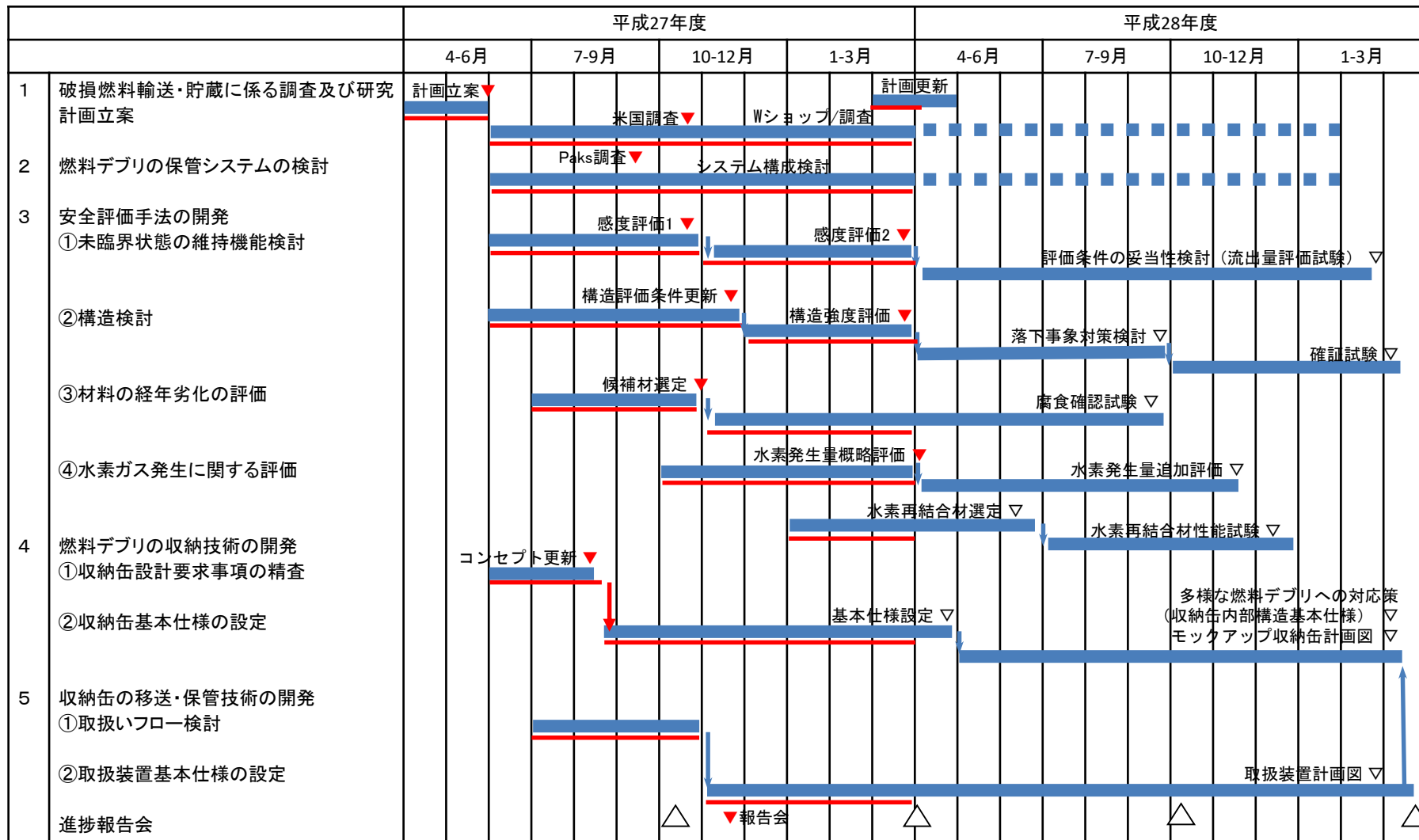
実施内容	平成27年度成果	今後の予定(課題)
3.安全評価手法の開発		
①未臨界評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計評価基準および燃料条件の緩和を検討し、収納缶からの燃料デブリ漏えい等の臨界感度評価を行い、収納缶内径を220mm(平成26年度と同じ)とする案を提案。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>提案内容をベースに他PJと調整し、燃料デブリの収納・移送・保管の作業性や効率を考慮した収納缶内径の妥当性の確認/見直し。</li> <li>燃料デブリ粒径分布、収納缶蓋構造、収納缶の取扱い(水中/気中、横倒し有無)に基づく収納缶外への燃料デブリの流出試験の検討(暫定)。</li> <li>収納缶取扱い条件、事故時条件での臨界評価の実施(必要に応じて)。</li> </ul>
②構造評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>収納缶本体を対象とした静解析による構造強度評価手法の妥当性を確認。</li> <li>実機収納缶体系における構造強度評価を行った結果、本評価条件では平成26年度に設定した収納缶の設計が成立しない可能性のあることが判明。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>荷重低減策の検討に加え、運用方法、構造強度評価(荷重評価手法、構造強度評価手法、評価基準の設定)などの総合的な検討・判断による収納缶設計の成立性の確認。</li> </ul>
③材料の経年劣化評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>塩素イオン等の収納缶内環境を想定し候補材の抽出を行った。</li> <li>水の放射線分解で発生する過酸化水素の量によっては高耐食材料の適用が必要になる可能性がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>炭素鋼とステンレス鋼の組み合わせについてのすき間腐食挙動データを収集する。</li> <li>移送等の環境条件見直しを検討する。</li> <li>水の放射線分解による過酸化水素発生量の検討(④水素発生量評価技術で検討)結果を踏まえて材料を選定する。</li> </ul>

