（一社）日本原子力学会 水化学部会
第52回定例研究会　於　四国電力（株）総合研修所

PWR２次系における高経年化対策としての水化学管理

2025.12.10

三菱重工業株式会社　原子力セグメント
プラント設計部　系統設計課　前田 哲宏

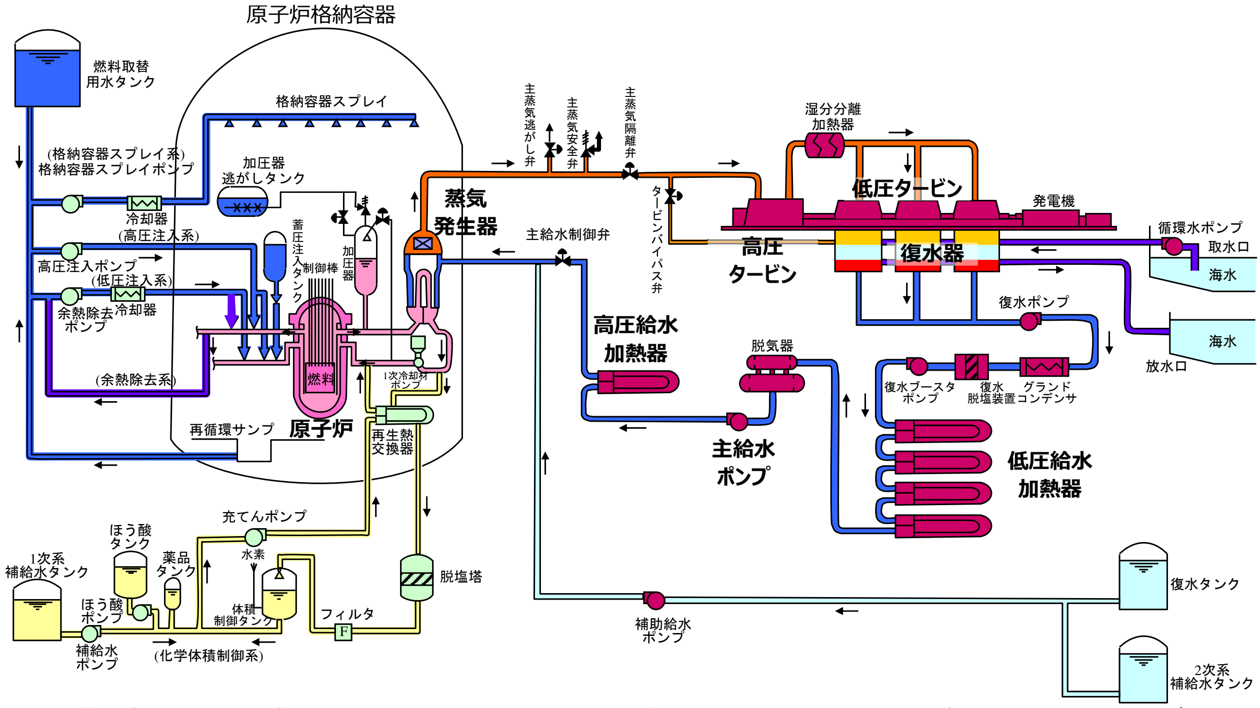
ZCS-GE-250035

三菱重工

目次

1. PWRプラントの系統構成

（1） PWRプラントの系統構成と特徴



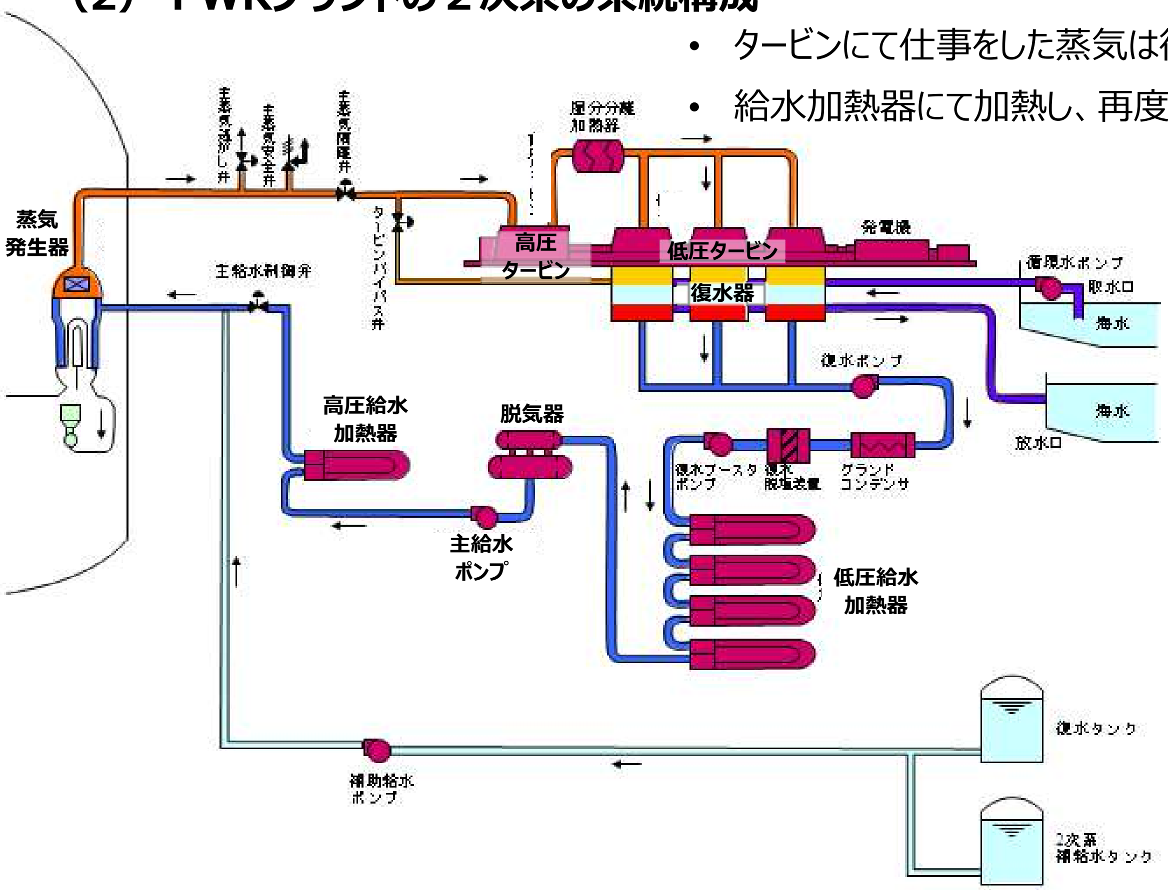
- 原子炉内の燃料核分裂で発生した熱は、1次冷却材を介して蒸気発生器に運ばれる
- 蒸気発生器で発生した蒸気によりタービンを回転させ、発電する
- １次冷却材と２次系冷却材は蒸気発生器（SG）伝熱管により隔離されている

1. PWRプラントの系統構成

三菱重工

（2） PWRプラントの２次系の系統構成

- タービンにて仕事をした蒸気は復水器で凝集
- 給水加熱器にて加熱し、再度、SGに給水



MOVE THE WORLD FORWARD MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES GROUP

2. PWR２次系における PLMとスケール付着懸念事項

2. PWR２次系におけるPLMとスケール付着懸念事項

三菱重工

（1） PLMにおいて考慮すべき劣化モード

- 腐食
  - 全面腐食
  - 応力腐食割れ（SCC）
  - 粒界腐食割れ（IGA）
  - FAC
  - ピッティング
  - ･･･
- 中性子照射脆化
- 摩耗
- 疲労
- スケール付着（伝熱性能の低下、SG２次側水位振動･･･）

