

福島第一原子力発電所の 廃炉技術の現状と課題

平成28年10月13日

東京大学大学院工学系研究科

原子力国際専攻特任教授

兼 IRID技術アドバイザー

鈴木俊一

本発表内容は、経済産業省「平成25年度発電用原子炉等廃炉・安全技術基盤整備事業」、「平成25,26年度発電用原子炉等廃炉・安全技術開発費補助金」、「平成25,26年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金」の成果を含む。

(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)

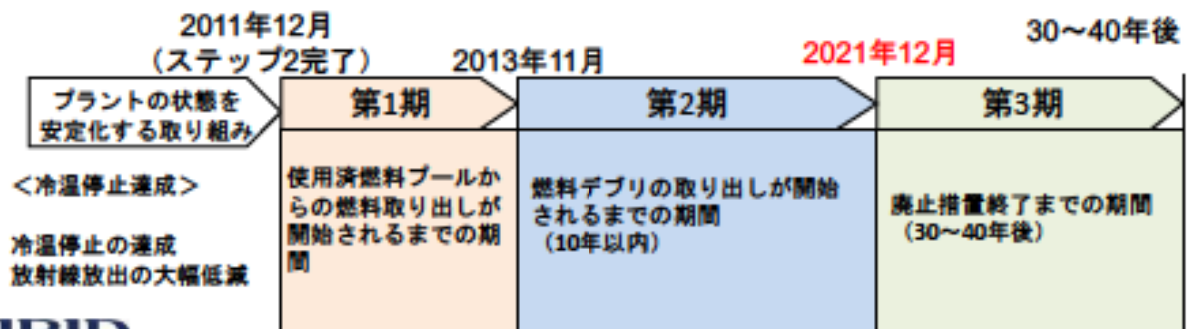
1号機-4号機の最新状況

2

1号機 2号機 3号機 4号機