# 4.実施結果と今後の予定(4/4)

実施内容	平成27年度成果	今後の予定(課題)
<p>④水素発生量評価技術</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1F燃料デブリを想定した、要素試験と解析による海水成分とヨウ素の共存体系における水素発生量への影響を確認。</li> <li>・塩素およびヨウ素濃度によっては、水素発生量への影響が大きいことが判明。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MCCI生成物を想定した、コンクリートおよびモルタル成分による水素発生への影響評価。</li> <li>・要素試験結果に基づく水素発生量評価の妥当性確認。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・水素ガス触媒等の対策</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水素触媒にかかわる情報収集/候補の選定。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・さらなる情報収集。</li> <li>・収納缶内の環境条件を検討し、採否も含めて候補を判断。</li> </ul>
<p>4.燃料デブリの収納技術の開発</p>		
<p>①取扱いフロー検討</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・フローを検討し、収納缶の取扱条件案の設定。</li> <li>・平成26年度策定の収納缶コンセプトの見直し。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料デブリ取り出しPJと連携してさらなる具体化。</li> </ul>
<p>②取扱装置基本仕様の設定</p>	<p>---</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・①に基づき、取扱装置の基本設計の実施。</li> </ul>

# 5.開発進捗状況

## 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発



■ 計画      ■ 実績



# 5. 開発進捗状況

## 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発

実施内容	マイルストーン		達成状況	要因	対応策	備考
	項目	計画時期				
1.破損燃料輸送・貯蔵に係る調査及び研究計画立案	研究計画立案	平成27 5/E	完了			計画は適宜見直し
	破損燃料輸送・貯蔵に係る調査	平成28 3/E	完了			Paks、米PNNLを完了
	計画見直し・追加調査	平成29 3/E	未			必要に応じて実施
2.燃料デブリの保管システムの検討	燃料デブリの保管システムの検討	平成28 3/E	完了			最新知見に基づき継続的に見直し
	燃料デブリの保管システム見直し	平成29 3/E	完了			必要に応じて実施
3.安全評価手法の開発 ①未臨界状態の維持機能検討	感度概略評価#1	平成27 10/E	完了			収納缶からの燃料デブリ漏えい影響評価
	感度詳細評価#2	平成28 3/E	完了			収納缶内径評価
	評価条件設定の妥当性評価 (流出量評価試験)	平成29 2/E	未			試験/実施内容は感度評価や調査結果に基づいて設定
②構造検討	構造評価条件更新	平成28 11/E	完了			
	構造強度評価	平成28 3/E	完了			
	落下事象他対策検討	平成29 9/E	未			
	確証試験	平成29 3/E	未			

# 5. 開発進捗状況

## 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発

実施内容	マイルストーン		達成状況	要因	対応策	備考
	項目	計画時期				
3.安全評価手法の開発 ③材料の経年劣化の評価	候補材選定	平成27 10/E	完了			
	候補材の評価(腐食試験)	平成28 9/E	実施中			文献で検討 試験は限定して実施予定
④水素ガス発生に関する評価	水素発生概略評価	平成28 3/E	完了			
	水素発生追加評価	平成28 11/E	未			
	水素再結合候補材選定	平成28 6/E	実施中			要否も含めて検討
	水素結合剤評価(試験)	平成28 12/E	未			
4.燃料デブリの収納技術の開発 ①収納缶設計要求事項の精査	要求事項見直し、コンセプトの見直し方針策定	平成27 8/E	完了			引き続き適宜見直しを実施。
	②収納缶基本仕様の設定	収納缶の基本仕様設定	平成28 4/E	実施中		
5.収納缶の移送・保管技術の開発 ①取扱いフロー検討	多様な燃料デブリ形態への対応策、モックアップ試験用収納缶の計画図作成	平成29 3/E	未			
	フロー案策定	平成27 11/E	完了			
②取扱装置基本仕様の設定	取扱装置基本仕様の設定	平成29 3/E	未			

## 6.研究開発の運営

### ① 中長期視点での人材育成

- ・本PJの遂行にあたっては、IRID内組合員の若手技術者が参加した。
- ・IRIDシンポジウム2015in福島(7/23)において、  
昨年度の研究成果や今後の計画をパネルを用いて説明し、理解促進及び啓発活動を行った。

