



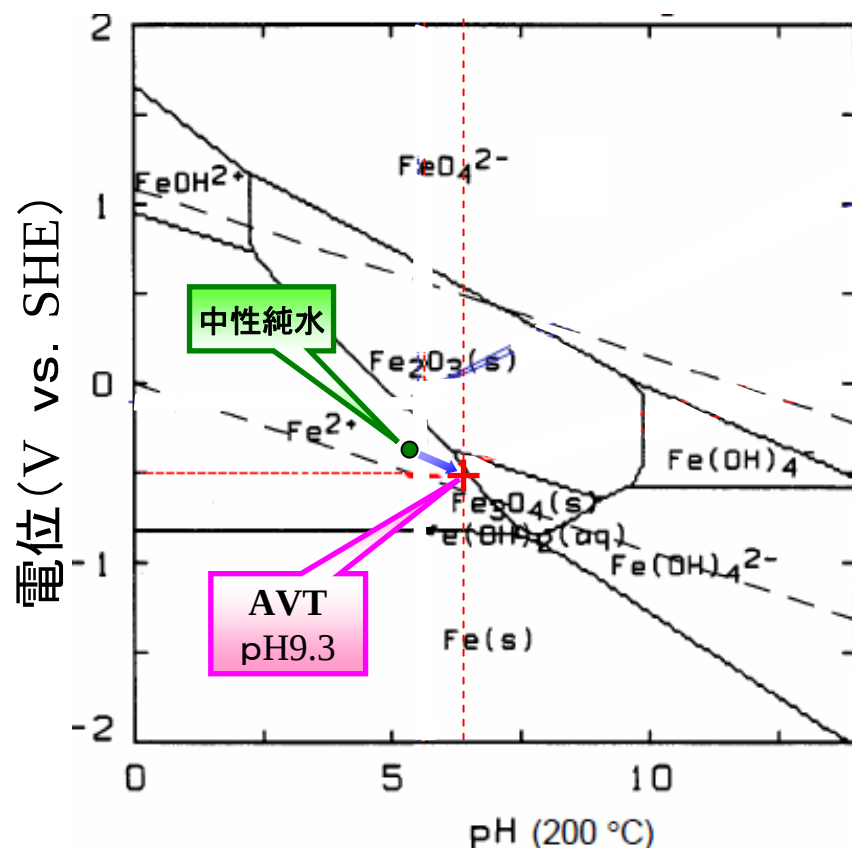
日本原子力学会「水化学部会」第5回定例研究会

水化学によるPWR二次系 炭素鋼配管の減肉抑制への取り組み

平成20年10月20日

日本原子力発電(株) 杉野 亘

PWR二次系における防食法(AVT)

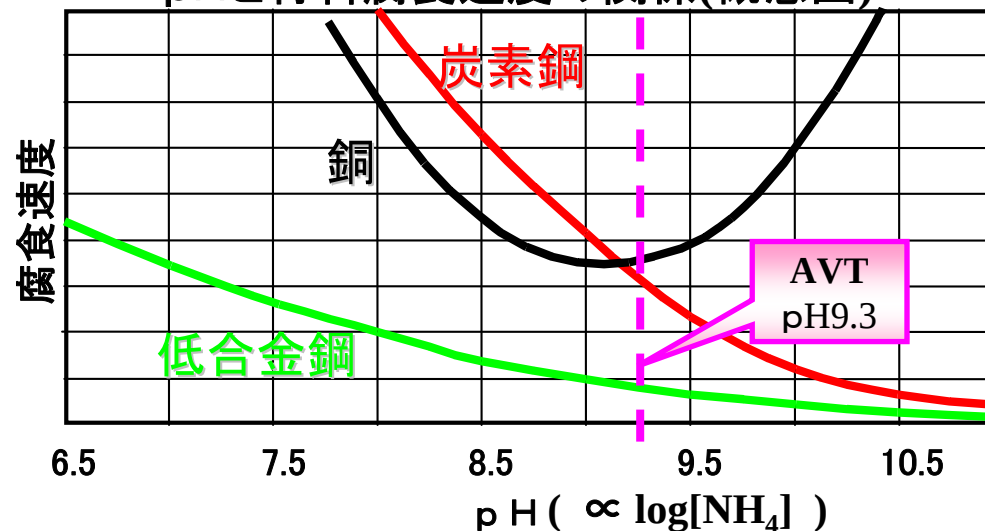


- ・脱酸素剤(N_2H_4)により脱気
 - ・アンモニアによりpH上昇(pH9.3@25°C)
- (AVT処理: All Volatile Treatment)

↓

マグネタイト(Fe_3O_4) 被膜を形成し防食

<pHと材料腐食速度の関係(概念図)>



- ・鉄系材料(炭素鋼, 低合金鋼)はpH上昇に伴い腐食量が低下
- ・銅系材料はpH上昇に伴い腐食量が上昇

両者のバランスを勘案しpH9.3を選定

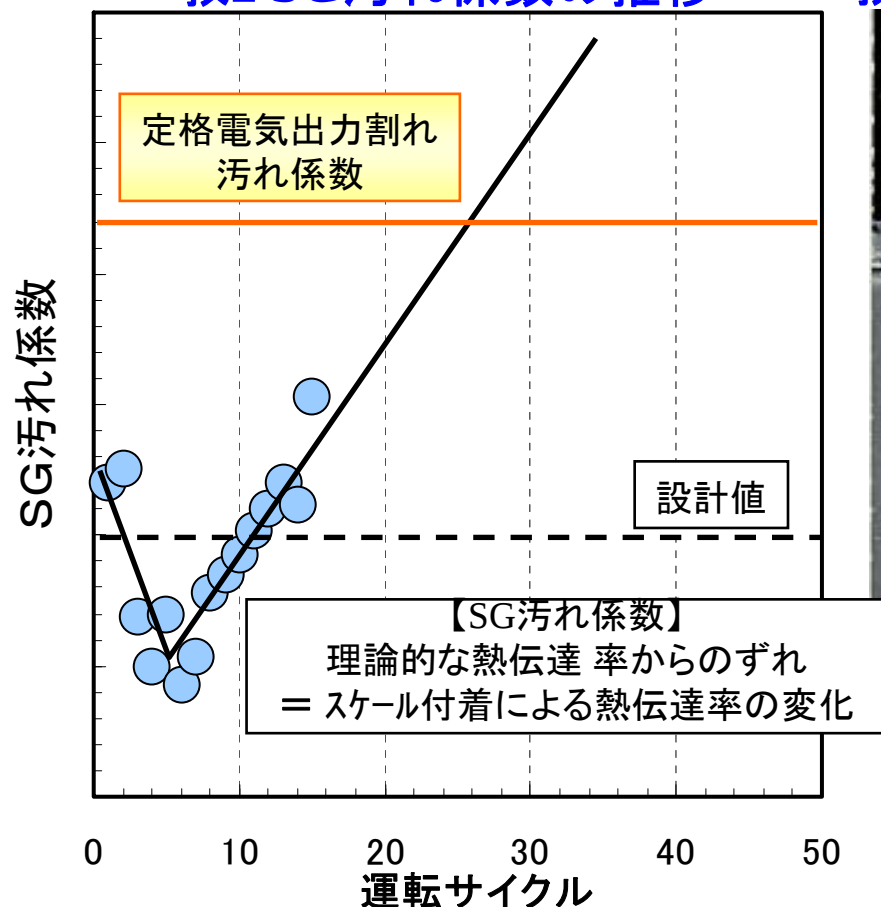
↓

敦賀発電所2号機(PWR)の給水鉄は
4~5ppb程度と高かった。

AVTによる二次系機器への影響(1/2)

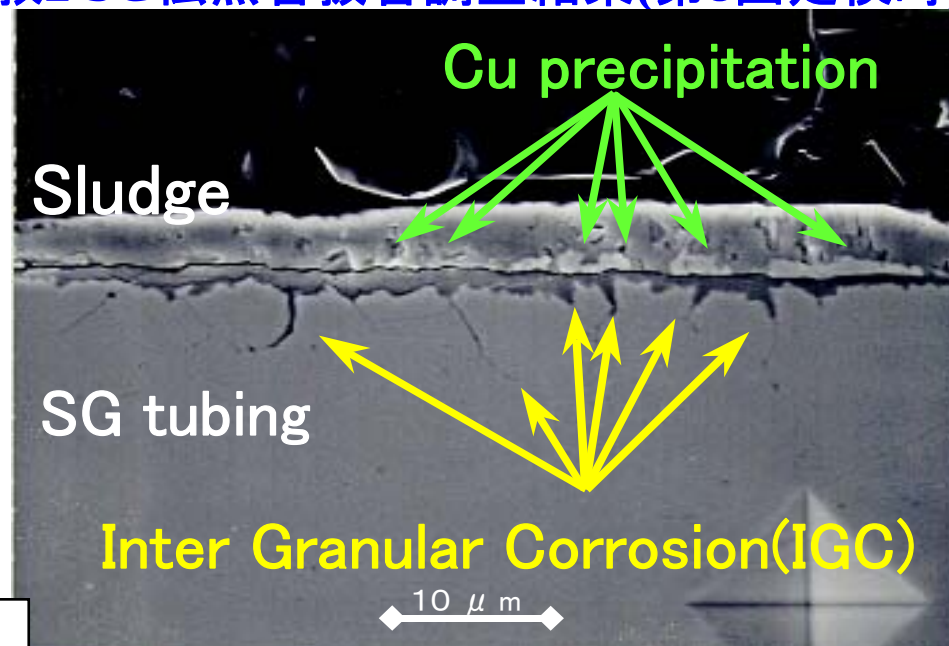
→①蒸気発生器(SG)の性能低下

敦2 SG汚れ係数の推移



SG伝熱管へのスケール付着により熱効率が低下し、近い将来には定格電気出力が出せなくなる可能性あり

敦2 SG伝熱管抜管調査結果(第8回定検時)



