

日本原子力学会 水化学部会 第34回定例研究会

再稼働に向けた被ばく低減の 取り組みについて

東北電力株式会社 女川原子力発電所
環境・燃料部 環境・化学G

南川啓一
2018/10/5



- 1 はじめに

- 2 長期停止前までの被ばく低減への取組み
 - 2.1 被ばく低減一般
 - 2.2 建設段階の取組み－クリーンプラント作戦
 - 2.4 運転段階の取組み－水質管理
 - 2.5 女川1号機－Ni/Fe比制御
 - 2.6 女川2・3号、東通1号－極低鉄高Ni制御
 - 2.7 極低鉄・高ニッケル制御の課題

- 3 再稼働に向けての被ばく低減への取組み
 - 3.1 系統保管状況
 - 3.2 給復水系における鉄クラッド発生量と浄化運転の検討
 - 3.3 CUWポンプの間欠運転に伴う影響評価
 - 3.4 配管付着放射エネルギーの評価・予測
 - 3.5 再稼働に向けた課題

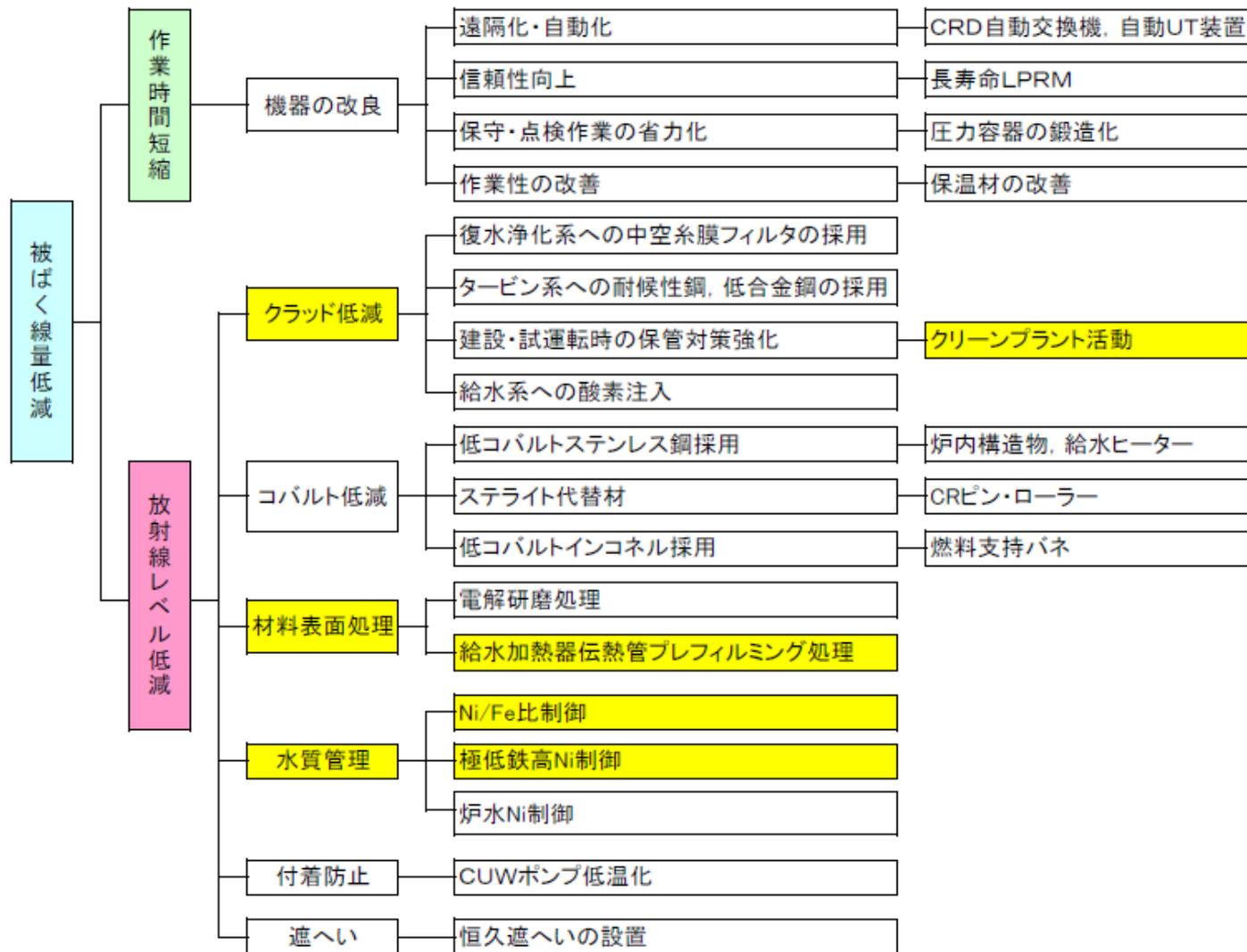
1. はじめに



東北電力 原子力発電所				
	号機	出力(MWe)	TYPE	運転開始
女川	1号機	524	BWR4	1984年
	2号機	825	BWR5	1995年
	3号機	825	BWR5	2002年
東通	1号機	1100	BWR5	2005年



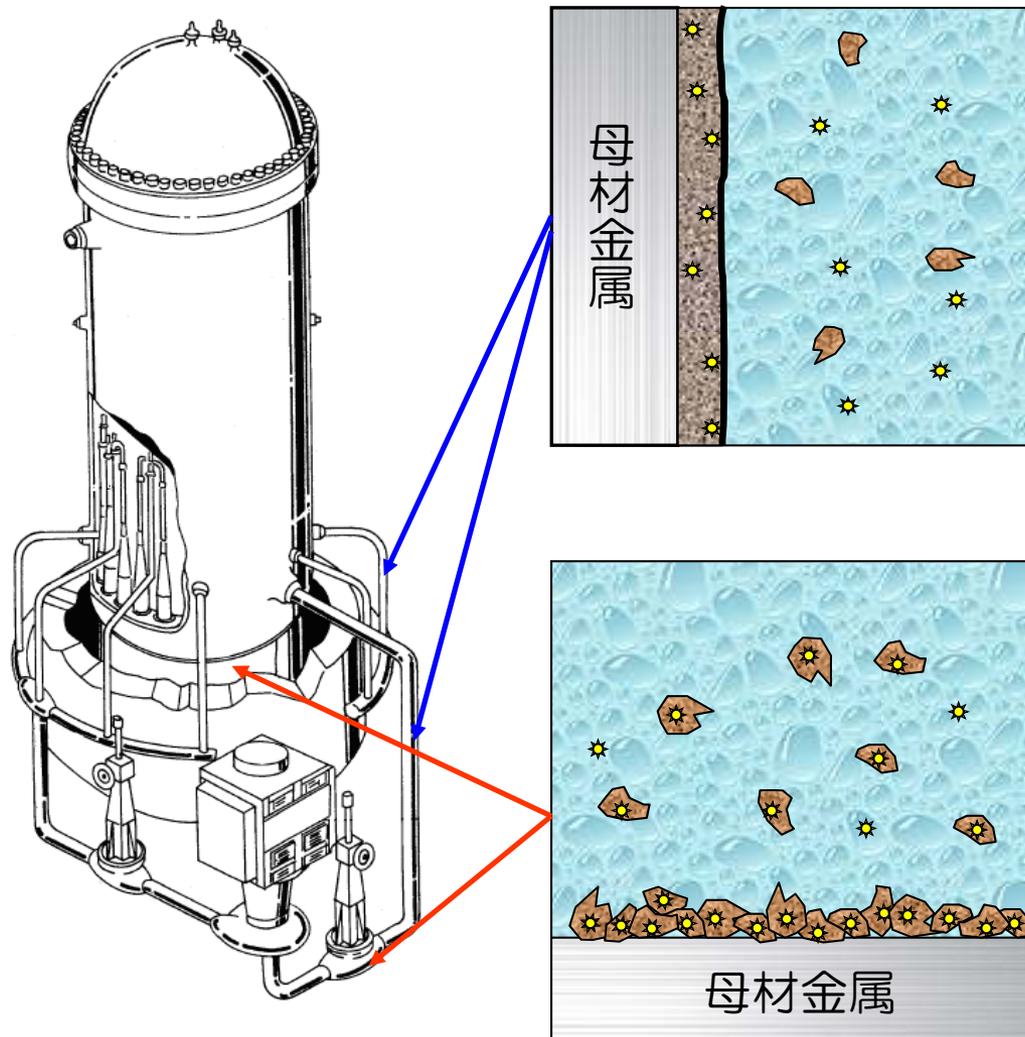
2. 1 被ばく低減一般



女川、東通の主な被ばく低減対策

項目	内容	効果	東通1号	女川1号	女川2号	女川3号
原子炉冷却材浄化系流量		濃度低減	2%	2.8%	3%	3%
低コバルト材の採用	炉内構造物	濃度低減	●	—	●	●
	給水ヒータ		●	●	●	●
	CRピン・ローラ		●	●	●	●
	燃料支持ばね		●	●	●	●
材料表面処理	一次系配管電解研磨	付着抑制	●	—	●	●
	給水加熱器伝熱管酸化皮膜生成	濃度低減	●	—	—	—
水質管理	Ni/Fe比制御	濃度低減	—	●	—	—
	極低鉄高Ni制御	付着抑制	●	—	●	●