### ② 国内外の叡智の結集

- ・JAEA研究者と水素発生(7/31)、MCCI生成物(6/29、8/28)についての意見交換会を実施し  
知見収集を行った。
- ・ハンガリーPaks発電所を訪問し、未臨界評価手法、水素対策等の情報を収集した。(9/17-18)
- ・IAEAを訪問し、海外からの情報収集に関する意見交換を行った。(9/21-22)
- ・米PNNL、Hanford Siteを訪問し、金属ウラン損傷燃料の移送・保管技術低温加熱真空乾燥技術、  
収納缶 (Multi-Canister Overpack) 設計) 情報等を収集した。(10/19-21))
- ・TMI-2の経験者に面談し、水素発生(エネルギー吸収)量精査手法の情報を収集した。(10/24)
- ・既存技術の海外関連メーカー等との連携の可能性を探るべく英国大使館の訪問(9/1)、  
英国Sellafield Limited社と意見交換を実施。(10/1)

### ③ 試験条件や開発仕様の明確化

- ・平成29年度からの収納缶試作の観点から指標を設定した。(補助事業概要説明書に反映済)
- ・IRID設計レビューにおいて有識者より前提条件(仮定条件)、アウトプット内容の確認を行った。(2/5)

### ④ 廃炉作業や他の研究開発との連携

- ・IRID本部の一元的なマネジメントを通じて、PJ間で連携・協力を行った。
- ・燃料デブリ性状把握・処置技術の開発PJ(4/24、6/29、7/15、12/9)、  
燃料デブリの臨界管理技術の開発PJ(5/14)、燃料デブリ取り出し技術開発PJ(11/17、12/15、1/7、  
1/15)と合同会議を実施し情報共有、開発内容の調整を行った。

## 6.研究開発の運営

### ⑤ 研究の管理

- ・中長期ロードマップについての議論や廃炉・汚染水対策チーム会合事務局会議、原子力損害賠償・廃炉等支援機構における議論等に参加、事業に反映できる実施体制を構築。(具体的な参加の実績はなし。)
- ・1-2回/月程度のIRID内でPJ会議を開催して進捗を確認。

### ⑥ 福島第一原子力発電所等における作業管理

- ・対象外(福島第一原子力発電所での作業予定はないため。)