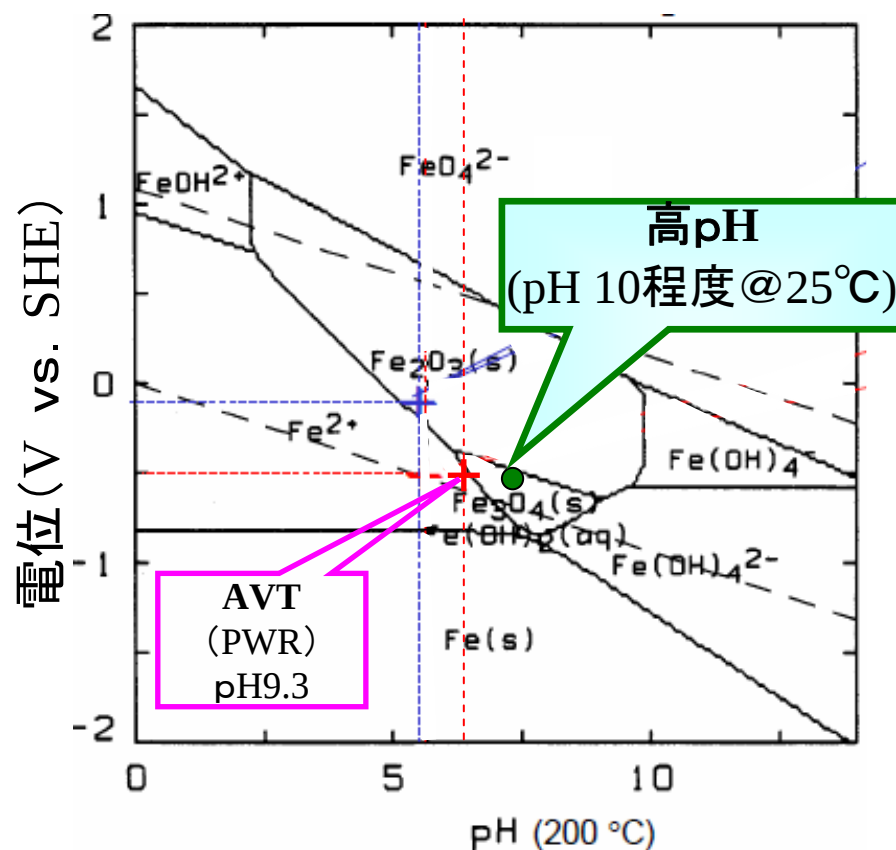
- ・スケール堆積部の銅が偏析した部位で微小な粒界腐食の兆候あり
→スケール堆積部でのイオン不純物濃縮によるpHの低下と銅による電位上昇によると推測
- ・今後、IGA/SCCに進展する可能性あり

敦賀発電所2号機 二次系配管の取替え実績



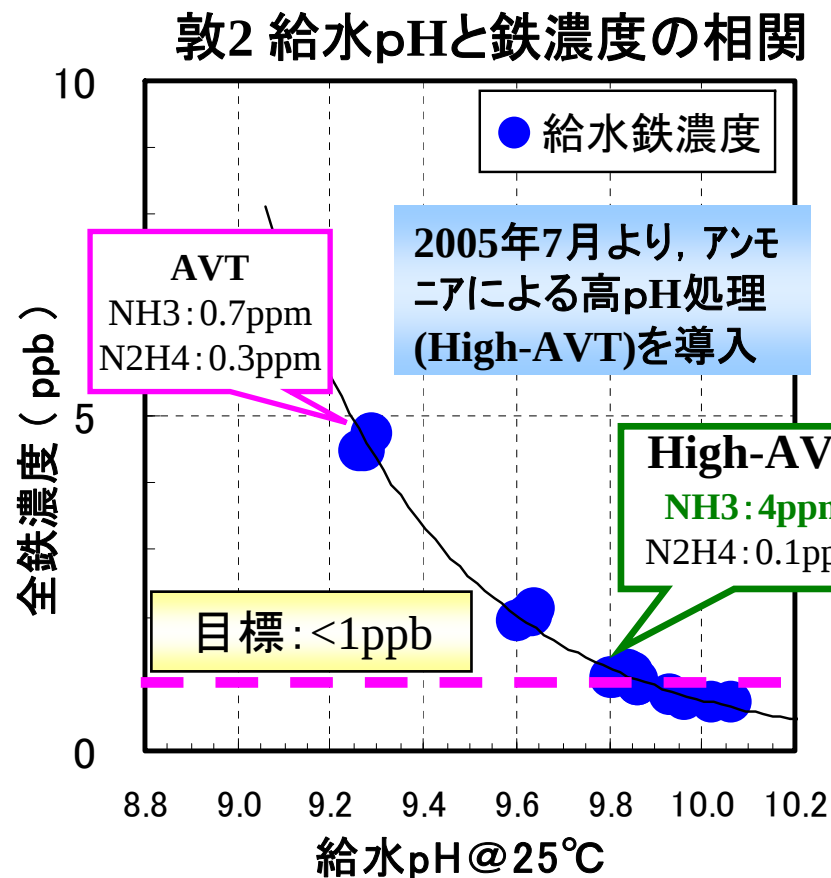
- 発電コスト削減，安全性確保のため
→減肉抑制が重要課題

PWR水化学の改善(高pH処理の効果1/2)



・pHを10程度まで高める高pH処理により防食効果を向上(マグネタイト溶解度低下)

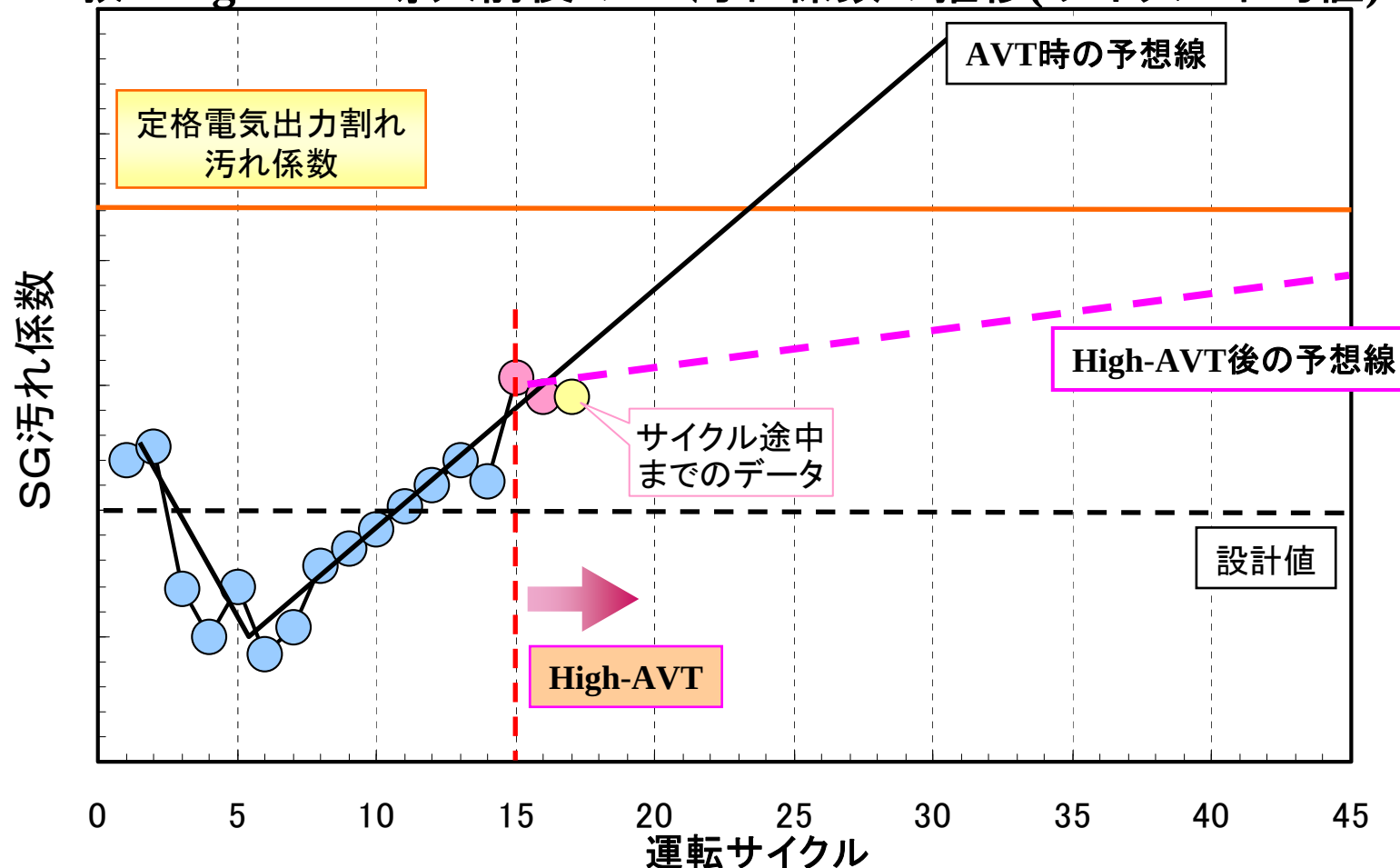
【目的】給水鉄濃度を1ppb以下まで低減し、蒸気発生器(SG)伝熱管へのスケール付着による性能低下を抑制



pH9.8のHigh-AVTにより, 目標としていた防食効果(鉄低減)が得られた
(炭素鋼の平均的な腐食率が従来の~1/5に低減)