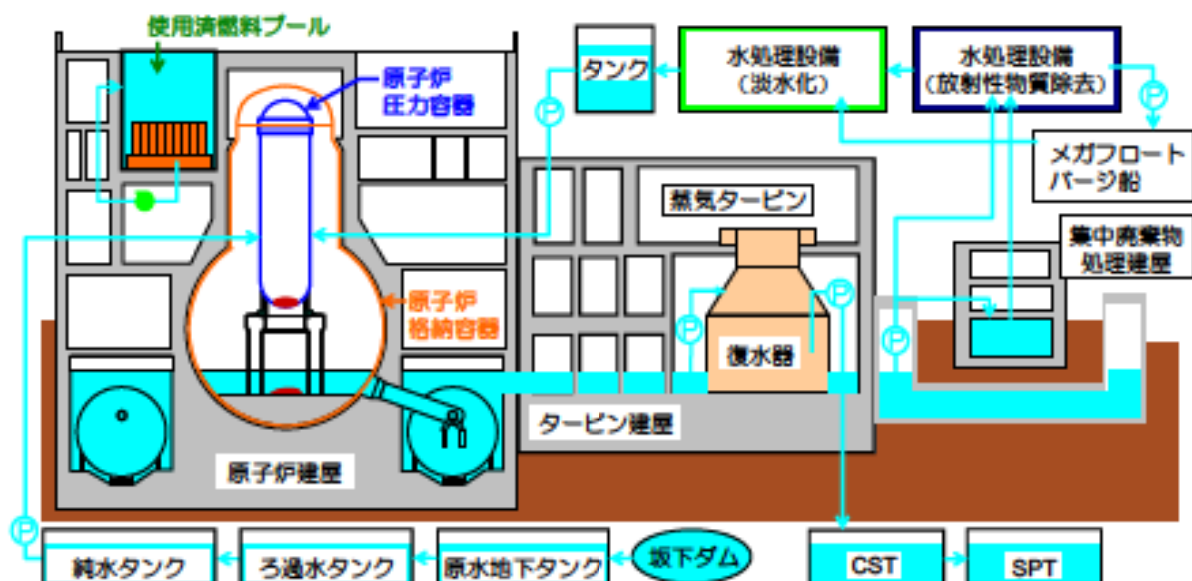
廃炉汚染水対策チーム
食料資料より、



期待する材料関連技術

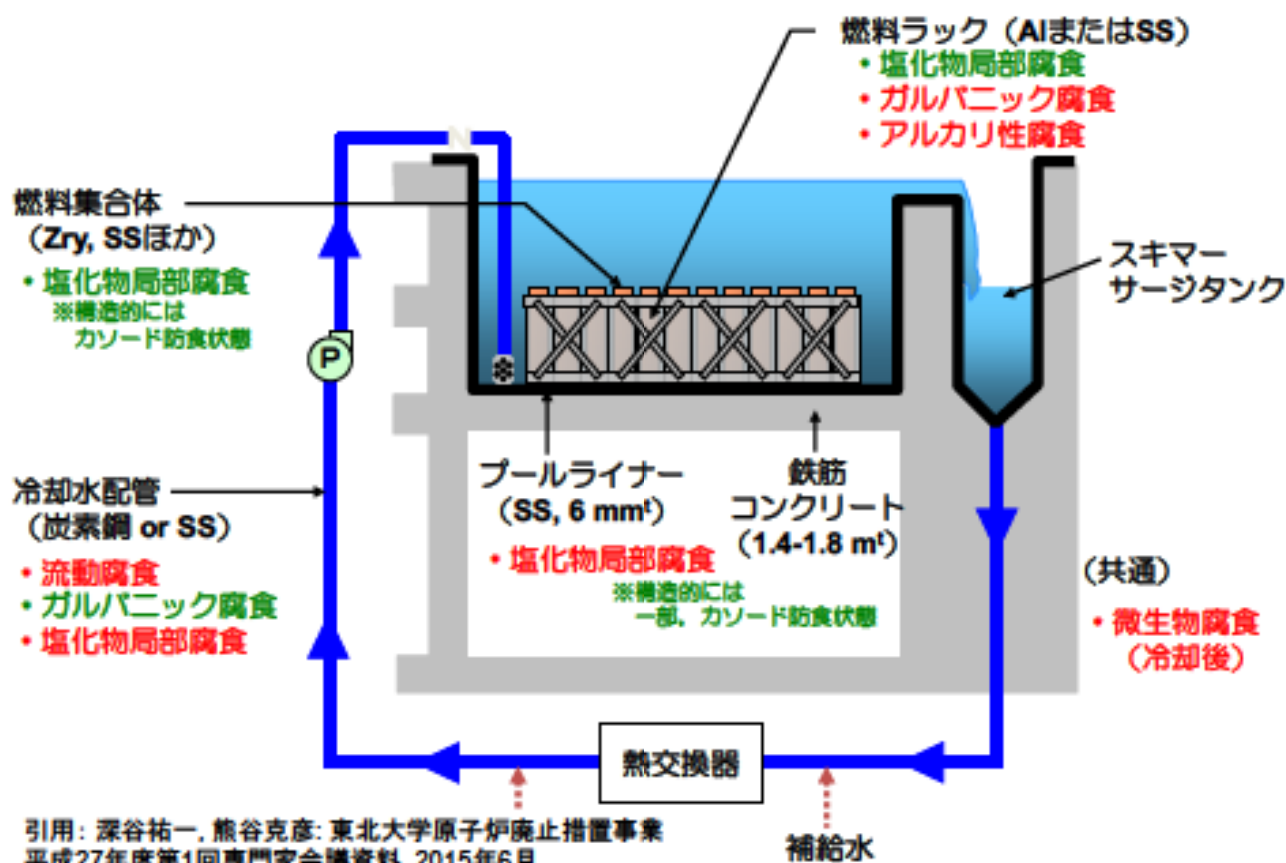
- 溶接、グラウト等補修技術(但し、簡易かつ迅速)
- 材料寿命評価と対策(金属、ポリマー、コンクリート)
- ✓ 腐食
- ✓ 高温履歴
- ✓ 構造・耐震許容基準
- 検査技術(但し遠隔)
- 耐放射線材の開発(含むセンサ、ケーブル等素材)
- 事故耐性制御棒材の開発
- 高効率水素触媒の開発
- 燃料デブリ組成評価と位置推定評価
- ✓ 取り出し工法選定と事故進展評価のための、高温熔融・凝固挙動と材料組成同時把握
- 分析技術
- 廃棄物関連技術
- リサイクル技術