最近、注目される機会も多い
「スケール付着」を中心に紹介する

※ 日本原子力学会標準「原子力発電所の高経年化対策実施基準(AESJ-SC-P005)」のうち、
経年劣化メカニズムまとめ表に基づき整理

2. PWR２次系におけるPLMとスケール付着懸念事項

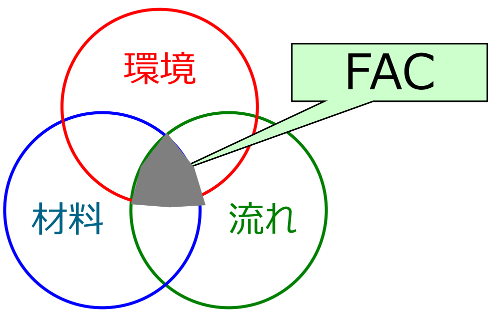
三菱重工

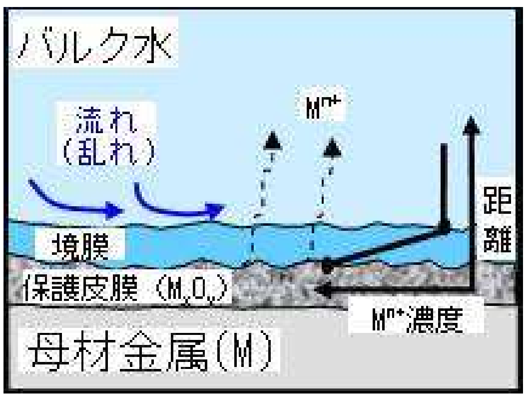
（1）２次系内におけるスケール生成

- ２次系を構成する配管･機器からの腐食（FAC、全面腐食）が要因であり、スケール生成に寄与している。
- 腐食により溶出した金属イオン（主にFe）が、配管･機器表面やSG器内で、鉄酸化物（スケール）として析出/付着する。

<FAC, Flow Accelerated Corrosion / Flow Assisted Corrosion>

- 金属材料表面の保護性酸化皮膜（マグネタイト）が、流れの乱れにより、溶解反応が加速され減肉する事象。
- 環境（温度、ｐH、酸素）、材料（Cr含有率）、流れ（流速、形状）などの影響を受ける。

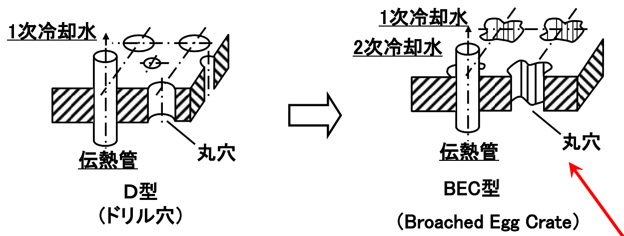




2. PWR２次系におけるPLMとスケール付着懸念事項

三菱重工

（2）SGの構造とスケール付着に関する懸念事項（1/3）



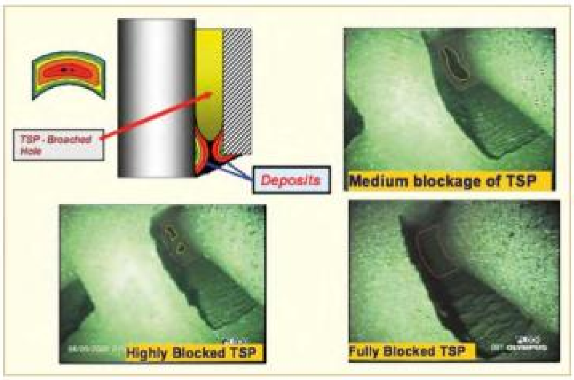
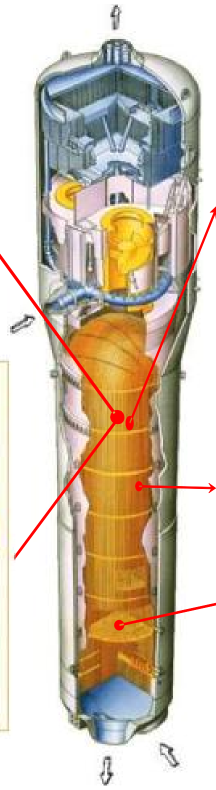
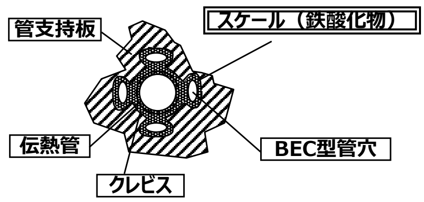


Figure 1-13: Visual inspections: Blockage of broached hole TSPs by corrosion products [Nordmann & Pitner, 2006b].

BEC閉塞状況観察写真

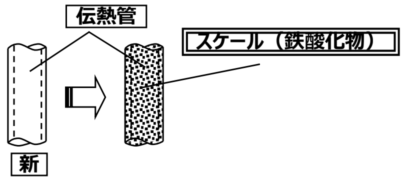


BEC閉塞



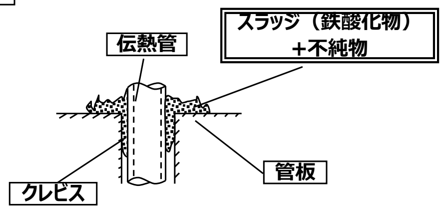
器内水の流動に影響し、閉塞が進むと運転の安定性に影響

直管部付着



伝熱性能を悪化させ、プラントの出力に影響

濃縮

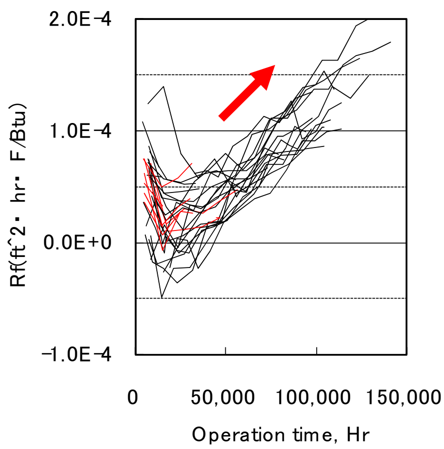


不純物の濃縮箇所となり、腐食（機器健全性悪化）要因

2. PWR２次系におけるPLMとスケール付着懸念事項

三菱重工

（2）SGの構造とスケール付着に関する懸念事項（2/3）



国内プラントのSG汚れ係数推移[1]
（黒：TT690、赤：TT600）

	1	2	3	4	5
Adhesion behavior of scales					
Structure of scales	-	coarse layer	coarse layer and dense layer (growing dense layer)		
Heat-transfer performance	-	↗	Max.	↘	
SG tube fouling factor	-	↘	Min.	↗	
	Larger surface area with scale adhesion to the SG tubes makes heat transfer performance higher.			Heat transfer resistance with dense layer growth makes heat transfer performance impaired. (Rf growth)	

スケール性状の変化とSG汚れ係数の関係のイメージ[2]