PWR水化学の改善(高pH処理の効果2/2)

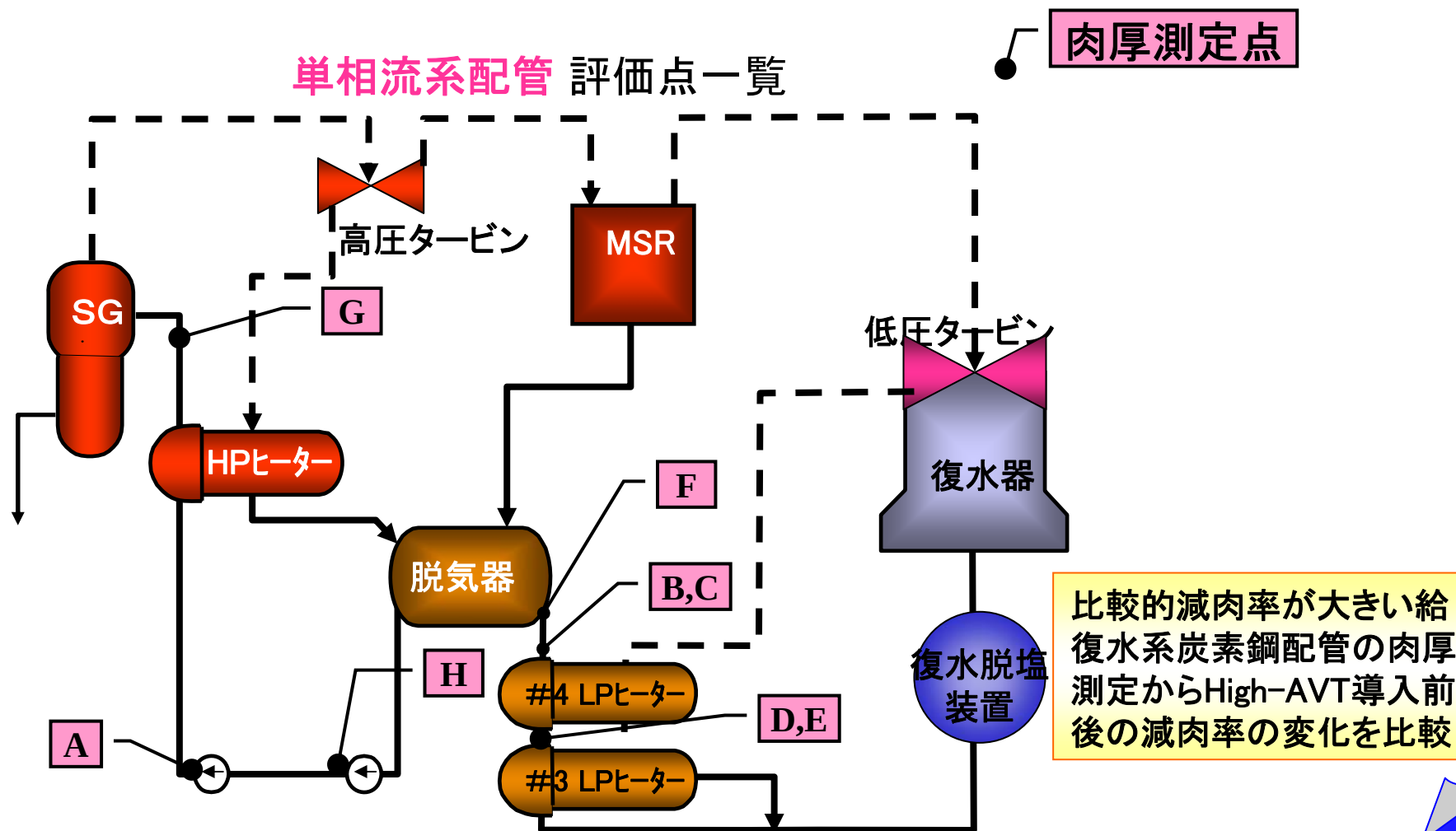
敦2 High-AVT導入前後のSG汚れ係数の推移(サイクル平均値)



SG性能の低下傾向が抑制され, 目的としたSGの長期的な健全性確保が達成できる見通しを得た。

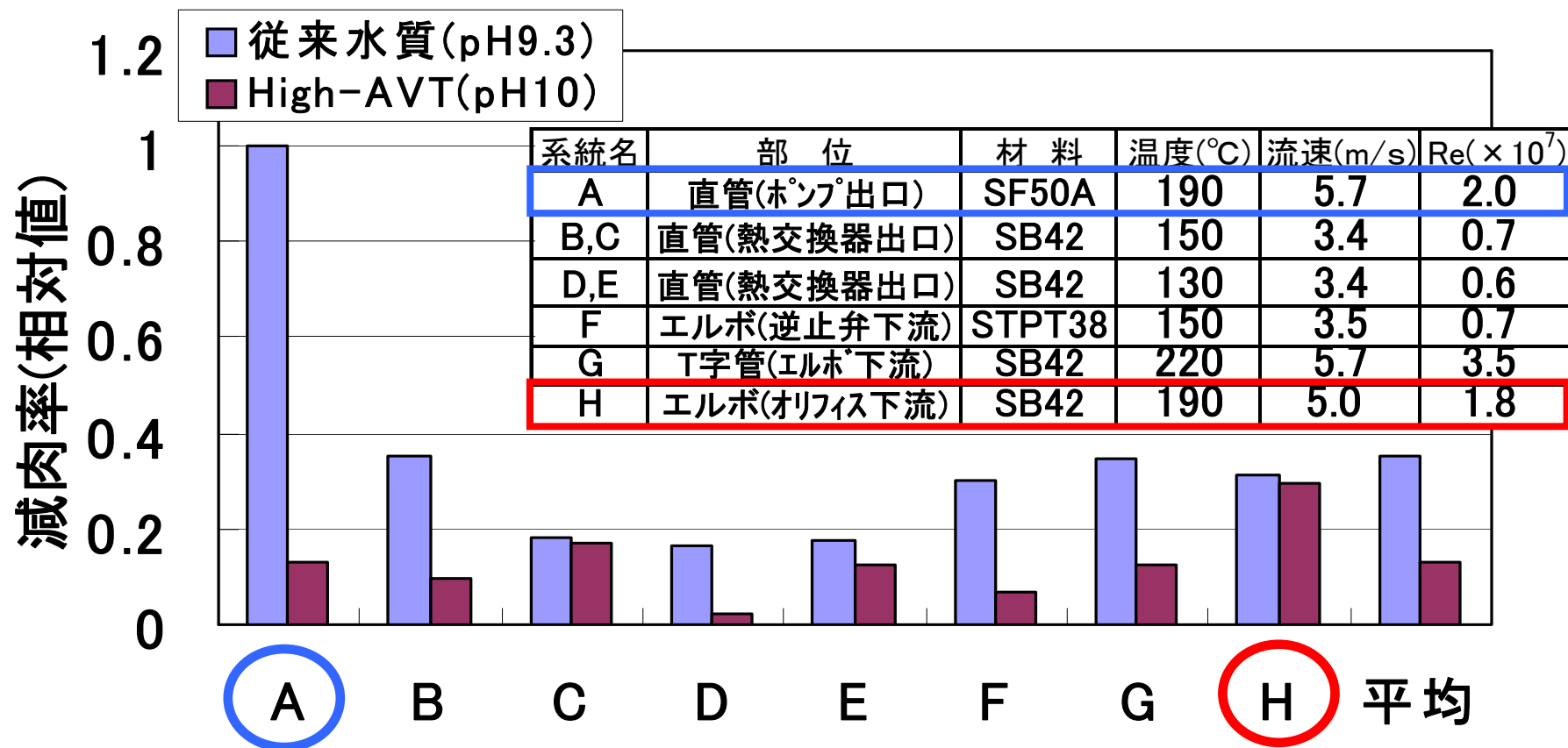
High-AVTによる減肉抑制効果(1/6)

