

平成26年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金 (燃料デブリ臨界管理技術の開発)

完了報告

平成28年3月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

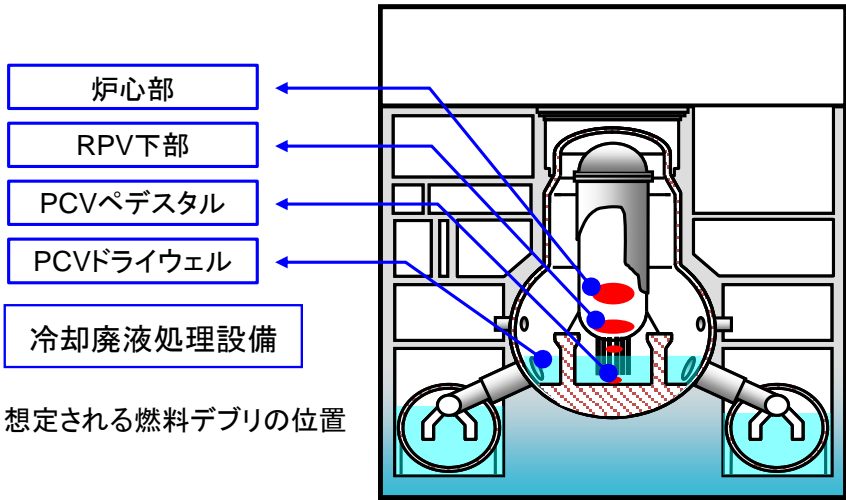
1. 全体計画

1.1 「燃料デブリ臨界管理技術の開発」の目的と目標

【目的】
 現状の燃料デブリは臨界になっていないと考えられるが、今後のデブリ取り出し作業等に伴いデブリ形状や水量が変化した場合でも、臨界を防止するとともに、万一臨界が生じた場合でも一般公衆及び作業員に過度の被ばくが生じることのないような臨界管理手法を開発する。



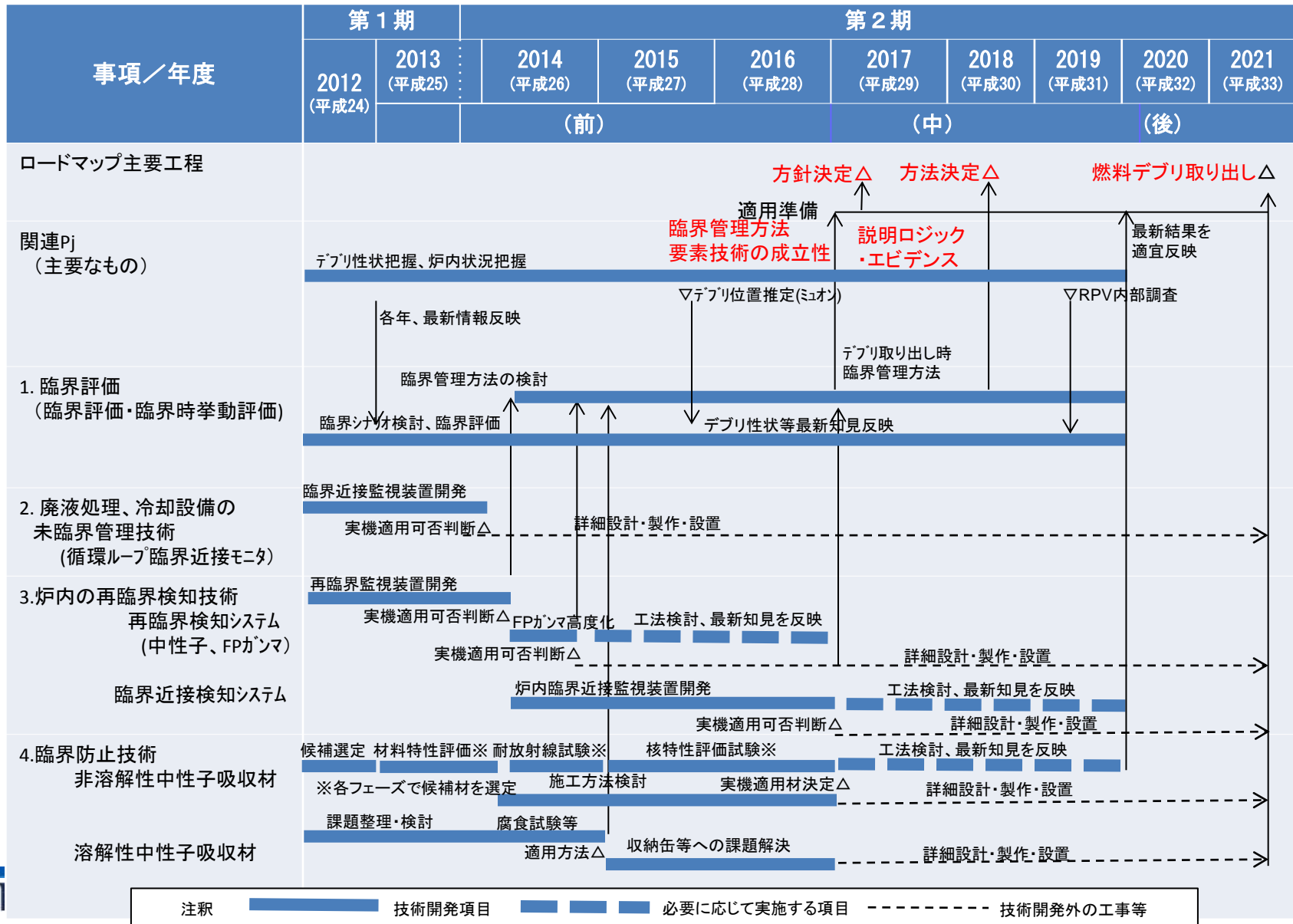
・ロードマップ各工程でデブリ状態が変化するPCV水張り、デブリ取り出し等で合理的な臨界管理方法を策定するために、臨界評価、臨界監視及び臨界防止技術の開発を行う。
 ・当初、冠水工法をベースに開発を実施していたが、ロードマップ改訂を受け、気中工法を含む複数工法を対象に検討を実施中。



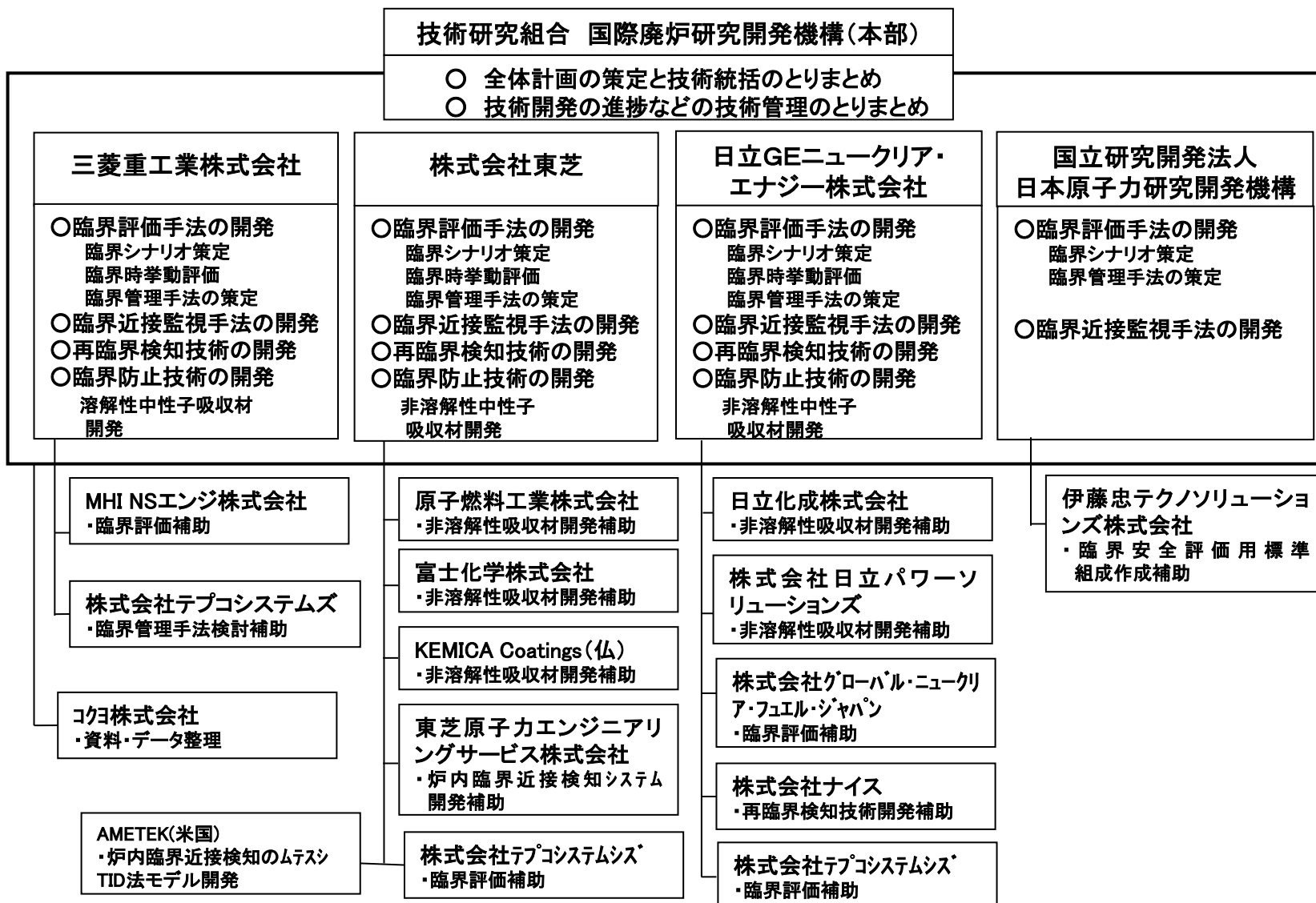
- ①臨界評価技術の開発 臨界シナリオ・臨界評価、臨界時挙動評価、臨界管理手法策定
- ②臨界監視技術の開発 炉内再臨界検知システム、炉内臨界近接検知システム、小循環ループ向け臨界近接モニタ開発
- ③臨界防止技術の開発 非溶解性中性子吸収材、溶解性中性子吸収材開発