### ⑦ 事業の報告

- ・中間報告を実施(10/9)。
- ・事業完了後には、実績報告書及び公開可能な説明資料を作成・提出の予定。

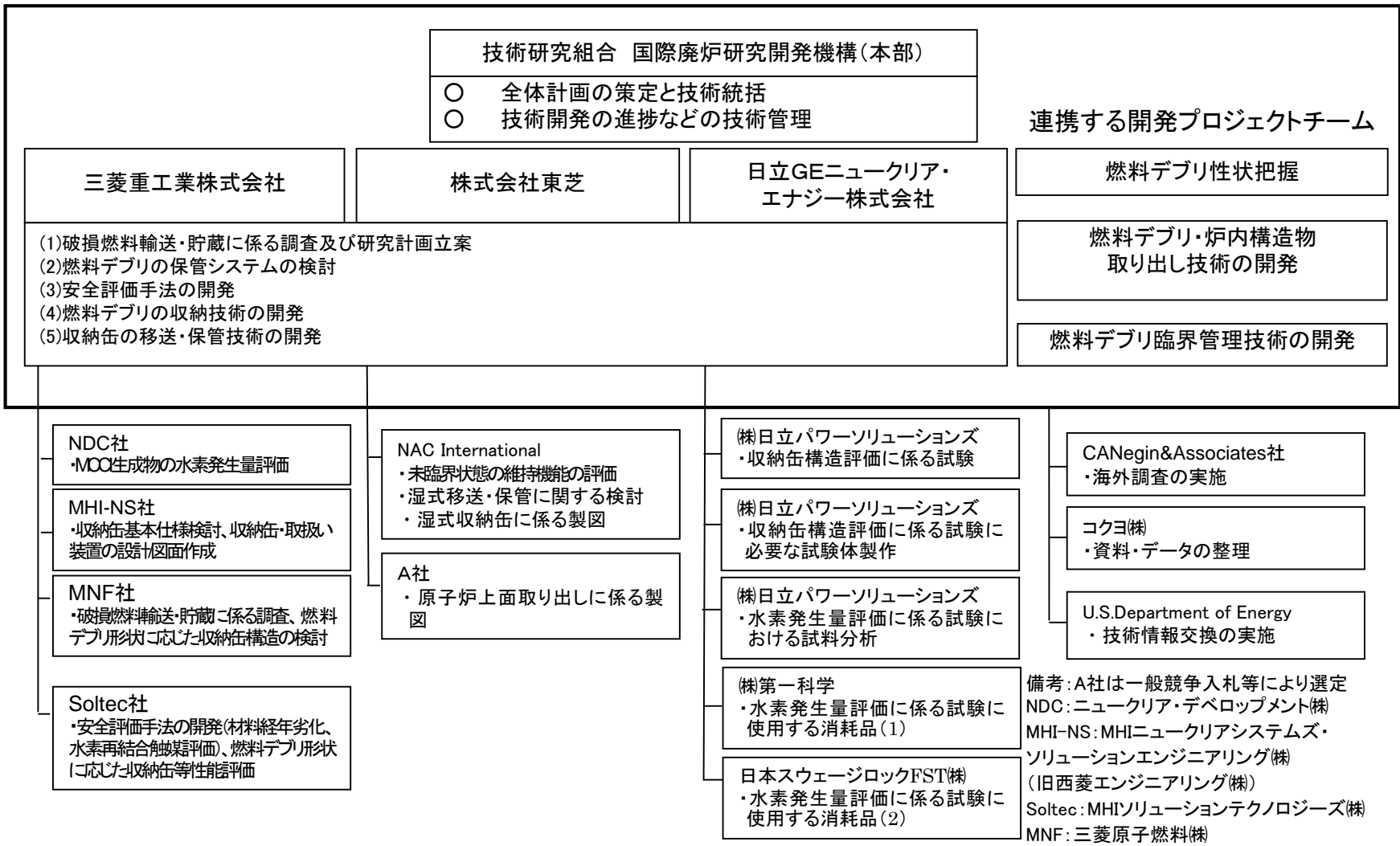
### ⑧ 情報発信の充実

- ・実施内容、成果などをIRID成果報告としてまとめ、一般の人を対象にわかりやすく情報発信する活動の一環として、IRIDシンポジウム2015in福島(7/23)にて昨年度成果を中心に報告した。

### ⑨ 代替案の事前準備

- ・燃料デブリの収納・移送・保管は取り出し工法として想定原子炉上部からの冠水、非冠水、側面からの非冠水の各工法に対応しているほか、多様な制約条件を想定して乾式・湿式のいずれの保管方法にも対応できるよう検討を実施中。

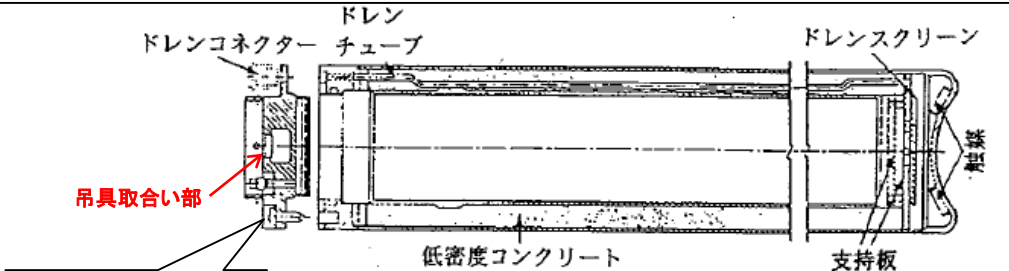
# 【参考】体制図 (H28.3.31現在の最新計画)



# 【参考】収納缶の例(TMI-2の例)

TMI-2では、収納物の状態に応じた3種類の同一外形(3810H×φ355.6mm)の収納缶を使用。実績重量は装荷状態(水抜き後)で最大1335kg。収納缶の主要な機能は臨界防止と燃料デブリの取扱いであり、遮蔽、除熱、密封の機能は全体のシステムの中で分担されている。

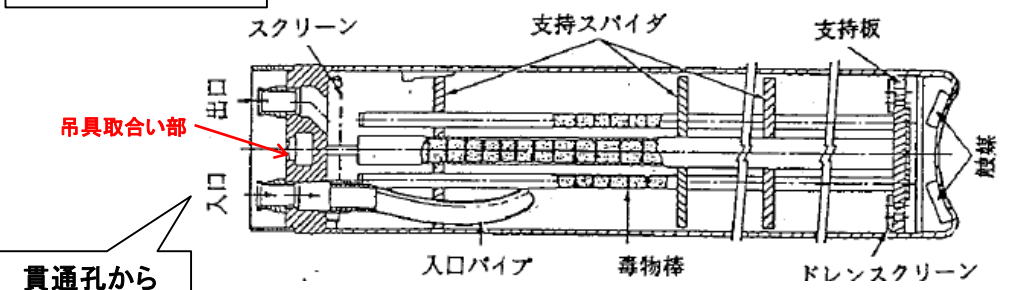
本研究では燃料デブリ回収工法等の他PJと連携して1F向けの収納缶仕様(形状等)を決定する