福島第一原子力発電所の腐食対策

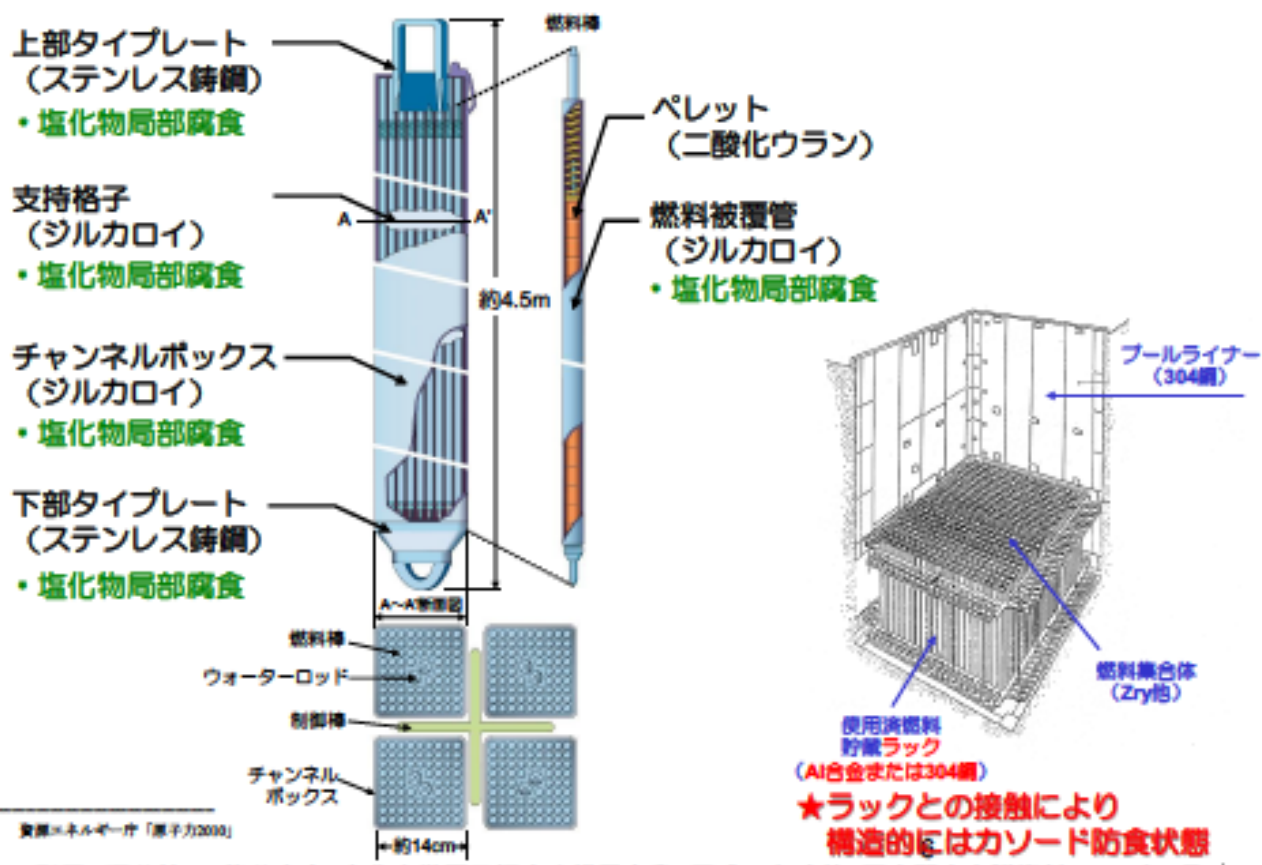


- 東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、燃料冷却機能を喪失。
- 緊急措置として海水を注入。発電所各設備で腐食リスクが顕在化

使用済燃料プールの構造



燃料集合体の構造



	採取日	温度 (°C)	Cl濃度 (ppm)	pH	注入実績			燃料 ラック 材質	備考
					海水	N ₂ H ₄	ほう酸		
1号機	2011/8/19	34.0 (47.0)	3.9	8.2	-	-	-	Al	カッコ内温度: 2011.8.10 循環冷却: 2011.8.10~
2号機	2011/8/19	37.0 (70.0)	1508	7.5	○	○	-	Al	カッコ内温度: 2011.5.19 N ₂ H ₄ 注入: 2011.5.10~ 循環冷却: 2011.5.31~
3号機	2011/8/19	33.9 (62.0)	1769	9.2 (11.2)	○	○	○	Al	カッコ内温度, pH: 2011.5.8 N ₂ H ₄ 注入: 2011.5.9~ ホウ酸注入: 2011.6.26-27 循環冷却: 2011.6.30~
4号機	2011/8/20	42.0 (92.5)	1944	7.7	○	○	-	SUS	カッコ内温度: 2011.6.20 N ₂ H ₄ 注入: 2011.5.9~ 循環冷却: 2011.7.31~

引用: 深谷祐一, 熊谷克彦: 東北大学原子炉廃止措置事業
平成27年度第1回専門家会議資料, 2015年6月

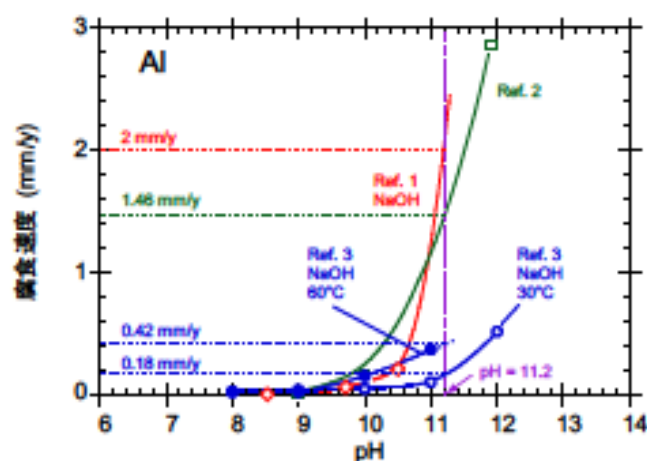
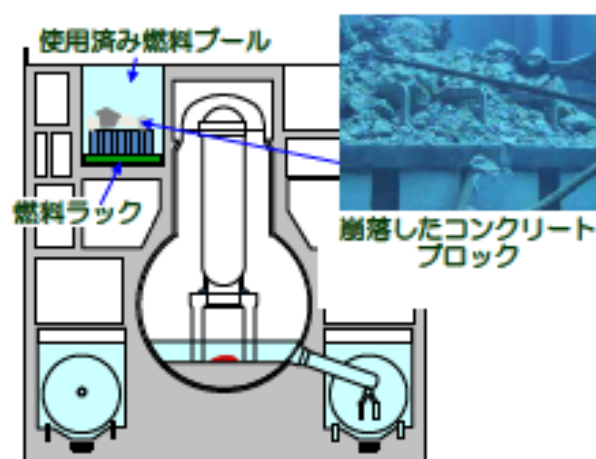


図1 Alの腐食速度に及ぼすpHの影響¹⁾²⁾

- 3号機燃料プールは崩落したコンクリートがれきによりpHが11.2に上昇
→アルカリ性によるAl製燃料ラックの腐食加速が懸念
- pHの再上昇対策も考慮し, 【弱酸注入によるpH緩衝溶液化】を検討
→ pHの安定性や難溶性塩の析出挙動等に基づきホウ酸注入を採用
→2011年6月末にpH 11.2→9.2まで中和後は, pH 9付近で安定