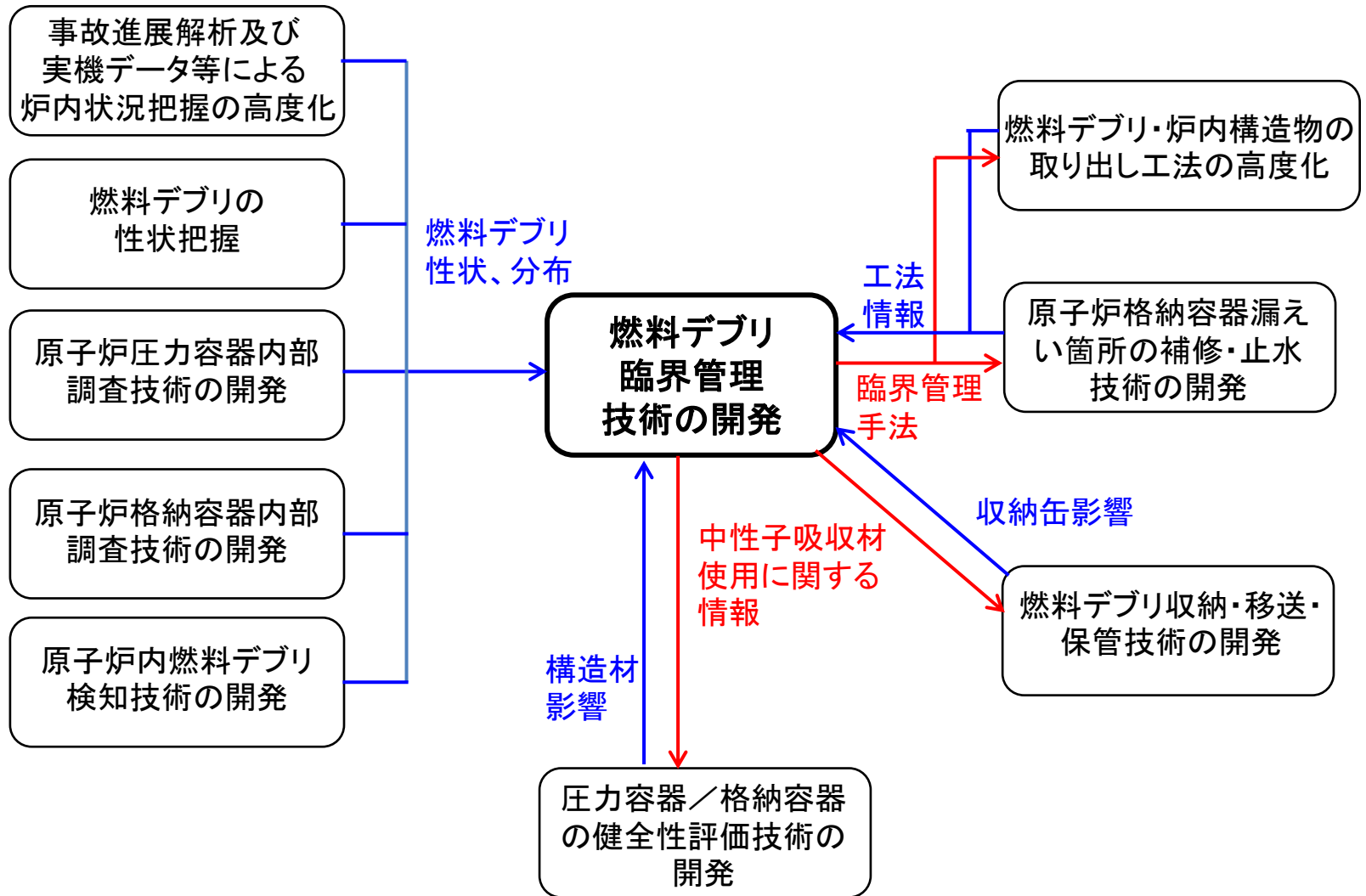
1. 全体計画

1.2 ロードマップとの関係



2.平成27年度プロジェクト体制





関連プロジェクトとの連携

主な連携状況

関連Pj	現状	今後
炉内状況把握	・最新評価結果の入手、臨界シナリオ検討への反映	—
燃料デブリの性状把握	—	・Gd核種帯同など、臨界管理合理化に必要な情報の入手
原子炉圧力容器内部調査	—	・調査ニーズ発信 ・サンプリング時の臨界管理面での検討事項の整理
原子炉内燃料デブリ検知	・最新評価結果の入手、臨界シナリオ検討への反映	—
圧力容器／格納容器の健全性評価	・ホウ酸水使用時の腐食試験条件の設定 ・ホウ酸水水質管理設備検討情報の交換	・腐食試験結果の分析 ・ホウ酸水使用可否情報の交換
固体廃棄物の処理・処分	—	・溶解性・非溶解性吸収材適用時の影響の検討
補修・止水技術	・ホウ酸水使用時の適用情報交換	・ホウ酸水使用可否の情報交換
燃料デブリ取り出し技術	・取り出し工法の情報交換 ・安全に関する検討	・臨界管理方法の発信 ・臨界関連事故・異常事象の整理、システム要求の発信
収納・移送・保管技術	・溶解性・非溶解性吸収材適用時の影響の検討	—

3. 実施工程(1/2)

 予定
 実績
 ▽: 予定 ▼: 完了

燃料デブリ臨界管理技術の開発 平成27年度工程表

大分類	小分類	平成27年度											
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1) 臨界評価 手法の 開発	①臨界シナリオの策定												
	PCV水張り時シナリオ見直し	水張り時シナリオ▽				水張り時シナリオ▼							
	デブリ取り出し時シナリオ見直し		デブリ取り出し時シナリオ▽			デブリ取り出し時シナリオ▼							
	②臨界時挙動評価												
	PCV水張り用モデル精緻化	精緻化▽				精緻化▼							
	PCV水張り時挙動評価				簡易評価▽					詳細評価▽			
					簡易評価▼					詳細評価▼			
	デブリ取り出し用モデル整備				取り出し時モデル▽								
					取り出し時モデル▼								
		③臨界管理手法の策定											
	PCV水張り時臨界管理方法 (純水/ホウ酸水)合理化			水張り時管理方法▽				水張り時管理方法▼					
	デブリ取り出し時臨界管理方法検討				取り出し時臨界管理基本方針▽								
					取り出し時臨界管理基本方針▼								
2) 臨界近接 監視手法の 開発	検知手法選定				TID法を除く1次検討▼					複数手法組合せ案▽			複数手法組合せ案▼
	システム概念検討								システム仕様▽			システム仕様▼	
	適用方法検討								適用方法▽			適用方法▼	
									1次案▼			適用方法▼	
	実証試験方法検討				実証試験計画▽								
				実証試験計画▼									

3. 実施工程(2/2)

 予定
 実績
 ▽: 予定 ▼: 完了

燃料デブリ臨界管理技術の開発 平成27年度工程表

大分類	小分類	平成27年度												
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
3)再臨界 検知技術の 開発	中性子システム適用方法検討	複数工法での適用方法▽					複数工法での適用方法▼							
	FPy 線システム適用方法検討	複数工法での適用方法▽					複数工法での適用方法▼							
	未臨界度推定アルゴリズム実証試験方法 検討	実証試験計画▽												
		実証試験計画▼												
4)臨界防止 技術の開発	①非溶解性中性子吸収材													
	照射試験計画(新規候補材)	試験計画▽												
		試験計画▼												
	照射試験				水中1回目完了▼		気中完了▼			耐放射線性能▽		一部引張試験▽		
					水中1回目完了▼		気中完了▼			耐放射線性能▼		引張試験▼		
	核の特性確認試験計画検討						試験計画▽							
							試験計画▼							
	適用方法検討									複数工法での適用方法▽				
										複数工法での適用方法▼				
	②溶解性中性子吸収材													
低濃度適用性確認試験計画	試験計画▽													
	試験計画▼													
低濃度適用性確認試験						適用性評価結果▽								
						試験完了▼			適用性評価結果▼					
運用法検討									溶解性吸収材運用方法▽					
									設備検討▼ 溶解性吸収材運用方法▼					
第三者有識者 による確認	方法検討	確認方法案▼												
	設置に向けた活動						諮問内容・設置機関決定▼					委員構成検討▽		
						諮問内容・設置機関決定▼					委員構成検討▼			
進捗報告会	▼実施計画					▼中間報告						最終報告▼		

4. 平成27年度成果

4.1 臨界評価手法の開発（臨界シナリオの策定(1/2)）

[達成目標]

- ・ロードマップ上各工程において、最新知見を反映するとともに、複数のデブリ取り出し工法を踏まえた臨界シナリオの作成及び臨界の可能性の推定が行われていること。

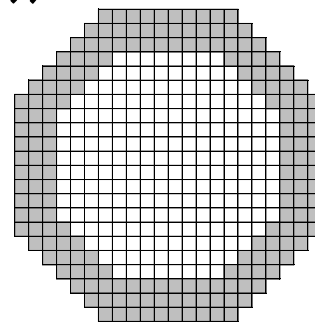
[平成27年度成果]

- ・臨界シナリオ・臨界評価への最新知見を反映した見直し
 - 炉内状況把握、デブリ位置推定の結果などの最新情報に基づき現状の臨界リスクを推定（次ページ図）
 - 気中取り出し等複数工法を考慮した臨界シナリオを見直し(図3)
 - 事故直前の3次元炉内組成分布に基づき、炉心残存燃料冠水時の臨界可能性を再評価：
 - 1号機： 集合体3層以下で未臨界(図1)
 - 2号機： 集合体5x5体より小さければ未臨界(図2)