- ・High-AVT導入の目的としていたSGの長期健全性の確保は達成
(これは二次系全体の炭素鋼の平均的な腐食率が従来の $\sim 1/5$ となったため)
- ・一方、厳密な配管の肉厚管理や頻繁な配管取替えの要因となっているFACによる炭素鋼配管の局所的な減肉についても同様な抑制効果が得られるかを評価した。



High-AVTによる減肉抑制効果(2/6)

単相流系 配管減肉率の比較(AVT/High-AVT)



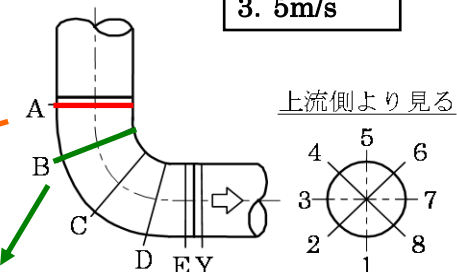
- ・減肉率が大きく抑制された系統がある一方、ほとんど抑制されない系統あり
(全系統平均で約1/2)
- ・効果の差は、材料、温度、レイノルズ数との相関なし
→局所的な偏流が影響している可能性あり

High-AVTによる減肉抑制効果(3/6)

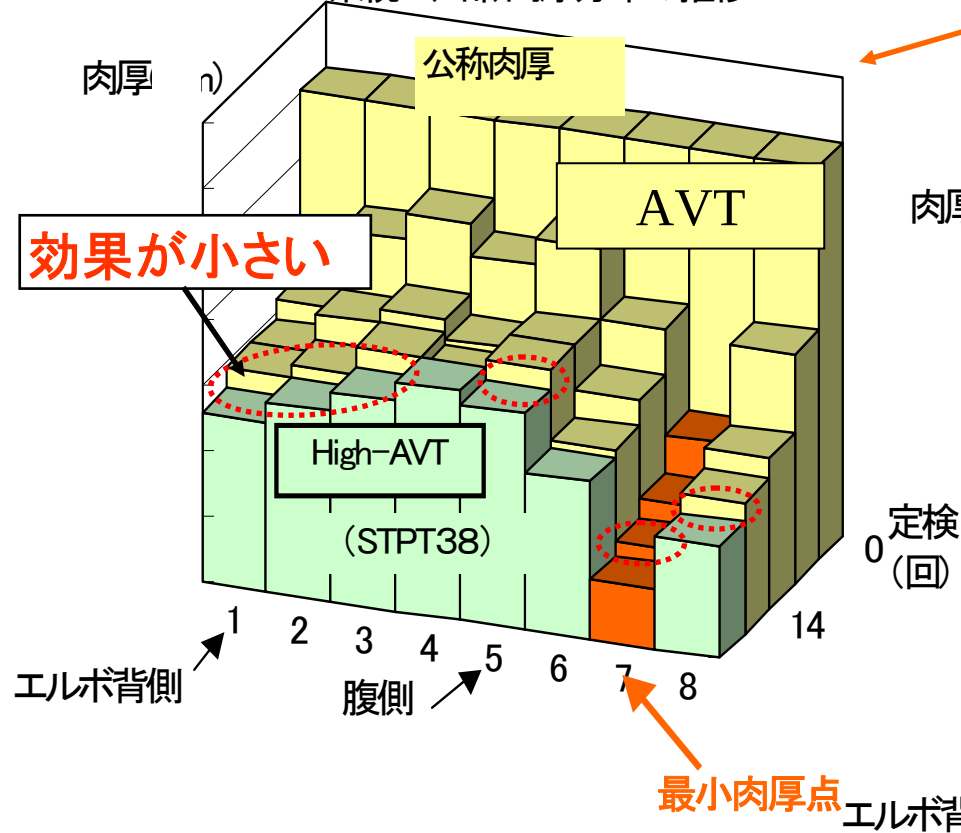
系統Fの詳細な肉厚の経時変化

※逆止弁下流に位置するエルボ

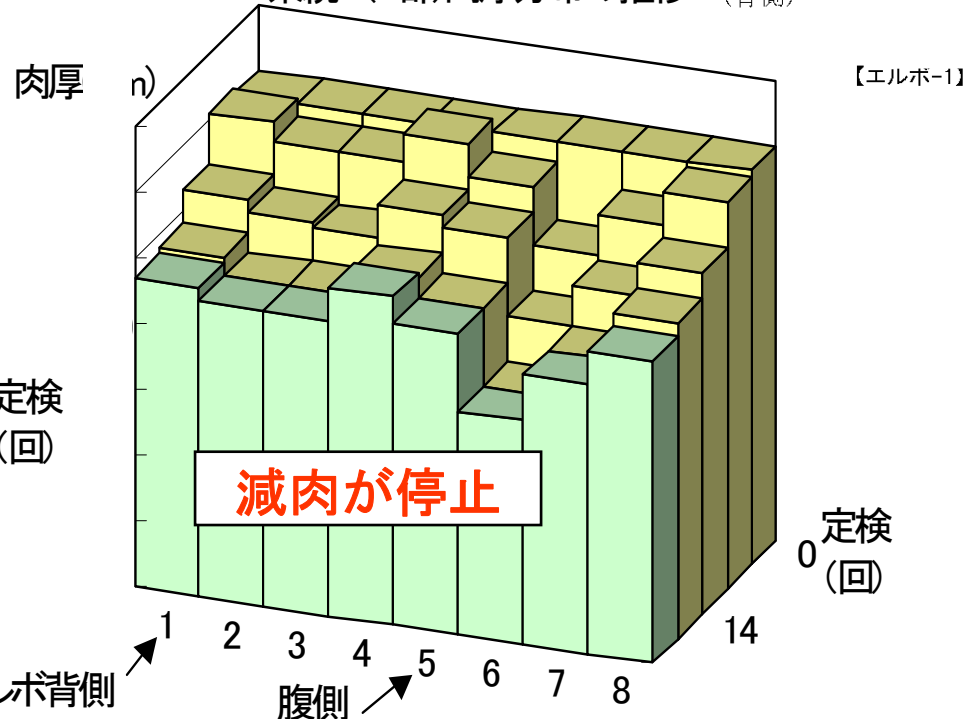
平均流速
3.5m/s



系統F (A部)肉厚分布の推移