経時的なスケール付着に伴いSG汚れ係数は増加傾向
（プラント性能は低下）

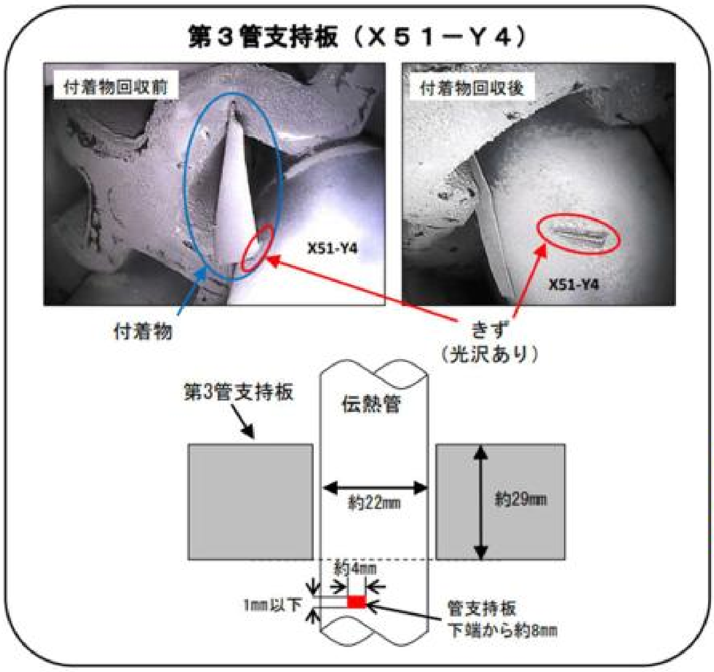
出典1) Y. Shoda, et. al., “Attachment of Iron Corrosion Products on Steam Generator Tube and Feed-Water Pump in PWR Secondary Systems”, 6.14P, NPC 2010 (2010)
出典2) A. Maeda, et. al., “Secondary Water Chemistry Control Practices and Results at the Japanese PWR Plants”, O09-12, NPC 2012 (2012)

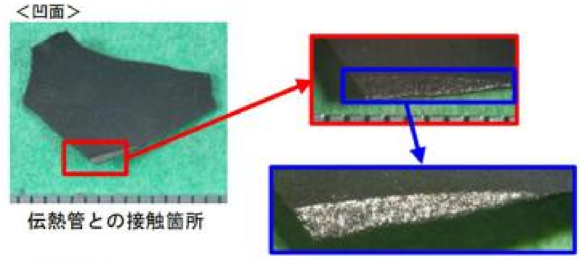
2. PWR２次系におけるPLMとスケール付着懸念事項

三菱重工

（2）SGの構造とスケール付着に関する懸念事項（3/3）

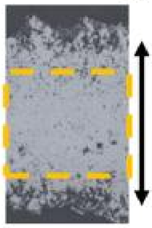
小型カメラで確認したきずの状況





幅　：約15mm
長さ：約9mm
厚さ：約0.2mm～0.3mm
重さ：約0.1g
材質：マグネタイト
（鉄酸化物）

・伝熱管との接触箇所に光沢を確認。
（電子顕微鏡による観察の結果、
筋状の擦れ痕を確認。）
・伝熱管の主成分であるニッケルや
クロムを検出。



約0.2～
0.3mm

稠密層が主体なスケールによって、SG伝熱管を損傷（減肉）されるケースもある

出典：関西電力（株）HP　2021年1月25日プレスリリース
高浜発電所４号機の定期検査状況について（蒸気発生器伝熱管損傷に関する原子炉施設故障等報告書の提出について）
https://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2021/0125_1j.html

MOVE THE WORLD FORWARD　MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES GROUP

3. 対策と管理

- スケールマネージジメントの考え方
- 水処理と材料の改善
- 高pH処理による給水鉄濃度低減
- 化学洗浄

3. 対策と管理

（1）国内PWRプラントのスケールマネージメントの考え方

1. SG器内へのスケール持込み量を減らす

高pH処理により給水鉄濃度を低減し、SG器内への鉄持込み量を削減。

2. SG伝熱管に付着したスケールを改質・除去する

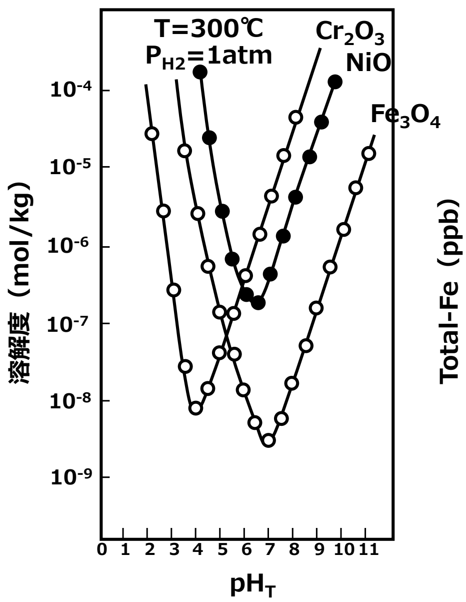
化学洗浄（ASCA）適用より、スケールを改質・除去（空隙の増加）

高pH処理の適用と定期的なASCA洗浄の組み合わせにより、長期的なプラント性能および材料健全性の維持を目指す

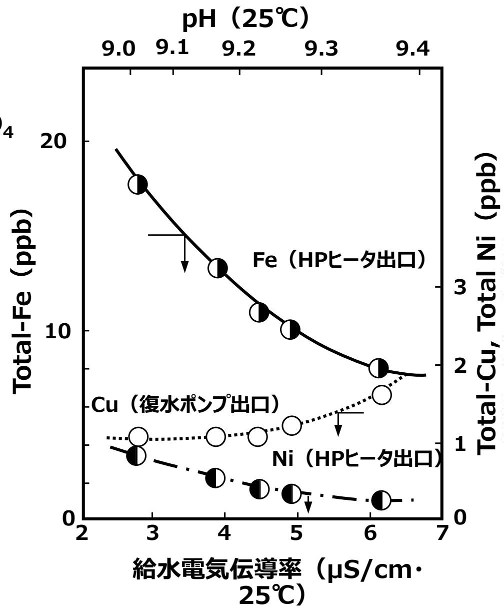
※ 海外では、持込み量低減、付着スケールの除去・改質付着の他、付着抑制（分散剤）もスケールマネージメント手法として実施されている。

3. 対策と管理

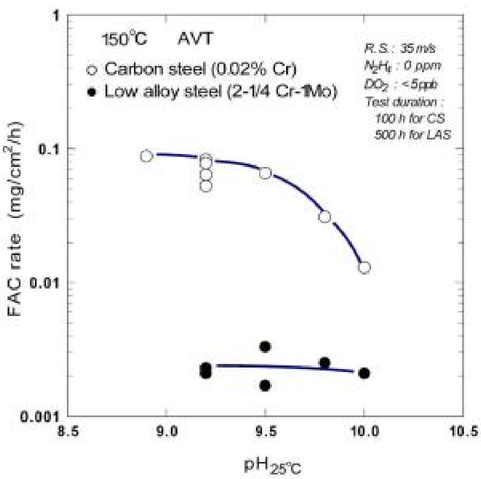
（2）スケールの生成源を減らす　～ 高pH処理 ～



300℃高温水中での酸化物の溶解度[1]



SG給水pHと系統水中Fe,Cu濃度の関係[1]



FAC減肉速度とpHの関係[2]