蓋を開けて燃料装荷

### <燃料キャニスタ※>

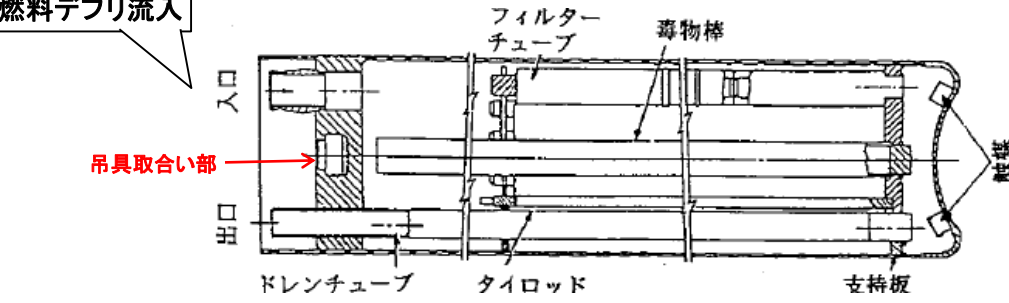
- ・切断した燃料集合体や遠隔装置のハンドリング器具でつかめるサイズの燃料デブリを収納
- ・装荷重量は最大776kg
- ・TMI-2では268体使用



貫通孔から燃料デブリ流入

### <ロックアウトキャニスタ※>

- ・真空吸引システムにより外径140μm~ペレットの大きさ程度の粒子状の燃料デブリを捕集
- ・装荷重量は最大860kg
- ・TMI-2では12体使用



### <フィルタキャニスタ※>

- ・真空吸引システムにより外径5~800μm程度の微粒子状の燃料デブリを捕集
- ・装荷重量は最大681kg
- ・TMI-2では62体使用

使用実績  
輸送燃料デブリ  
134.4トン

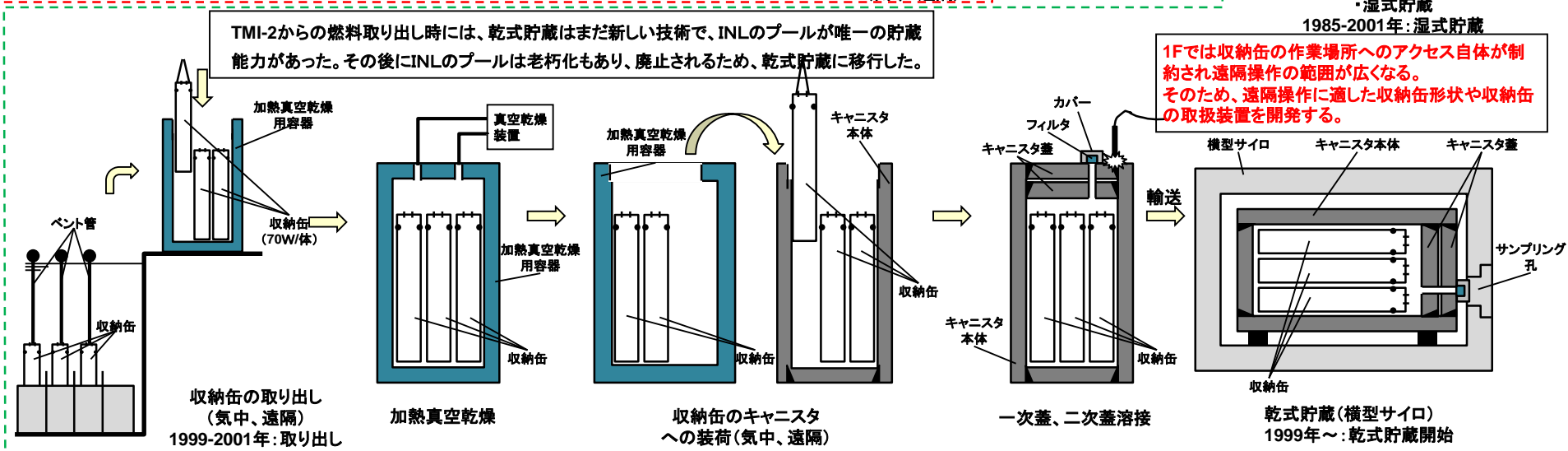
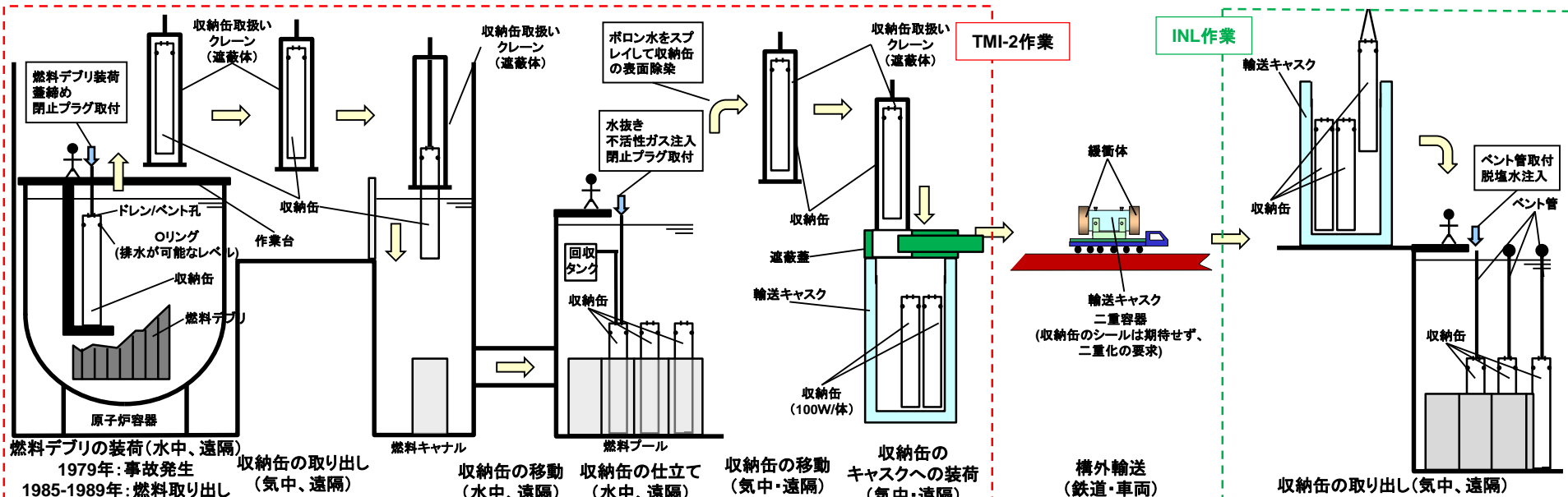
(342体)