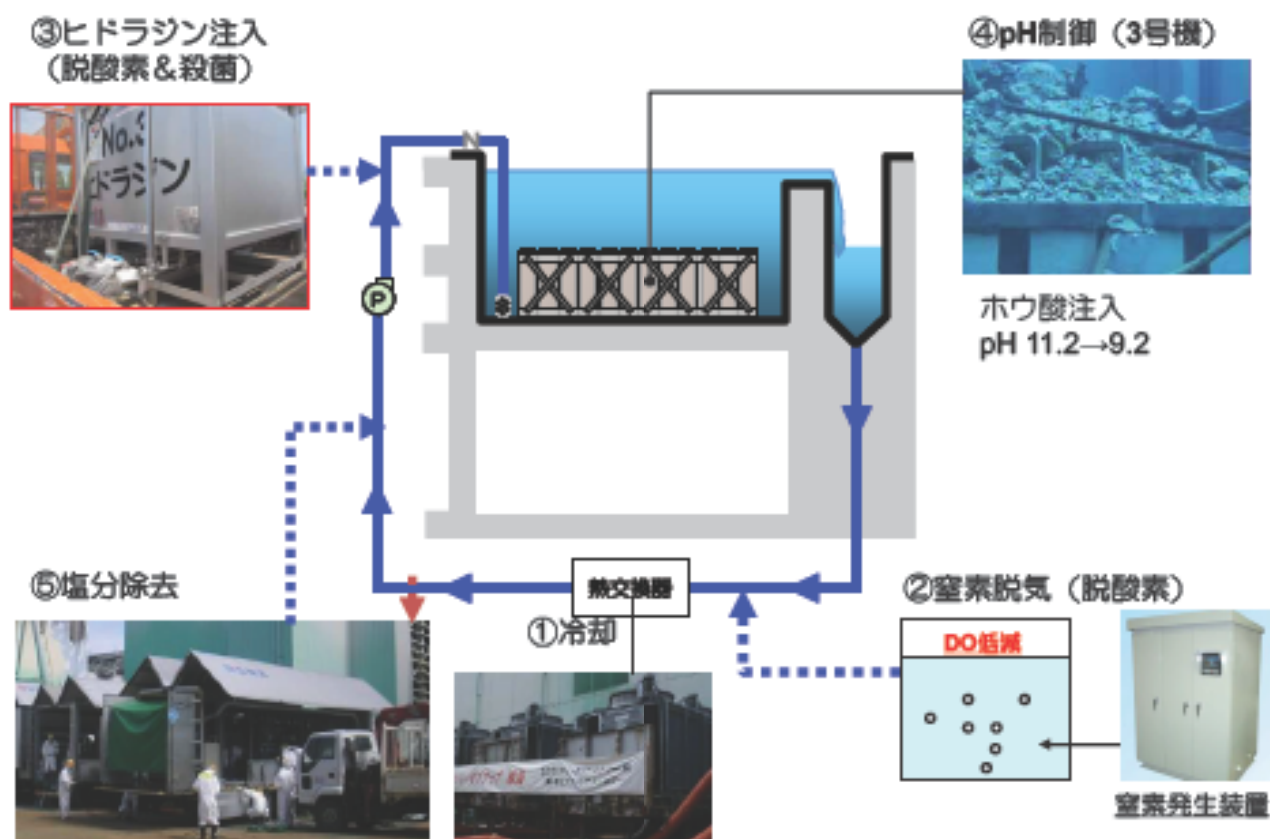
1) D.E. Davis: *J. Appl. Chem.*, 9, 65 (1959). 2) Aluminium Taschenbuch, 15th ed., vol. 1 Aluminium Verlag, Düsseldorf, p. 330 (1998).
3) M. R. Tabrizi et al.: *Corros. Sci.*, 32, 733 (1991).

腐食抑制策の検討 (燃料プール系)

		有効性		適用性			
		腐食発生抑制に有効	進行中の腐食抑制にも有効	高線量の現場に適用可能	他材料に悪影響なし	副次的障害なし	軽水炉(放射線環境)での経験
冷却		○	△	○	○	○	○
脱酸素処理	窒素通気	○	△	○	○	○	○
	ヒドラジン	○	△	○	○	○	○
	亜硫酸塩	○	△	○	△	△	×
	その他	○	△	○	△	×	×
塩分除去		○	△	○	○	○	○
電気防食	犠牲陽極	○	○	×	○	△	×
	外部電源	○	○	×	○	○	×
pH制御		○	△	○	×	×	○
インヒビター	無機系	△	△	○	△	△	×
	有機系	△	△	○	△	×	×
殺菌	塩素/H ₂ O ₂	○	△	○	×	△	×
	ヒドラジン	○	△	○	○	○	○

引用: 深谷祐一, 熊谷克彦: 東北大学原子炉廃止措置事業 平成27年度第1回専門家会議資料, 2015年6月

腐食抑制策の適用 (燃料プール系)



