

燃料デブリ取り出し関連の 研究開発の状況

2014年4月25日

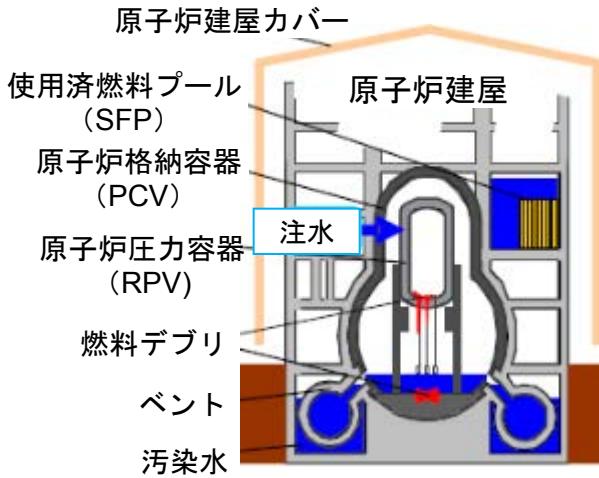
技術研究組合 国際廃炉研究開発機構

(プラント情報等の一部内容は、東電ホームページより引用)

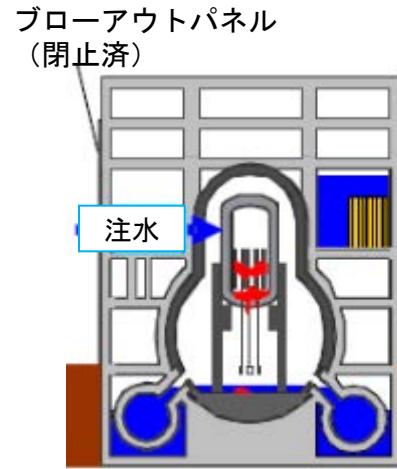
1~4号機の概要

- 廃止措置の進捗状態は号機ごとに異なっている。
- 4号機の使用済燃料プールからの使用済燃料の取り出しは11月18日に開始された。

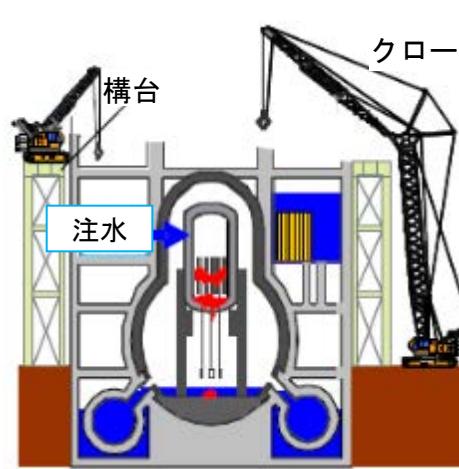
1号機



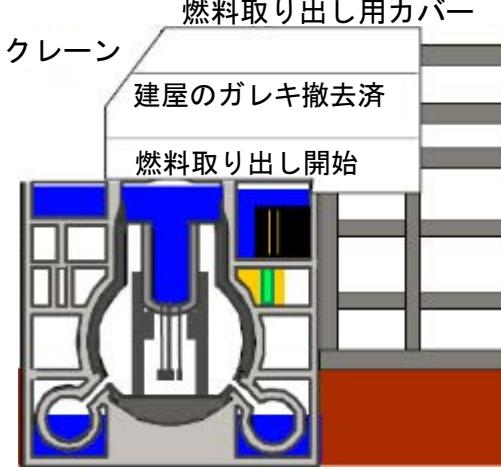
2号機



3号機



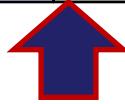
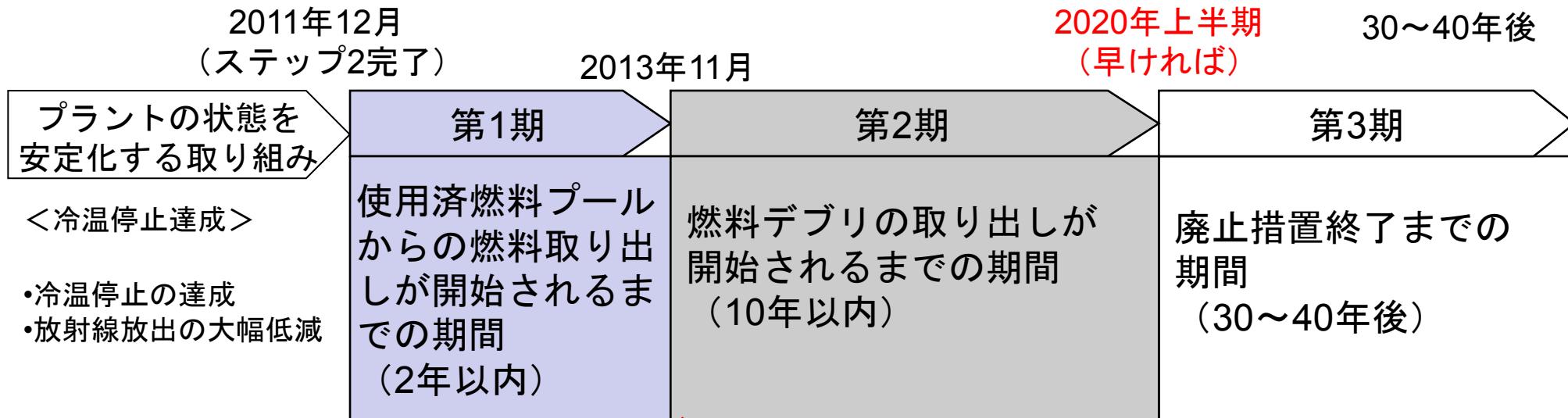
4号機



電気出力	460MW	784MW	784MW	784MW
商業運転開始日	1971年3月	1974年7月	1976年3月	1978年10月

中長期ロードマップの概要

- 中長期ロードマップは2013年6月に改訂された。
- 段階的アプローチが確認された。
- 4号機SFPからの燃料取り出しは2013年11月に開始された。



2013年11月18日に4号機SFPから
最初の燃料集合体の取り出し開始

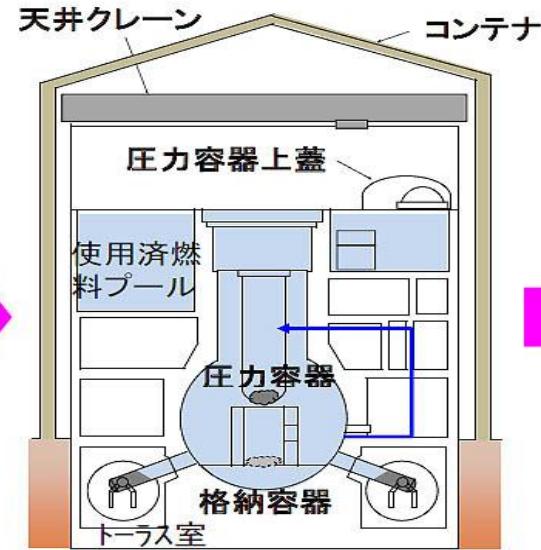
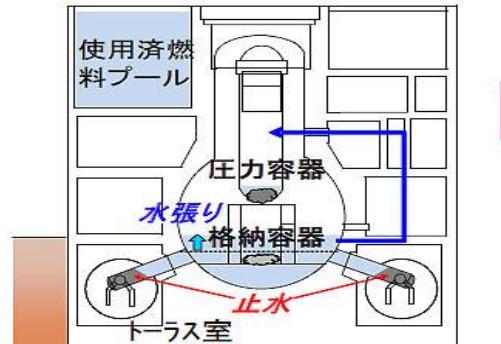
「福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた中長期ロードマップ」は、
2013年6月27日に改訂された。



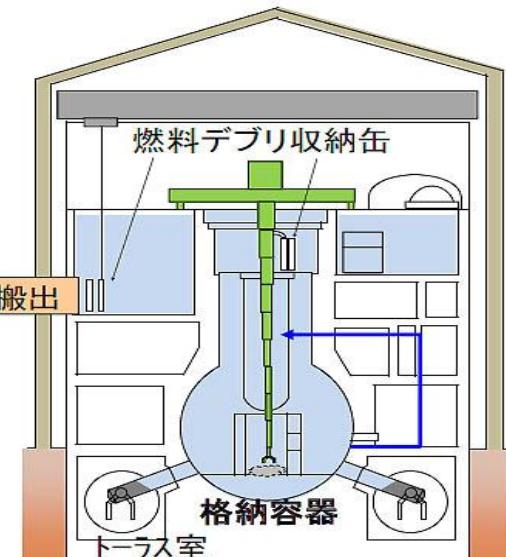
燃料デブリ取出しへ作業イメージ

- 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
- 汚染水対策及び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)を実施

原子炉格納容器下部補修
(止水)～下部水張り(イメージ)



燃料デブリ取り出し(イメージ)