- ・デブリ標準組成の評価
 - 国際燃焼計算ベンチマーク問題に基づき評価したデブリ標準組成を使用した最小臨界量の評価を実施。昨年度作成した標準的デブリ組成のデータセットの拡充を実施。計算値のばらつきを整理し、計算に不確定さの考え方を整理。
- ・ガドリニアを考慮した臨界抑制のためのホウ素濃度を評価

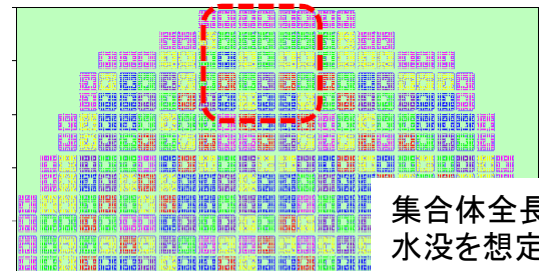
[今後の課題]

- ・集合体混合、Gd核種帯同などの合理化の説明ロジックの補強



ミュオン測定結果から高さ1m以下を想定

図1 1号機 集合体3層(これ以下では未臨界)



集合体全長水没を想定

図2 2号機 5x5集合体(これ未満では未臨界)

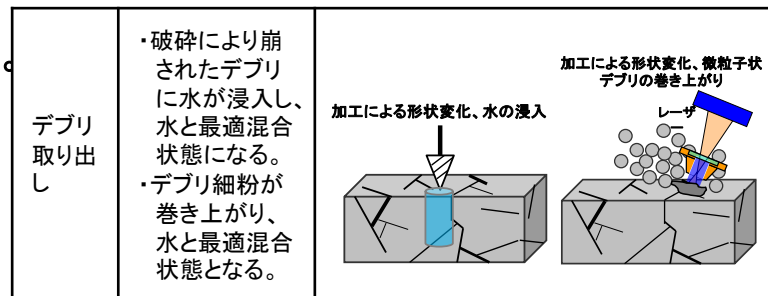
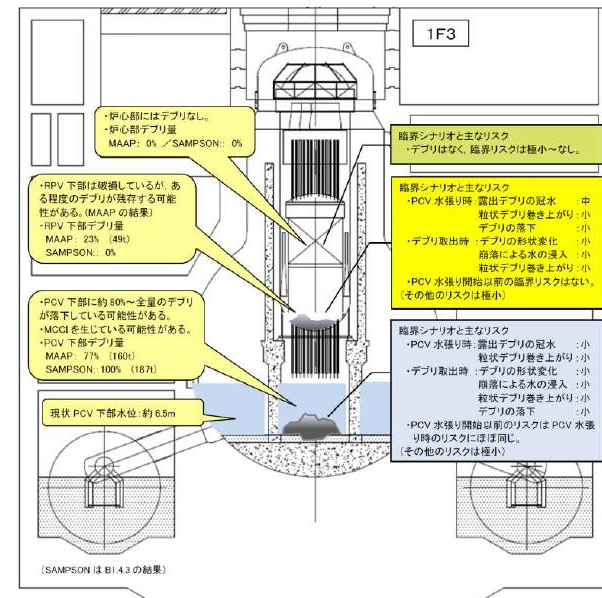
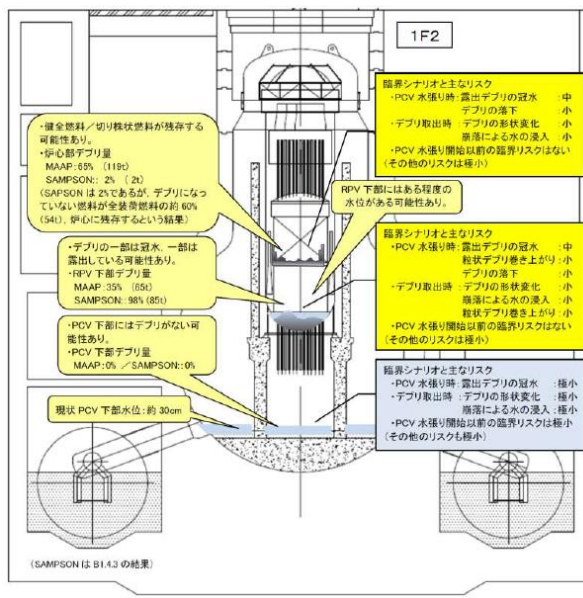
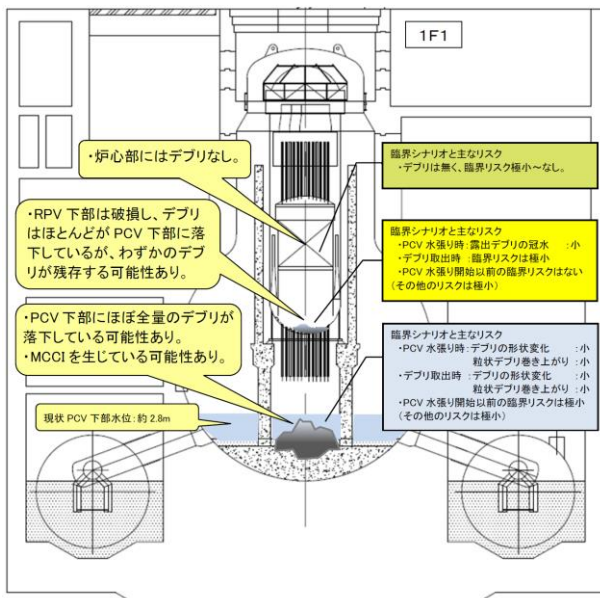


図3 デブリ取り出し作業を想定した臨界シナリオ例

4. 1 臨界評価手法の開発 (臨界シナリオの策定(2/2))



これらの炉内状況の推定は昨年度(平成26年度)の事業成果に基づく。
 今年度(平成27年度)の事業成果に基づくリスク評価は次年度(平成28年度)に実施する。

* 評価でリスクが“中”とされているものは、今後のデブリ取り出しに向け状態を変化させる場合のものである。
 炉内や格納容器内の調査等の情報に基づき評価の精度をあげ、臨界リスクの有無や小さいことを確認していく。

臨界リスク評価(1F-1, 2, 3号機)

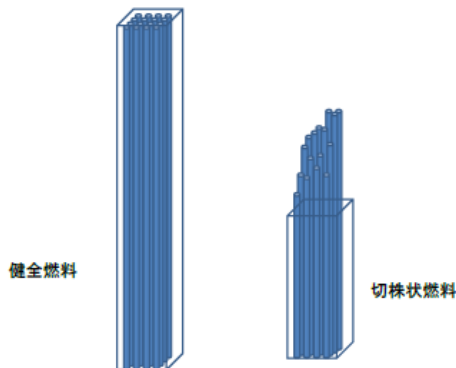
4. 1 臨界評価手法の開発 (臨界時挙動評価(1/3))

[達成目標]

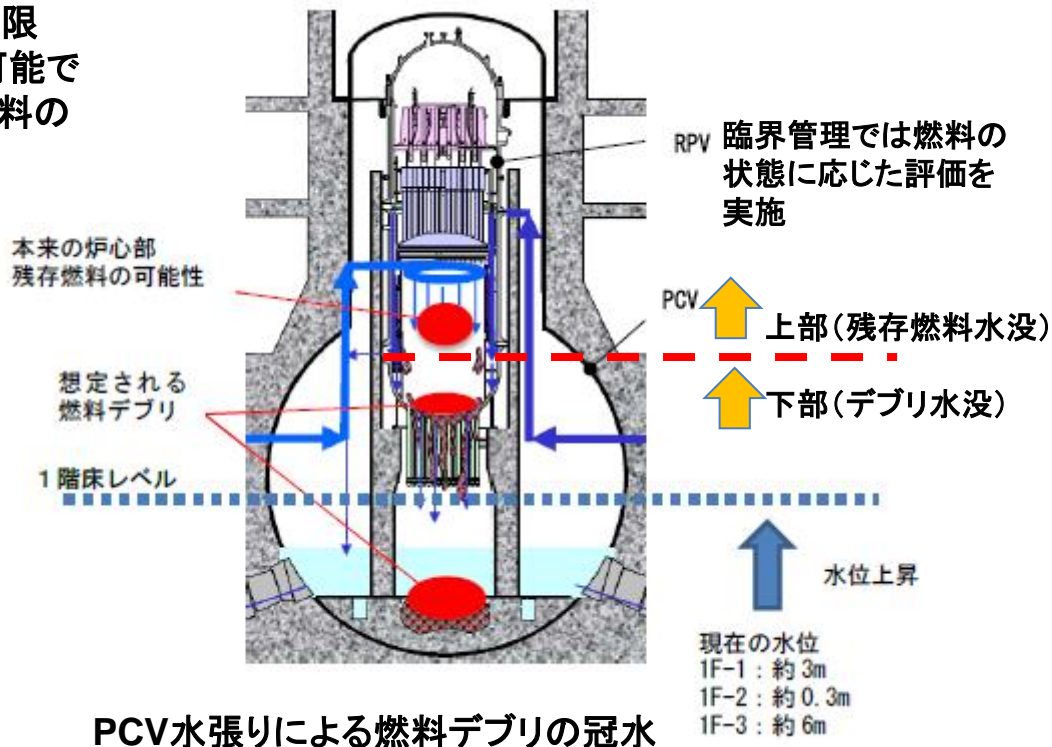
- ・PCV上部水張りを取り扱える評価モデルが開発されていること。開発されたモデルを用い、最新の知見を反映して臨界時挙動評価により臨界時の被ばく線量評価が実施されていること。
- ・平成26年度時点で検討されている複数工法に対応して、燃料デブリ取り出し時の臨界時挙動評価用モデルおよび手法が開発されていること。

[平成27年度成果]

- ・PCV上部水張り時に必要な機能を整備
前年度RPV下部デブリ水没時に水張り速度制限により被ばく線量を許容範囲に収めることが可能であることを示した。これに引き続き炉内残存燃料の冠水を対象とした評価手法を開発した。



炉内残存燃料のイメージ



PCV水張りによる燃料デブリの冠水

4.1 臨界評価手法の開発 (臨界時挙動評価(2/3))