高pH処理により鉄溶解度を低下させ、スケール量を低減

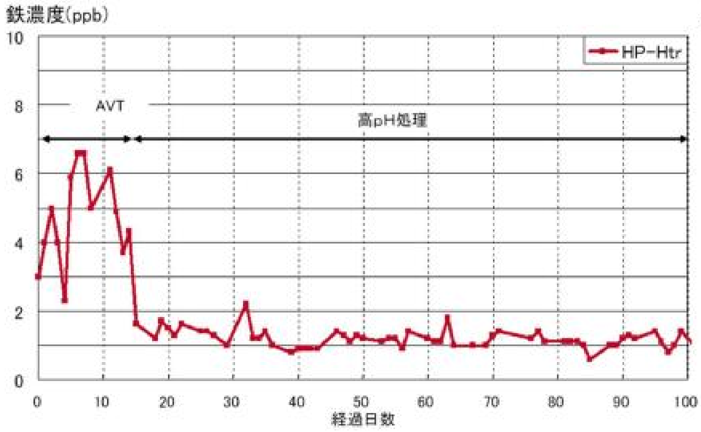
材料を炭素鋼から低合金鋼・SUSにすることでFACは大幅抑制

出典1)：原子炉水化学ハンドブック（ 日本原子力学会編、コロナ社）

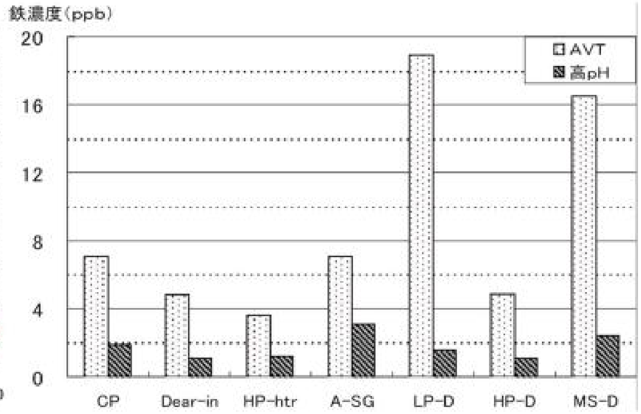
出典2)：T. Tsuruta, et. al.,"Flow Accelerated Corrosion Study Using Rotating Disc Specimen", Fontevraud 6, Volume 1, Session A, p.181-190, SFEN, 2006

3. 対策と管理

（2）スケールの生成源を減らす　～ 高pH処理 ～



高pH化後の給水鉄濃度



高pH化前後の各系統鉄濃度

高pH処理により、以下の効果を確認

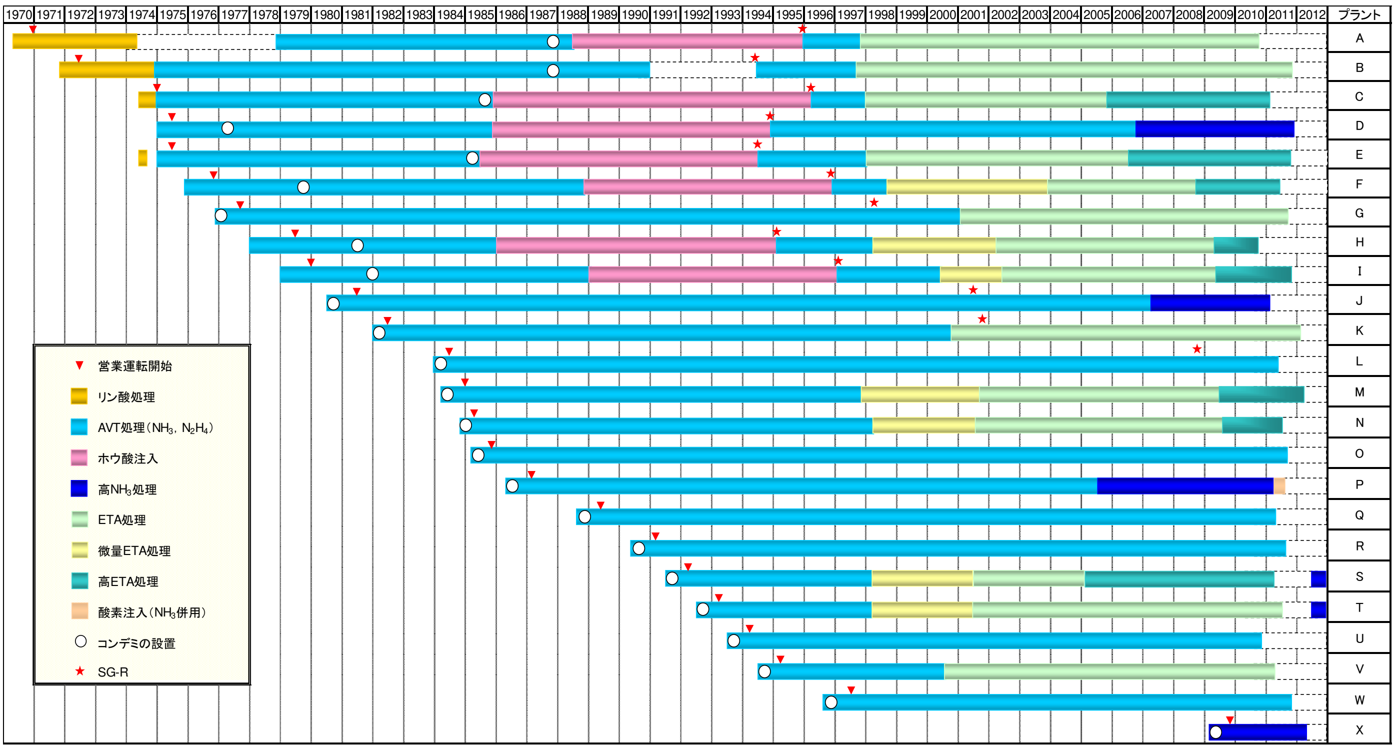
- **給水鉄濃度の低減（高pH時< 1 ppb）**
- **主給水ポンプ電流値の増加なし**
- **高圧ヒータ差圧の増加なし**

出典：松田ら, "玄海原子力発電所２次系統における高pH運転導入について", 平成20年度火力原子力発電大会研究発表要旨集, p66-67,（2008）

3. 対策と管理

（2）スケールの生成源を減らす　～ 高pH処理 ～

国内では銅系材料を排除のうえ、高pH処理への転換が進められている



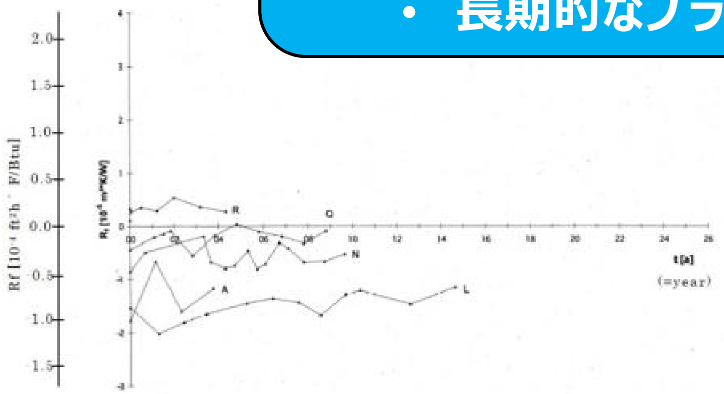
出典：A. Maeda, et. al., "Secondary Water Chemistry Control Practices and Results at the Japanese PWR Plants", O09-12, Proceeding of NPC 2012 (2012)

3. 対策と管理

（2）スケールの生成源を減らす　～ 高pH処理 ～

高pH処理適用によるSG器内持込み鉄量の低減効果を継続確認・評価中

- **伝熱抵抗となるスケール成長速度**
- **長期的なプラント性能傾向の評価**



高pH化後のSG汚れ係数の推移
（海外プラント）

出典：T. Schwarz, “Heat Transfer and Fouling Behavior of Siemens PWR SGs Long Operating Experience”
Proc. of the International Thermal Science Seminar, Bled, Slovenia, June 11-14, 2000