引用: 深谷祐一, 熊谷克彦: 東北大学原子炉廃止措置事業 平成27年度第1回専門家会議資料, 2015年6月

腐食抑制策：脱酸素（ヒドラジン）

- 脱酸素反応： $N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + H_2O$
- 利点
 - ボイラ設備における脱酸素剤として実績多数
 - PWRプラントで実績（2次系，起動時1次系）
 - 反応生成物が N_2 と H_2O のみ
 - 放射線環境下で反応性大
 - 殺菌作用あり（微生物対策）
- 懸念要素
 - 高温で熱分解が起こる
 - 205°C 超： $3N_2H_4 \rightarrow 4NH_3 + N_2$
 - 350°C 超： $2N_2H_4 \rightarrow 2NH_3 + N_2 + H_2$
 - 解離によりpH上昇（スケール障害リスク）
- 水温が安定した燃料プールに適用（2011.5～）
- 燃料プールは大気開放系であるが， N_2 バブリングとの併用に期待
- 原子炉は水温安定後の適用を検討



引用：深谷祐一，熊谷克彦：東北大学原子炉廃止措置事業
平成27年度第1回専門家会議資料，2015年6月

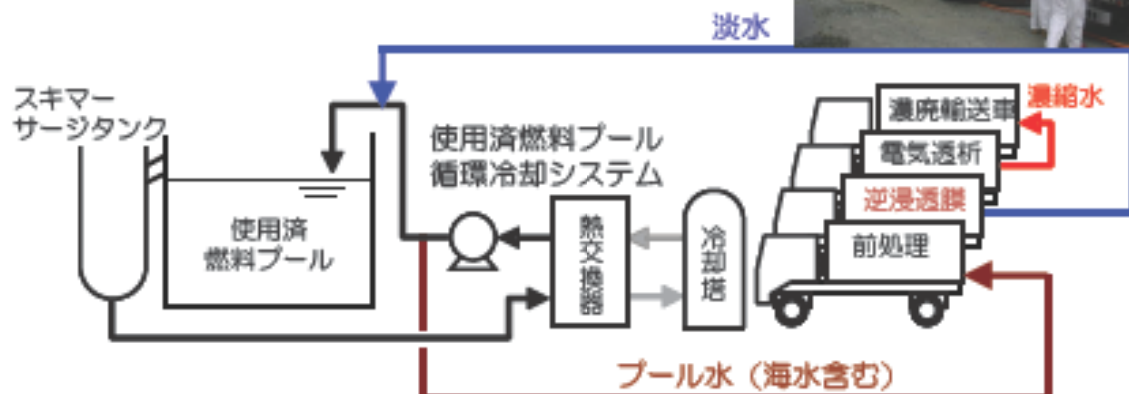
腐食抑制策：塩分除去

目的

使用済燃料プール構成材料の腐食抑制のために，プールに注入された海水成分を除去し，**塩化物イオン濃度を10ppm程度まで低減**する

システム構成：

- ① 前処理：油分や放射性物質等を除去（RO保護）
- ② 浄化1：RO（逆浸透膜）/ED（電気透析）による浄化
- ③ 浄化2：イオン交換樹脂による水質・純度向上



引用：深谷祐一，熊谷克彦：東北大学原子炉廃止措置事業 平成27年度第1回専門家会議資料，2015年6月

腐食抑制策：殺菌

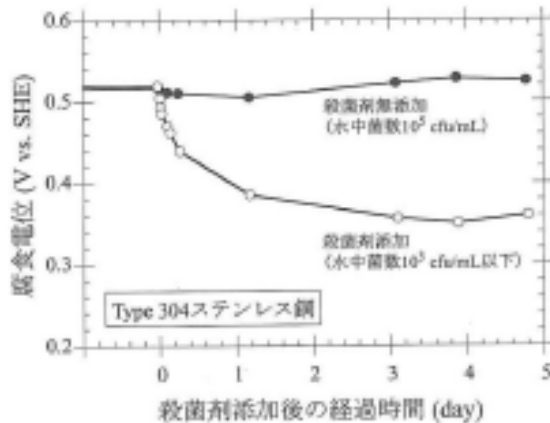


図 3.3-2 微生物汚れを含む淡水冷却水系における殺菌剤添加の効果 (井芹一, 高橋邦幸, 米田裕: 材料と環境 2000 講演集, 腐食防食協会, p. 9 (2000)より引用)

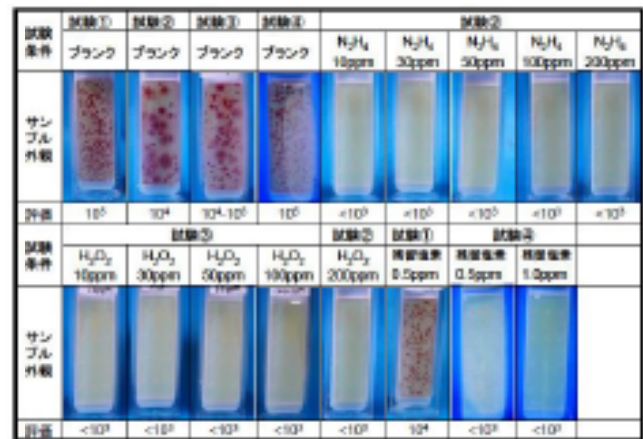


Fig.1 一般細菌に対する殺菌剤添加試験結果 ※撮影は、DFW社

図 一般細菌に対する殺菌効果の比較¹⁾

- 塩分除去前の使用済燃料プール水は高Cl濃度のため、次亜塩素酸やH₂O₂等の酸化性殺菌剤は使用できず。
- ヒドラジン(N₂H₄)に次亜塩素酸やH₂O₂同等の殺菌効果があることを確認
- 脱酸素剤かつ殺菌剤としてヒドラジンを燃料プールに適用

1) 平嶋敏文, 生田 聡, 藤井裕一, 高守謙郎: 第59回材料と環境討論会講演集, 腐食防食学会, p. 119 (2012).