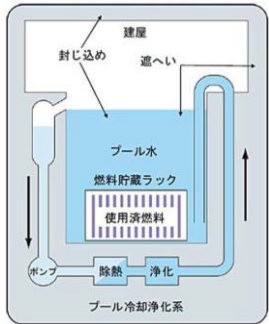
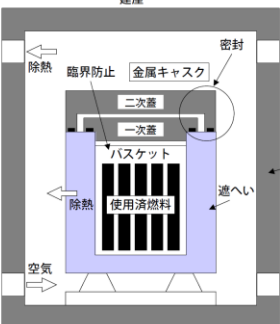
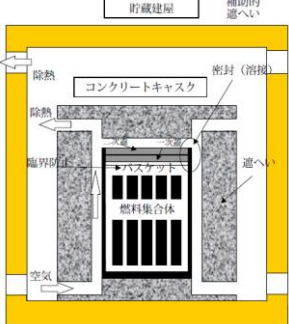
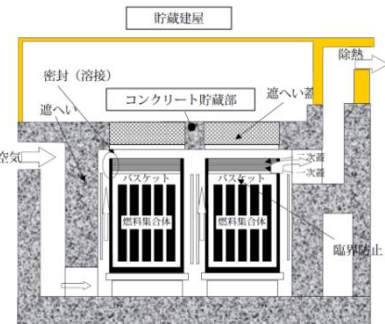
平均装荷重量:  
約390kg

※:TMIでは収納缶をキャニスタと呼称

# 【参考】燃料デブリの収納・移送・保管の概要 (TMI-2の例)



# 【参考】使用済燃料の保管方式例

保管方式	湿式		乾式						
	プール方式		金属キャスク方式	コンクリート遮蔽式(横型サイロをふくむ)	ポルト方式				
概要図	 <p>図 プール方式の概要<sup>注1)</sup></p>		 <p>図 金属キャスク方式の概要<sup>注2)</sup></p>		 <p>図 コンクリート遮蔽式の概要<sup>注2)</sup></p>		 <p>図 ポルト方式の概要<sup>注2)</sup></p>		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・貯蔵専用(搬出時には輸送容器が必要)</li> <li>・建屋が必要</li> <li>・施設全体で管理するため貯蔵密度高</li> <li>・冷却能力高(ただし、プール水の冷却・浄化系及び気体廃棄物処理系が必要)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・輸送・貯蔵兼用可能</li> <li>・縦置き、横置き可</li> <li>・必要に応じて建屋内に設置</li> <li>・容器単体で管理するためプール方式、ポルト方式に比べ貯蔵密度低</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・貯蔵専用(キャニスタは輸送・貯蔵兼用、輸送容器・キャニスタ詰替設備が必要)</li> <li>・縦置き:コンクリート容器、横置き:横型サイロ</li> <li>・必要に応じて建屋内に設置</li> <li>・遮蔽材密度の観点から金属キャスクより貯蔵密度低</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・貯蔵専用(キャニスタは輸送・貯蔵兼用、輸送容器・キャニスタ詰替設備が必要)</li> <li>・通常は縦置き</li> <li>・建屋が必要</li> <li>・施設全体で管理するため貯蔵密度高</li> </ul>		
安全機能の担保	密封	・プール水及び原子炉建屋		・一次蓋、二次蓋の金属ガスケット方式		・キャニスタの一次蓋、二次蓋の溶接構造		・同左	
	遮蔽	・プール水及び原子炉建屋		・金属キャスク本体(鋼、中性子遮蔽材等の組み合わせ)		・コンクリートキャスク本体(鋼、コンクリートの組み合わせ)		・建屋(コンクリート)	
	臨界防止	・燃料ラックの幾何学的配置(必要に応じて燃料ラック材料)		・金属キャスクバスケットの幾何学的配置(必要に応じてバスケット材料)		・キャニスタバスケットの幾何学的配置(必要に応じてバスケット材料)		・同左	
	除熱	・プール水		・金属キャスク表面の自然冷却		・キャニスタ表面の自然冷却		・同左	
国内実績	<ul style="list-style-type: none"> <li>・発電所内使用済燃料プール</li> <li>・福島第一 共用プール</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・福島第一 使用済燃料乾式貯蔵設備<sup>注3)</sup></li> <li>・東海第二 乾式キャスク貯蔵施設<sup>注3)</sup></li> <li>・むつ リサイクル燃料備蓄センター<sup>注4)</sup></li> </ul>		なし		<ul style="list-style-type: none"> <li>・再処理工場 高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター<sup>注5)</sup></li> </ul>		
海外実績	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多数あり(発電所内使用済燃料プール、スウェーデンCLABなど)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・多数あり(アメリカSurry、ドイツGorlebenなど)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・多数あり(TMI-2の燃料デブリはINLにて横型サイロ方式で乾式貯蔵中)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・実績あり(アメリカFortSt.Vrain、ハンガリーPaksなど)</li> </ul>		