置換性線源

炉水中のイオン放射能が原子炉の高温部の配管に生成する酸化皮膜中に取り込まれる。

- PLR、CUW配管
- 高温機器

沈積性線源

炉水中のクラッド放射能が炉水の滞留部、低流速部、水平部などに沈降堆積する。

- CRDフランジ
- フィルタ部
- PLR、CUW配管水平部
- ノズルスリーブ

2.2建設段階の取組み（クリーンプラント活動その1）

- ① 作業環境の整備
- ② 保護養生
- ③ 内面清浄度の維持



出入口へのエアガン、ジェットスプレー設置による塵埃持込抑制



系統構成配管・機器内外面の保管管理の徹底、清浄度の維持

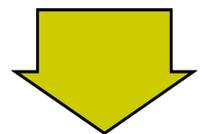


系統試験時



- ★ 保管管理の徹底
- ★ 試験用水の純度管理

起動試験時



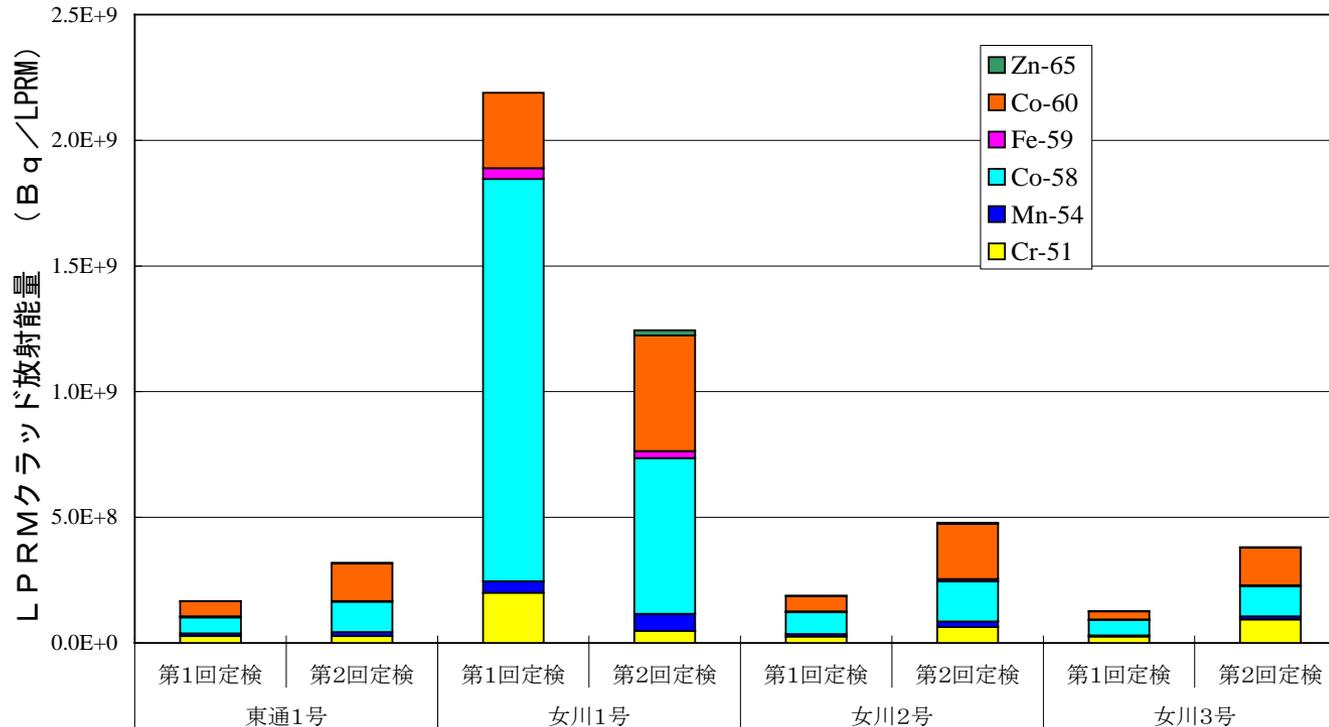
- ★ 1次系クリーンアップ運転
- ★ 復水・給水浄化運転
- ★ 復水・給水スイング運転
- ★ ホットウェルの清掃
- ★ 残留熱除去系統洗浄
- ★ 水処理系の管理

クラッド持込み低減

第1サイクル

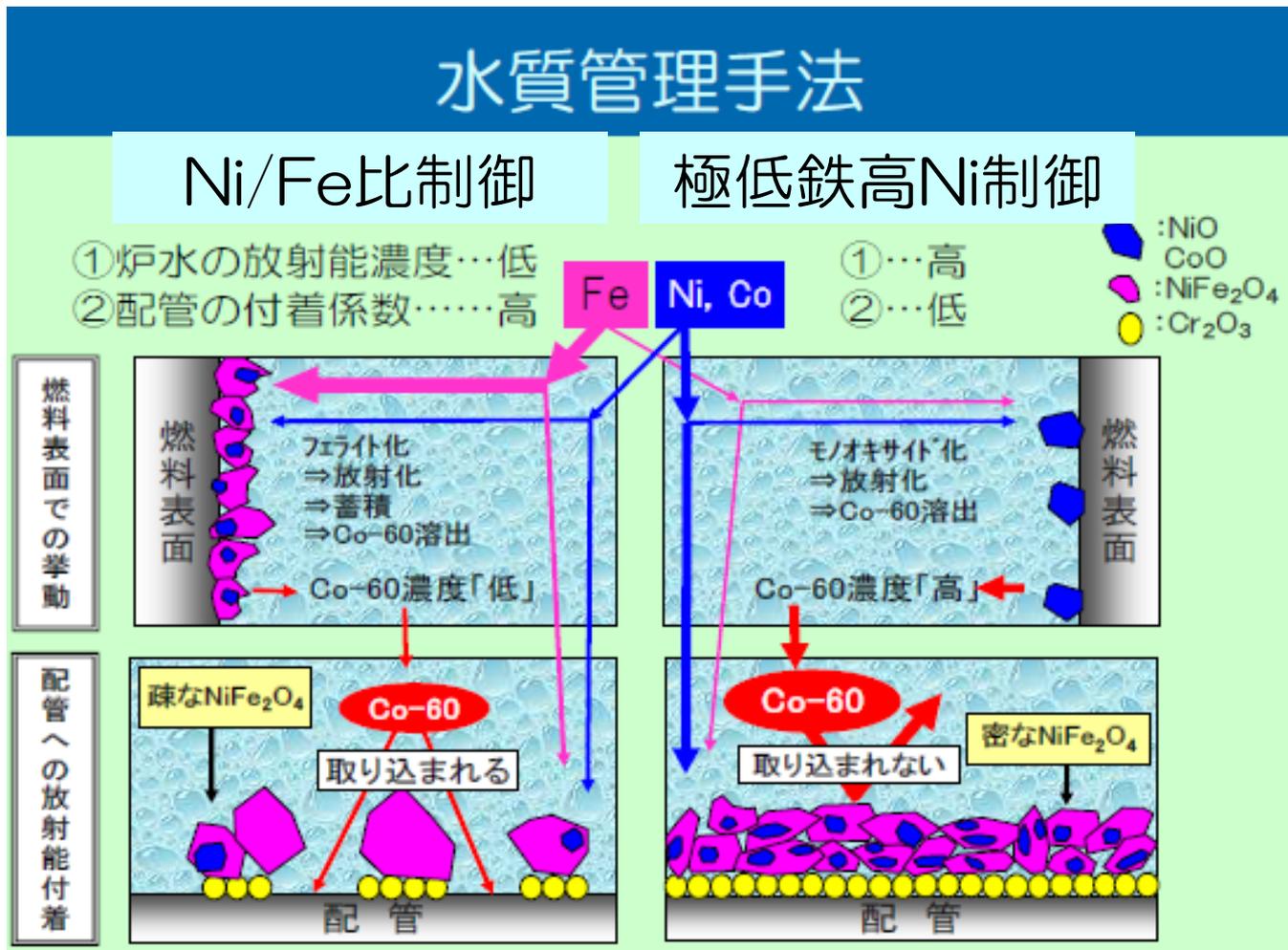
- ★ 炉水放射能濃度の抑制

クラッド低減対策の効果（炉底部沈積クラッド放射能量）



- 女川2・3号、東通1号はクリーンプラント活動および極低鉄高Ni制御を実施していることから、炉内に持込まれたクラッド量は低く抑えられたため、クリーンプラント活動の効果があったものと評価。