系統F (B部)肉厚分布の推移



・エルボ入口(A部)はHigh-AVTの効果小

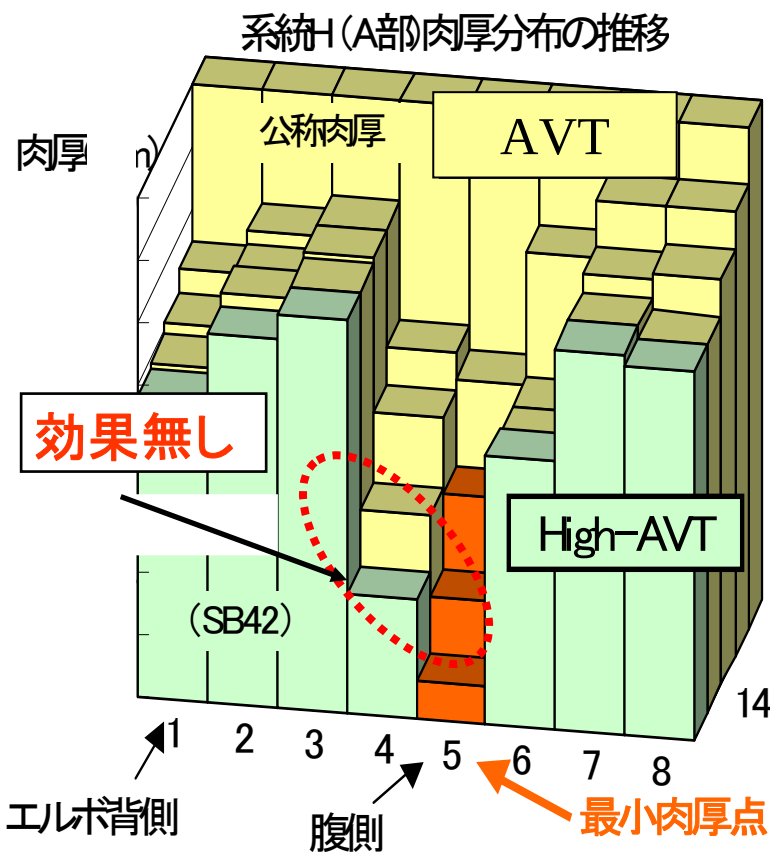
・B部以降は減肉が殆ど停止

逆止弁下流の偏流の大きい部位はHigh-AVTによる減肉抑制効果が小さい可能性あり

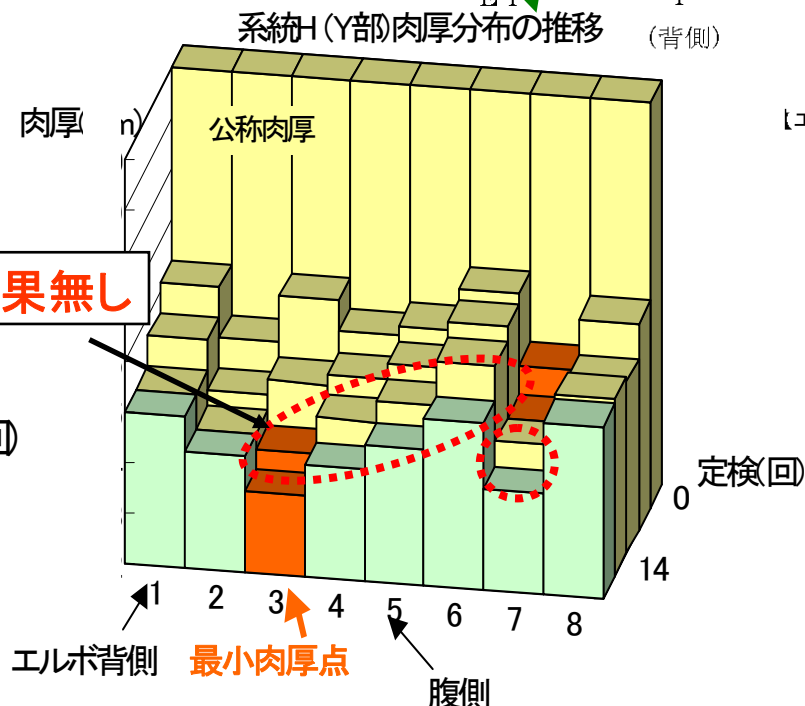
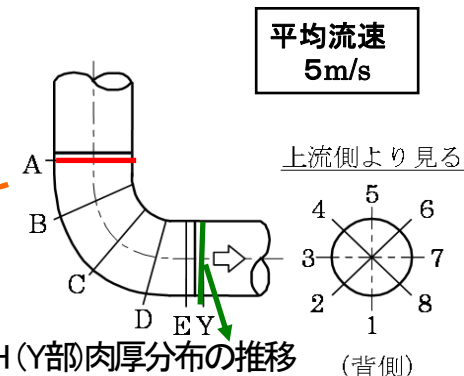
High-AVTによる減肉抑制効果(4/6)

系統Hの詳細な肉厚の経時変化

※オリフィス下流に位置するエルボ



・エルボ入口腹側は抑制されない



・エルボ出口(溶接線下流)も抑制されない

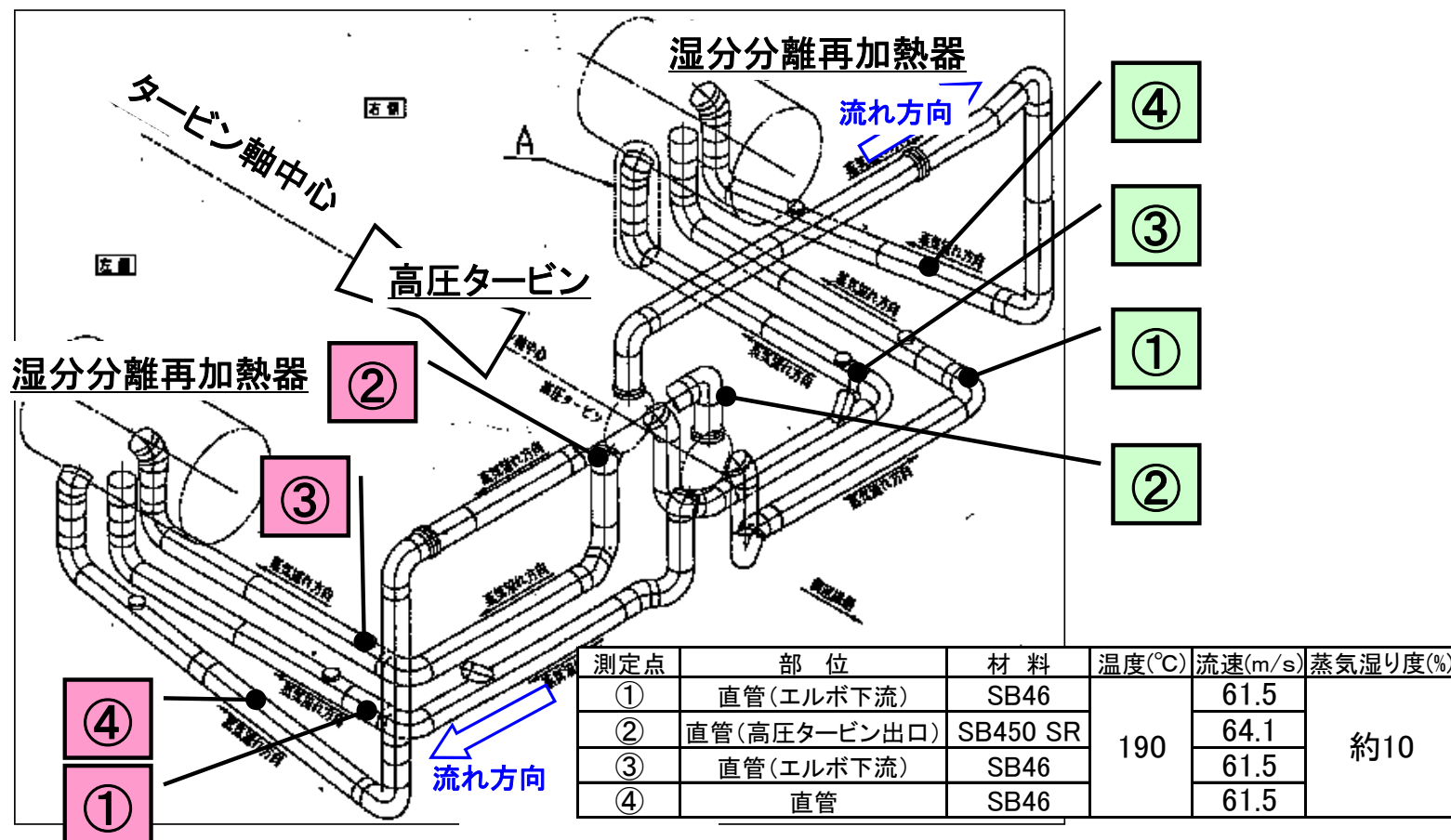
オリフィス下流や溶接線下流の偏流の大きい部位では、High-AVTによる減肉抑制効果が小さい可能性あり

High-AVTによる減肉抑制効果(5/6)

二相流系配管 評価点一覧

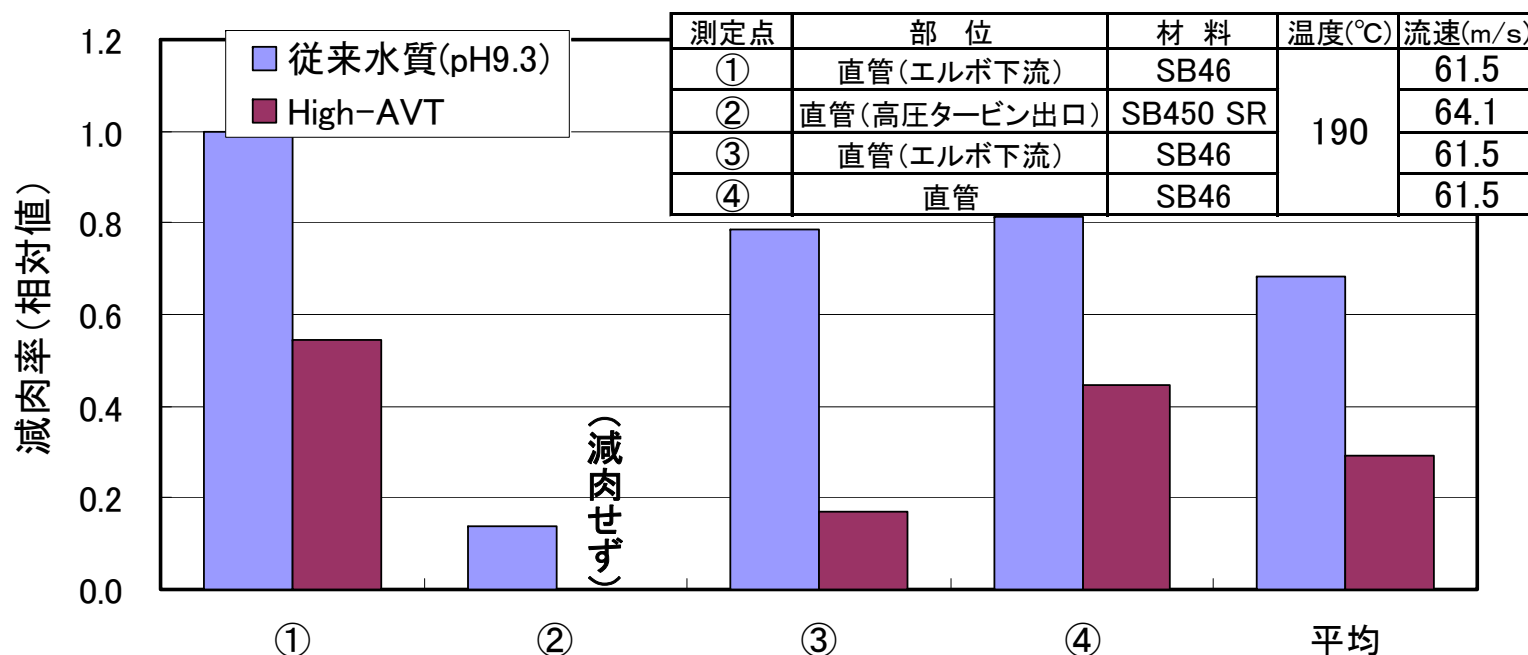
- ・気-液分配係数の大きいアンモニアでは、二相流系配管の腐食抑制効果が小さいとされている