[平成27年度成果]

- ・複数工法への機能拡張
 複数工法に対応する臨界時の直接線・スカイシャイン線(図1)モデルを整備
 取り出しPJ検討中のRPV上部水・鉄遮へいを考慮した合理的なモデルを採用
- ・被ばく線量評価モデルの高度化
 公衆被ばく線量評価モデルをベースとして、建屋外作業員(図1)被ばく線量モデルを整備し試解析(図2)を実施
 また、公衆・建屋外作業員評価の精緻化としてグランドシャイン線(図1)モデルを整備
- ・パラメータの確率的な取扱いによる評価結果の不確定さ検討
 不確定さの大きな気象パラメータの確率的な取扱いにより、被ばく線量評価結果の信頼性を検討
 現状評価に使用している気象パラメータが十分に保守的な条件であることを確認

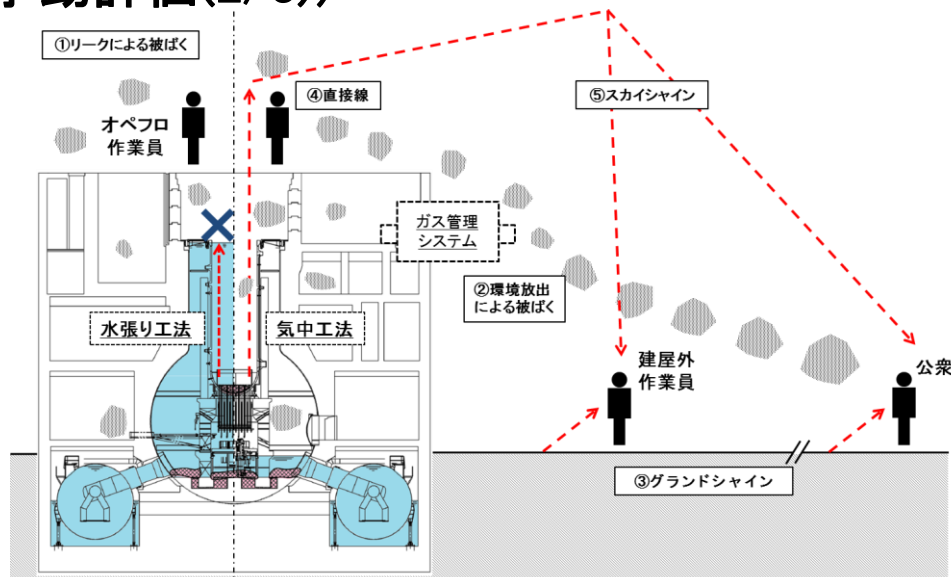


図1 被ばく線量評価モデル

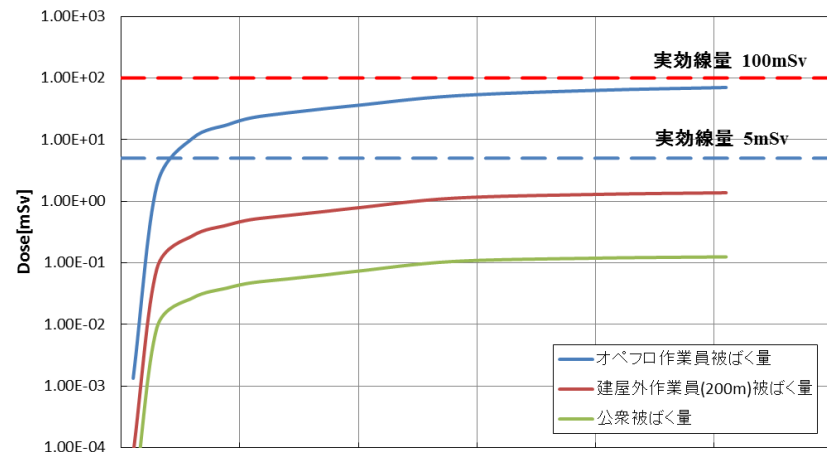
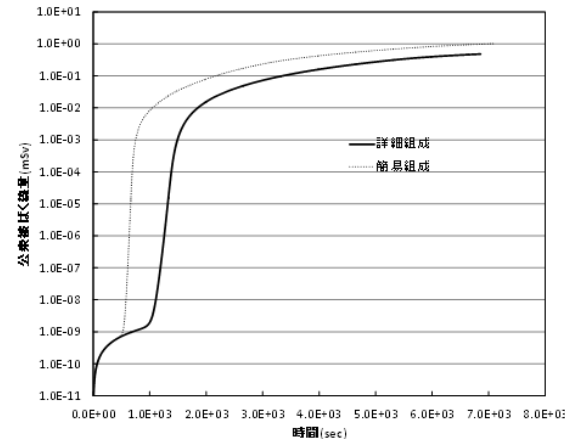


図2 建屋外作業員被ばく線量の試解析
 (平成26年度評価のPCV下部水張り時における公衆被ばく線量、オペフロ作業員被ばく線量の試解析例との比較)

4. 1 臨界評価手法の開発 (臨界時挙動評価(3/3))

[平成27年度成果]

- ・臨界管理手法策定のための臨界時挙動評価
 - PCV上部水張り工法の成立性を検討するため2号機の臨界時挙動評価を実施(図1)
 - 事故前の詳細燃料組成を織り込むことで過度の保守性を排除
 - 不明な残存燃料体数をパラメータとして、被ばく線量との関係性を評価(図2)。
- 全量残存を仮定しても、水位上昇速度を1cm/hに制限すれば、事故時緊急被ばく線量を満足できる見込み。残存燃料体数が約380体(*)以下であれば、平常時被ばく線量内に収まる可能性あり
- * ミュオン透過法の分解能 1mで識別が可能



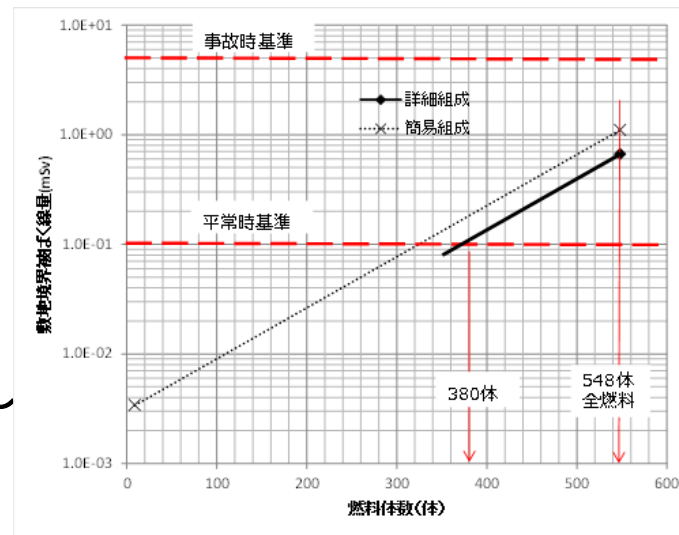
臨界検知遅れ時間は1hと想定。今後再臨界検知システム成立性確認試験結果を反映して再確認を行う。

図1 水位上昇時の臨界による公衆被ばく線量の解析例(2号機)

- ・デブリ取り出し時の課題の整理
- デブリ取り出し時に想定される臨界シナリオに基づき臨界時挙動評価に必要とされる解析機能を検討
- これまで開発済みの1点炉核モデルと熱水力モデルで対応可能であることを確認。
- 局所的なデブリの弱結合による臨界事象の取り扱いに、については大学と意見交換を実施。

[今後の課題]

- ・最新知見による再臨界条件と臨界到達後の影響の見直し
- 現状評価条件の大きな保守性の確認 (RPV残存デブリ量、ヨウ素放出量等)
- ・合理的詳細評価のため上記評価条件の見直し
- ・デブリ取り出し時臨界時挙動・被ばく線量評価



平常時基準は1mSv/年であるが、他の寄与分も考慮して臨界による追加分を0.1mSvと考えた。

図2 残存燃料体数と被ばく線量の関係(2号機)

4. 1 臨界評価手法の開発（臨界管理手法の策定）

[達成目標]

- ・平成26年度時点で検討されている複数工法に対応して、万一の臨界の際にも緊急時被ばく線量（作業員100mSv、一般公衆5mSv）以下とする臨界管理手法が策定できていること。
PCV水張りについては最新の知見を反映した見直しが行われていること。
- ・デブリ取り出しに対しては、臨界管理の基本方針が決定されていること。

[平成27年度成果]

- ・臨界管理の基本的な考え方の整理
 - 一 臨界管理の目標、被ばく線量許容範囲について考え方を整理
 - 一 第三者有識者による確認方法を検討
- ・PCV水張り時の臨界管理手法精緻化
 - 一 臨界抑制必要ホウ素濃度合理化検討(図1)
 - 一 燃焼クレジットの考慮
 - 一 集合体混合を仮定し、評価用濃縮度を低減するとともに、Gd核種を考慮
 - 一 燃料集合体がほぼ同時点で溶融することを説明するために、溶融時点の温度分布評価を実施(図2)

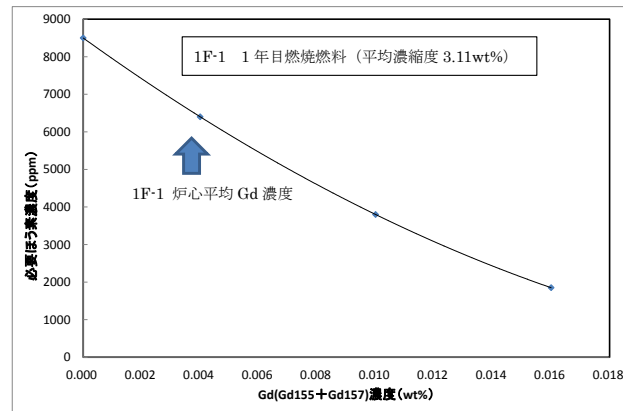


図1 Gd核種考慮による必要ホウ素濃度低減検討例

- ・燃料デブリ取り出し時臨界管理手法の策定
 - 一 水中／気中取り出しに対して基本的な考え方(次ページ)
- ・事故・過渡事象への対応
 - 一 事故・過渡事象整理のため、臨界に関する特性要因、事象整理
 - 一 取り出し工法検討に提示