配管線量とは

配管線量 = ① 原子炉冷却水中の放射能濃度 × ② 配管の付着係数

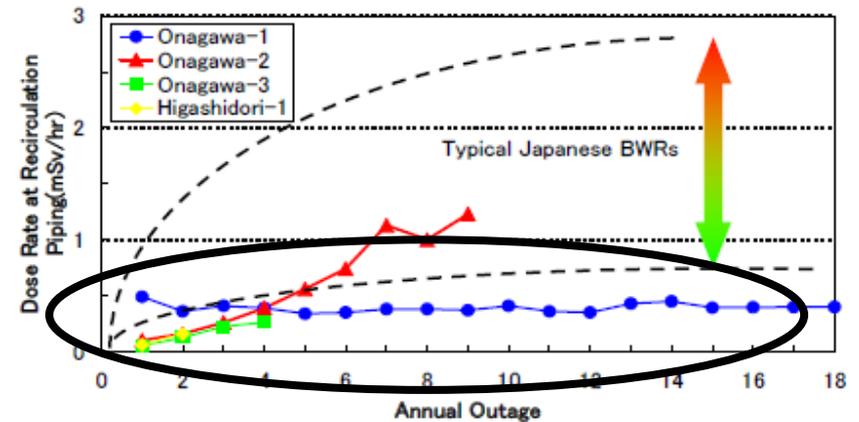
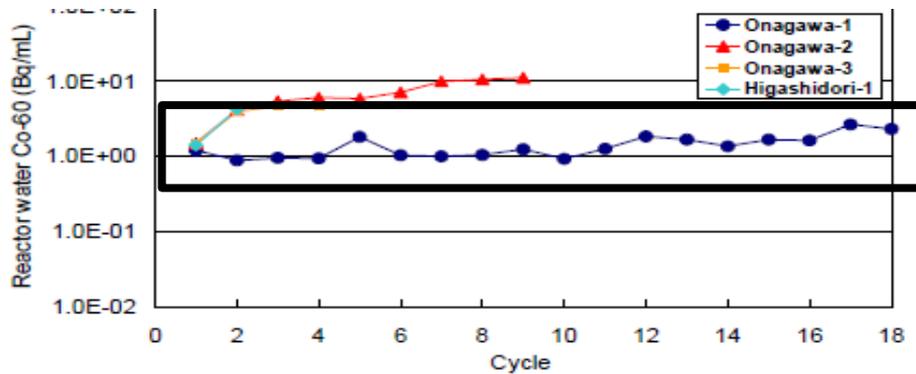
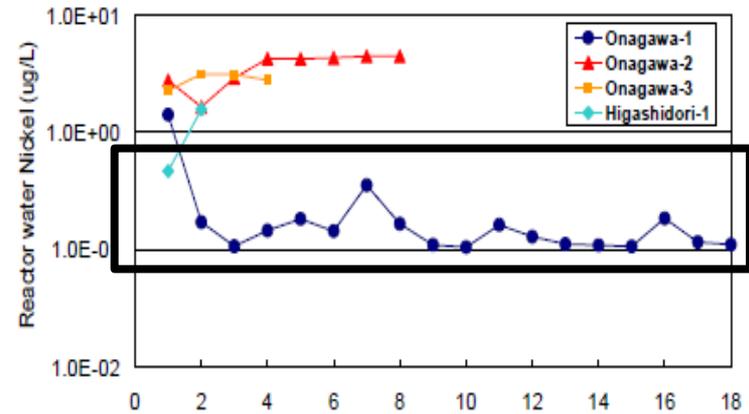
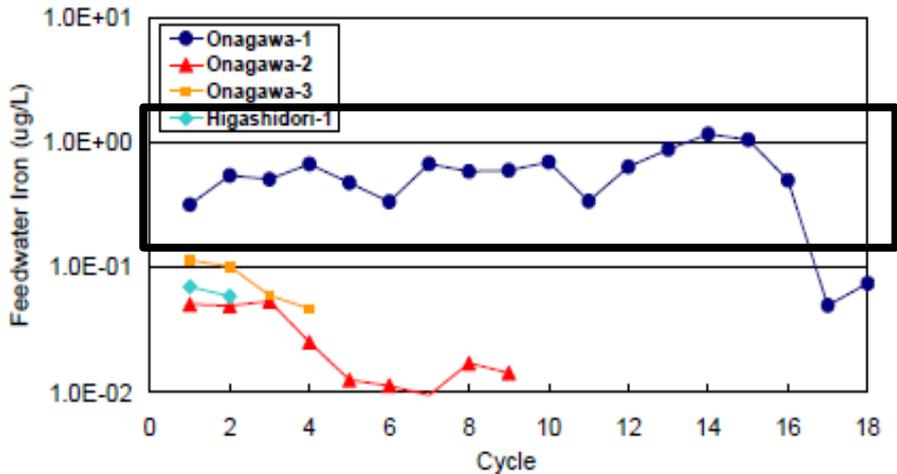
- ① 構造材等より溶出した物質が原子燃料より放出される中性子等により放射化し、放射性物質となったものの濃度。
- ② 放射性物質が配管に付着する速度。物質の性状、配管の材料・表面状態等に依存する。

水質管理手法

- 女川1号
原子炉冷却水中の放射能濃度 = ① を低減
Ni/Fe比制御を採用。
- 女川2、3号、東通1号
配管の付着係数 = ② を低減
水質管理に極低鉄高Ni制御を採用。



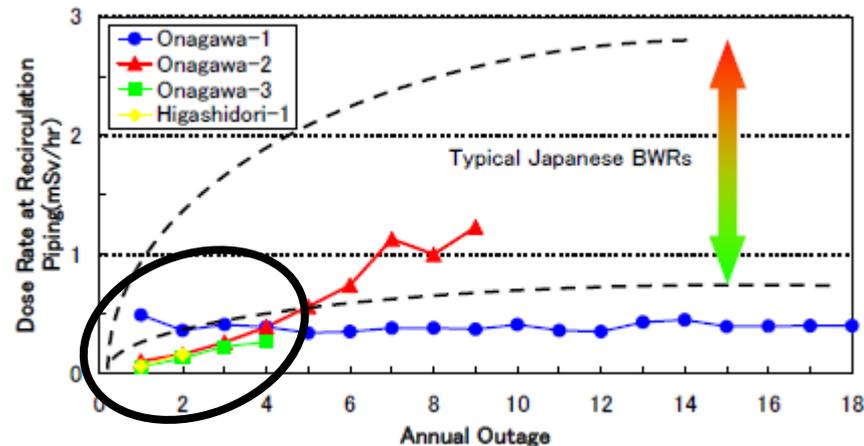
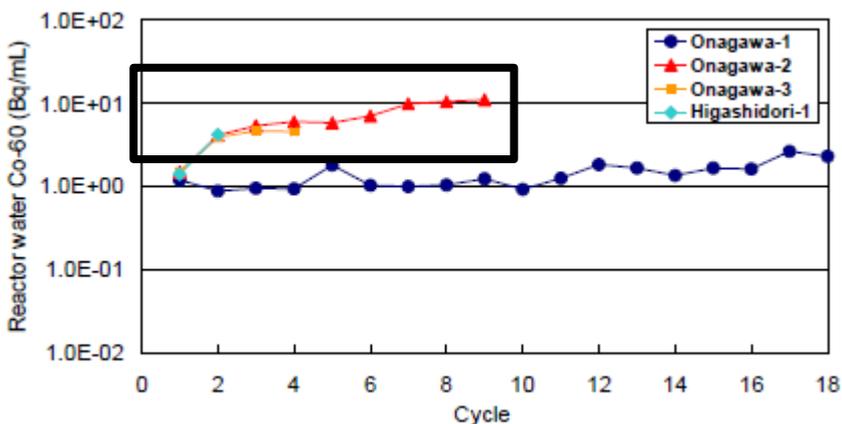
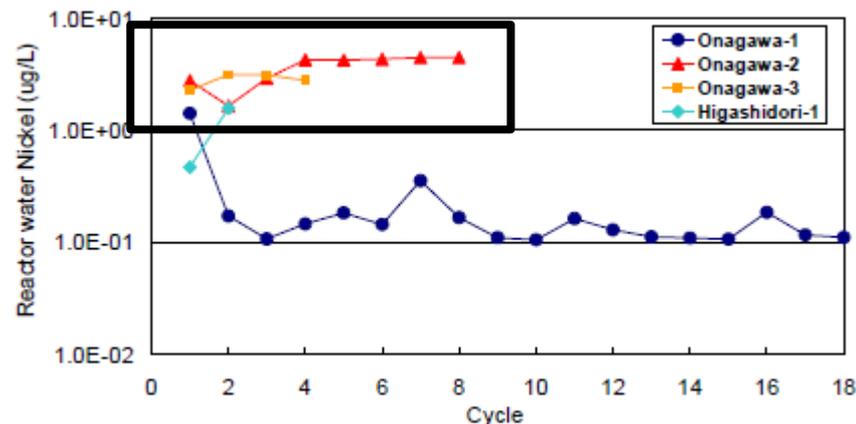
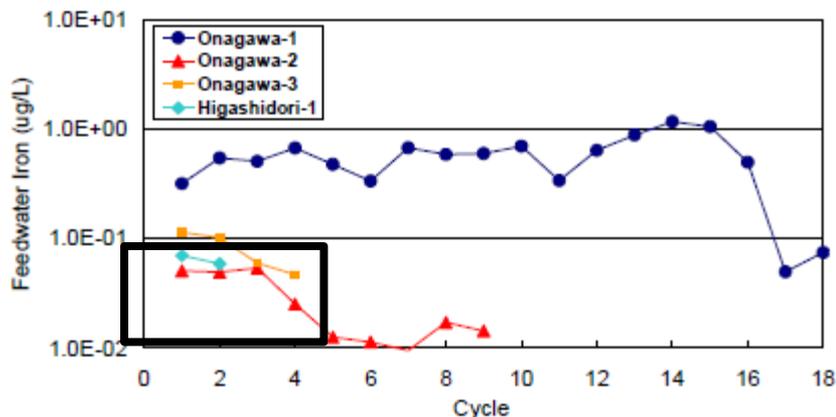
2.5 女川1号機-Ni/Fe比制御