これを検証するため、比較的減肉率が高い**クロスアンダー管**の減肉率を比較



High-AVTによる減肉抑制効果(6/6)

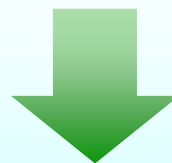
二相流系 炭素鋼配管減肉率の比較(AVT/High-AVT)



- ・評価点を平均したHigh-AVT後の減肉率は従来の約1/2
- ・二相流系においても、部位によっては単相流系と同様の減肉抑制効果が得られる可能性あり（今後のデータの蓄積が必要）

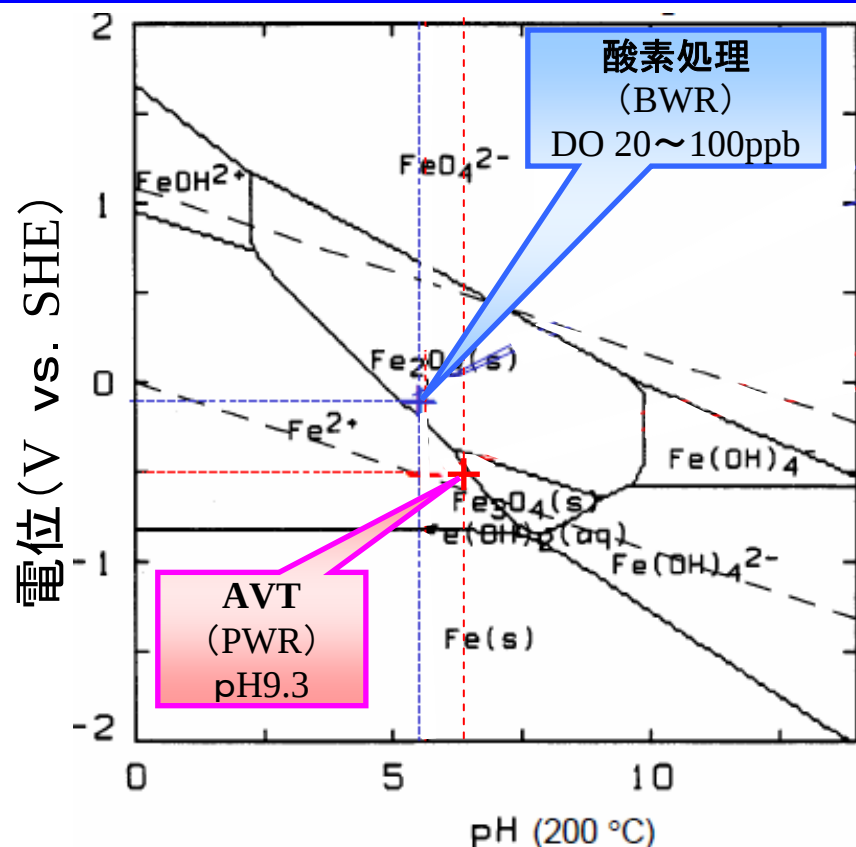
高pH(High-AVT)のまとめ

- ・ 給水鉄低減を目的として敦賀発電所2号機に導入したHigh-AVTにより、期待通りの効果（給水鉄<1ppbによるSG長期健全性確保）を達成
- ・ これは、二次系全体の炭素鋼の平均的な腐食率が従来の～1/5となったため
- ・ 一方、炭素鋼配管の減肉率については、単相流系、二相流系ともに平均で従来の1/2程度に抑制されたが、流動条件の厳しい部位は抑制されない可能性がある



- ・ これは、マグネタイト(Fe_3O_4)被膜で防食を図るAVT処理の限界を示唆しているものと考ええる

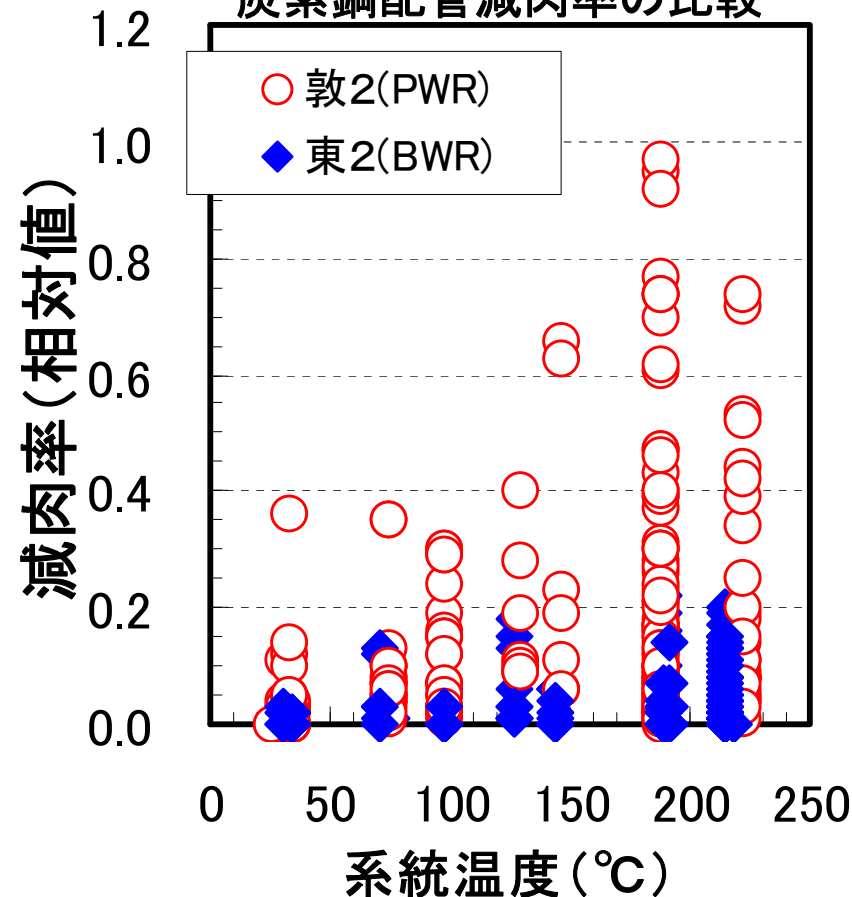
配管減肉抑制のための水化学の改善(低濃度酸素処理)