3. 対策と管理

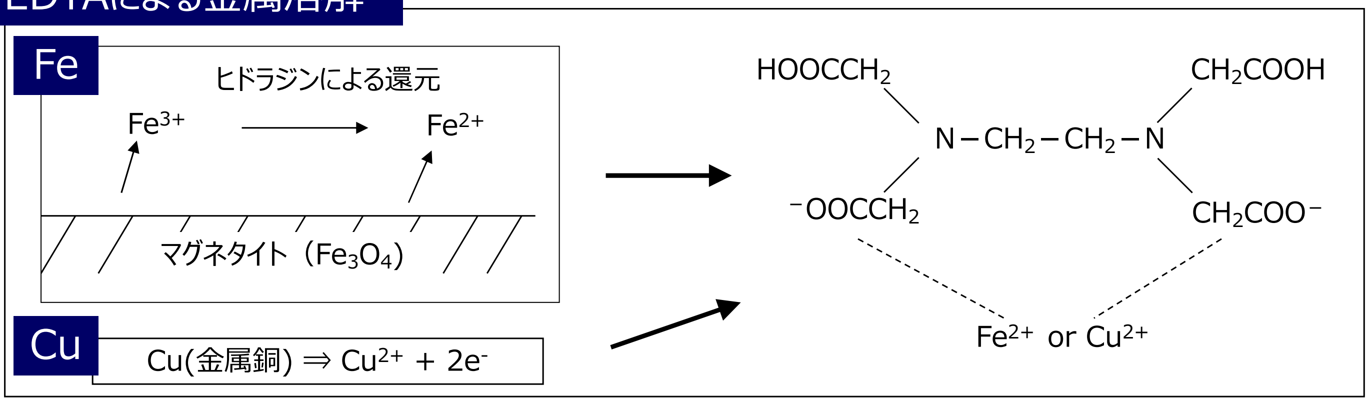
（3）持ち込まれた付着スケールを改質・除去する　～ 化学洗浄 ～

ASCA（Advanced Scale Conditioning Agent）

- 希薄EDTAによるスケールを改質（全量除去ではない）
- 「表層部の空隙化」「スケール脆弱化」「銅除去」を狙う
- 「伝熱向上」「閉塞改善」「腐食リスク低減」が目的
- 薬品によるSG構成母材腐食は小さい
- 国内外で広く「スケール除去対策」として実績あり

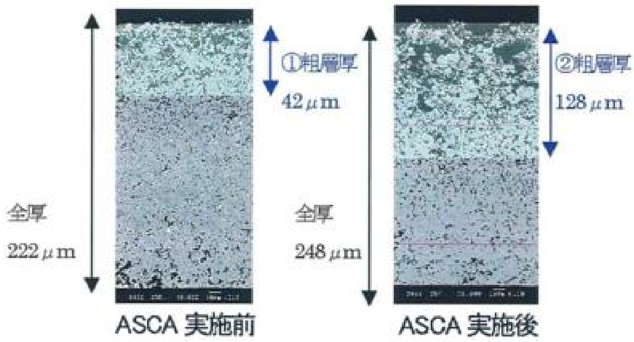
定期的な適用によりプラント性能を回復

EDTAによる金属溶解

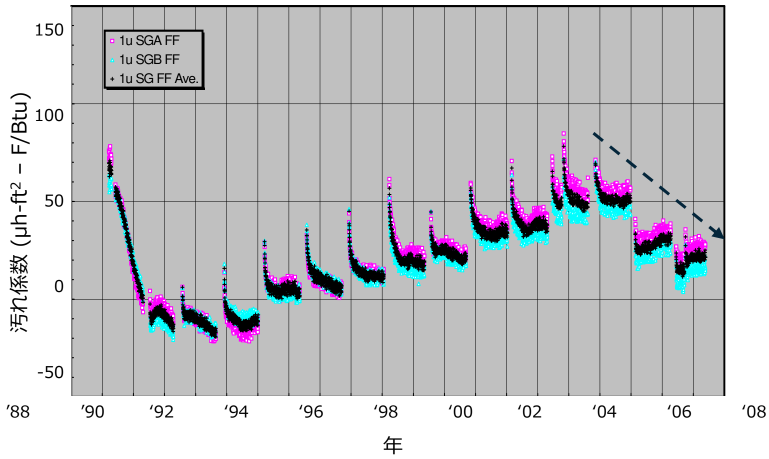


三菱重工

（3）持ち込まれた付着スケールを改質・除去する　～ 化学洗浄 ～



ASCA洗浄適用前後のスケール断面[1)]



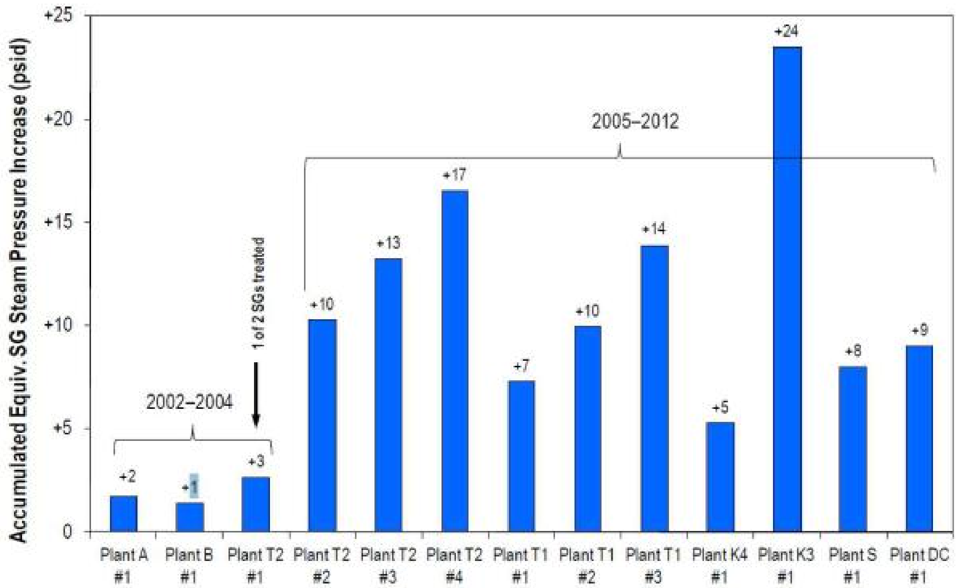
SG汚れ係数(プラント性能)の推移[2)]

- 洗浄によってSG伝熱管スケール外表面の空隙率が増加
- 空隙率増加により、沸騰が促進されるため、伝熱性能は回復（1 ～ 2サイクル相当）
- 薬液濃度・温度を調整し、稠密スケール対策としても有効[3)]

出典1：九州電力（株），"川内原子力発電所におけるSG２次側洗浄（ASCA）について", 日本原子力学会水化学部会第８回定例研究会,（2009）
出典2：笹田　直伸, "泊発電所における蒸気発生器２次側洗浄の実績と効果", 日本原子力学会水化学部会2008年度サマーセミナー,（2008）
出典3：関西電力（株）HP　2021年1月25日プレスリリース
高浜発電所４号機の定期検査状況について（蒸気発生器伝熱管損傷に関する原子炉施設故障等報告書の提出について）
https://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2021/0125_1j.html

三菱重工

（3）持ち込まれた付着スケールを改質・除去する　～ 化学洗浄 ～



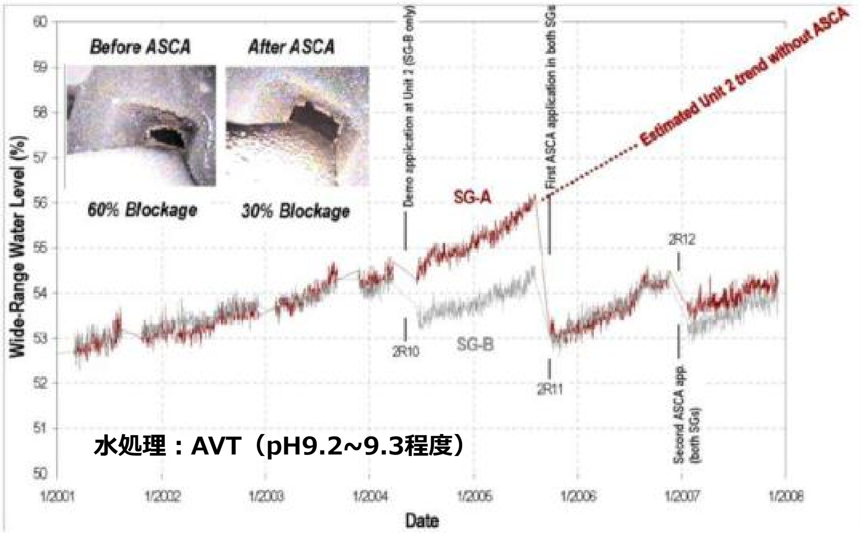
ASCA洗浄適用による主蒸気圧力の回復効果

- 回復効果は確認されているが、プラントによりバラツキが見られる

出典：C. N. Gof, et. Al., "Advanced Scale Conditional Agent (ASCA) and inhibited Advanced Scaled Conditioning Agent (iASCA) Applications: 2025 Experience Update", Paper No. 1129, Proceedings of NPC2025, (2025)