- 給水鉄クラッドを一定濃度で維持、給水中の鉄クラッドをNi濃度の3~5倍程度とNi/Fe比制御状態を確認。
- 給水から原子炉へ持込まれる鉄クラッド量とニッケルイオン量をコントロールすることで、燃料表面に放射性物質を保持させて原子炉水放射能濃度を低減させ、PLR配管表面への放射能付着を抑制。



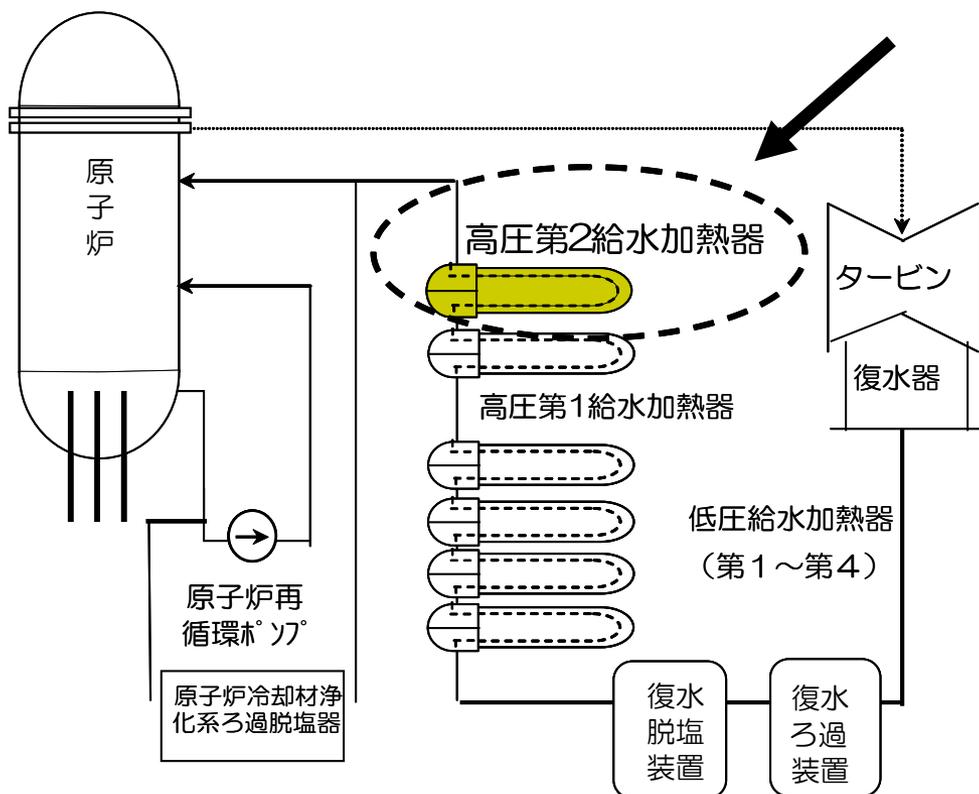
2.6 女川2・3号、東通1号—極低鉄高Ni制御



- 給水鉄クラッド0.1ppb、炉水Ni数ppb程度、炉水放射能濃度は数Bq/mlと高くなり、極低鉄高Ni状態を確認。
- 炉内が極低鉄高Ni状態になると、機器・配管への腐食生成物の取込みが抑制されることによりPLR配管表面への放射能付着が抑制された。



給水加熱器伝熱管へのプレフィルミング効果（東通1号）



高圧第2給水加熱器仕様	
材料	SUS304TB-S相当
外形×厚さ	15.88×1.0mm
平均有効長さ	15214mm
伝熱管総数	2780本
伝熱面積	2110m ² /個

【水蒸気酸化処理】

伝熱管の熱処理を水素＋水蒸気雰囲気
で実施

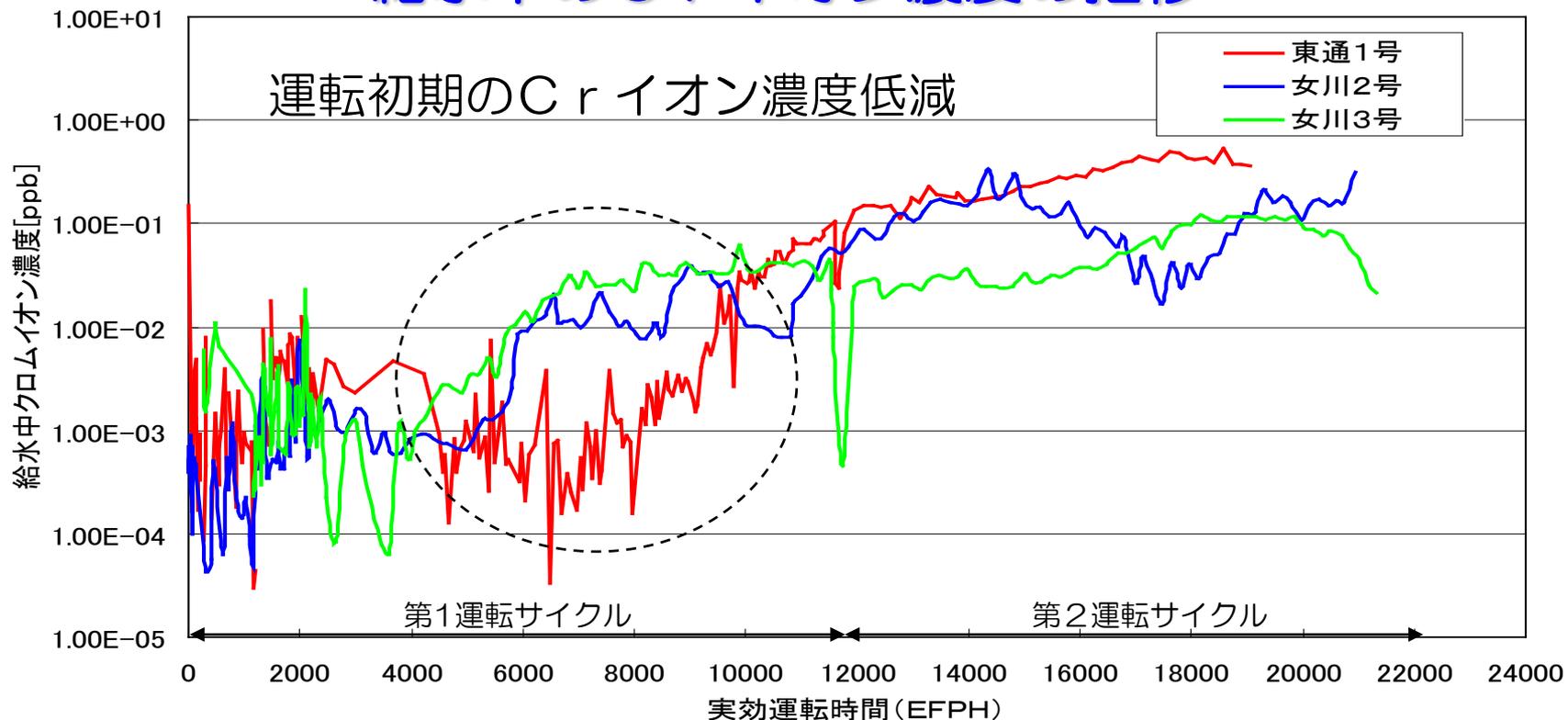
【目的】

Crイオンの溶出抑制

- 炉内Crイオンが増加すると炉水pHは酸性側へシフトし燃料表面からのCo-60等の放射能溶出が増加するため、実機では初めてとなる高圧第二給水加熱器伝熱管に酸化処理を施し給水からの持込Crを抑制。