現行の廃止措置手順における主たる課題

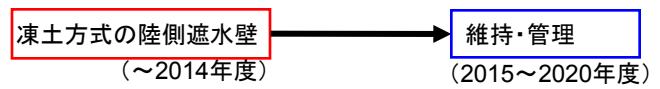
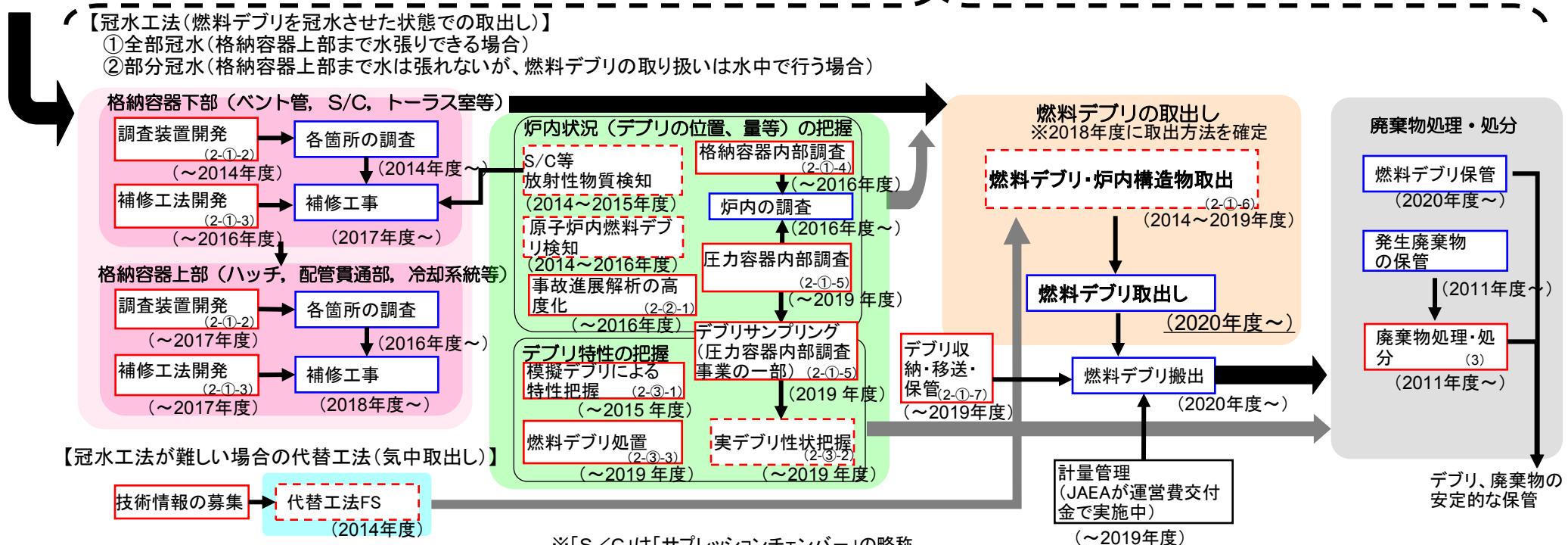
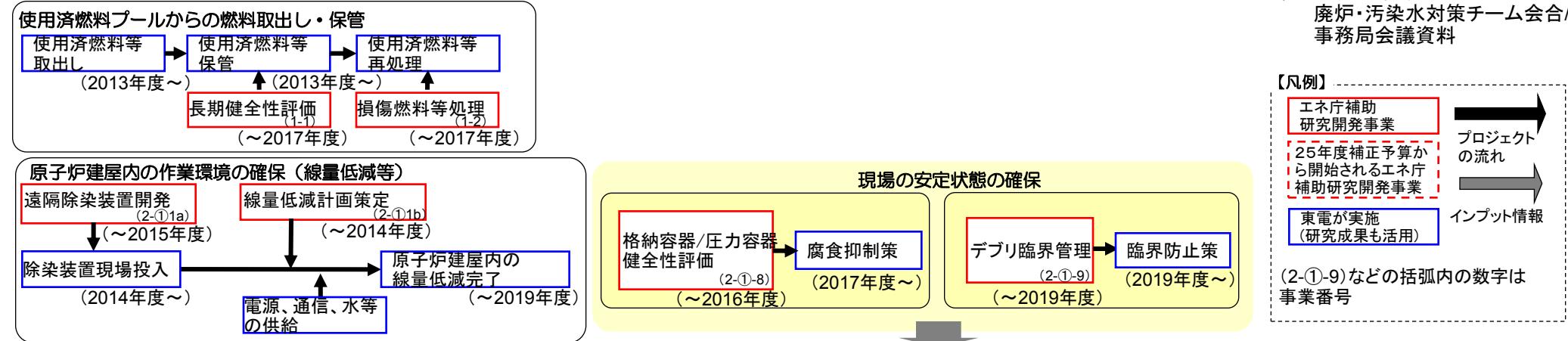
- 最終目標は原子炉建屋（R/B）から燃料を取り出すことである。
- 燃料取り出し手順は、以下のような相違のために、TMI-2の場合よりもはるかに複雑になるだろう。

		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活用しうる。

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

出典:平成26年3月27日
廃炉・汚染水対策チーム会合/
事務局会議資料



H25年度研究開発PJの進捗状況

OPCV/RPV内部調査並びにPCV/RPVからの燃料デブリ取り出しに関連するプロジェクト

- (2-①-2, 3) 格納容器水張りに向けた調査・補修（止水）技術の開発
- (2-①-4) 格納容器内部調査技術の開発
- (2-①-5) 原子炉圧力容器内部調査技術の開発
- (2-①-7) 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発
- (2-①-9) 燃料デブリの臨界管理技術の開発
- (2-②-1) 事故進展解析技術の高度化による炉内状況把握
- (2-③-1、3) 模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ処置技術の開発

格納容器水張りに向けた調査・補修（止水）技術の開発

- ・調査：下部用については、装置の設計、製作および工場モックアップ試験設備を製作し装置の性能試験及び実機適用性評価を完了予定。
- 上部用については、調査部位毎に装置設計・製作及び性能確認を完了予定。
- ・補修：下部用については、装置の設計・製作に向け、補修工法と止水材の詳細検討と要素試験を完了予定。
- （止水）上部用については、損傷の可能性が高い箇所に適用する補修装置の製作に向けて、試験等成果を止水材の詳細検討・設計に反映予定。

実施内容

1. 格納容器調査技術の開発

1.1 格納容器下部調査装置の開発

- ・格納容器下部調査装置・原子炉建屋から隣接建屋への漏水箇所の調査装置を製作。工場モックアップ試験設備を製作し装置性能確認を完了予定。
- ・実機適用性評価（現場実証）の計画を策定し現場実証を完了予定。

1.2 格納容器上部調査装置の開発

- ・格納容器上部調査装置は、調査部位毎に装置設計・製作及び性能確認を実施。（ドライウェル（D/W）外側開放部調査装置の漏えい特定用デバイスについては、代表である基本タイプの小径ペネ向けを実施）
- ・実機適用性評価（現場実証）の計画を策定。平成27年度に現場実証予定。

2. 格納容器補修（止水）技術の開発

2.1 格納容器下部補修装置の開発

- ・ベント管やサブレッションチェンバなどでバウンダリ構成するための補修装置の設計・製作に向けて、補修工法の詳細検討（止水試験等による止水材の詳細検討や閉止補助材の最適化検討等）を完了予定。

2.2 格納容器上部補修装置の開発

- ・損傷の可能性が高い箇所（ハッチフランジ、貫通部ベローズ、電気ペネ）に適用する補修装置の製作に向けて、止水試験等による成果を止水材の詳細検討・設計に反映予定。

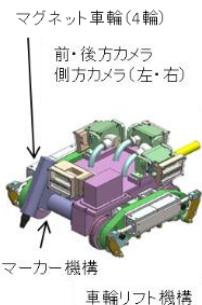


図1 S/C下部外面調査装置と工場モックアップ試験設備

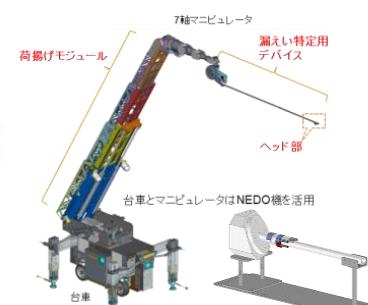
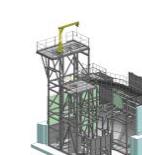


図3 D/W外側開放部調査装置と工場モックアップ試験設備



図4 PCV下部止水用閉止補助材試験状況



図5 PCV上部止水用試験装置



図6 PCV上部止水用止水試験状況

課題及び次期計画方向性

水張り水位等を含めた補修の全体シナリオについて、他プロジェクトと連携・協議を行い技術開発装置の設計に反映することが必要。

マグネット車輪(4輪)

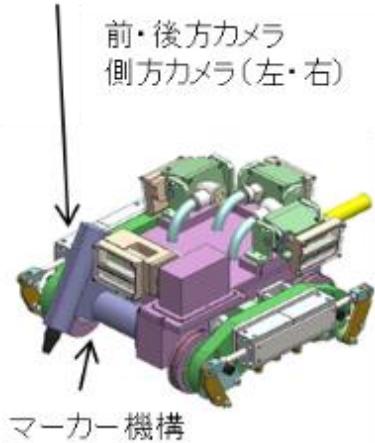


図1 S/C下部外面調査装置と
工場モックアップ試験設備



格納容器水張りに向けた調査・補修(止水)技術の開発



床面走行装置



水中遊泳装置



モックアップ設備

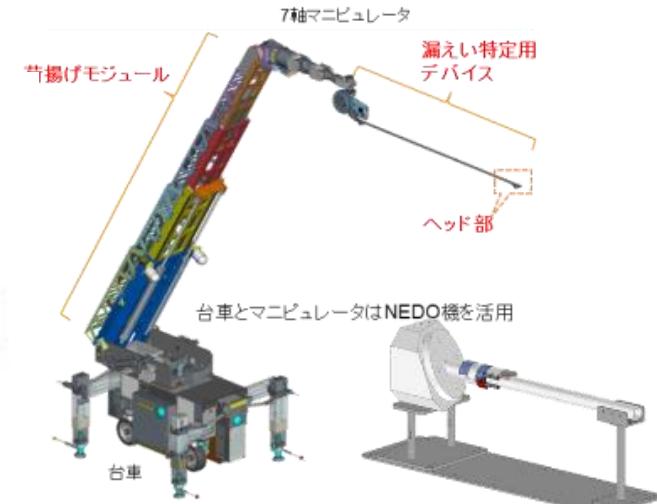


図3 D/W外側開放部調査装置と
工場モックアップ試験設備



図4 PCV下部止水用閉止
補助材試験状況



図5 PCV上部止水用試験装置

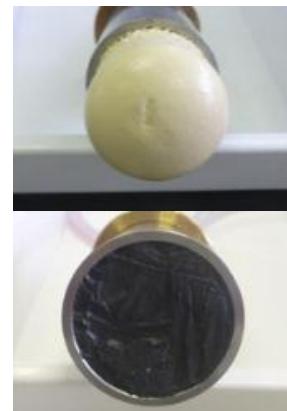


図6 PCV上部止水用
止水試験状況

格納容器内部調査技術の開発

- ペデスタル外の事前調査(格納容器内の映像、線量、温度等を取得)について、1号機用の調査装置は製作・機能検証試験を完了。ペデスタル内の事前調査について、2号機は遮へいブロック取り外し装置と調査装置の製作・機能検証試験を完了予定。
- デブリの存在が推定されるペデスタル内外の本格調査(燃料デブリの分布状態、形状の測定)に向けた更なるアクセス部位用の調査装置について、基礎検討及び要素試験を完了予定。