<BWR>
酸素注入によりヘマタイト(Fe_2O_3)
不動態被膜を形成し腐食抑制

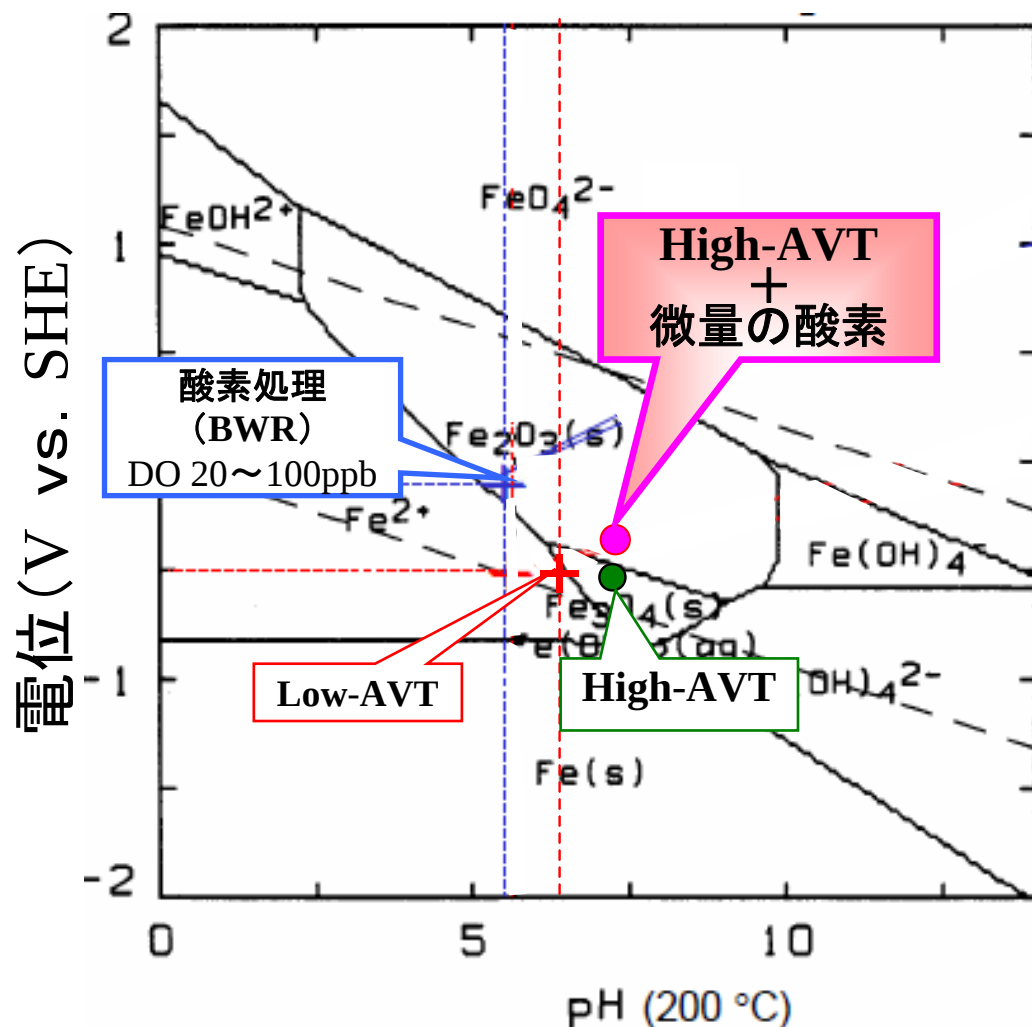
<PWR>
AVT処理によりマグネタイト(Fe_3O_4)
被膜を形成

PWR(AVT)とBWR(OT)の炭素鋼配管減肉率の比較



・減肉率は、酸素処理を採用しているBWRの方が小さい。
・これは、被膜の溶解度の違い(ヘマタイト<<マグネタイト)による

配管減肉抑制のための水化学の改善(低濃度酸素処理)

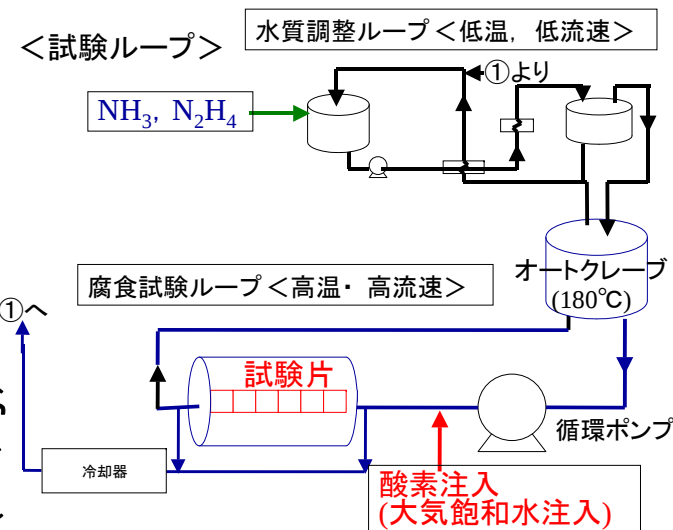
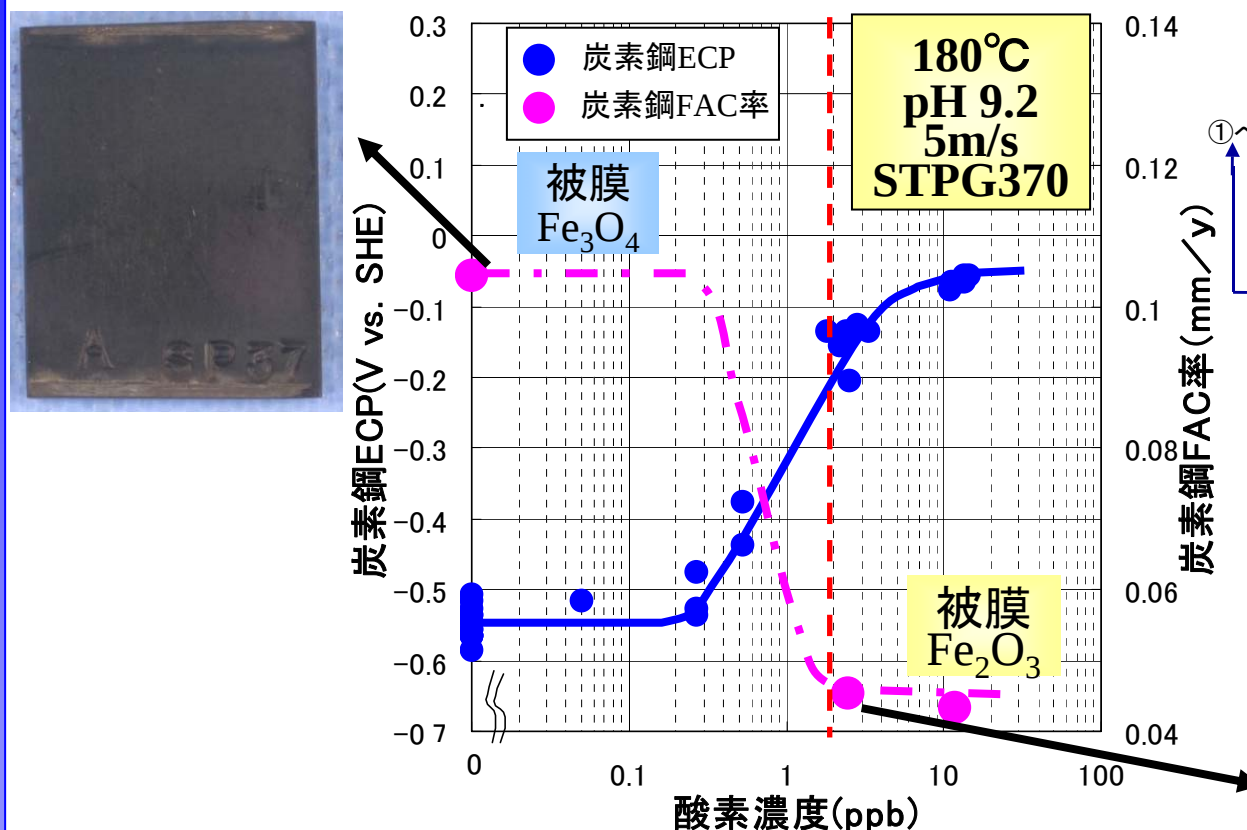


＜低濃度酸素処理のコンセプト＞

- ・High-AVT条件下では、極僅かな電位上昇(＝微量酸素濃度)でヘマタイト被膜を形成できる可能性あり
- ・High-AVT＋微量酸素注入により、二相流系を含めた二次系全体の腐食を抑制しつつ、給復水系炭素鋼配管の減肉を抑制できる可能性あり

低濃度酸素処理の事前評価結果

酸素濃度と炭素鋼ECP, FAC率の相関



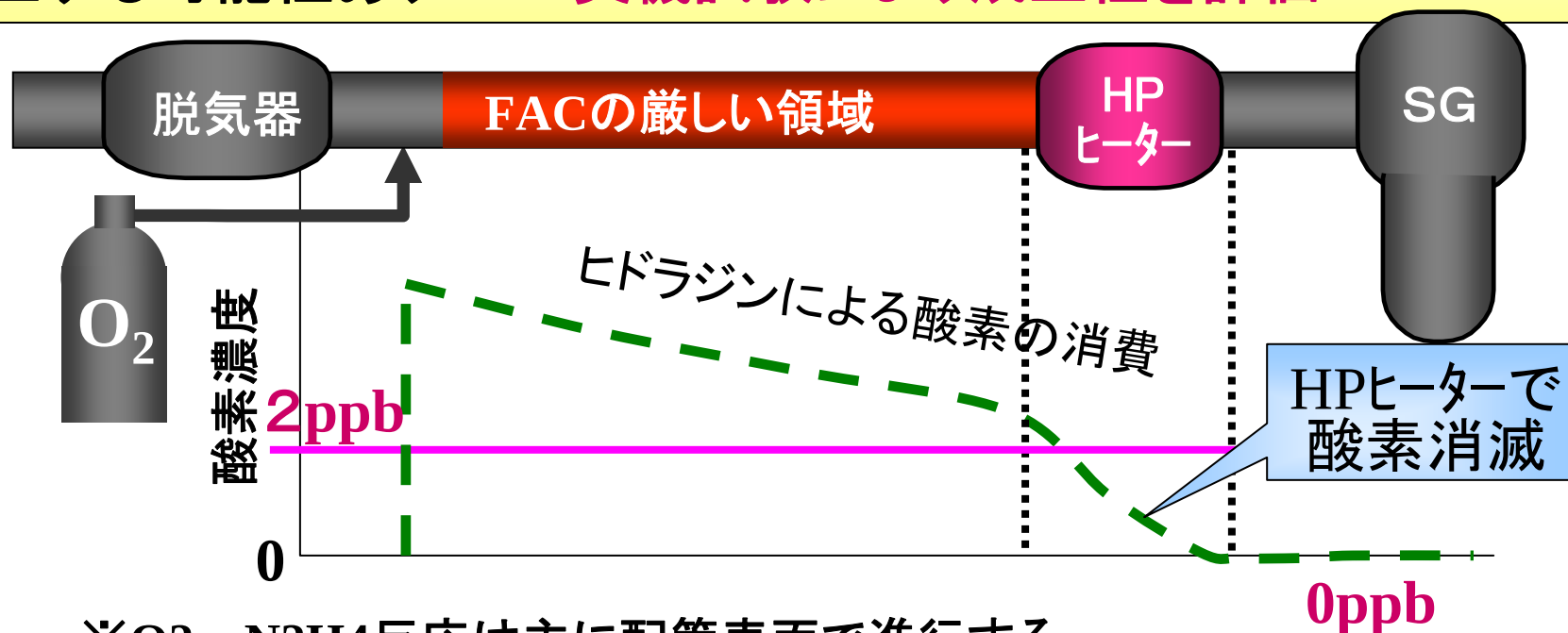
- ・ラボ試験の結果, AVT条件下では僅か2ppbの酸素でヘマタイト化し, FAC速度が低減
- ・High-AVT+微量酸素注入というコンセプトが基本的に成立する