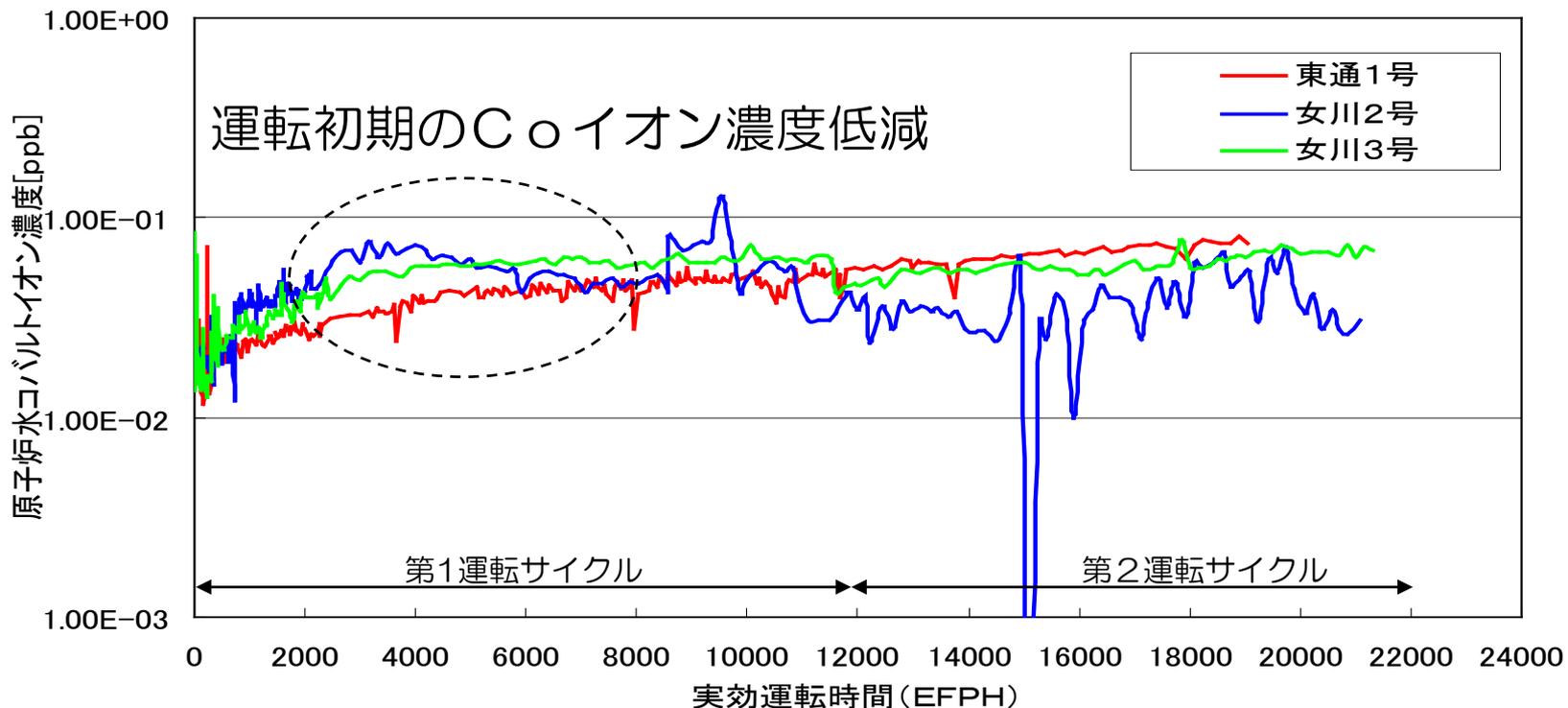
給水中のCrイオン濃度の推移



- 材料表面酸化処理の効果を給水中Crで確認し、4000時間以降Crイオンが低めに推移、Crイオン抑制効果があることを確認。
- 従来プラント溶出量に対し1/4低減できるといわれているが、給水から持込まれたCr総量は当社先行プラントの約2/5と抑制効果は大きいと評価。