注1): 原子力規制委員会HP (<http://www.nsr.go.jp/activity/regulation/chozou/>)より

注2) (財)原子力安全研究協会「コンクリートキャスク貯蔵方式を中心としたキャニスタ系使用済燃料中間貯蔵施設の安全設計・評価手法について」より

注3): 貯蔵専用キャスクを使用 注4): 建設中(輸送・貯蔵兼用キャスクを使用予定) 注5): ガラス固化体を保管

貯蔵システムは既存技術の適用を前提とする。本研究では、既存技術で収納缶を保管できるか、対応できない場合にはその課題を整理する。



# 【参考】想定される1F燃料デブリとTMI-2燃料デブリとの比較 (56)

燃料デブリの収納・移送・保管の観点から、1F燃料デブリとTMI-2燃料デブリの比較をすると下表のとおりとなる。大きく異なる点は以下のとおり。

- ・1F燃料デブリのほうが燃焼度と濃縮度が高い  
⇒放射線、崩壊熱大及び反応度高
- ・1F燃料デブリはコンクリートとの溶融生成物が存在すると推定  
⇒コンクリート中の水分の放射線分解による水素発生懸念
- ・1F炉内への海水注入、計装ケーブル他との溶融  
⇒燃料デブリ中の塩分の影響、多様な不純物の混入

1F固有の課題として  
対応が必要

		1F燃料デブリ	TMI-2燃料デブリ
燃焼度(炉心平均)		約25.8GWd/t <sup>注1)</sup>	約3.2GWd/t <sup>注2)</sup>
濃縮度(バンドル平均(最大))		3.7 wt% <sup>注1)</sup>	2.96 wt% <sup>注2)</sup>
冷却期間(最短)		約9年(2020年6月時点)	約6年 <sup>注3)</sup>
燃料デブリ存在位置		圧力容器内及び格納容器内(推定) ⇒燃料構造物・炉内構造物に加え、コンクリートや計装ケーブル等との溶融生成物が存在すると推定	圧力容器内 ⇒燃料構造物・炉内構造物との溶融生成物
収納物量	燃料デブリ重量	—	134.4t <sup>注3)</sup>
	(燃料集合体重量)	3基合計で約450t以上 <sup>注4)</sup>	約122t <sup>注2)</sup>
	(ウラン重量)(未照射)	3基合計で約260t以上 <sup>注5)</sup>	約82t <sup>注2)</sup>
その他		炉内に海水を注入	—

注1)「JAEA-Data/Code 2012-018 福島第一原子力発電所の燃料組成評価、2012.9、JAEA」より1F-1の値

注2)「DOE/SNF/REP-084 TMI Fuel Characteristics for Disposal Criticality Analysis、2003.9、U.S. Department of Energy」より

注3)「G. Lassahn, Uranium and Plutonium Content of TMI-2 Defueling Canisters, EG&G internal technical report, September 1993」より

注4)炉心装荷体数×300kgで算出

注5)福島第一原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書(1号、2号、3号、4号、5号及び6号原子炉施設の変更) 本文及び添付書類、平成9年12月、東京電力株式会社