実施内容

1.PCV内部事前調査装置の開発：右図に装置の開発例を示す。

下記装置について、来年度の実証試験に向けて開発を実施中。

(1) X-100Bからの調査装置(1号機)

装置の製作を完了し、機能検証試験を完了した。今後、平成26年度までに機能検証で抽出した改善対応を行う。

(2) X-6遮蔽ブロック取外し装置(2号機)

装置の各構成品(マニピュレータ、エンドエフェクタ等)の製作完了、装置の組立を実施中。現地調査の結果判明した、取扱い対象物の重量大について、対応を検討し開発計画へ反映中。

(3) X-6ペネからの調査装置(2号機)

前年度に実施したX-53からの調査で得られた成果及び課題について、移動機構の装置構成への変更を検討、開発へ反映。今後、平成26年度までに装置の製作・機能検証試験を行う予定。

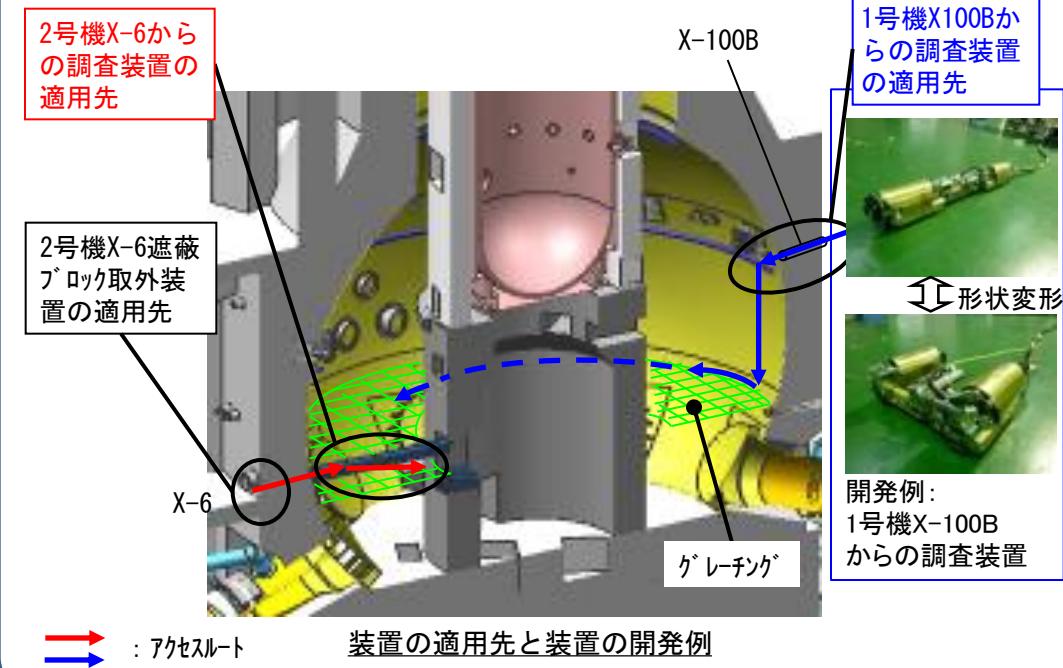
2.アクセス方法と装置の開発(ペデスタル内/外アクセス装置)

ペデスタル内/外のそれに対するアクセス装置の構想検討を実施し、要素試作の仕様を策定中。また、アクセス装置のPCV内投入時に必要な放射性物質飛散防止装置の概念検討も実施。

今後、平成28年度までに要素試作・試験を実施する予定。

3.検査装置・技術の開発(デブリ計測装置)

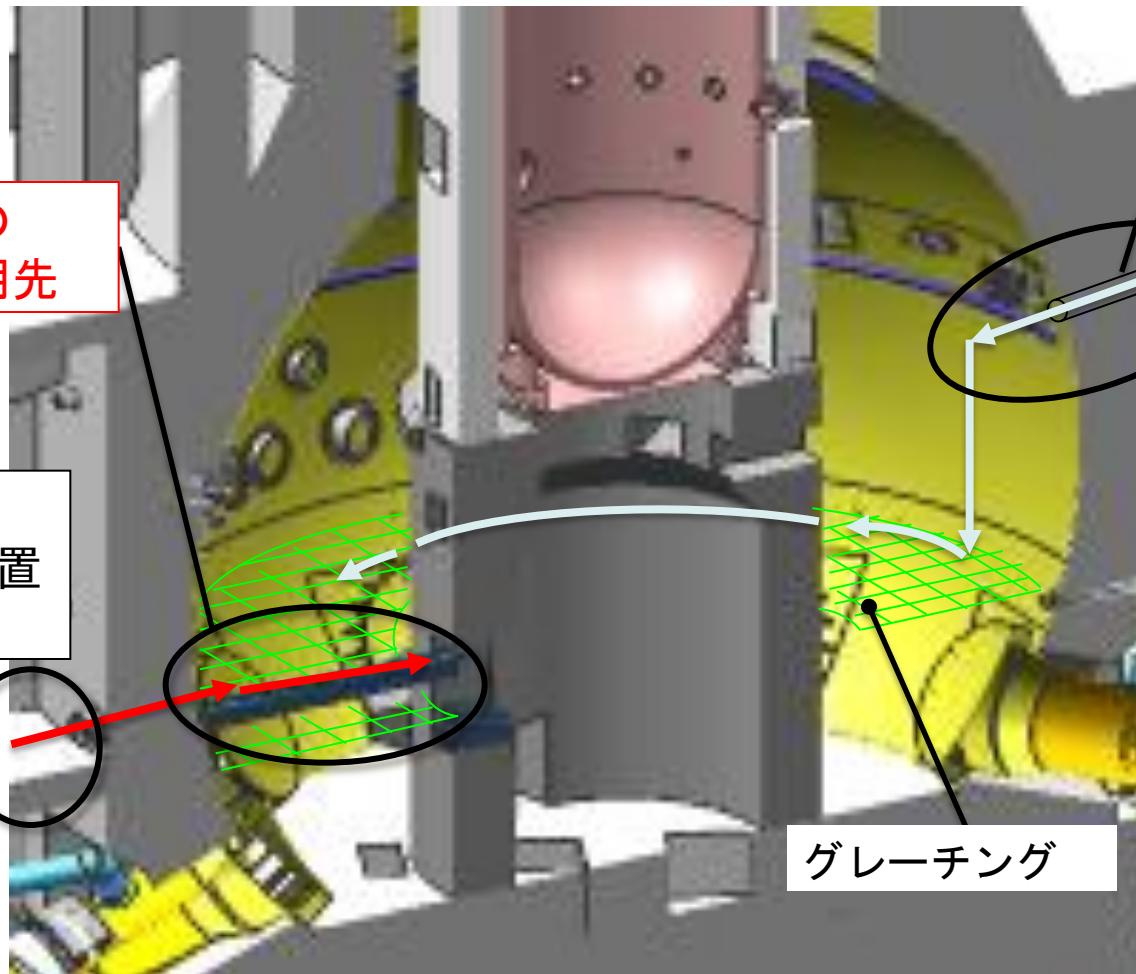
光切断方式による形状計測技術について、装置のシステム構成を立案。また、計測に対するPCV内の外乱環境(霧状、雨状等)を模擬した要素試験を実施中。



課題及び次期計画の方向性

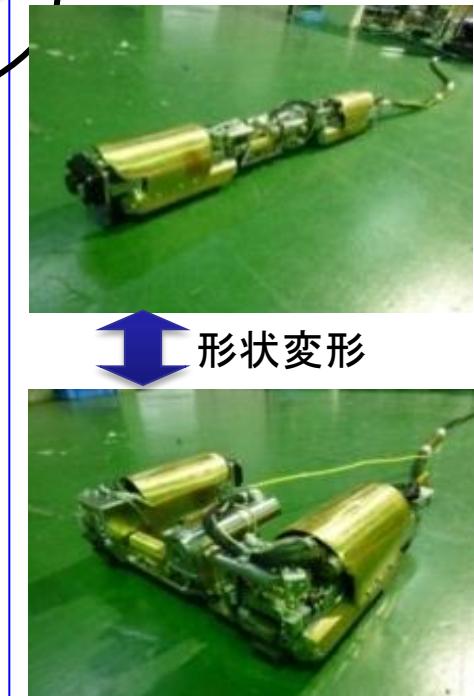
- 前年度の実証試験や現場調査結果で判明した新たな課題(想定外干渉物の存在や対象の重量大等)や、検証試験での改善点への対応。
- 次期計画では、上記の対応を行い実証試験の実施と、更に次ステップに向けた装置開発を推進する。

装置の適用先と装置の開発例



X-100B

1号機X100Bからの調査装置の適用先



開発例:1号機X-100Bからの調査装置

原子炉圧力容器内部調査技術の開発

原子炉圧力容器（RPV）内部の燃料デブリの位置、炉内構造物の損傷状態、RPV内の温度、線量等を取得するため、調査対象部位までのアクセス方法、調査方法、及びサンプリング方法を検討し、RPV内部の高線量下（暫定1,000Gy/h）での調査技術の整理を行い、RPV内部を調査する技術開発計画（2015年度・2017年度：系統配管経由調査技術、2018年度：RPV上部穴あけ調査技術、2019年度：原子炉開放後調査技術）を立案した。