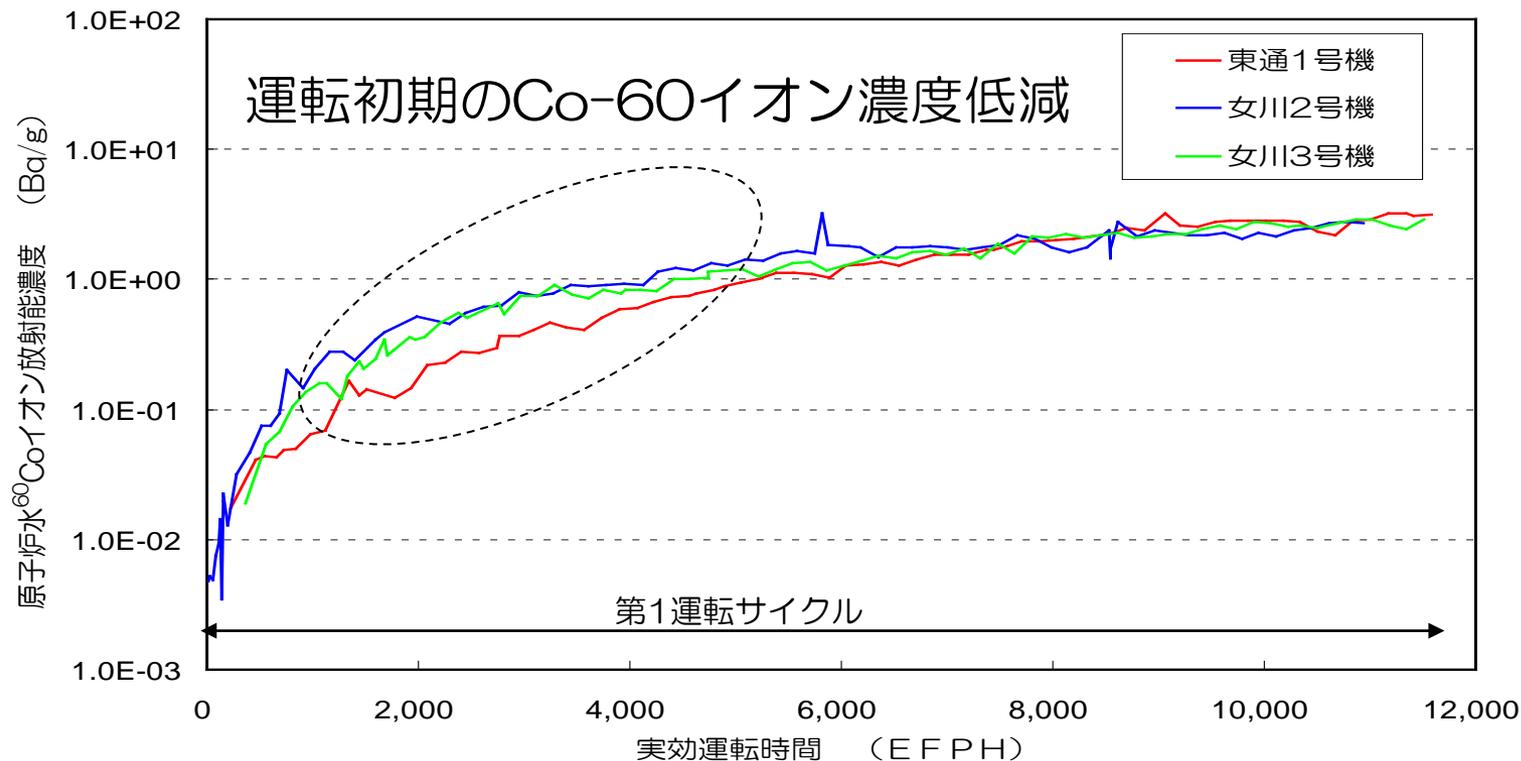


炉水中のCoイオン濃度の推移



- Crイオン抑制により炉水放射能濃度上昇が抑制されたことを炉水金属Coイオン濃度で確認、先行プラントと比較して低く推移、Crイオン抑制効果を確認。

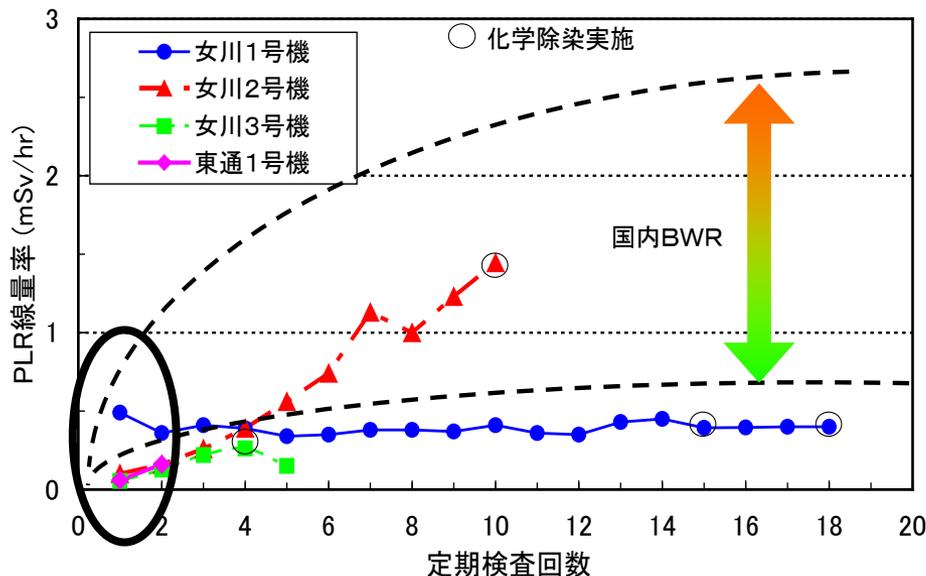
炉水中の Co-60 放射能濃度の推移



- 炉水中 Co-60 放射能濃度は先行プラントより低く推移、炉水金属 Co イオン濃度同様、 Co 溶出抑制を確認。



被ばく低減対策の効果（原子炉再循環系配管線量率）

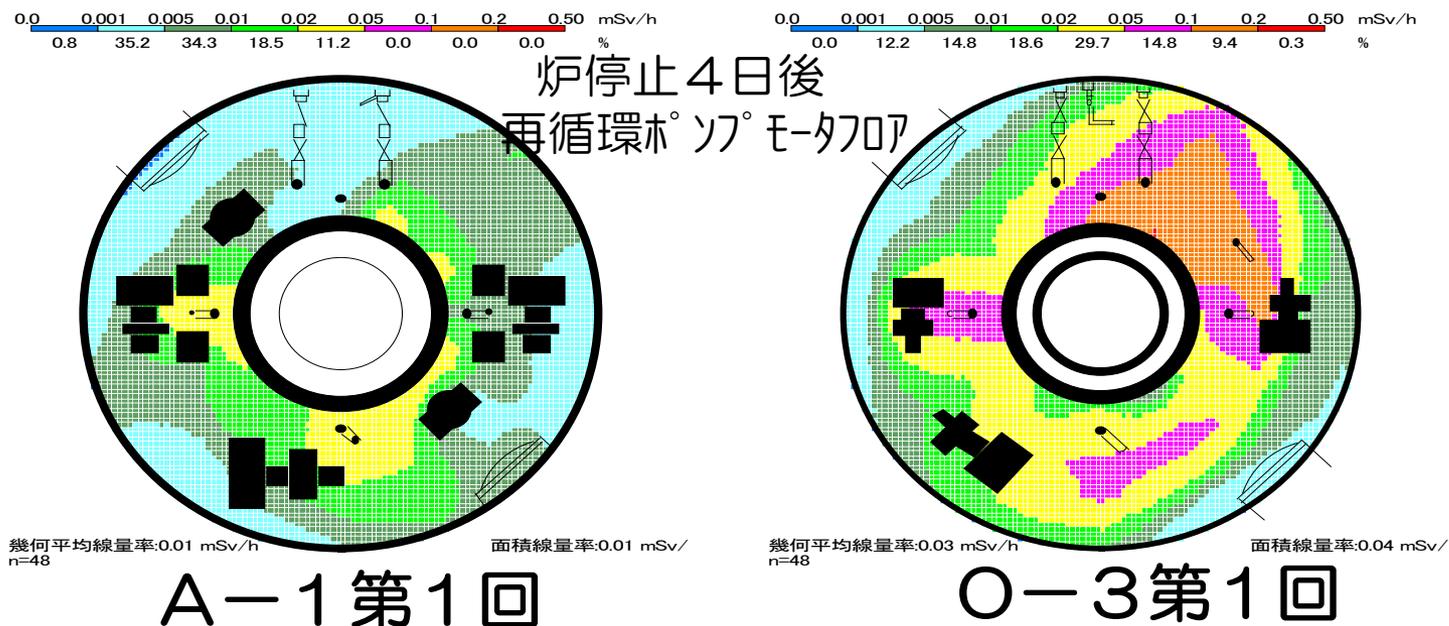


	Fe/Ni制御	極低鉄高Ni制御		
	女川1号	東通1号	女川2号	女川3号
第1回定期検査時 PLR配管線量率 (mSv/h)	0.49	0.06	0.10	0.06
第1回定期検査時 ばく線量 (人・Sv)	0.70	0.14	0.15	0.19

- 水質管理として極低鉄高Ni制御を行い、かつ給水加熱器伝熱管に酸化処理を施す相乗効果によって、世界でもトップクラスの低線量プラントを達成した。

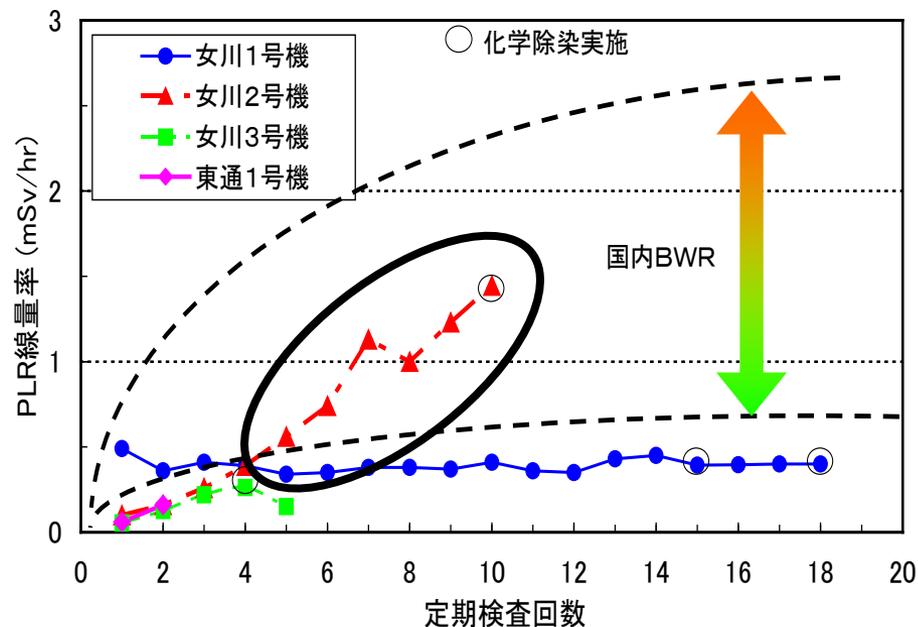
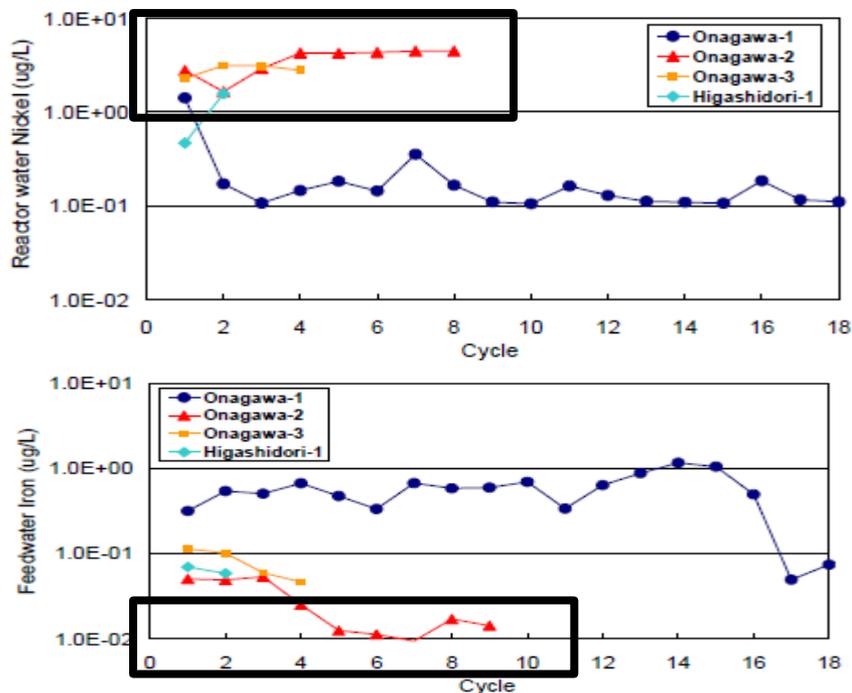


原子炉格納容器内空間線量率 東通1号と女川3号機比較（第1回定検）



- 被ばく低減対策の効果によって原子炉格納容器内線量率を低く抑えられ、その結果、総被ばく線量を低く抑えられたと評価。

2.7 極低鉄高Ni制御の課題



- 第5サイクル以降、配管線量率増加が顕著。
- 給水鉄クラッドが0.01ppb程度に低下し、炉水Ni濃度が過剰な状態となりPLR配管線量率が上昇。
 - ① 余剰なNiが放射能取込み率の高いNiOを形成取り込みが加速。
 - ② ニッケルフェライトに割れが生じクロム酸化物が露出し取り込みが加速。
- Niを過剰にさせないように微量な鉄を給水から注入し炉水Niを制御する必要がある。



3 再稼働に向けての被ばく低減への取組み

停止中	起動前	起動時	安定運転
<p>被ばく低減</p> <ul style="list-style-type: none"> ・配管・機器の腐食抑制対策 →保管対策 ・配管酸化皮膜の状態監視 →配管線量率又は付着放射エネルギーの測定 ・沈積性線源の監視 →定点線量率測定 	<p>被ばく低減</p> <ul style="list-style-type: none"> ・炉内への腐食生成物持込低減 →給復水再循環運転 ・配管酸化皮膜の状態監視 →配管線量率又は付着放射エネルギーの測定 ・沈積性線源の監視 →定点線量率測定 	<p>被ばく低減</p> <ul style="list-style-type: none"> ・炉内への腐食生成物持込量監視 →給水持込量評価 	<p>運転時の安全性・高信頼性を達成</p>

項目		リスク	対策(案)
被ばく低減	クラッド不純物の増加	<p>長期停止に伴い機器配管等の腐食によりクラッド発生量が増加。起動前の浄化期間が長引き、プラント起動工程に影響を与えるリスクがある。</p> <p>給水からの鉄クラッド持ち込みにより極低鉄高Ni制御のバランスが崩れニッケルフェライト(NiFe₂O₄)層により配管への放射能取込みを抑制できず配管線量率が増加する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・適切な保管管理。 ・起動時に持ち込まれる鉄量を事前評価し、必要に応じて浄化期間を確保する。
	放射エネルギーの増加	<p>配管内面酸化皮膜が不安定となると酸化皮膜が配管から剥離し、その箇所の腐食速度が増加することで新しい酸化皮膜生成が進む。起動時に新しい酸化皮膜に放射性核種が取込まれ配管付着放射エネルギーおよび配管線量率が増加する。</p>	<p>定期的に定点線量率測定を行い配管内面酸化皮膜の状態を監視する。</p>



【東日本大震災時のプラント状況】

《東北地方太平洋沖地震の概要》	《女川原子力発電所における観測》
<ul style="list-style-type: none"> ・発生日時：2011年3月11日(金)14時46分頃 ・震源地：三陸沖約130km 深さ約24km ・マグニチュード：9.0(日本国内観測史上最大) 	<ul style="list-style-type: none"> ・震度：6弱 ・地震加速度※：567.5ガル (1号機 原子炉建屋地下2階) ※ 過去最大地震加速度：251.2ガル, H17.8.16