[今後の課題]

- ・必要ホウ素濃度低減に関する説明ロジックの確立
- ・上部水張りにおける臨界時挙動・被ばく線量評価を踏まえ、水張り時臨界管理手法の確立
- ・溶解性／非溶解性吸収材使用方法検討のうえ、取り出し時管理手法の考え方の整理
 - ・事故・異常事象整理中、対策検討のうえ、設備への要求の整理
 - （平成28年度に、複数工法に対応する取り出し時臨界管理手法の確立）

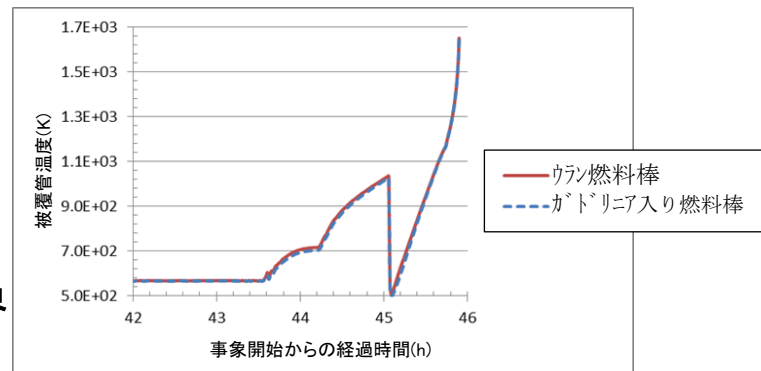


図2 燃料溶融時のウラン燃料及びガドリニア入り燃料の被覆管温度

臨界管理方法と要素技術開発の関係： PCV水張り時①(純水水張り)

項目	①純水での水張り	検討課題・要素技術開発
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・純水(非ホウ酸水)を用いた水張り ・現状設備での適用容易、腐食・漏えいリスク小 ・監視を主体にした臨界管理方法(先行事例とは異なる方法) 	<ul style="list-style-type: none"> ・対外的説明性 → 第三者有識者による確認
臨界リスク	<ul style="list-style-type: none"> ・露出デブリ、炉内残存燃料の水没 ・地震などによる燃料落下 	<ul style="list-style-type: none"> ・最新情報を反映した臨界リスク評価 → 臨界評価
臨界監視	<ul style="list-style-type: none"> ・水張り前に臨界可能な量(30cmサイズ)が確認された場合には適用不可 ・ガスサンプリング系システムによる炉内再臨界検知 	<ul style="list-style-type: none"> → 炉内再臨界検知技術開発 検知性向上のための設備高度化(Kr検知)
臨界防止(PS)	<ul style="list-style-type: none"> ・水張り速度を制限し、ガスサンプリング系システムにより未臨界を確認しながら段階的水張り 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガスサンプリング系システムによる臨界近接監視の成立性 → 炉内再臨界検知技術開発 成立性確認試験(実機)
臨 界 事 故 時 影響緩和(MS)	<ul style="list-style-type: none"> ・ガスサンプリング系システムによる臨界検知、ホウ酸水投入による臨界終息。臨界時挙動評価により一般公衆・作業員被ばく線量が許容範囲内に収まることを確認 ・未臨界維持 <ul style="list-style-type: none"> 中期： ダンプによる水位低下 長期： ホウ酸水水張りへ移行 あるいは水張り中止 	<ul style="list-style-type: none"> ・緊急ホウ酸注入設備の利用 ・デブリ残存量を反映した臨界時挙動評価 → 臨界評価(臨界時挙動評価) ・外部レビュー → 第三者有識者による確認

臨界管理方法と要素技術開発の関係： PCV水張り時②(ホウ酸水水張り)

項目	②ホウ酸水での水張り	検討課題・要素技術開発
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界リスクを最大限低減可能 ・設備対応、腐食・漏えいリスク検討要 	
臨界リスク	<ul style="list-style-type: none"> ・露出デブリ、炉内残存燃料の水没 ・地震などによる燃料落下 ・臨界防止必要ホウ素濃度評価の合理化 	<ul style="list-style-type: none"> → 臨界評価 ・同説明性確認 → 第三者有識者による確認
臨界監視	<ul style="list-style-type: none"> ・ガスサンプリング系システムによる炉内再臨界検知 	<ul style="list-style-type: none"> → 炉内再臨界検知技術開発 検知性向上のための設備高度化(Kr検知)
臨界防止(PS)	<ul style="list-style-type: none"> ・ホウ酸水を用いた水張り ・水張り速度を制限し、ガスサンプリング系システムにより未臨界を確認しながら段階的水張り 	<ul style="list-style-type: none"> ・必要ホウ素濃度が使用可能であること → 臨界防止技術(溶解性吸収材) PCV,RPV構造材腐食、漏えい時影響、設備実現性確認 ・ガスサンプリング系システムによる臨界近接監視の成立性 → 炉内再臨界検知技術開発 成立性確認試験(実機)
臨界事故時影響緩和(MS)	<ul style="list-style-type: none"> ・ガスサンプリング系システムによる臨界検知、高濃度ホウ酸水投入で臨界終息。臨界時挙動評価により一般公衆・作業員被ばく線量が許容範囲内に収まることを確認 ・未臨界維持 中期： ダンプによる水位低下 長期： 濃度上昇させて水張り継続 	<ul style="list-style-type: none"> ・緊急ホウ酸注入設備の利用(濃度上昇) ・デブリ残存量を反映した臨界時挙動評価 → 臨界評価(臨界時挙動評価) ・外部レビュー → 第三者有識者による確認 ・水位低下の実現性 → 小循環ループ設計に反映 ・ホウ素濃度上昇が不可能な場合には、水張り中止の選択も含めておく

臨界管理方法と要素技術開発の関係： デブリ取り出し時

項目	デブリ取り出し時	検討課題・要素技術開発
想定する状況	<ul style="list-style-type: none"> ・小循環ループ構築 冠水工法：水中状態、 気中工法：冷却材かけ流し ・デブリへの直接アクセス可能 (検出器設置、非溶解性吸収材散布可能) 	
臨界リスク	<ul style="list-style-type: none"> ・デブリ状況変化(掘削に伴う水浸入など) ・地震などによる燃料落下 	<ul style="list-style-type: none"> ・複数工法・取り出し方法を想定した臨界シナリオ、 臨界可能性評価 → 臨界評価 ・防止必要ホウ素濃度評価の合理化 → 残存量確認(内部調査・ミュオン測定) ・外部レビュー → 第三者有識者による確認
臨界監視	<ul style="list-style-type: none"> ・炉内臨界近接検知システムにより臨界近接監視 ・炉内臨界検知システム及びガスサンプリング系システムによる炉内再臨界検知 	
臨界防止(PS)	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界近接検知システムによる臨界近接を監視しながらのデブリ取り出し ・ホウ酸水あるいは非溶解性吸収材事前投入による臨界抑制 	<ul style="list-style-type: none"> → 炉内臨界近接検知システム システム開発、成立性確認 → 臨界防止技術(非溶解性吸収材) 候補材選定、適用工法確立、成立性確認
臨 界 事 故 時 影響緩和(MS)	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界近接検知システム、ガスサンプリング系システムによる臨界検知、高濃度ホウ酸水あるいは非溶解性吸収材追加投入で臨界終息。 臨界時挙動評価により一般公衆・作業員被ばく線量が許容範囲内に収まることを確認 	<ul style="list-style-type: none"> → 臨界評価(臨界時挙動評価) デブリ取り出し時臨界挙動・被ばく線量評価 外部レビュー → 第三者有識者による確認

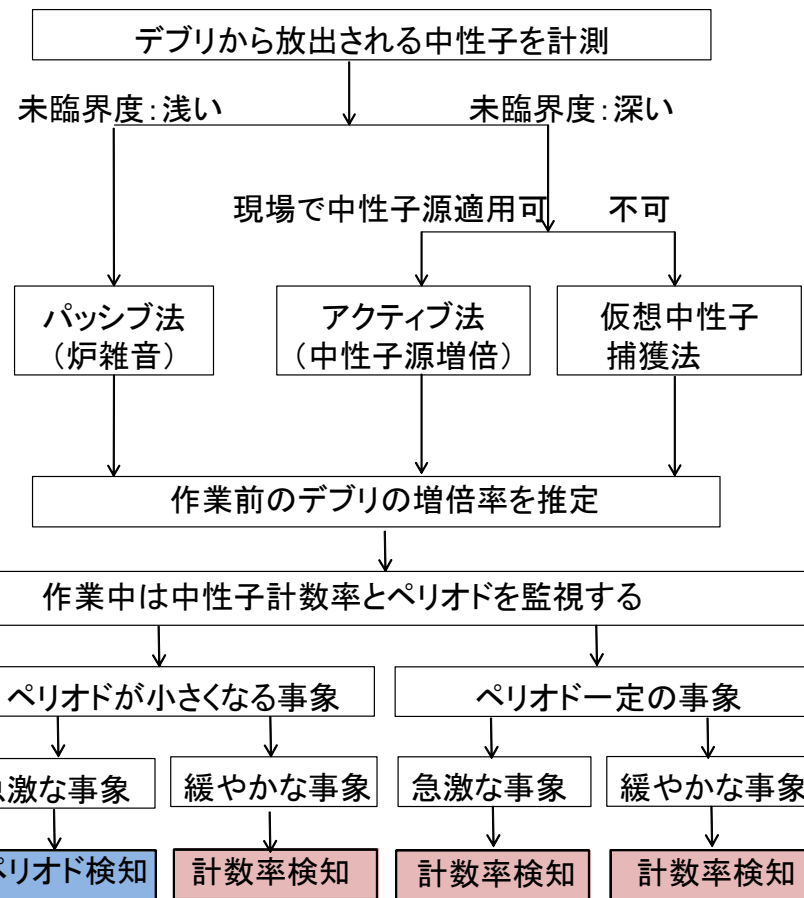
4. 2 臨界近接監視手法の開発(1/2)