実施内容

1. RPV内部調査計画の立案

◆ 主要調査項目・調査時期の検討

RPV内部調査にて実施する調査項目を選定したうえで、調査項目、調査時期等を検討し、下記2.にて技術開発計画（2015年度・2017年度：系統配管経由調査技術、2018年度：RPV上部穴あけ調査技術、2019年度：原子炉開放後調査技術）を立案した。

◆ アクセスルートの検討

RPV内部を調査するルートとして、配管からアクセスする方法、RPV上部に穴を開けてアクセスする方法、原子炉開放後にアクセスする方法について、候補となるアクセスルートを抽出し、アクセス性を評価し、候補ルートを選定した。（図1）

2. 技術開発計画の立案

◆ アクセス技術

RPV内部へのアクセスルートの検討結果に基づき、既存技術を調査したうえで、障害物の貫通技術等の開発課題を抽出した。

◆ 調査技術（耐放カメラ、線量計等）

既存技術の調査したうえで適用性を検討し、耐放射線性等の対処に係る課題を抽出した。

◆ サンプリング技術

既存技術の調査を行い、サンプリング工法の概念検討を実施し、課題を整理し、開発計画を立案した。

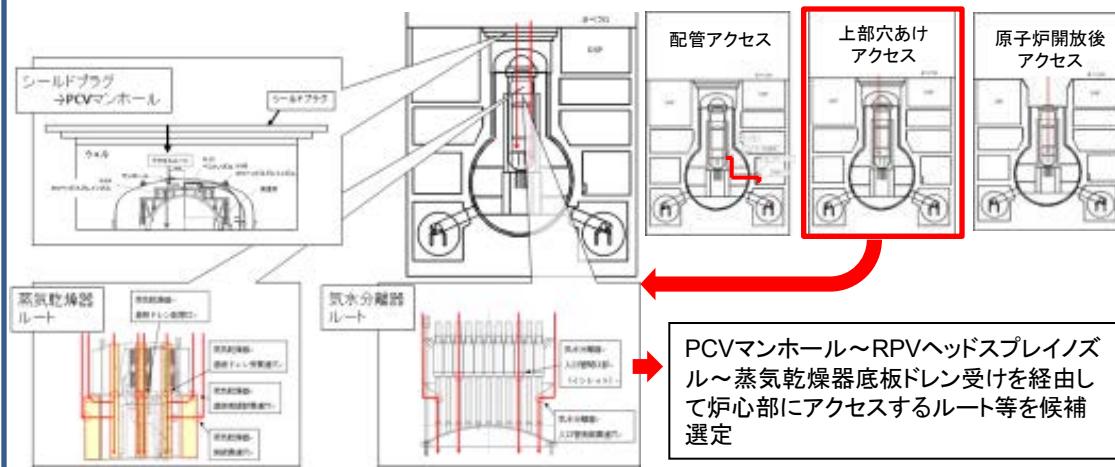


図1 RPV内部へのアクセスルートの検討（上部穴あけアクセスの例）

表1 アクセス技術の開発計画（上部穴あけアクセスの例）

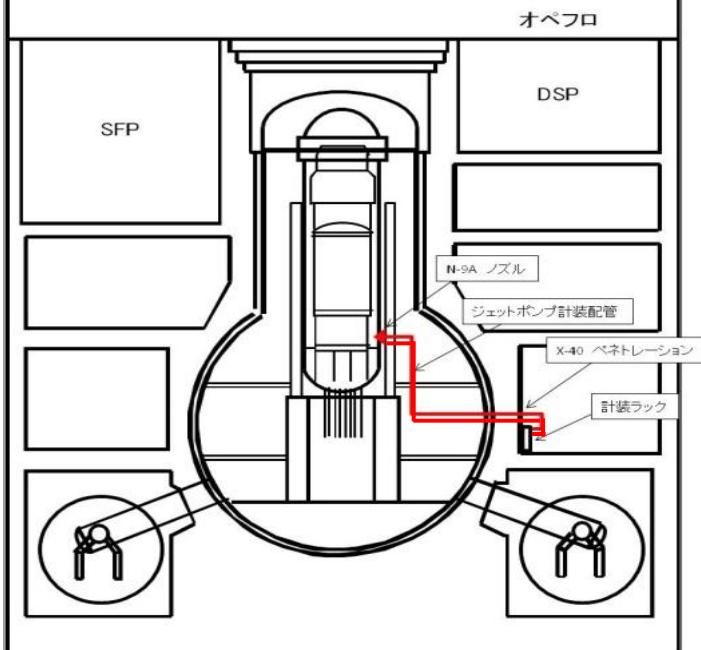
No	開発技術要素	課題	2014	2015	2016	2017	2018
1	穿孔技術	蒸気乾燥器、気水分離器の穴あけ					
2	拡管技術	蒸気乾燥器、気水分離器の穴径の拡管					
3	遠隔操作技術	曲がり、狭隘部の通過、作業状態の監視					
4	バウンダリ形成技術	オペレーションフロア（シールドプラグ）上でのバウンダリ再形成					

課題及び次期計画の方向性

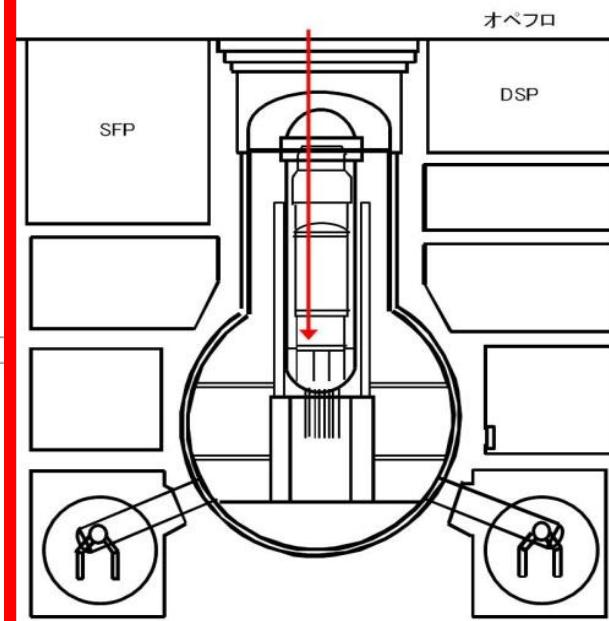
アクセス技術、調査技術、サンプリング技術について、今年度検討した技術開発計画を基に装置設計及び要素試作・試験を実施する必要あり。