# 【参考】燃料デブリの保管方法(湿式保管案)

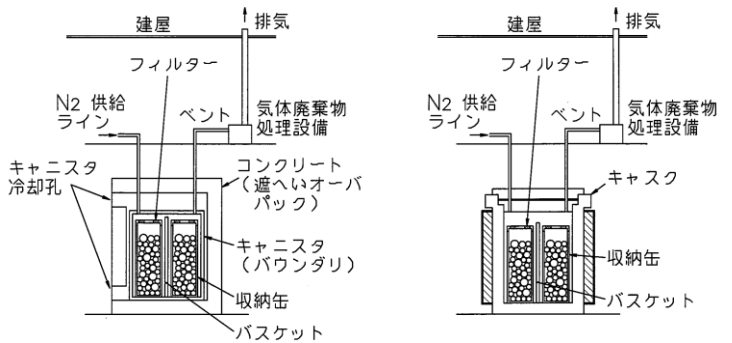
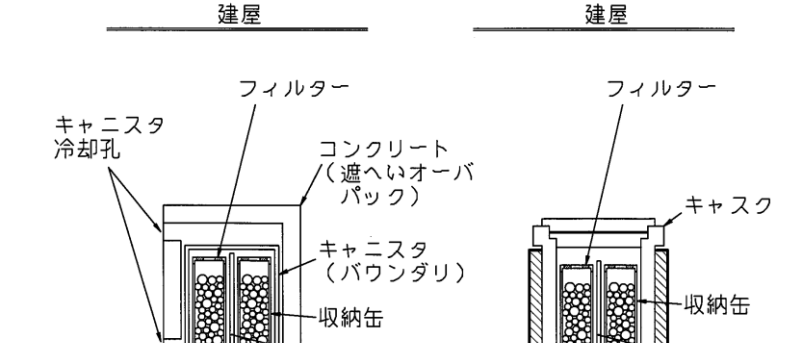
開発にあたり昨年度検討した保管システムについて全体的な位置づけを再評価。

湿式保管の特徴: 湿式保管は、プール水自体を遮蔽材として利用とともに、収納缶内部からの燃料デブリのサンプリングに対応しやすい。

		湿 式 保 管		
		①内部水とプール水は分離 収納缶内部水はプールに放出されない	②内部水とプール水は混合 収納缶内水とプール水は混合できる	③内部水は排水(水分あり) 収納缶内を窒素ガスで充填
1.概 要				
特 徴	2.燃料デブリ化学組成の影響	燃料デブリからの放射性物質の放出が大きくなってもプール水中への汚染拡大はない。	燃料デブリからの放射性物質の放出が大きくなるとプール水の浄化等の設備が大掛かりとなる。	燃料デブリからの放射性物質の放出が大きくなってもプール水への汚染拡大はない。
	3.保管密度/付属設備の規模	プール水喪失事故を考えると収納缶同士の距離を大きく確保するか、中性子を隔離するラックで保管する必要があり保管密度は低くなる。また、収納缶個々にベント管等を設ける必要があり、設備が複雑になる可能性がある。	プール水喪失事故を考えると収納缶同士の距離を大きく確保する必要があり保管密度は低くなる。	プール水喪失事故の影響は多少緩和されるので①、②に比べ保管密度を高くできる可能性がある。ただし、収納缶個々にベント管等を設ける必要があり、設備が複雑になる可能性がある。
	4.その他	-	プール水の溶存酸素量が大いなので、全面腐食支配の材料の場合、寿命が短くなる。プールの浄化設備規模など不確定性があり、実績なしでの採用は困難	-
全体		工法制約上、収納缶内水の排水が難しい場合に採用		湿式では技術的には最も安定した方法

# 【参考】燃料デブリの保管方法(乾式保管案)

乾式保管の特徴: 腐食等に有利で長期保管に適する。

		乾 式 保 管	
		①不完全乾燥(TMI-2で採用) 残留水分から発生する水素を放出	②完全乾燥 残留水分から発生する水素が問題ない量まで乾燥
1.概 要			
特 徴	2.燃料デブリ化学組成の影響	乾燥により燃料デブリからの放射性物質の溶出等の影響はほとんどない。	同左
	3.保管密度/付属設備の規模	プール水喪失事故の考慮が不要で、一般的な使用済燃料の乾式保管施設と同程度の密度が期待できる。排気システム等が必要でその分許認可や施設は複雑になる。	プール水喪失事故の考慮が不要で、一般的な使用済燃料の乾式保管施設と同程度の密度が期待できる。排気システムは不要なので建設期間は短くなるが、乾燥技術(乾燥方法、乾燥確認方法)の検証等の期間が必要
	4.その他	-	完全乾燥の確立は、場合によっては実燃料デブリでの確認も必要となる。
全体		完全乾燥の確立は時間を要することが想定されるので保管の初期段階では有力な選択肢となる。	技術的に最も安定した方式であるが、乾燥方法確立には時間を要するため不完全乾燥保管で実績を積みながら段階的に採用するのが現実的となる。

## 各保管方法を踏まえたまとめ

- ・燃料デブリの安定な保管には乾式保管が適するが、初期段階は不完全乾燥状態での保管が現実的選択である。
- ・なお、保管施設・設備の準備などを考えるとごく初期段階に既設プール等を活用した湿式保管も選択肢となる。
- ・また、保管後も燃料デブリの分析等のニーズがある場合、乾式保管では燃料デブリのサンプリング作業等が大掛かりとなるので、少量の湿式施設(あるいはホットセル)の併設が有効となる可能性がある。