[達成目標]

- ・臨界近接検知手法が選定され、システム概念が確立していること
- ・複数工法に対して適用方法が決定されていること
- ・成立性確認試験計画が立案されていること

[平成27年度成果]

- ・臨界近接検知手法の選定
未知のデブリ体系の不確定を考慮して、デブリ取り出し時に想定される様々な臨界シナリオに対応するため、単一の手法ではなく、炉雑音法(ファインマン α 法)を中心とした複数手法の組合せによる臨界近接検知手法を選定(図1)
炉雑音法により、取り出し前の初期の未臨界度(中性子増倍率)を確認したうえで、ペリオドまたは計数率を監視することで、取り出し中の連続的な監視を行う(図2)。



炉雑音法(TID法/MCNP,*)については、デブリへの適用性評価のためのシミュレーション方法を確認し、課題を抽出

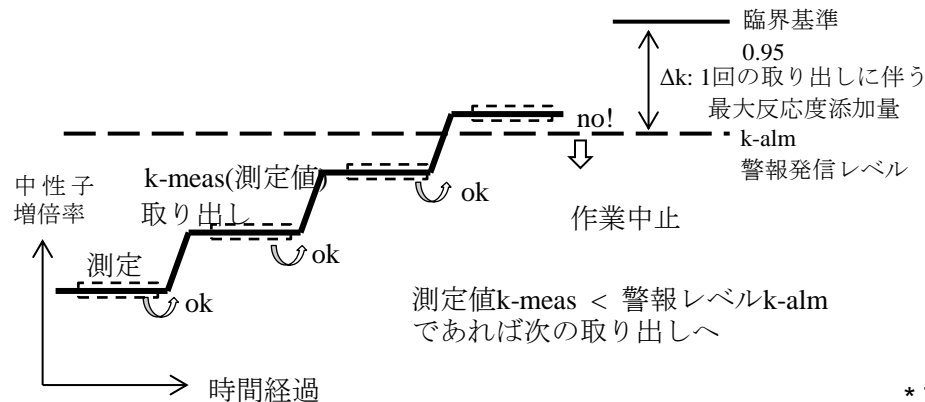


図2 臨界近接監視に基づく臨界防止

図1 デブリ取り出し時の臨界近接検知手法

* TID法は有力な手法であるが、体系に応じた係数を解析により決定する必要がある。モンテカルロ計算コードMCNPを利用することを当初考えていたが、課題のあることがわかり別手法(ASC)を検討中。 TID: Time Interval Distribution, MCNP: モンテカルロ計算コード

4. 2 臨界近接監視手法の開発(2/2)

[平成27年度成果]

・臨界近接検知システム概念

炉雑音法を中心とした複数の臨界近接検知手法を同一ハードウェアで実現するためのシステム概念と構成案を策定(図1,2)

・複数工法への適用方針

水中、気中での中性子束に基づき、適用可能範囲を整理

・成立性確認試験計画

原子力機構の実用燃料試験施設に保管されている、PWR/BWR使用済燃料集合体を対象としてガンマ線量を評価
(SWAT4燃焼計算、MVP2.0光子固定源計算)

使用済燃料集合体のガンマ線を用いた高放射線環境下での試験計画を策定

[今後の課題]

- ・成立性確認試験に向けたシステム設計、試作
- ・臨界試験による臨界近接検知性能確認試験
- ・高放射線環境下での動作試験
- ・臨界近接検知手法の測定精度向上
- ・炉雑音法TID法についてASCシミュレーションによるデブリの未臨界測定への適用性評価

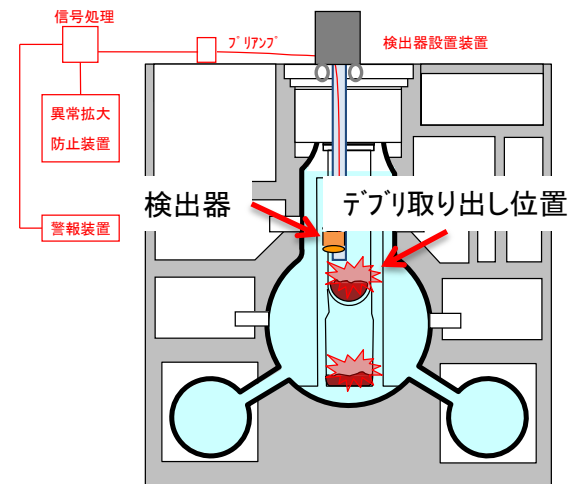


図1 臨界近接検知システム概念

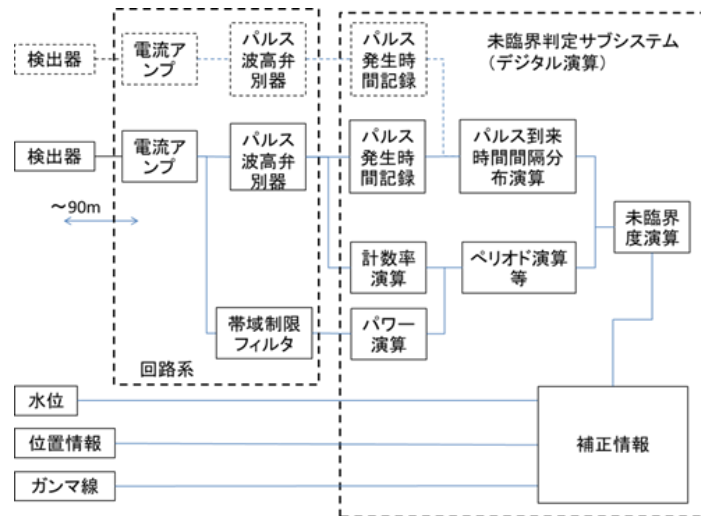


図2 臨界近接検知システム構成

4.3 再臨界検知技術の開発(1/2)

[達成目標]

- ・(中性子システム):ガンマ線100Gy/hの環境下で臨界検知できる臨界レベルの範囲が評価されていること。平成26年度時点で検討されている複数工法における適用方法が確立していること。
 - ・(ガスサンプリング系システム): 現行のXe135に加え、Kr88(～ 10^{-4} Bq/cm³)を検出可能とし、臨界検知時間を1/10程度(*)に短縮できるシステムについて、平成26年度時点で検討されている複数工法における適用方法が確立していること。未臨界度推定アルゴリズムの実証試験方法が策定されていること。
- * システム開発計画時に設定した暫定目標であり、臨界時挙動・被ばく線量評価の結果を踏まえて、妥当性を確認していく。

[平成27年度成果]

・ガスサンプリング系システム

- 最新知見の反映

Kr同位体濃度比による測定遅れ時間の推定、Kr/Xe濃度比による中性子増倍率の推定の実機適用のため1号機ガスサンプリング系による現地試験方法の策定(図1)

- 複数工法への適用方法の検討

各工法でのガスサンプリング系システムによる臨界検知システムの活用法について検討。排気口の移設、測定遅れ時間短縮等の課題について整理。

Kr測定による検知速度向上を踏まえた臨界時挙動評価の実施、被ばく線量低減効果を確認。

- 検知性能向上の検討

軸方向・径方向に臨界性の高い領域が偏在する場合の臨界検知性を評価
非一様炉心であっても中性子増倍率推定が有効であることを確認

(次頁参考図)

1号機の過去6ヶ月の測定データから低エネルギー領域でKr濃度を概略測定(表1)。デブリ組成一様と仮定すると十分小さい未臨界状態と推定(次頁参考表)

・中性子検出器を用いた炉内再臨界検知システム

- 気中工法での適用方法の検討、検出器設置場所の検討

検知速度が速いメリットあるものの、RPV内検出器設置に制約あるため、ガスサンプリング系システムのバックアップと位置づける。

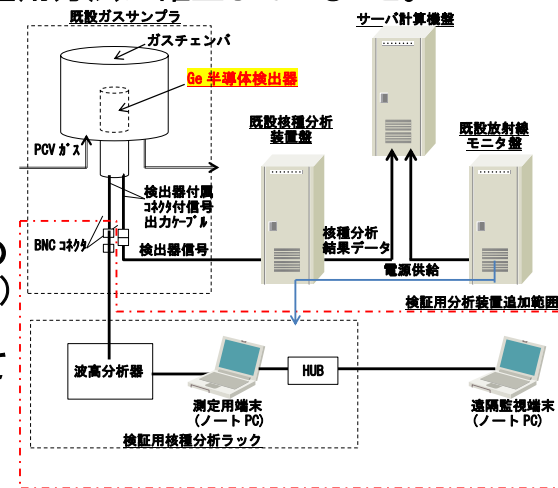


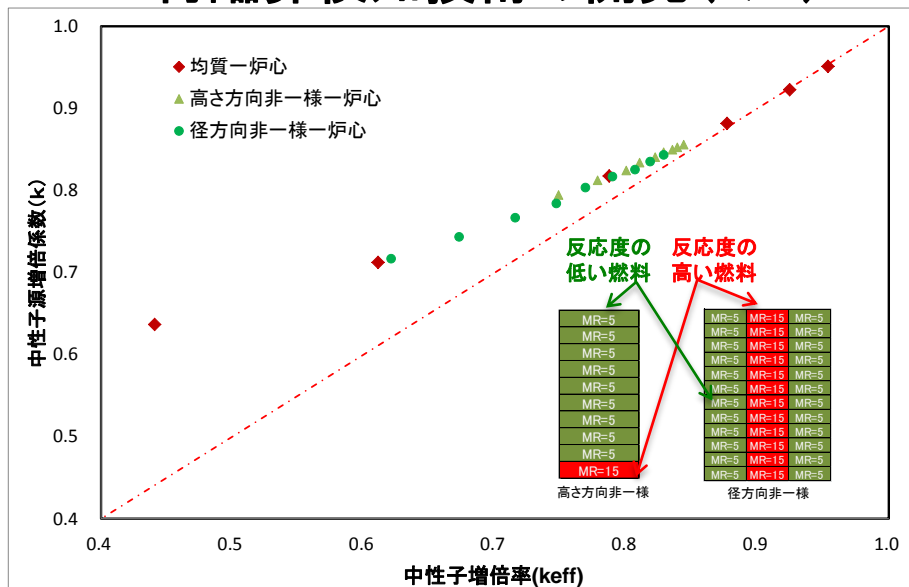
図1 1号機ガスサンプリング系現地試験システム
(1号機は現行システムにGe半導体検出器を使用しており、長期間の測定によりKr濃度の推定が可能)