3. 対策と管理

（3）持ち込まれた付着スケールを改質・除去する　～ 化学洗浄 ～



*1)SG広域水位はBEC閉塞指標。一定以
の閉塞率でSG広域水位はサイクル中増加
向が確認されるようになる。

SG広域水位の推移

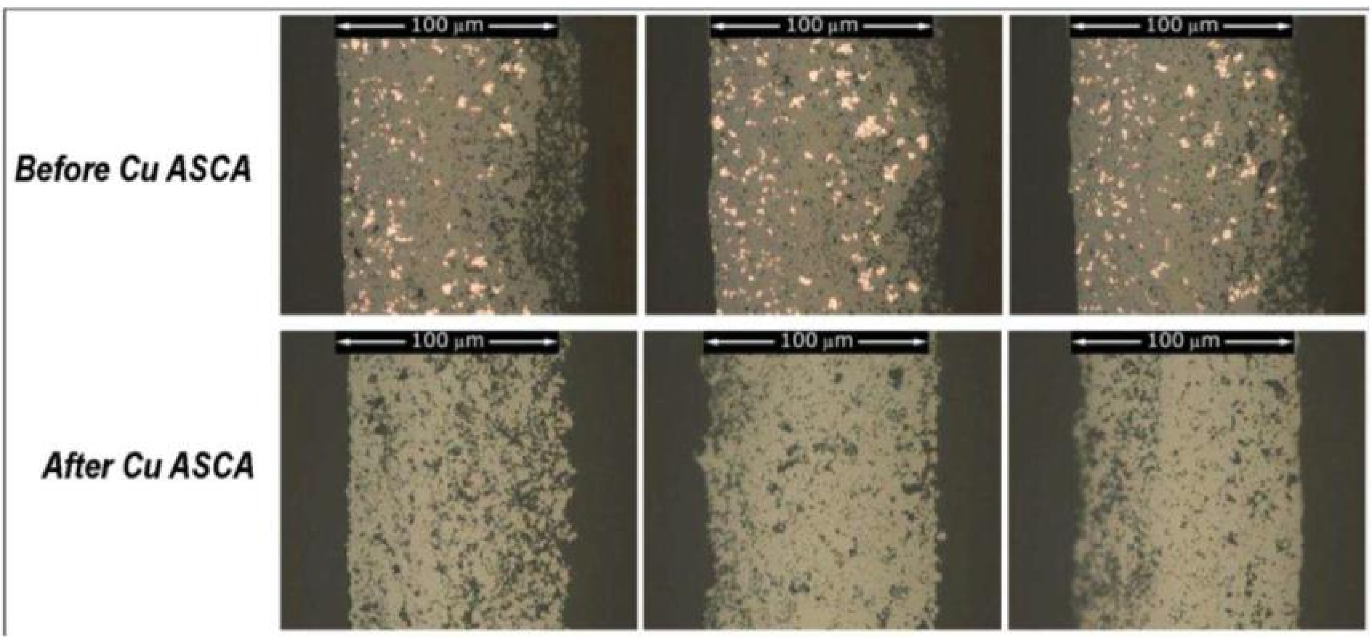
- 洗浄によってBEC管穴付着スケールが脆弱性が増加
- 脆弱性増加により、SG器内の水の流動によりスケールが脱落・除去されBEC管穴閉塞が回復（SG広域水位で監視）
- 回復効果はAVT運用条件下の1～1.5サイクルに相当

出典：Michael J. Little (Dominion Engineering, Inc.) “Advanceed Scale Conditioning Agent(ASCA)　Applications:2012 Experience Update, proceedings of NPC2012 (2012)

3. 対策と管理

（3）持ち込まれた付着スケールを改質・除去する　～ 化学洗浄 ～

- ASCA Cu洗浄によるSG付着スケール中のCu排出実績（下図の金色部がCu）
- 海外プラントにて100kg (as Cu)排出、Cuインベントリーの95%以上排出

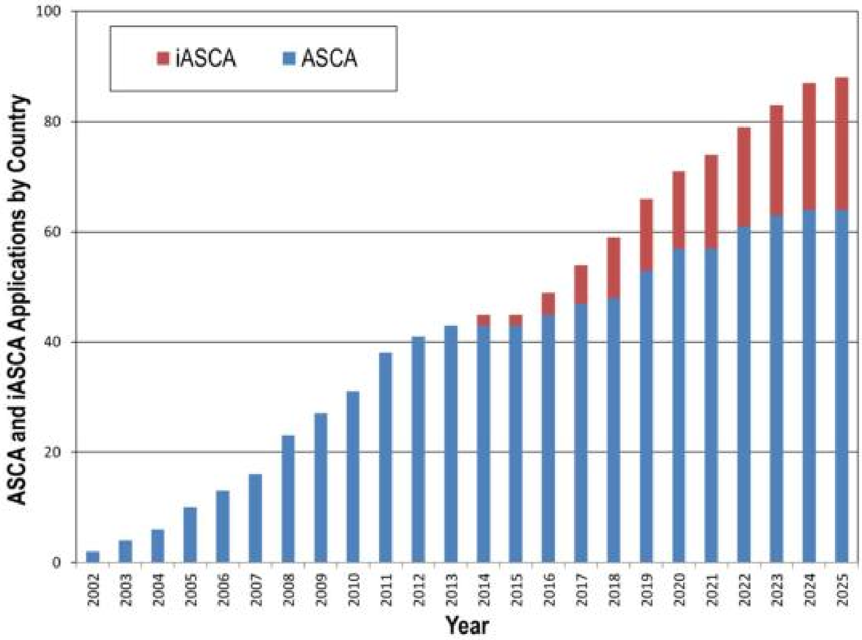


出典：Michael J. Little (Dominion Engineering, Inc.) “Advanceed Scale Conditioning Agent(ASCA)　Applications:2012 Experience Update, proceedings of NPC2012 (2012)

（3）持ち込まれた付着スケールを改質・除去する　～ 化学洗浄 ～

国内＆海外（米国、フランス、韓国、カナダ）にて適用済

- ASCA洗浄の適用は延べ60回以上（うち、日本国内では30回（繰り返し含む））
- iASCAは延べ20回以上



国内外におけるASCA/iASCA洗浄適用プラント数の推移

出典： C. N. Gof, et. Al., “Advanced Scale Conditional Agent (ASCA) and inhibited Advanced Scaled Conditioning Agent (iASCA) Applications: 2025 Experience Update”, Paper No. 1129, Proceedings of NPC2025, (2025)