		女川1号機		女川2号機		女川3号機		(東通1号機)
地震発生前		運転中		起動中 (第11回定期検査中) 3/11 14:00 起動開始		運転中		停止中 (第4回定期検査中)
地震発生後	止める	3/11 14:46	自動停止	3/11 14:46	自動停止	3/11 14:46	自動停止	——
	冷やす	3/12 0:58	冷温停止 (100℃未満)	3/11 14:49	冷温停止 (100℃未満)	3/12 1:17	冷温停止 (100℃未満)	——
	閉じ込める	排気筒モニタ・各区域の放射線モニタの指示値に異常なし (なお、東電福島第一の事故により3/12深夜モニタリングポスト指示値が上昇したため、 原子力災害特別措置法第10条に基づき関係機関に通報) ⇒『止める、冷やす、閉じ込める』が健全に機能						排気筒モニタ・ 各区域の放射線 モニタの指示値に 異常なし



3.1 系統保管状況

フラント名		東通1号	女川1号	女川2号	女川3号
系統区分	系統名	保管方法			
原子炉系	RPV	満水保管 RPVヘッドオン	満水保管(ウェル満水) RPVヘッドオフ	満水保管 RPVヘッドオン	満水保管 RPVヘッドオン
	CUW系	1ポンプ定期運転 (1回/月) F/Dバイパス	[現状]水抜き(点検中) [点検後]満水保管 (1回/月運転)	[現状]水抜き(点検中) [点検後]満水保管 (1回/月運転)	[現状]満水保管 [次回点検後]満水保管 (1回/月運転)
	CRD系	定期運転(1回/月) CRD最低冷却水量 による間欠通水 CUWへのパージ水供給	[現状]水抜き(点検中) [点検後]満水保 管(1回/月運転)	[現状]水抜き(点検中) [点検後]満水保管 (1回/月運転)	[現状]満水保管 [次回点検後]満水保管 (1回/月運転)
	PLR	満水保管	満水保管	満水保管	満水保管
	RHR	SHCモード	SHCモード	SHCモード	SHCモード
	FPC	1ポンプ+1F/D運転	1ポンプ+1F/D運転	1ポンプ+1F/D運転	1ポンプ+1F/D運転
タービン 主蒸気系	主蒸気系(MS)	自然乾燥保管	自然乾燥保管	自然乾燥保管	自然乾燥保管
	タービン	自然乾燥保管	自然乾燥保管	自然乾燥保管	自然乾燥保管
給復水系	復水器・給水加熱器	自然乾燥保管	満水乾燥	自然乾燥保管	自然乾燥
保管	給水加熱器(管側)	自然乾燥保管	自然乾燥保管	自然乾燥保管	自然乾燥保管
	CF(フィルタ)(CFD)	脱塩水満水保管	脱塩水満水	脱塩水満水	脱塩水満水
	復水脱塩装置(CD)	脱塩水満水保管	脱塩水満水	脱塩水満水	脱塩水満水
	ヒータードレン系	自然乾燥保管	自然乾燥保管	自然乾燥保管	自然乾燥保管



給復水系+タービン系 鉄クラッド発生量評価 (kg)

			女川2号 825MWe	女川3号 825MWe	東通1号 1100MWe
給復水再循環運転	給復水系 クラッド発生量	給復水系浄化運転時 CF捕捉量			57
給復水系 水抜き保管			34	41	40
タービン系 水抜き保管	タービン系 クラッド発生量	タービン起動時 CF捕捉量	248	298	301
合計			282	338	398

- 長期停止中の腐食に伴い給復水系、タービン系から発生する鉄クラッド量を保管状態に合わせた腐食速度、保管日数、配管表面積から算出した。
- 建設時の起動試験中に除去される量と同程度の発生量となっている。



CF(HFF)各塔 クラッド負荷量(g)と逆洗回数

女川2号 CF(HFF)各塔クラッド負荷量 (g/m²)

	A塔	B塔	C塔	D塔	E塔
水抜き保管～給復水再循環運転	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
給復水再循環運転～タービン起動	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8
合計	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3



女川2号 CF(HFF)逆洗回数

実施時期	必要回数
起動前の給復水再循環運転後	1回
原子炉起動操作前	1回
合計	2回

東通1号 CF(HFF)各塔クラッド負荷量 (g/m²)

	A塔	B塔	C塔
給復水再循環運転	2.4	2.4	2.4
水抜き保管～給復水再循環運転	3.9	3.9	3.9
給復水再循環運転～タービン起動	15.2	15.2	15.2
合計	21.5	21.5	21.5

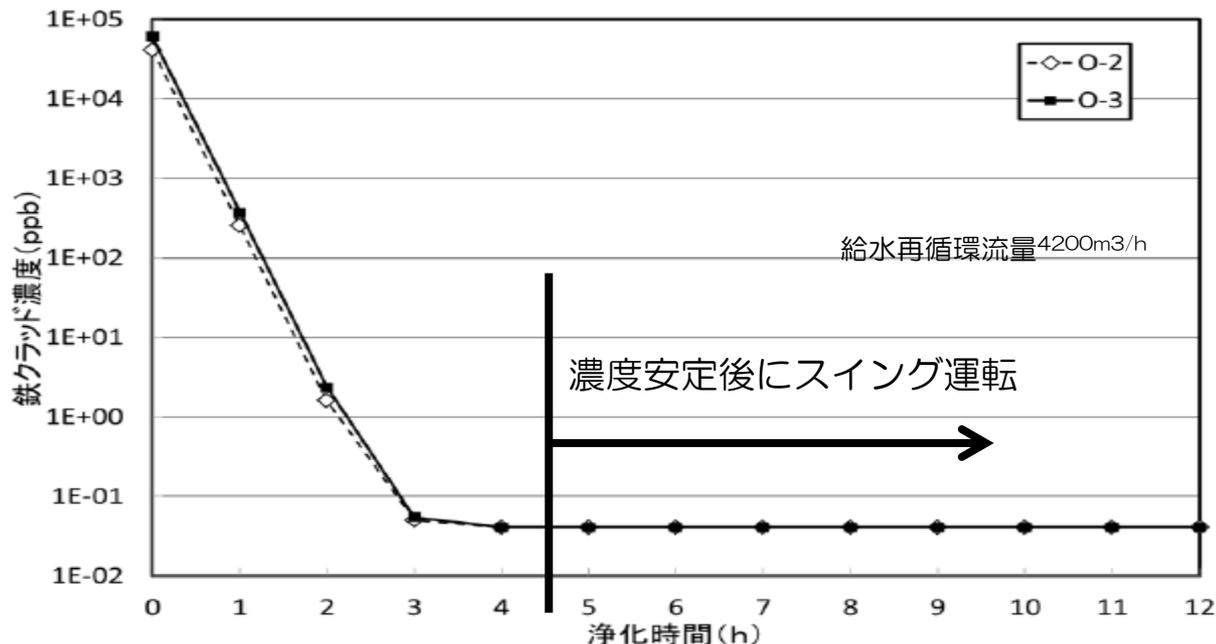


東通1号 CF(HFF)逆洗回数

実施時期	必要回数
起動前の給復水再循環運転後	1回
原子炉起動操作前	1回
合計	2回

- 長期停止中の給復水系発生クラッド除去のため起動前の給復水系浄化運転後に1回。
- 長期停止中のタービン系発生クラッド除去のため原子炉操作前に1回。
- 適切なCF逆洗回数、時期を起動前の点検工程・系統運用工程へ反映。

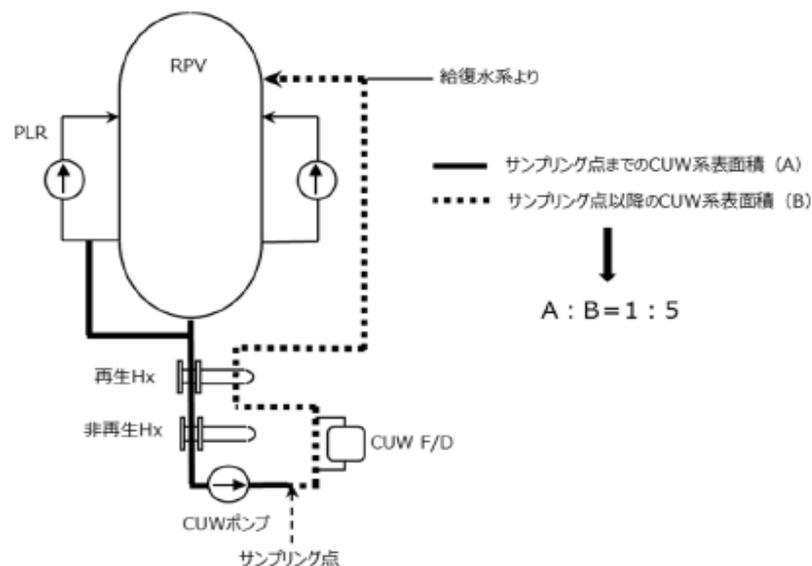
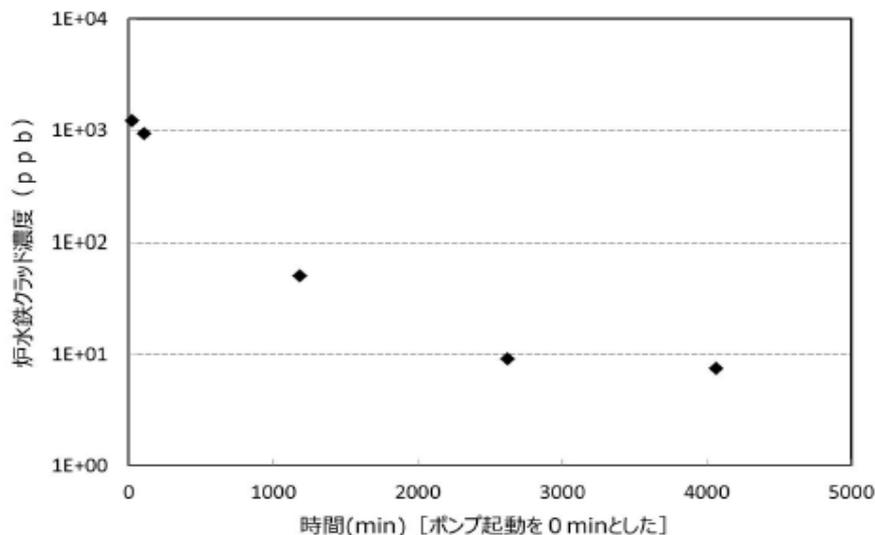
女川2・3号 給水系再循環運転時のクラッド浄化時間の推定