RPV内部へのアクセスルートの検討

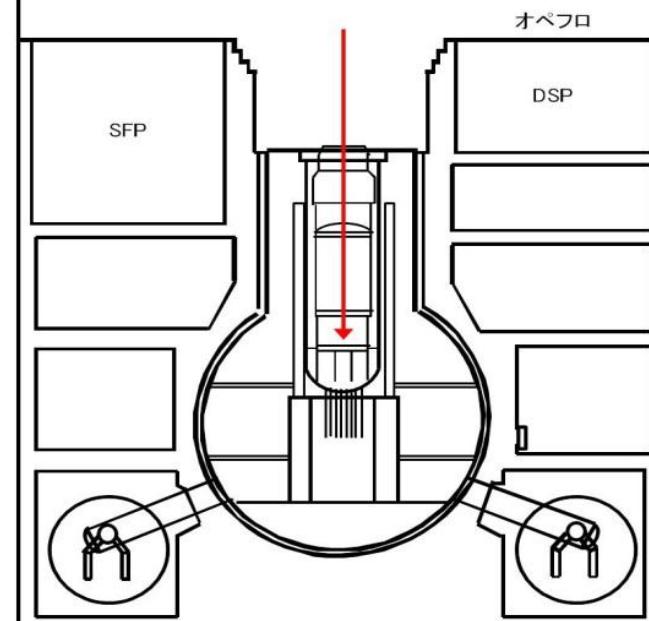
配管アクセス

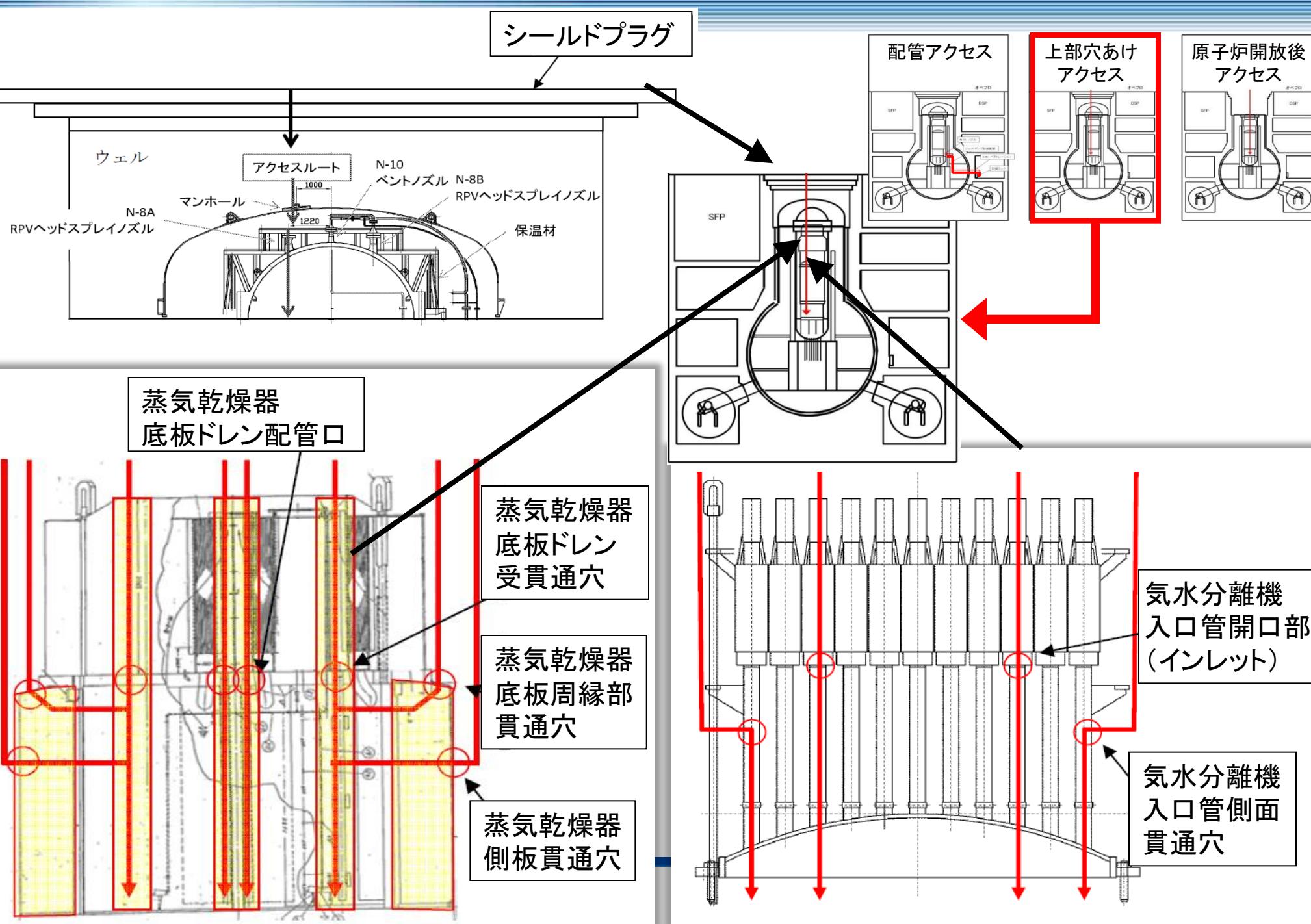


上部穴あけアクセス



原子炉開放後アクセス





燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発

燃料デブリを収納・移送・保管するための収納缶の形状等仕様決定につなげるため、米国スリーマイル島原子力発電所2号機での事故対応等海外の関連技術調査を実施した。収納缶開発における課題を抽出し、今後の開発計画を立案した。

実施内容

1. 破損燃料移送・保管に係る調査

米TMI-2燃料デブリの移送・保管他、海外の破損燃料（漏えい燃料含む）の輸送・貯蔵に係る情報を調査し、燃料デブリを収納・移送・保管するための収納缶設計において参考となる情報を収集した。

2. 保管システムに関する検討

コンクリートキャスク等、国内実績のない使用済燃料の保管システムを調査し、燃料デブリの保管システムの選定において参考となる情報を収集した。

3. 課題の抽出と全体計画立案

①他の研究開発との連携

関係するプロジェクトと連携し、臨界、デブリ性状等の基本物性について、収納缶設計を行う上で必要となる情報を整理した。また、燃料デブリの保管までの基本的な処理フロー案を策定し、課題、必要となる技術開発項目を抽出した。

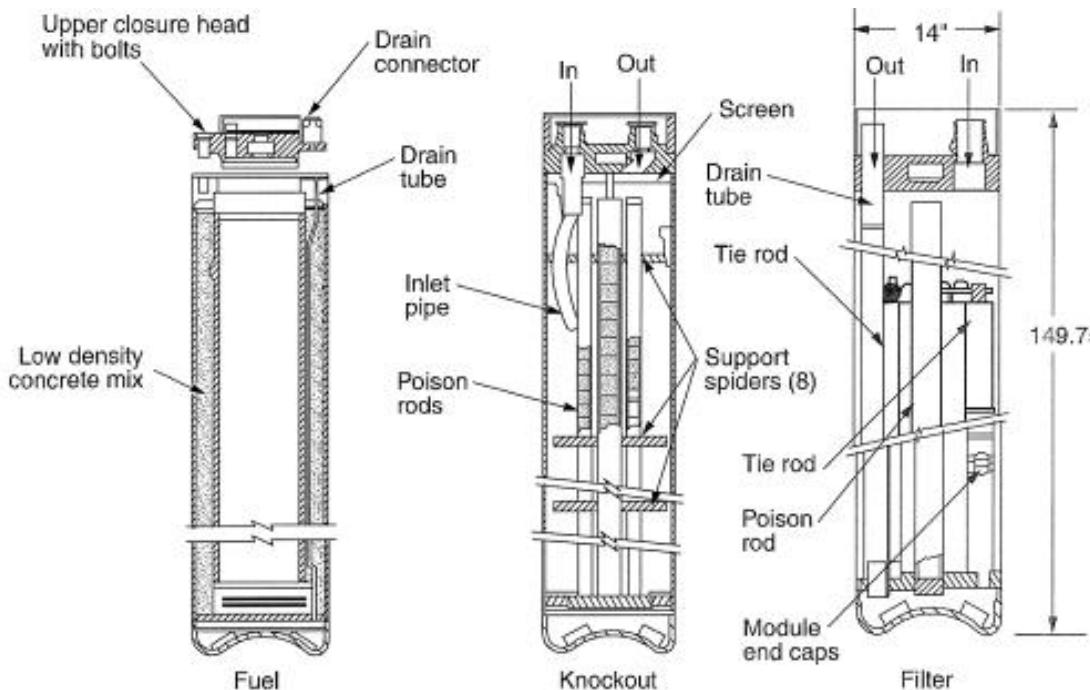
②燃料デブリ保管方法の選定検討

収納缶による燃料デブリ保管に供する場合の技術的課題や問題点を抽出し、比較を行った。

③全体計画の策定

上記の調査及び検討を踏まえ、今後の研究開発計画を策定した。

※ : DOE/SNF/REP-084 TMI Fuel Characteristics for Disposal Criticality Analysis(2013)より

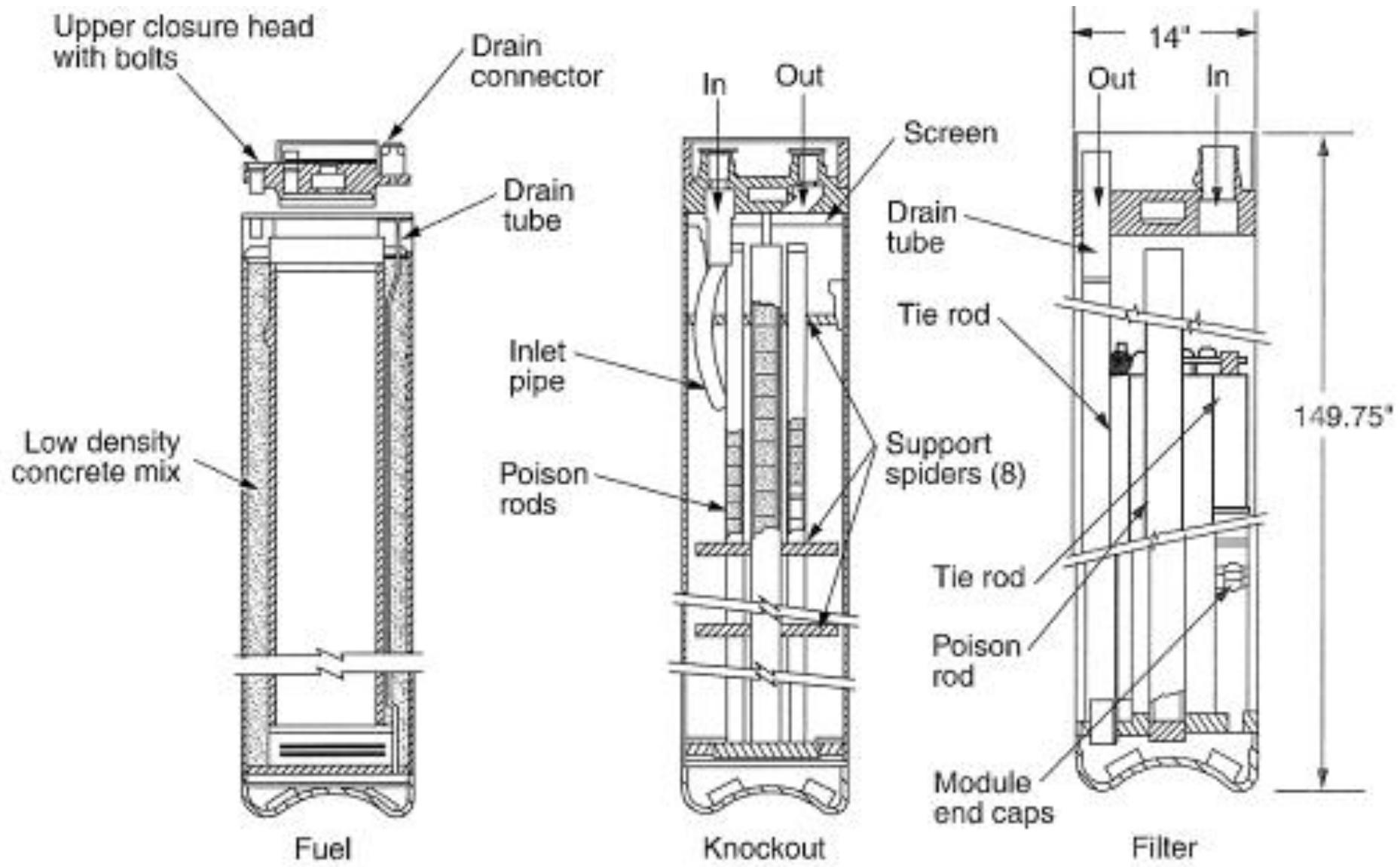


米TMI-2で使用された燃料デブリ用収納缶事例(参考)※

課題及び次期計画の方向性

平成25年度の調査結果を踏まえ、追加の海外調査、収納缶のコンセプトを整理することが必要。平成26年度は、これらを踏まえ設計に必要な安全解析手法を開発する。

燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発



米TMI-2で使用された燃料デブリ用収納缶事例(参考)※

燃料デブリの臨界管理技術の開発

平成31年までに燃料デブリ取出し時の臨界管理手法を開発するため、平成25年度は要素技術として、燃料デブリ取出しまでの各工程における臨界シナリオ評価、臨界検知モニタ試作・検証、非溶解性吸収材候補材試作及び絞り込み、溶解性吸収材課題整理等を完了した(炉内再臨界検知モニタは継続中)。平成26年度はこれらの成果を統合して代表工程であるPCV水張りおよび燃料デブリ取出し時の臨界管理手法の策定を行う。