引用: 深谷祐一, 熊谷克彦: 東北大学原子炉廃止措置事業 平成27年度第1回専門家会議資料, 2015年6月

2013年1~3月の状態

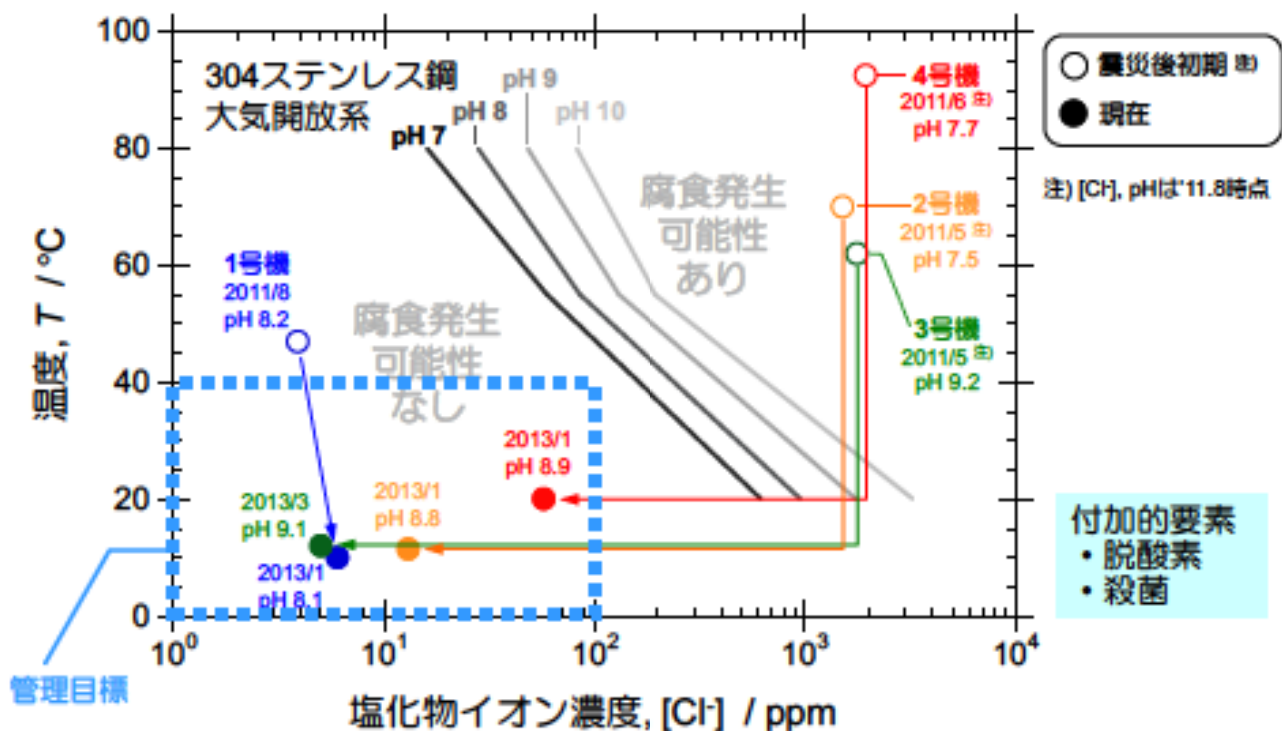
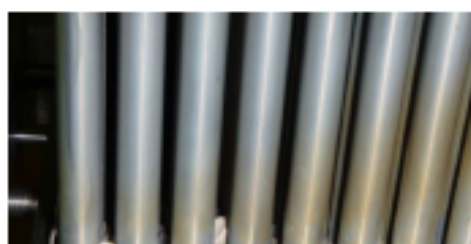


図 304ステンレス鋼のすきま腐食発生領域¹⁾と燃料プール水質との比較

引用: 深谷祐一, 熊谷克彦: 東北大学原子炉廃止措置事業 平成27年度第1回専門家会議資料, 2015年6月

1) M. Akashi, G. Nakayama, T. Fukuda: CORROSION/98 Conf., NACE International, Paper No. 158 (1998).