4. 海外におけるスケールマネージメント技術

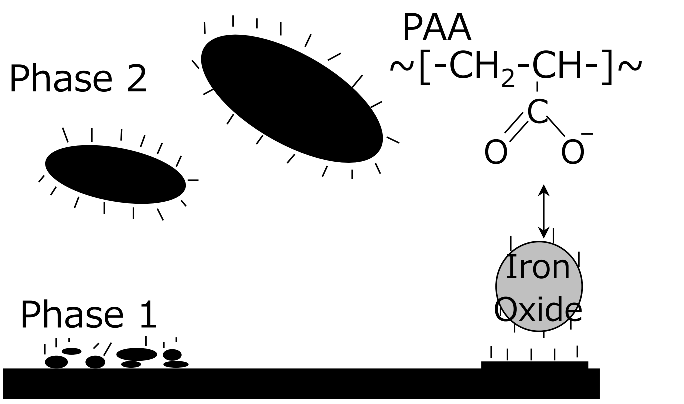
- 分散剤
- DMT洗浄
- フィルムフォーミング剤（FFS）

三菱重工

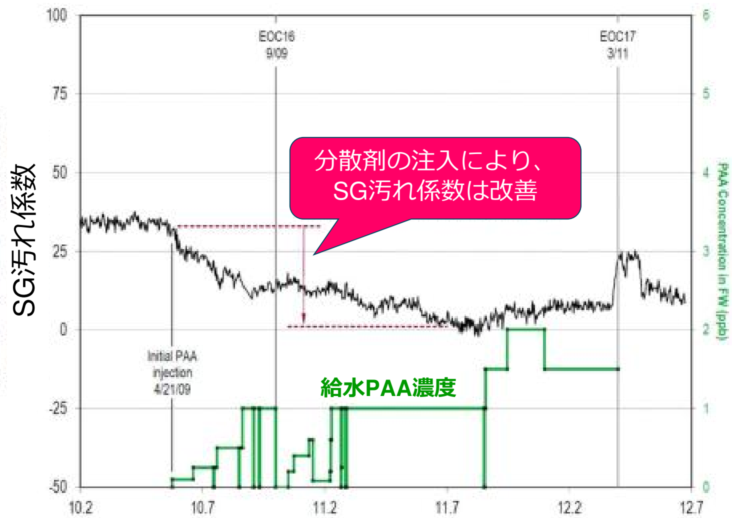
（1）分散剤（1/4）

– Poly Acrylic Acid (PAA)が粒子に付着し、負電荷の反発作用でSG伝熱管への付着防止

✓ 汚れ係数回復効果は～30μh-ft²-°F/Btu
✓ 主蒸気回復効果は約8～9psi



分散剤ポリアクリル酸による付着防止の原理



出典：K. Fruzzetti, “Experience with Dispersant Application” proceedings of NPC2012, (2012)

4. 海外におけるスケールマネージメント技術

三菱重工

（1）分散剤（2/4）

分散剤の注入により、主蒸気圧力の回復効果が確認されている。

出典：I. Duncanson, et. al., “Dispersant Injection Strategy Optimisation at South Texas Project” proceedings of NPC2018, (2018)

（1）分散剤（3/4）

プラント停止前の分散剤注入により、大量のスケール除去が確認された事例もある。

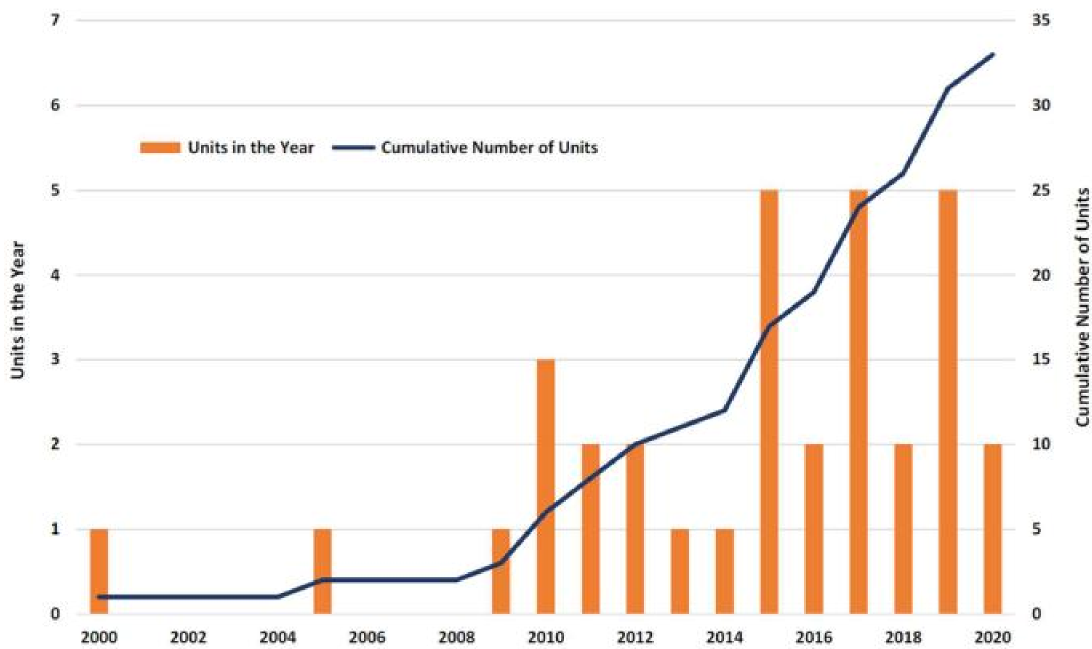
出典：L. Verelst, et. al., “Dispersant Applications in ENGIE Electrabel Belgium” proceedings of NPC2018, (2018)

4. 海外におけるスケールマネージメント技術

三菱重工

（1）分散剤（4/4）

適用プラント数は数プラント/年程度で増加。



出典：K. Fruzzetti and I. Duncanson., “PWR Secondary Chemistry: A View of Operating Experience and Current/Future Trends”, Paper No. 1168, proceedings of NPC2025, (2025)

4. 海外におけるスケールマネージメント技術

三菱重工

（2）DMT洗浄（Deposit Minimization Treatment）（1/3）

ASCA洗浄と同様に化学薬品でSG器内スケールを改質させる方法。

- 希薄薬品でスケールを改質（全量除去ではない）
- 「空隙化」「脆弱化」を狙う
- 「伝熱向上」「閉塞改善」が目的
- BEC穴閉塞対策を主目的とした改良版（mDMT）の開発も進められている

DMT洗浄の主な特徴

- 鉄の溶解能力が高い
- 炭素鋼腐食が極小
- ヒドラジンなどの有害薬品を未使用

＜Fe溶解反応＞

$$Fe_3O_4 + 4H_2C_2O_4 \Rightarrow Fe[Fe(C_2O_4)_3] + \underline{\underline{FeC_2O_4(\downarrow)}} + 4H_2O$$