実施内容

1. 臨界評価

- PCV水張りから燃料デブリ取出しまでの各工程における臨界シナリオ作成完了、再臨界に至る可能性のある状態変化を整理(表1)。

代表ケースでコンクリートとの相互反応も含めた臨界評価完了。

- 性状の異なる複数デブリ、冷却材沸騰取り扱い可能な燃料デブリ向け熱水力モデル、FP核種生成量評価モデル等の追加により臨界時挙動評価モデル改良を完了(次年度の臨界管理方法策定に活用)。

2. 廃液処理、冷却設備の未臨界管理技術

- 臨界近接モニタを試作(図1)、臨界集合体において臨界近接検知性確認を行い、システム成立性確認を完了。(本年度で開発完了予定)

3. 炉内の再臨界検知技術

- 中性子検出器システム仕様検討・設計、試作機器調達実施。
- 再臨界早期検知のため、ガスサンプリング系FPガンマ線検出器システムの改良検討、成立性確認試験のための機器調達実施。
- 上記2件の成立性確認試験実施予定(平成26年4-5月)。

4. 臨界防止技術

- 非溶解性中性子吸収材候補材を試作(図2)、基礎物性データ(表2)を取得して、第一段階の候補絞り込み完了(次年度以降、耐放射線試験、核的特性確認で候補を最終的に絞り込み、デブリ取出しに適用)
- 溶解性中性子吸収材適用時の課題整理し、腐食試験追加等の必要な検討項目抽出を完了(次年度課題検討後、吸収材適用方法決定)。

表1 燃料デブリ取出し時臨界シナリオ例

フェーズ	場所	初期状態		再臨界シナリオ
		燃料状態	冷却状態	
RPV冠水～燃料デブリ取出し	炉心部 デブリベット層	炉心平均組成のデブリ(粒状、塊)	非沸騰で冠水状態	(臨界質量増加) ・上部からの非溶解燃料落下 ・上部からの燃料デブリ落下
		Pu含有率の高いMOXデブリが偏在		(減速材/燃料体積比変化) ・ボランティへの浸水 ・作業に伴うデブリヘッド搅拌
		燃焼度の低い燃料デブリが偏在した状態		(自然災害) ・地震によるデブリ・構造物の落下、移動
		制御棒由来のボロングが事故時に流出した状態		



図2 非溶解性吸収材試作例
(ガドリニア・スラリー)



図1 未臨界監視モニタ画面

表2 性能評価確認項目

評価観点	評価項目
中性子吸収能	Gd/B数密度
デブリ冷却	比熱・熱伝導率
水中で流出しない	密度・溶出特性
水質環境への影響	pH
デブリ取出しへの影響	硬さ

課題・次計画方向性

本年度までに開発した技術を統合し、燃料デブリ取出しなどの工法検討と連携して臨界管理手法の開発を進める。また、合理的な臨界管理のため、早期検知を目的に炉内臨界近接モニタ開発に着手する。

燃料デブリの臨界管理技術の開発

表1 燃料デブリ取出し時臨界シナリオ例

フェーズ	場所	初期状態		再臨界シナリオ
		燃料状態	冷却状態	
RPV冠水～燃料デブリ取出し	炉心部 デブリベッド層	炉心平均組成のデブリ(粒状、塊)	非沸騰で冠水状態	(臨界質量増加) ・上部からの非溶融燃料落下 ・上部からの燃料デブリ落下
		Pu含有率の高いMOXデブリが偏在		(減速材/燃料体積比変化) ・ボロシリケートへの浸水 ・作業に伴うデブリベッド攪拌
		燃焼度の低い燃料デブリが偏在した状態		(自然災害) ・地震によるデブリ・構造物の落下、移動
		制御棒由来のボロンが事故時に流出した状態		



図2 非溶解性吸収材試作例 (ガドリニア・スラリー)



図1 未臨界監視モニタ画面

表2 性能評価確認項目

評価観点	評価項目
中性子吸収能	Gd/B数密度
デブリ冷却	比熱・熱伝導率
水中で流出しない	密度・溶出特性
水質環境への影響	pH
デブリ取出しへの影響	硬さ

事故進展解析技術の高度化による炉内状況把握

燃料デブリの位置等の炉内状況を推察するための事故進展解析技術の高度化（炉心損傷進展モデル改良、下部プレナム内デブリ挙動モデル改良等）を完了。高度化した事故進展解析技術の成果を活用し、現場オペレーションから得られる新たな情報も踏まえながら、炉内状況を把握するための検討を実施し、格納容器に落下したデブリ比率は、1号機が最大、2、3号機はそれより少なく同等であると評価した。

実施内容

1. コード改良・モデルの追加の妥当性の確認

平成24年度に完成したPIRT (Phenomena Identification and Ranking Table)に対し、その重要度ランクを改めて感度解析にて確認し、改定した。

2. 解析コードの改良・高度化

PIRTの結果、サイトのオペレーションから得られる情報、既存の模擬試験の結果、最新知見等に基づき解析コード(MAAP、SAMSON)の改良(図1)し、解析精度を向上させた。

3. 改良コードによる解析(MAAP、SAMSON(図2))

改良した最新版コードと構築したデータベースに基づき1～3号機の事故進展／炉内状況の把握に関する解析を実施し、モデル改良の影響を確認した。

4. CFDによる個別事象解析

铸造シミュレーションコードを用いたデブリ拡がり試験解析を行い、実機体系でのデブリ拡がり挙動評価への適用性を確認した(図3)。

5. モックアップ試験

シビアアクシデント事象進展の詳細分析に資する模擬試験等(海水熱伝達試験、溶融燃料落下挙動試験)を実施し、海水注入時に対する、従来の熱伝達評価式の適用性などを確認した(図4)。