- クラッド濃度は急速に低下し約3時間でクラッド濃度0.1ppbに達すると評価。
- 低流速部に堆積したクラッドや剥離しにくいクラッドを除去するために給復水スイング運転を実施し炉内への持込み量を低減する。
- 適切な浄化時間を起動前の点検工程・系統運用工程へ反映。

3.2 CUWポンプの間欠運転に伴う影響評価

女川2号 CUW系のポンプ運転によるクラッド発生量



CUWポンプ 運転時間	CUWポンプ起動前保管日数			炉水鉄クラッド濃度測定結果からの推定			
	ポンプ 停止	ポンプ 起動	日数 (日)	発生量 (g)	発生量/日数 (g/日)	腐食速度 (mdm)	減肉量 (mm/year)
2015/3/14 ~17	2011/12 /15	2016/3 /14	1551.6	841	0.5	3.1	0.0005

- サンプルング点前後での表面積の比が約6倍であるため炉内への持ち込み量も約6倍。
- CUW系からの持ち込み量をできるだけ低減するためにはCUW運転時はF/Dによる除去も有効。

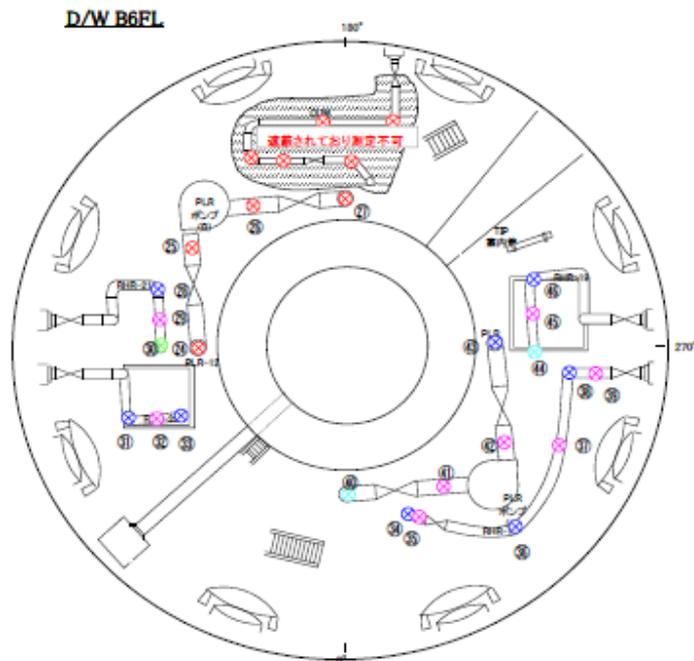


3.3 配管付着放射能量の評価・予測

【測定ポイント】

【測定状況】

× : 空間線量当量率 ⊗ : 表面線量当量率

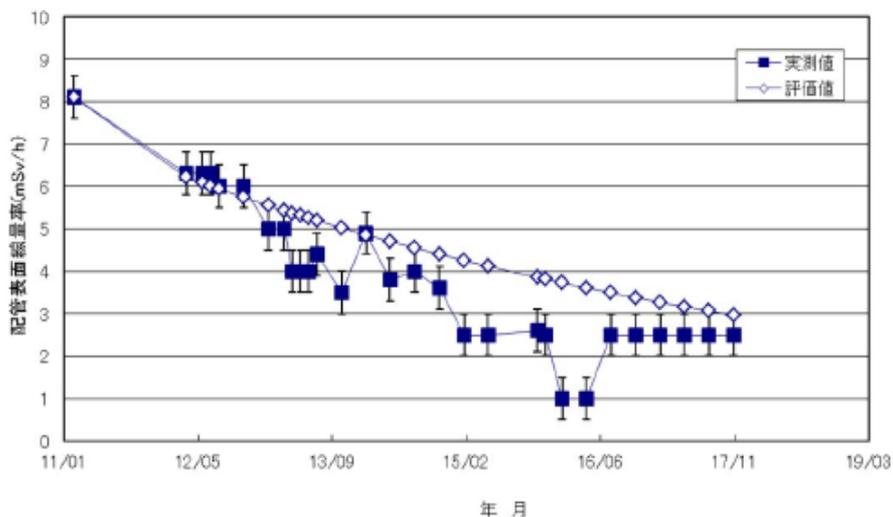


- 「一次系放射能挙動の監視」と「原子炉再稼動後のCUW配管・PLR配管線量予測」を目的に実施。
- 長期停止中のドライウェル内の配管表面線量率（CUW、PLR）および定点空間線量率を電離箱、 γ スキャンによりデータ採取し、配管内面の皮膜状況を推定。

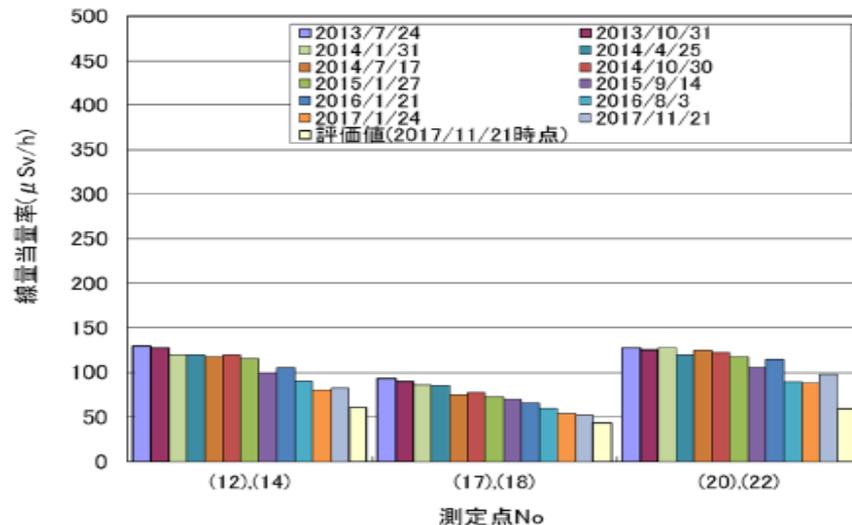


3.4 配管付着線量率の評価・予測

CUW配管表面線量率の実測値と減衰評価値



PLR配管表面線量率の実測値と減衰評価値



- CUW・PLR配管内面の酸化皮膜が剥離した場合、初期の配管付着係数となり、再稼働後の配管表面線量率増大が懸念される。
- CUW・PLR配管表面線量率は実測値と減衰評価値は概ね一致。
- CUW・PLR配管内面の酸化皮膜は安定しており、剥離はしていないと推定。



今後の新たな取組み（案）

①長期停止を考慮した浄化方法検討

長期停止により通常停止にはない設備点検、試験等が実施されることが予想されるため、工程調整、必要な浄化期間の確保、CF設備健全性確認、CF(HFF)新品交換等を検討する。

②原子炉底部の沈積クラッドの浄化方法検討

長期停止中に行われているECCS系サーベランス等により原子炉へ持ち込まれたクラッドが炉底部に沈積していると考えられるため、沈積量を推定するとともに、攪拌方法、浄化方法、時期について検討する。

③原子炉へつながるECCS系、給水系配管の死水処理検討

浄化運転により浄化できない配管に溜まっている不純物を多く含む死水を炉内へ持込まないように処理方法を検討する。

④起動前の系統試験等による炉内持込みの低減検討

起動前に実施される既設設備および新設SA設備の各系統試験、起動前試験等による不要なクラッドを炉内へ持込まないように事前の配管フラッシング、試験水の純度確認等を検討する。



今後の新たな取組み（案） 続き

- ⑤給復水系の腐食状況確認（目視、スミヤ）
実機給復水系配管の腐食状況を確認し、必要に応じて系統保管方法変更等を検討する。
- ⑥再稼働に向けたクリーンプラント活動の再構築
女川1号以降、低線量率プラントを目指し実施しているクリーンプラント活動について東通1号建設から13年経過していることから、当時の活動状況を踏まえ再稼働に向けて体制等を再構築する。
また、長期停止中のクラッド発生量、起動時持込可能量を予想し、クリーンプラント活動で目標設定し活動する。
- ⑦起動前設備点検における各設備の清掃、洗浄の検討
現在、系統運用されていない設備の保管状況を現場確認するとともに、清掃や洗浄が実施可能か検討する。
- ⑧再稼働後の水質管理手法の検討（炉水Ni制御、Zn注入、水素注入）
再稼働達成後の被ばく低減、高経年化対策（SCC抑制）の実施の検討。



FIN