シュウ酸鉄：母材を覆う皮膜として作用（= セルフインヒビタ）

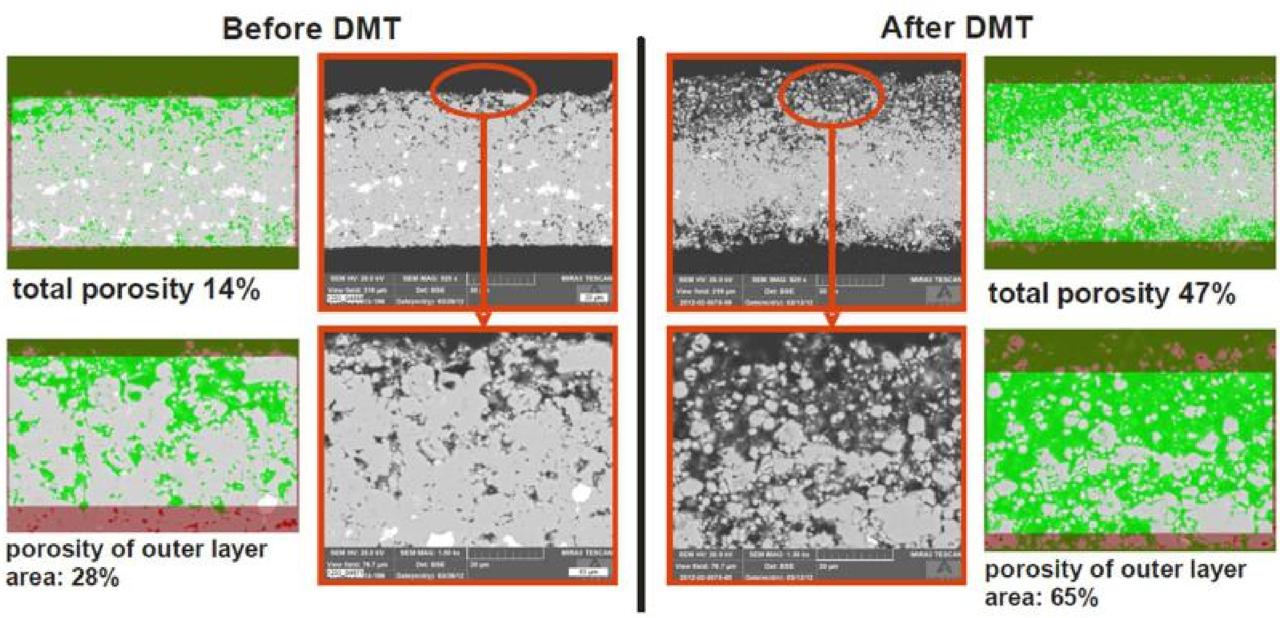
出典： S. Weiss, et. al., ”DMT – AREVA’s Steam Generator Maintenance Cleaning Process Concept and Experiences”, O61-175, Proceedings of NPC2012, (2012)
G. RIOT, et. Al., “Steam Generator Chemical Cleaning: Framatome operating experience on EDF PWR with mDMT Process”, Paper No. 1188, Proceedings of NPC2025, (2025)

4. 海外におけるスケールマネージメント技術

三菱重工

（2）DMT洗浄（Deposit Minimization Treatment）（2/3）

スケール表層部の空隙層の増加



洗浄前後のスケール断面写真

出典：S. Weiss, et. al., “Steam Generator Maintenance Measures as Part of an Integrated Management in PWRs”, 3rd Int. Conference on Nuclear Power Plant Life Management Salt Lake City, (2012)

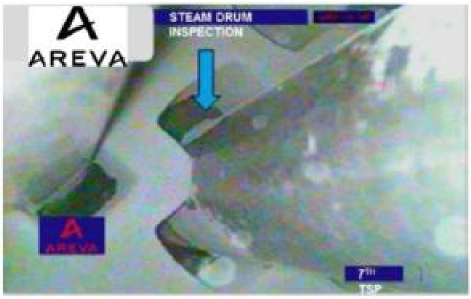
4. 海外におけるスケールマネージメント技術

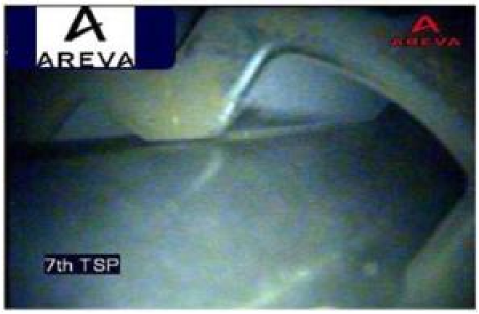
三菱重工

（2）DMT洗浄（Deposit Minimization Treatment）（3/3）

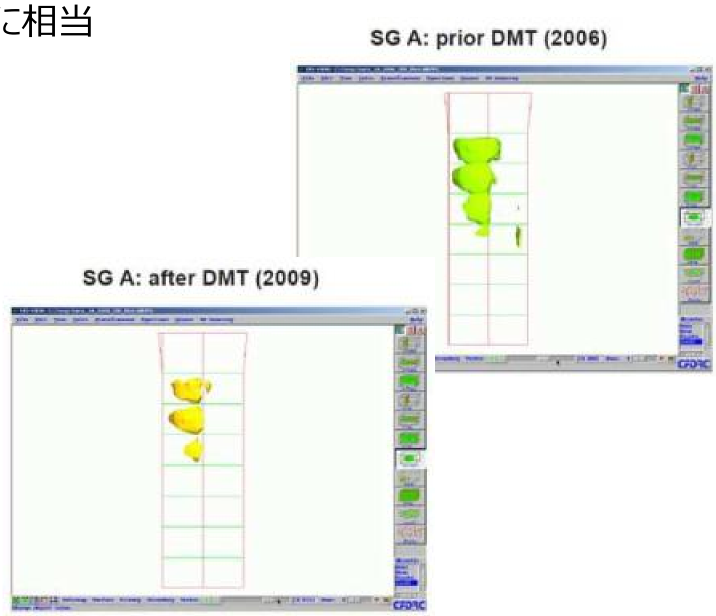
米国プラント実績評価

- 洗浄前後でSG2次側酸化物マッピングに改善を確認
- 閉塞改善効果はプラント運転3年分に相当





洗浄前後でのBEC部写真



洗浄前後でのＳＧ２次側の酸化物マッピング変化

出典：S. Weiss, et. al., ”DMT – AREVA’s Steam Generator Maintenance Cleaning Process Concept and Experiences”, O61-175, Proceedings of NPC 2012, (2012)

4. 海外におけるスケールマネージメント技術

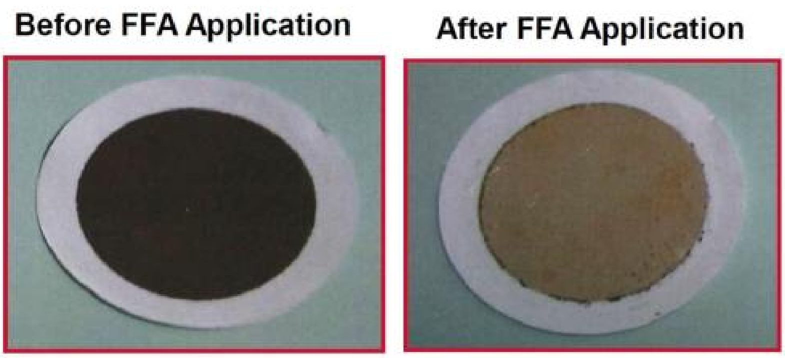
三菱重工

（3）FFS（Film Forming Substance）

- 機器表面や配管表面に疎水性皮膜を形成
- 「機器腐食低減」と「スケール内部取込み不純物の低減」を狙う
- 適用により給水鉄濃度を低減（< 1 ppb）
- SG器内における不純物取込み抑制効果

（運転中にSG伝熱管スケールに取込まれた不純物の停止時排出量（HOR）が低減）

FFA後復水器表面の撥水



FFA適用前後での給水鉄のフィルタ捕集外観

出典：U.Ramminger, et. al., “The application of film-foming amines in secondary side chemistry treatment of NPPs”, proceedings of NPC2012, (2012)

5. まとめ

5. まとめ

- 水処理の改善（水処理薬品の変更や高pH処理の適用）や構成材料の変更により、給水中の鉄濃度は低減されている。
- SG器内に持ち込まれ、蓄積したスケールに対し、定期的な化学洗浄（ASCA洗浄）を実施することで、プラント性能を維持している。
- 海外では、分散剤やDMT洗浄やFFSといった新しい技術が試行されており、今後の動向にも注目していく。

三菱重工

MOVE THE WORLD FORWARD

MITSUBISHI
HEAVY
INDUSTRIES
GROUP