表1 1号機の6ヶ月平均放射能濃度測定値

系統	核種	エネルギー (keV)	放射能濃度 (Bq/cm ³)
A系	Xe135	249.79	9.70E-04
	Kr87	402.64	5.99E-05
	Kr88	196.34	1.74E-04
B系	Xe135	249.79	1.24E-03
	Kr87	402.64	7.63E-05
	Kr88	196.34	2.09E-04

半減期
Xe135:9.14h
Kr87:76.3m
Kr88:2.84h

4.3 再臨界検知技術の開発(2/2)



参考表 中性子源増倍係数の推定値(1F-1)

系統	中性子源増倍係数(k)	遅れ時間推定値(h)
A系	0.50~0.74	2.6~3.0
B系	0.45~0.66	2.4~2.8

直近の約半年間のガスサンプリング系システムでの取得データをもとに、中性子源増倍係数を推定した結果であり、現状の中性子源増倍係数として0.4~0.8程度であると推定される。また、測定遅れ時間としては3時間程度と推定される。これを踏まえて、今後、臨界時挙動評価を再確認する。

参考図 均質炉心と非一様炉心の中性子増倍率と中性子源増倍係数の相関
 中性子源増倍係数とは、体系内の中性子源から放出された中性子が周囲の核分裂性物質によってどの程度増倍されるかを示す係数。
 ガスサンプリング系FPガンマ線システムは、体系全体を監視するシステムであるが、体系内に非均一性があった場合でも、ほぼ同様に臨界を検知可能であることを確認した。

[今後の課題]

- ・改良ガスサンプリング系システムの1F-2/3号機(現行システムにGe半導体検出器が使用されていない)への適用
- ・バックグラウンドの影響の少ない高エネルギー領域のガンマ線ピークを用いてKr濃度を測定し、改良ガスサンプリング系システムの設計に反映

4.4 臨界防止技術の開発（非溶解性中性子吸収材）

[達成目標]

- ・基礎物性、耐放射線性能のスクリーニングにより核的特性確認試験を行う候補材の選定が完了していること。
核的特性確認試験の計画が策定されていること。
- 平成26年度時点で検討されている複数工法を踏まえて均一性担保、保持性を考慮した適用方法が確立していること。

[平成27年度成果]

- ・基礎物性試験／耐放射線性能確認試験
 - －候補材の基礎物性試験、気中・水中耐放射線試験を実施
 - 試験結果から核的特性確認試験を行う候補材を選定(表1)
- ・核的特性確認試験準備
 - －H28年度以降実施の核的特性確認試験計画を策定
 - 候補材を収納した容器をKUCA燃料セルに装荷し反応度を測定(図1)
- ・適用工法検討
 - －複数工法を踏まえ、均一性・保持性を考慮した適用方法検討
 - 吸収材施工に係る要求仕様策定の為、具体的施工方法を検討(図2)
- ・製造性・製造コスト評価
 - －候補材選定のための製造性と製造コストの評価を実施
 - 供給者・加工メーカーへのヒアリング調査等の結果、特に問題が生じる候補材は無し
- ・必要量評価
 - －臨界抑制のための必要投入量を評価
 - 今次評価では取り出す燃料デブリに対して大量の中性子吸収材を必要とするケースはなかったが、今後取り出し工法の検討進捗に合わせて随時再評価を実施予定

[今後の課題]

- ・炉内構造物健全性、燃料デブリ収納缶への影響の検討
- ・核的特性確認試験による候補材の最終選定

表1 非溶解性中性子吸収材の耐放射線性能評価結果

カテゴリ	候補材	評価		今後の方針
		気中	水中	
固体	B ₄ C/金属焼結材	◎	○	核的特性評価候補
	B・Gd入ガラス材	○	○	核的特性評価候補(高性能)
	中空ボロン	-	-	取下げ
液体↓固体	Gd ₂ O ₃ 粒子	○	○	核的特性評価候補(高性能)
	セメント/Gd ₂ O ₃ 造粒粉材	△	△	取下げ
	水ガラス/Gd ₂ O ₃ 造粒粉材	○	△	核的特性評価候補(無機系)
	水中硬化樹脂/Gd ₂ O ₃ 粉末材	○	○	核的特性評価候補(有機系)
液体	水中硬化樹脂/B ₄ C粉末材	○	○	止水材候補
	スラリー/Gd ₂ O ₃ 造粒粉材	△	○	720 kGy以上で固化のため(液体→固体)の核的特性評価有機系第二候補
	B ₄ Cゲル材	△	-	照射材溶出特性の改善が必要

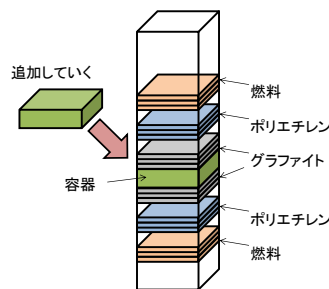


図1 KUCA燃料セルへの候補材装荷イメージ

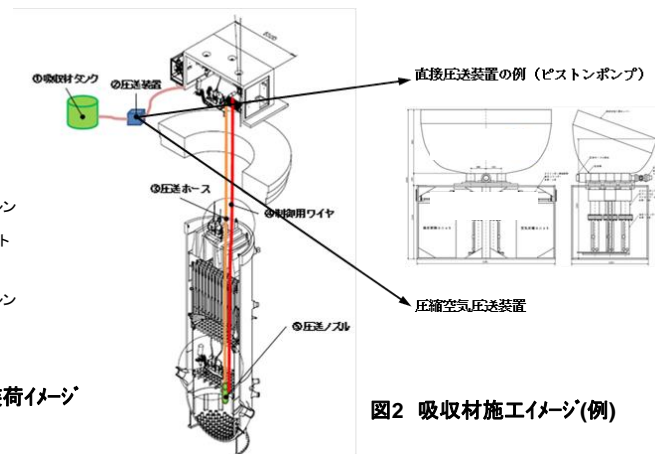


図2 吸収材施工イメージ(例)

4.4 臨界防止技術の開発（溶解性中性子吸収材）

【達成目的】

・PCV水張り前のホウ酸水置換などを含めて、溶解性中性子吸収材の運用方法が検討されていること。

【平成27年度成果】

・溶解性吸収材の運用方法の検討

一前年度の高濃度腐食試験に引き続き、低濃度状態での影響を検討するための腐食影響評価試験を実施(表1) 五ホウ酸ナトリウム1,000ppmでは腐食を確認したが、2,000ppmでは、腐食が確認されなかった(図1)。腐食試験結果に基づき、ホウ酸水使用条件を2,000ppm以上とした。

一必要設備及び運用方法の検討

ホウ酸水適用時の水質管理として、核種除去設備との共存性を考慮した水質管理設備を検討した。

ホウ素濃度維持のための必要設備、運用方法、廃棄物影響などを評価した。

検討ケース：①小循環ループ内でCsを除去するケース

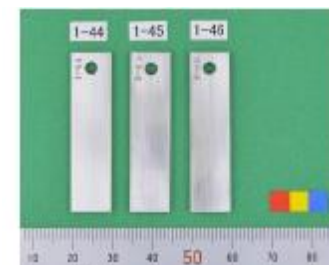
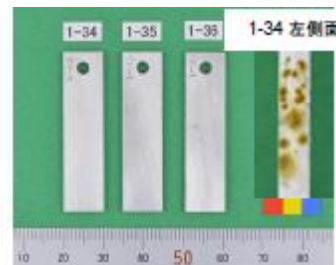
②多核種除去設備で放射性物質除去を行うケース

【今後の課題】

- ・小循環ループ設計(水質管理要求)との整合性の検討
デブリ取り出し工法と連動した検討
- ・設備の検討(水質管理のための要求仕様検討)
- ・高濃度ホウ酸核計算精度の確認試験
- ・PCV内部のホウ素濃度分布の評価(流動解析)

表1 腐食試験ケース

材料	前処理	温度	ベース水質	添加材 (五ホウ酸ナトリウム)	試験時間
SGV480 (PCV材)	皮膜なし	50°C	10,000倍 希釈海水	1,000ppmB	50, 100, 500 時間
				2,000ppmB	
			1,000倍 希釈海水	1,000ppmB	
				2,000ppmB	



1,000ppmB(腐食あり)

2,000ppmB(腐食なし)

図1 腐食試験結果(1,000倍海水、100時間)

5. 目標達成を判断する指標の達成状況(1/3)

平成27年度目標達成指標	達成状況
<p>a. 臨界評価</p> <p>①臨界シナリオの策定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ロードマップ上各工程において、最新知見を反映した臨界シナリオ作成及び臨界可能性の推定が行われていること。 (目標TRL:4) 	<p>[目標達成]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最新情報を反映してシナリオ見直し(前年度結果を見直し不要) ・複数工法に対してシナリオ作成 ・臨界評価実施、号機・部位毎の臨界リスク評価 (達成TRL:4)
<p>②臨界時挙動評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PCV上部水張りを取り扱える評価モデルが開発されていること。開発されたモデルを用い、最新の知見を反映して臨界時挙動評価により臨界時の被ばく線量評価が実施されていること。(目標TRL:4) ・平成26年度時点で検討されている複数工法に対応して、燃料デブリ取り出し時の臨界時挙動評価用モデルおよび手法が開発されていること。 (目標TRL:3) 	<p>[目標達成]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上部水張り時モデル整備、挙動評価実施。残存燃料が想定範囲内であれば、被ばく線量許容範囲内であることを確認 ・デブリ取り出し時挙動評価手法の課題を整理 (達成TRL:3)
<p>③臨界管理方法の策定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・平成26年度時点で検討されている複数工法に対応して、万一の臨界の際にも緊急時被ばく線量(作業員100mSv/一般公衆5mSv)以下とする臨界管理手法が策定できていること。PCV水張りについては最新の知見を反映した見直しが行われていること。 (目標TRL:4) ・デブリ取り出しに対しては、臨界管理の基本方針が決定されていること (目標TRL:3) 	<p>[目標達成]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・工法毎の基本的な考え方策定(水張り時、デブリ取り出し時) ・事故・異常事象整理、設備要求整理し、取り出し工法Pjへ提示。 ホウ酸水酸使用成立性判断のための設備概念検討。 ・ホウ素濃度合理化検討実施。 (達成TRL:3)