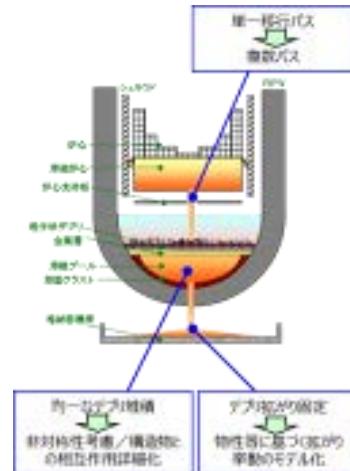


図1 MAAPのモデル改良

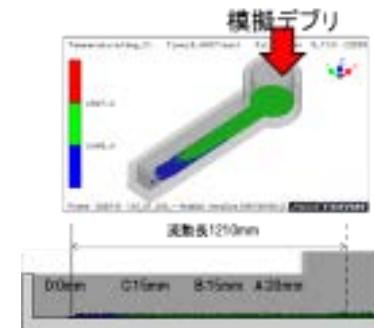


図3 模擬デブリの流動停止試験再現

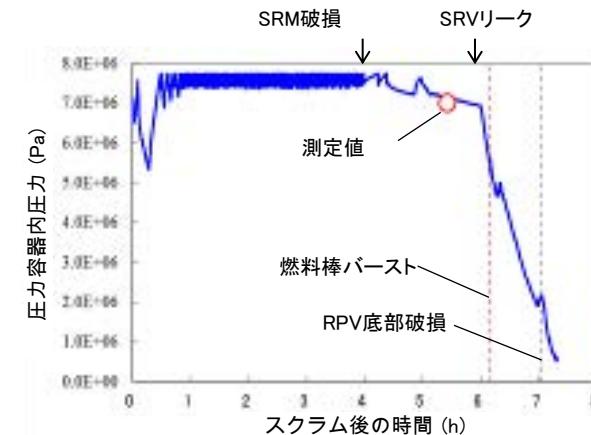


図2 SAMSONによる1号機炉内圧力の時間変化予測

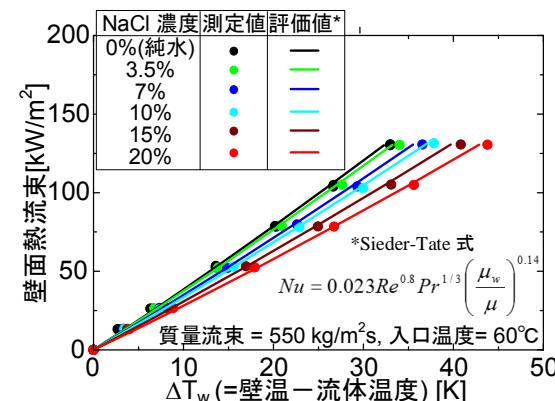


図4 海水の熱伝達に関する実験値と評価値の比較

課題及び次期計画方向性

他プロジェクトと良く連携し情報共有を密にし、廃炉プロジェクトへのアウトプット及び当プロジェクトのインプットを有効なものとする。

事故進展解析技術の高度化による炉内状況把握

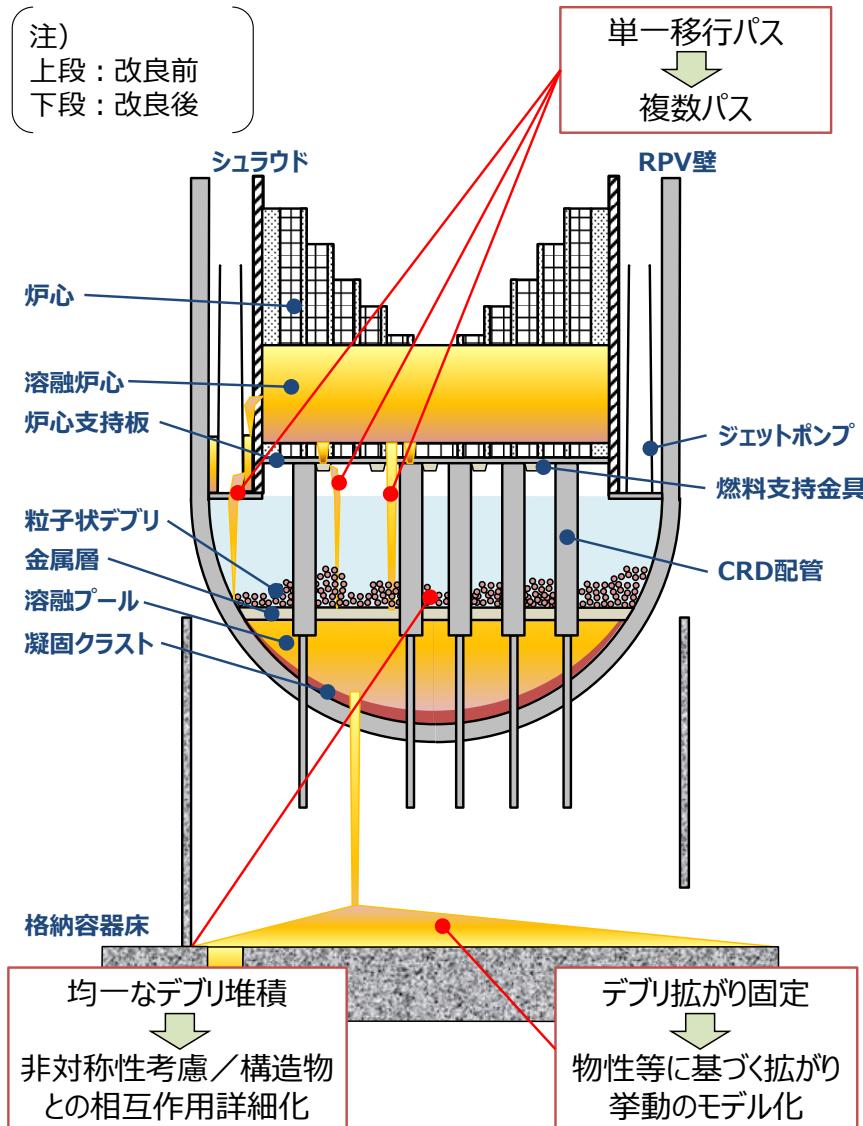


図1 MAAPのモデル改良

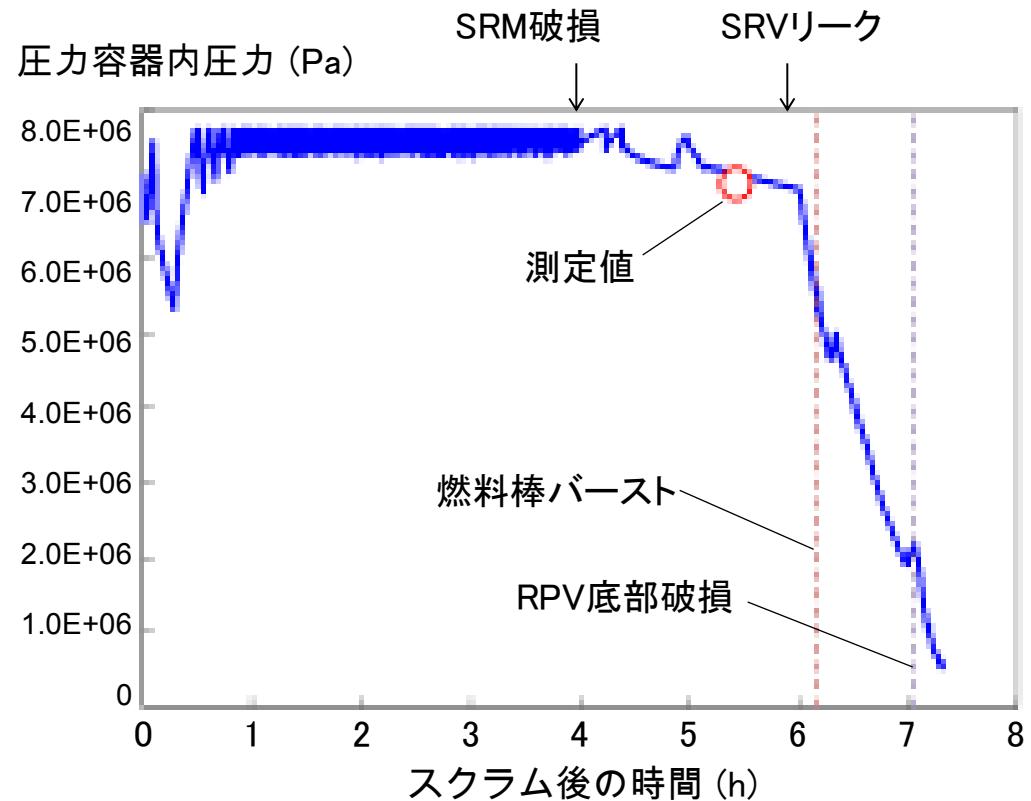


図2 SAMPSONによる1号機炉内圧力の時間変化予測

事故進展解析技術の高度化による炉内状況把握

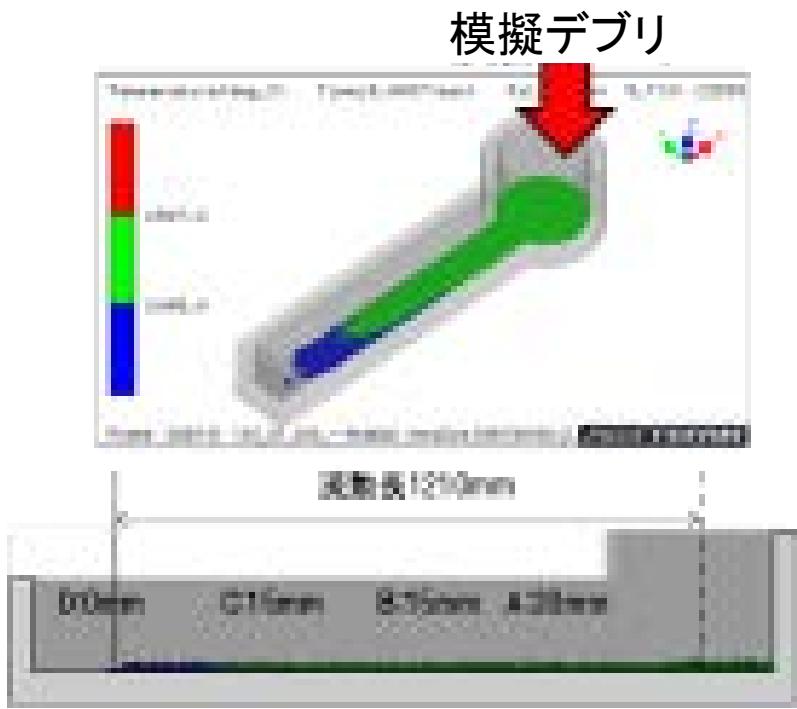


図3 模擬デブリの流動停止試験再現

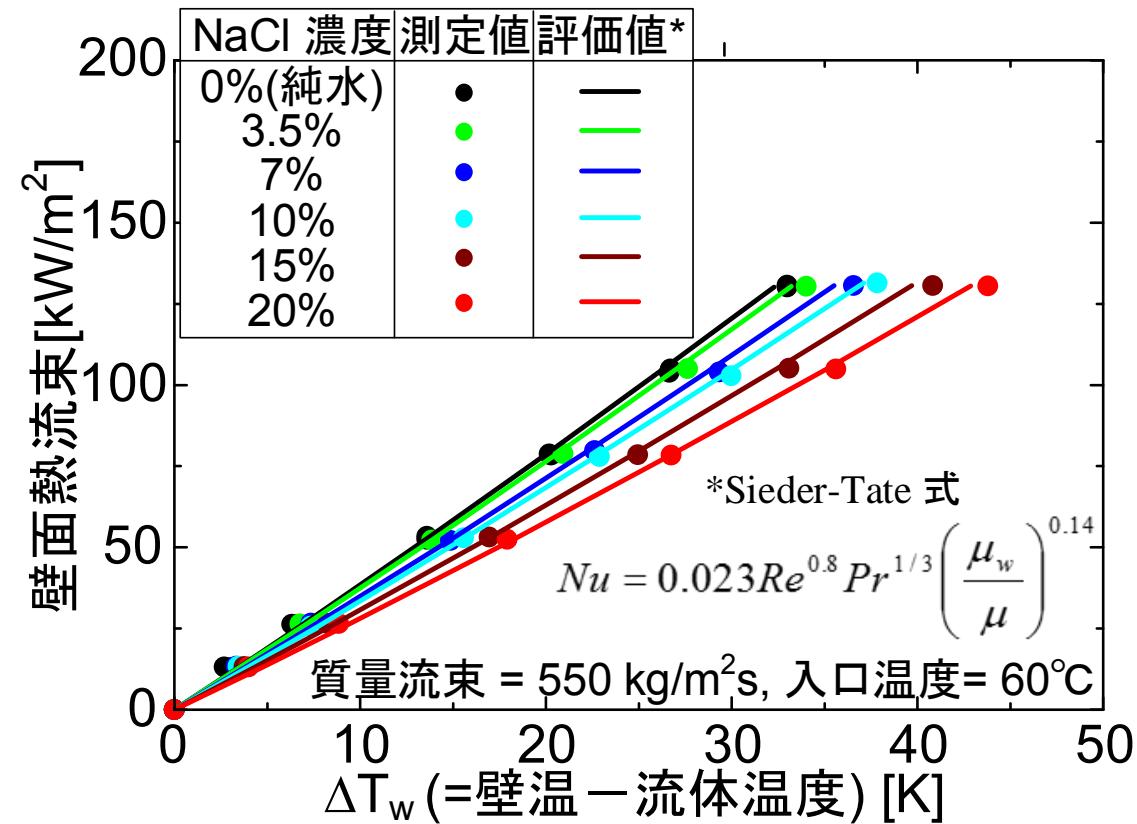


図4 海水の熱伝達に関する実験値と評価値の比較

模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ処置技術の開発

燃料デブリ取り出し技術の検討に向けて、実際のデブリの性状を推定するため、それを模擬した材料（模擬デブリ）を作製して硬さ等のデータを取得した。また、燃料デブリ取り出し後の処置シナリオを検討するため、既存の燃料処理技術の適用性や技術課題を抽出し、取りうる選択肢を比較して、得失を明らかにした。