4号機使用済燃料プールから取り出した新燃料（未照射燃料）の健全性調査（2012/8/28～8/29）



①新燃料1体目（サビの付着）

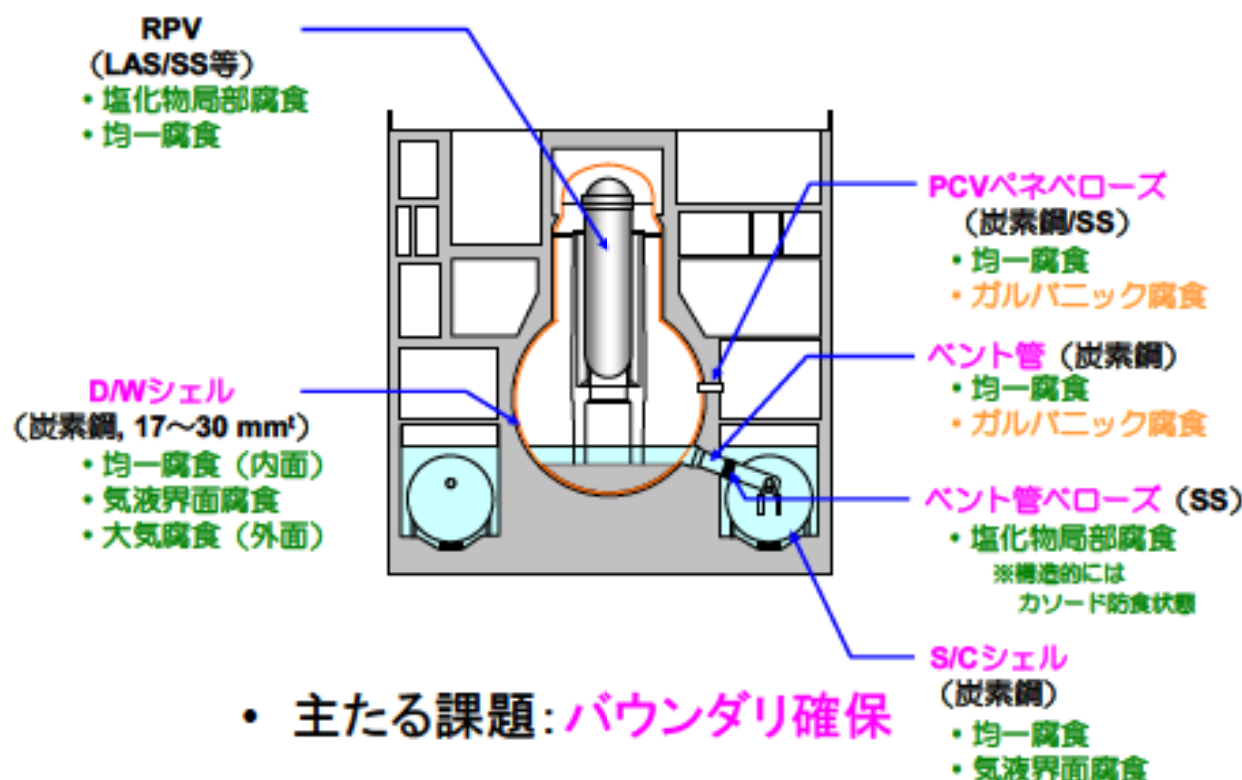
- 目視確認では、腐食や変形は認められず
- 変色部はふき取りにより除去可能
→もらい錆と推定



②新燃料1体目（サビ一部除去）

1) 東京電力ホームページ、「福島第一原子力発電所4号機使用済燃料プールから取り出した新燃料（未照射燃料）の健全性調査について」,handouts_120828_03-j.pdf, 2012年8月28日.

引用：深谷祐一、熊谷克彦：東北大学原子炉廃止措置事業
平成27年度第1回専門家会議資料, 2015年6月



引用：深谷祐一、熊谷克彦：東北大学原子炉廃止措置事業
平成27年度第1回専門家会議資料, 2015年6月

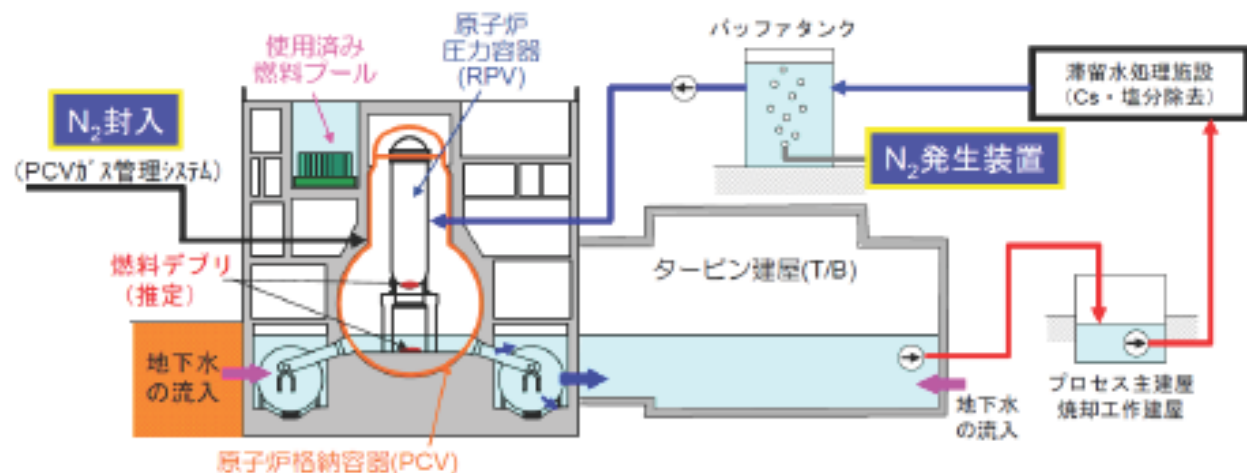
腐食抑制策の検討 (原子炉系)