5. 目標達成を判断する指標の達成状況(2/3)

平成27年度目標達成指標	達成状況
<p>b. 臨界近接監視手法の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・臨界近接検知手法が選定され、システム概念が確立していること ・平成26年度時点で検討されている複数工法に対して適用方法が決定されていること ・成立性確認試験計画が立案されていること <p>(目標TRL:3)</p>	<p>[目標達成]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・臨界近接検知手法を選定、炉雑音法を中心に複数手法を組み合わせる手法を選択。シミュレーションによる適用の見通しを得た。 ・システム概念構築 ・成立性確認試験の計画を策定 <p>(達成TRL:3)</p>
<p>c. 炉内の再臨界検知技術</p> <p>(1) 中性子検出器を用いた臨界検知システム</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ガンマ線100Gy/hの環境下で臨界検知できる臨界レベルの範囲が評価されていること。 ・平成26年度時点で検討されている複数工法における適用方法が確立していること。 <p>(目標TRL:4)</p>	<p>[目標達成]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・複数工法での中性子束検出器適用性を確認(検出器の設置距離など) ・検出器設置可能性からバックアップとして位置付け <p>(達成TRL:4)</p>
<p>(2) ガスサンプリング系システム</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現行のXe135に加え、Kr88($\sim 10^{-4}$Bq/cm³)を検出可能とし、臨界検知時間を1/10程度に短縮できるシステムについて、平成26年度時点で検討されている複数工法における適用方法が確立していること。 ・未臨界度推定アルゴリズムの実証試験方法が策定されていること。 <p>(目標TRL:4)</p>	<p>[目標達成]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・複数工法への適用性を検討 ・既存データによる検知遅れ時間、未臨界度推定を実施 ・実機での成立性確認試験計画を立案 <p>(達成TRL:4)</p>

5. 目標達成を判断する指標の達成状況(3/3)

平成27年度目標達成指標	達成状況
<p>d. 臨界防止技術</p> <p>(1)非溶解性中性子吸収材 2つ以上の中性子吸収材の実用化 基礎物性、耐放射線性能のスクリーニングにより核的特性確認試験を行う候補材の選定が完了していること。 核的特性確認試験の計画が策定されていること。 平成26年度時点で検討されている複数工法における適用方法が確立していること。 (目標TRL:3)</p>	<p>[目標達成]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・照射試験による候補材スクリーニング ・核的特性確認試験計画策定 ・適用方法検討、投入設備概念検討 ・適用時影響評価 <p>(達成TRL:3)</p>
<p>(2)溶解性中性子吸収材 PCV水張り前のホウ酸水置換などを含めて、溶解性中性子吸収材の運用方法が検討されていること。 (目標TRL:4)</p>	<p>[目標達成]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低濃度腐食試験によりPCV/RPV構造材腐食影響を確認(2000～12000ppmmで使用可) ・水質管理方法(必要設備概念)の検討 核種除去の観点から設備検討、6000ppm程度が上限。 取り出し工法へ提示 <p>(達成TRL:4)</p>

6.研究開発の運営等(1/3)

①中長期的視点での人材育成

- (実績) ・日韓サマースクールでの講義(8/21 JAEA東海)において、日韓の原子力系学生に対し、臨界管理の基礎及び福島第一デブリ取り出しに向けた技術開発の紹介し、人材育成に向けたネットワークの拡充・強化を図った。
- ・技術開発において、各社の若手を登用、討議を経験させることで技術レベルの向上と技術伝達を実施。

②国内外の叡智の結集

- (実績) ・国内外の関連学会会議やワークショップで研究開発成果を公表し、学術関係者の意見を受けた。

日本原子力学会 2015年秋の大会(9/10、静岡大学): 9件のシリーズ発表

臨界安全に関する国際学会ICNC(9/13-17、米国シャーロット): 海外の動向調査

- ・Paks発電所の破損燃料回収時管理方法を調査(9/17-18、ハンガリー)
 - ・第三者有識者による確認を得るための体制構築について検討。
- 次年度から電力中央研究所に有識者による検討会を設置してもらえるよう活動した。

③試験条件や開発仕様の明確化

- (実績) ・本事業での各実施項目の技術成熟度(TRL)を研究の開始前に判断し定義し、その結果は、5章の「目標達成を判断する指標の達成状況」表中に記載した。

④目標達成を判断する指標の設定

- (実績) 5章に示した通りである。

6.研究開発の運営等(2/3)

⑤廃炉作業や他の研究開発との連携

(実績) 他の関連研究との合同会議を適宜実施し、開発動向を共有しながら、プロジェクト間のインプット・アウトプット情報を整理し、研究の円滑な推進に役立てた。

- ・「圧力容器／格納容器の健全性評価技術の開発」との合同会議(4/22, 8/25, 10/30 , 12/15, 2/17)
- ・「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し工法の高度化」との合同会議(5/14, 12/15, 1/21, 2/18)
- ・「燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発」との合同会議(5/14)
- ・「原子炉格納容器漏えい箇所補修・止水技術の開発」との合同会議(7/13, 12/15, 1/21)

⑥研究の管理

(実績) 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を随時考慮し、技術開発事業に反映できるよう柔軟な実施体制を構築して研究開発を実施した。

⑦福島第一原子力発電所等における作業管理

(実績) 本年度は、現地調査や現場での実証試験などはなかった。

6.研究開発の運営等(3/3)

⑧事業の報告

(実績)事業の実施計画、進捗状況、事業成果等については、中間報告会(平成27年9月30日)、最終報告会(平成28年3月15日)で報告すると共に、毎月、定期的に進捗状況を確認し、事務局にも報告した。

⑨情報発信の充実

(実績)・下記を通じて、実施内容、成果などを一般の人を対象に情報発信した。

IRIDシンポジウム2015 in福島(7/23)

IRIDホームページでの研究開発成果進捗状況の公開(12/2)

⑩代替案の事前準備

(実績)炉内臨界近接監視システムの検知手法について、複数の候補の成立性を検討した結果、単独による成立は困難であることが判明し、代替案として複数候補の組合せ方式を考案した。また、候補の一つであるTID(Time Interval Distribution,米国AMETEK社が開発)法について、当初のアプローチで成立性を確認することが困難であると判明したため、TID法の基本原理であるRossi- α 法に立ち戻り、これの成立性を確認した。TID法はRossi- α 法の改良手法であるため、成立することが期待できる。

7.成果まとめ及び今後の課題

年度	本年度成果	今後の課題
全体	<ul style="list-style-type: none"> ・複数工法を踏まえた臨界リスクを明確化するとともに、工法毎の臨界管理の基本的考え方を整理し取り出し工法の検討に貢献した。 ・臨界監視・防止の要素技術開発を実施、成立性確認の段階に到達した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・2017年夏頃の取り出し方針決定に必要な情報の提供(工法毎の臨界管理方法、適用時技術成立性) ・第三者有識者の意見の取り込み
臨界評価	<ul style="list-style-type: none"> ・気中工法を含めた複数工法シナリオ策定、号機・部位毎に、複数工法を踏まえた臨界リスクを明確化した。 ・事故時点の詳細燃料組成に基づき臨界評価を精緻化し、臨界防止策の合理化を進めた。 ・PCV上部水張り時挙動・被ばく線量評価により、残存量が想定内であれば、純水でも被ばく線量を許容内に抑えることが可能であることを示した。 ・工法毎の臨界管理の基本的な考え方を策定。事故・異常事象、設備への要求を整理し、工法検討に提示した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ミュオン・事故進展解析最新結果を反映した見直し・精緻化 ・デブリ取り出し方法を反映した臨界評価 ・不確定さ、条件合理化などの対外説明ロジックの構築 ・デブリ取り出し時挙動・被ばく線量評価に基づく管理方法の確立。取り出し工法と連携した適用性の確認
臨界近接検知技術	<ul style="list-style-type: none"> ・臨界近接検知手法を選定し、システム概念を構築 ・成立性確認試験方法を検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・システム設計、試作 ・臨界試験、高放射線環境下での動作試験による成立性の確認
再臨界検知技術	<ul style="list-style-type: none"> ・複数工法への適用性、適用方法を検討 ・FPガスγ線システム実機試験計画を策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・FPガスγ線システム実機確認試験により、再臨界検知性能(検知レベル、時間遅れ)の確認
臨界防止技術	(非溶解性中性子吸収材) <ul style="list-style-type: none"> ・耐放射線性能による候補材スクリーニングを実施 ・核的特性確認試験計画を策定 ・適用方法を検討、投入設備概念を検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・核的特性確認試験による候補材の最終選定 ・適用工法確認試験(均一性・保持性) ・工法確立(含、必要投入量の確定)
	(溶解性中性子吸収材) <ul style="list-style-type: none"> ・低濃度腐食試験により臨界防止に使用する濃度領域でPCV/RPV構造材に腐食影響ないことを確認 ・水質管理設備概念を検討し、取り出し工法と連携した検討を開始 	<ul style="list-style-type: none"> ・設備の検討(水質管理のための設備要求検討) ・高濃度ホウ酸の核計算精度確認試験(臨界試験)