実施内容

デブリ特性の把握 (2-③-1)

- ① 燃料デブリの取り出し技術開発に必要な物性値の検討
 - 種々の模擬材について、切削性への硬さ等の影響度を把握した。
 - 炉内の金属部材の混入を想定し、高Zr領域の $(U,Zr)O_2$ や、Fe含有模擬デブリの機械的特性の測定、測定値の化学系毎の物性分布推定への反映等を行った。

② 1F事故に特有な反応の把握

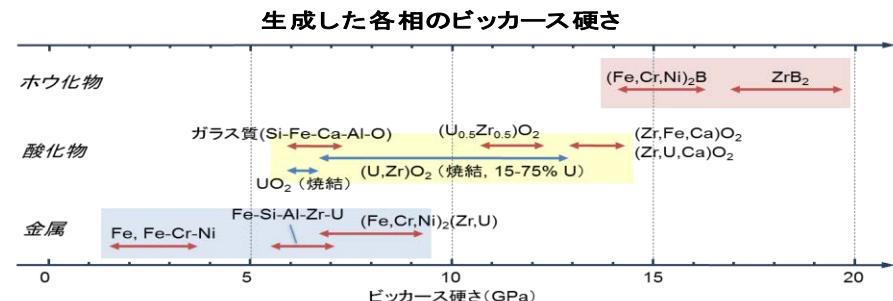
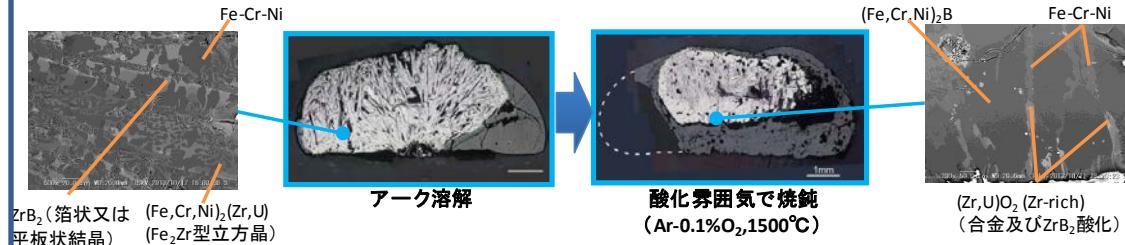
- 制御材との反応で、合金相やホウ化物が生成する可能性を確認した。また、コンクリートとの反応（MCCI）で、酸化物（ガラス質）と合金層が分離する傾向を確認。最も硬い物質はホウ化物と推定された。
- 一部の燃料に含まれていたGdについて、それが酸化物模擬デブリ($(U,Zr)O_2$)の熱物性に与える影響とその範囲を確認した。

③ 実デブリ特性の推定

- 上記の結果から、デブリの特性リスト（暫定版）を作成した。

デブリ処置技術の開発 (2-③-3)

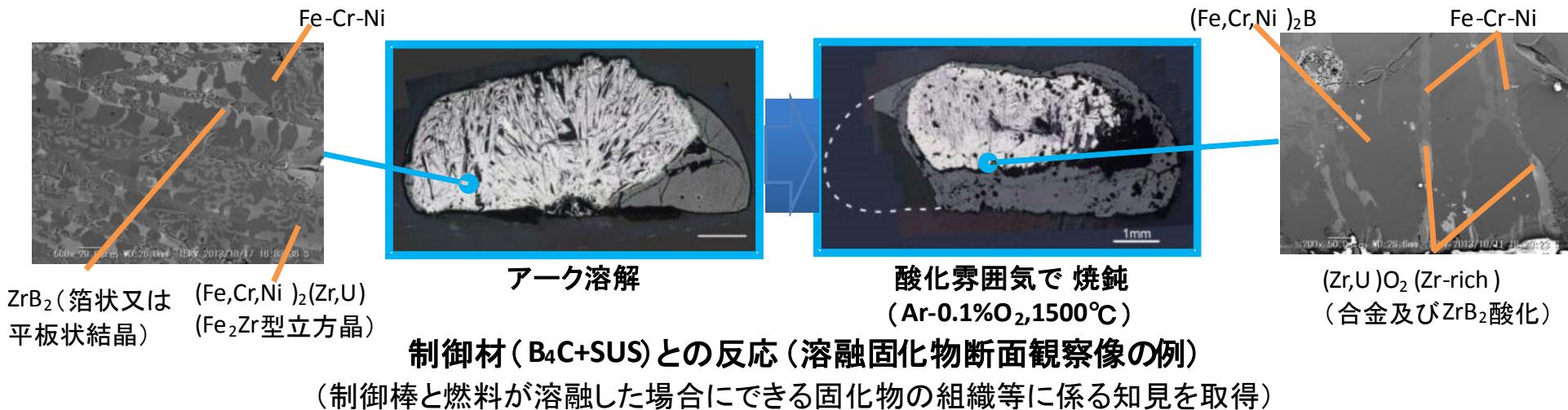
- ① 燃料デブリ処置シナリオ検討に向けた技術的要件の整理
 - 取り出し後の燃料デブリの処置シナリオについて、各選択肢を比較し、得失を明らかにした。
 - 既存の使用済燃料輸送容器の適用性を評価した。また、保管に影響する燃料デブリの含水性等の重要度が高いと判断した。
- ② デブリの分析に係る要素技術検討
 - MCCI生成物を含む各種模擬デブリについて、分析の前処理技術である融解プロセスの基礎データを取得した。
- ③ 既存燃料処理技術の適用性検討
 - 模擬デブリの、湿式及び乾式処理への適合性について、基礎データを取得した。



次期計画の方向性

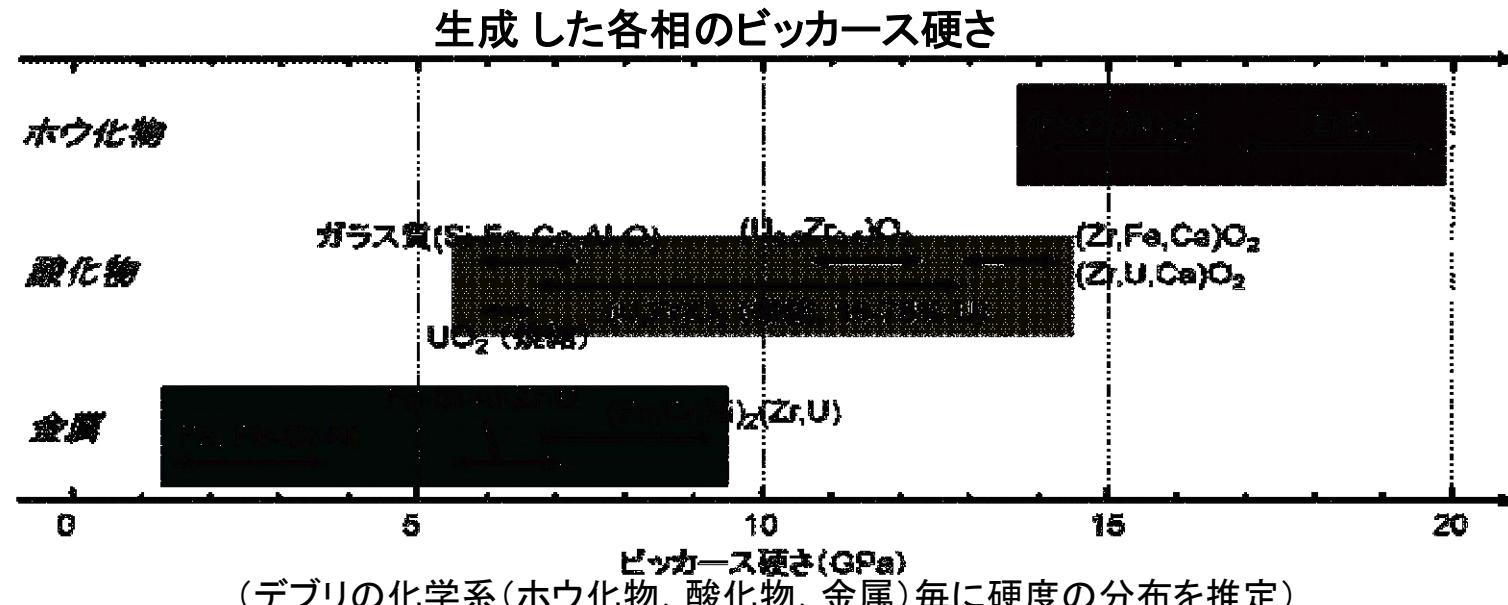
模擬デブリを用いた硬さ等の物性把握、圧力容器内外の材料との反応性の評価、MCCI生成物の特性評価等を実施する。2-③-3では、分析要素技術の開発を継続するとともに、保管技術に影響する燃料デブリの含水率等の検討・評価を行う。

模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ処置技術の開発



制御材(B_4C+SS)との反応(溶融固化物断面観察像の例)

(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)



平成26年度新規研究

平成26年度からは関連する新規研究として、冠水工法を中心とする燃料デブリ・炉内構造物取出技術の開発、原子炉内燃料デブリ検知技術の開発などが計画されている。
(参考：3月27日廃炉・汚染水対策チーム会合より)