		有効性	適用性				備考
			炭素鋼の腐食抑制に有効	高線量の現場に適用可能	他材料に悪影響なし	副次的障害なし	
冷却		○	○	○	○	○	
脱酸素処理	窒素通気	○	○	○	○	○	注水脱気窒素封入
	ヒドラジン	○	○	○	×	○	熱分解
	亜硫酸塩	○	○	△	△	×	
	その他	○	○	△	×	×	
塩分除去(希釈)		○	○	○	○	○	ガルバニック抑制
電気防食	犠牲陽極	○	×	○	△	×	
	外部電源	○	×	○	○	×	
pH制御		○	○	×	×	○	
インヒビター	無機系	×	○	△	△	×	高[Cl]不可
	有機系	×	○	△	×	×	高[Cl]不可
殺菌	塩素/H ₂ O ₂	-	-	-	-	-	高温
	ヒドラジン	-	-	-	-	-	高温

引用: 深谷祐一, 熊谷克彦: 東北大学原子炉廃止措置事業 平成27年度第1回専門家会議資料, 2015年6月

腐食抑制策の適用 (原子炉系)

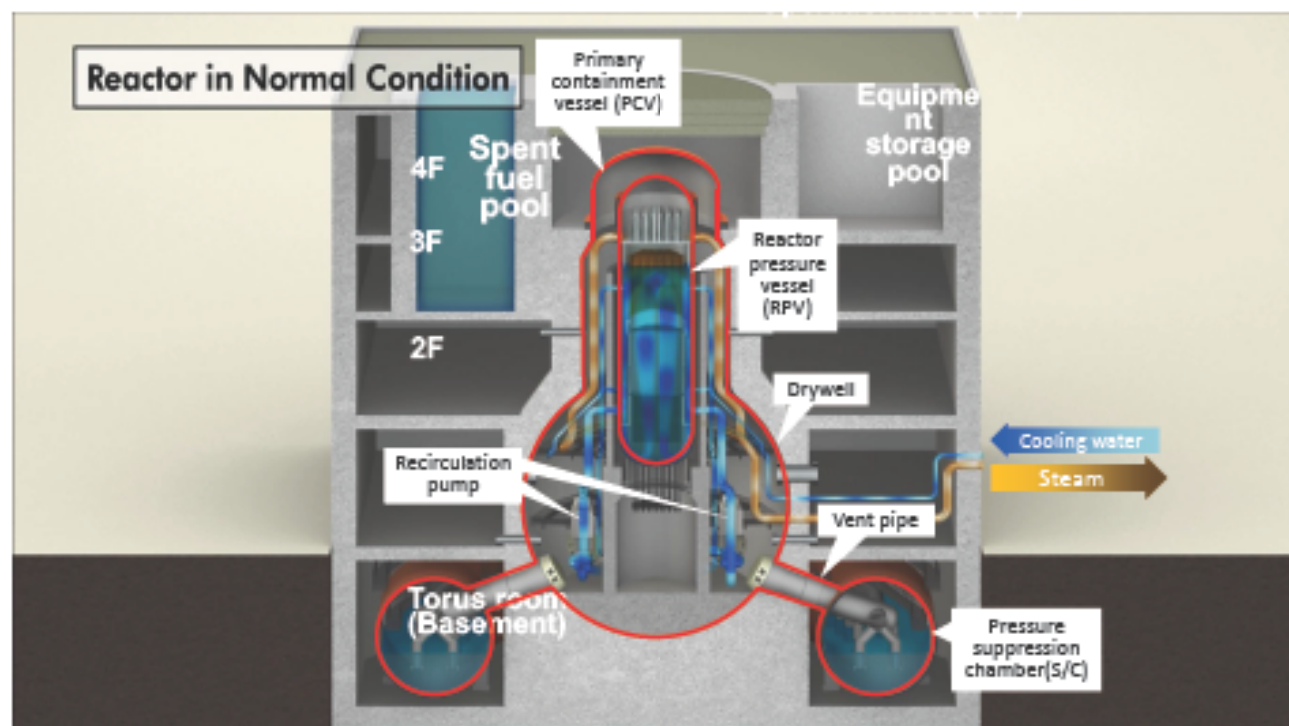
- 【冷却】注水
- 【脱酸素】注水を窒素ガスで脱気
- 【脱酸素】PCV内及びRPV内を窒素ガス封入
- 【塩分除去】淡水注入 & 水処理(塩分除去)



循環注水冷却システム概略図¹⁾

引用: 深谷祐一, 熊谷克彦: 東北大学原子炉廃止措置事業 平成27年度第1回専門家会議資料, 2015年6月

福島第一原子力発電所で何が起きたか（推定）



<http://fird.or.jp/en/reports/20150421/>

K. Okawa 'Robot Technologies Developed for the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station' at the German-Japanese Symposium on Technological and Educational Resources for the Decommissioning of Nuclear Facilities, April 21, 2015

事故炉と通常炉の廃止措置の違い

- 時間との戦い
 - 塩水腐食、鉄筋の腐食など
- 高放射線環境下の作業
 - ほとんど遠隔操作、回収ロボット
- 既設設備がほとんど利用できない
 - 損傷もしくは機能喪失
- 大量の放射性廃棄物
 - ほぼ全てが低レベル廃棄物。NRが無い