PWRにおける低濃度酸素処理の概念

- ・酸素による蒸気発生器(SG)伝熱管健全性への長期的な影響が不明
→SGへの酸素の持ち込みを回避する必要あり(酸素濃度<5ppb)



ヒドラジン(脱酸素剤)を共存させることにより、SGに酸素を持ち込ませずに給復水系配管のFACを抑制できる水質制御法が成立する可能性あり →実機試験により成立性を評価



※O₂-N₂H₄反応は主に配管表面で進行する
→表面積／体積比の大きなHPヒーター細管内で酸素消費が進行

敦賀発電所2号機 酸素注入調査の概要(1/2)

<目的>

- ①SGへの酸素持込抑制技術の確立
- ②実機でのFAC抑制効果の評価

減肉率の高い箇所が存在し、SG
への酸素持込について評価できる、
脱気器 下流で調査

<AVT条件>

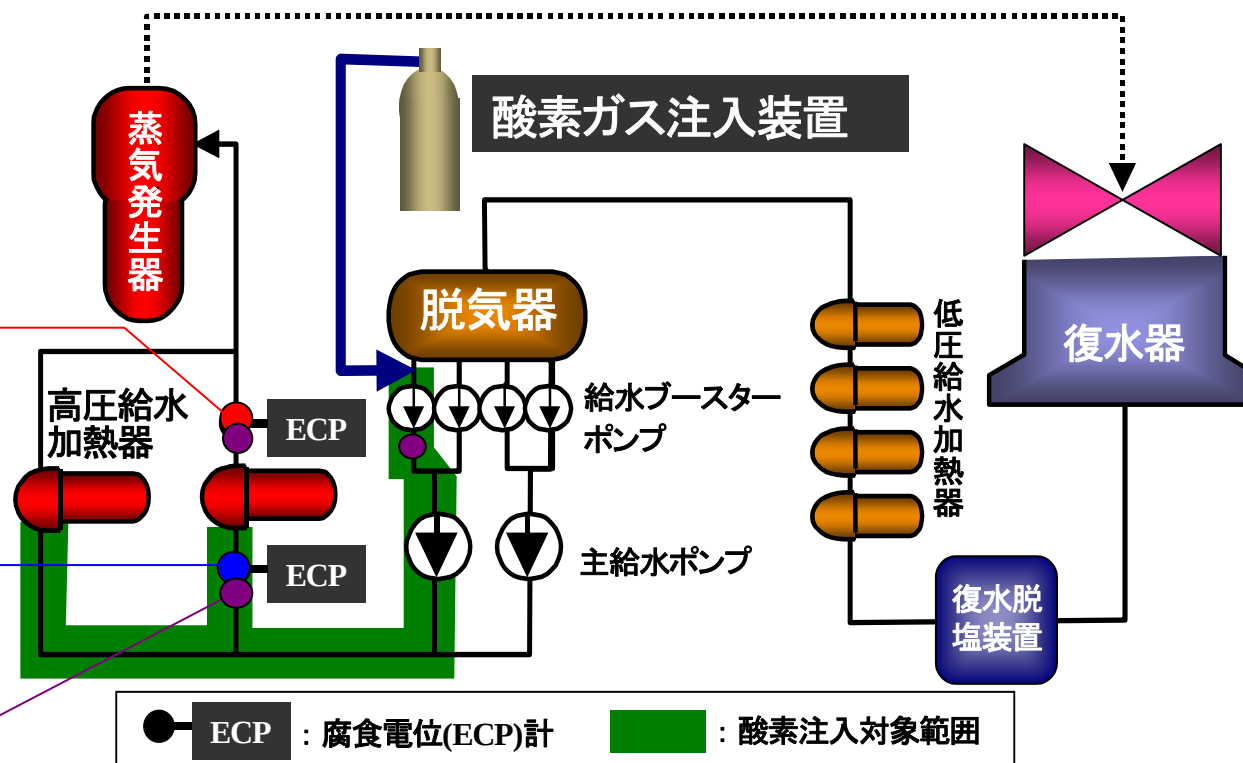
pH: 9.8 (High-AVT)
ヒドラジン: 100ppb

SGへ酸素が持ち込まれ
ないことを監視—

ECP(SS)

炭素鋼の表面状態を把握
—ECP(CS)

炭素鋼の減肉状況を把握
—鉄濃度、鉄形態

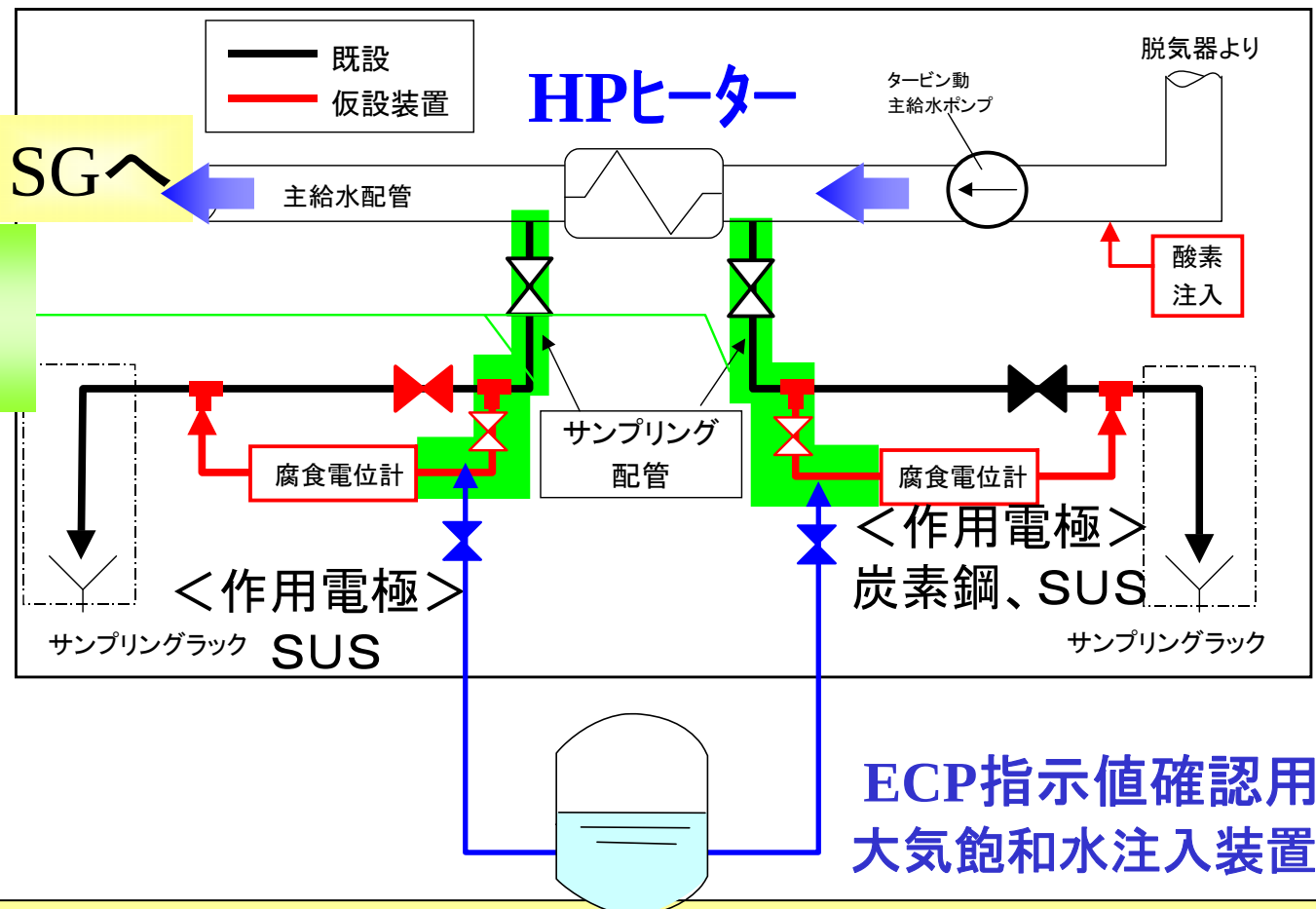


敦賀発電所2号機 酸素注入調査の概要(2/2)

- ・サンプリング配管内でのヒドラジンによる酸素消費により、既存の酸素濃度計では酸素濃度を精確に測定できないためECP計により系統内の酸素濃度を評価

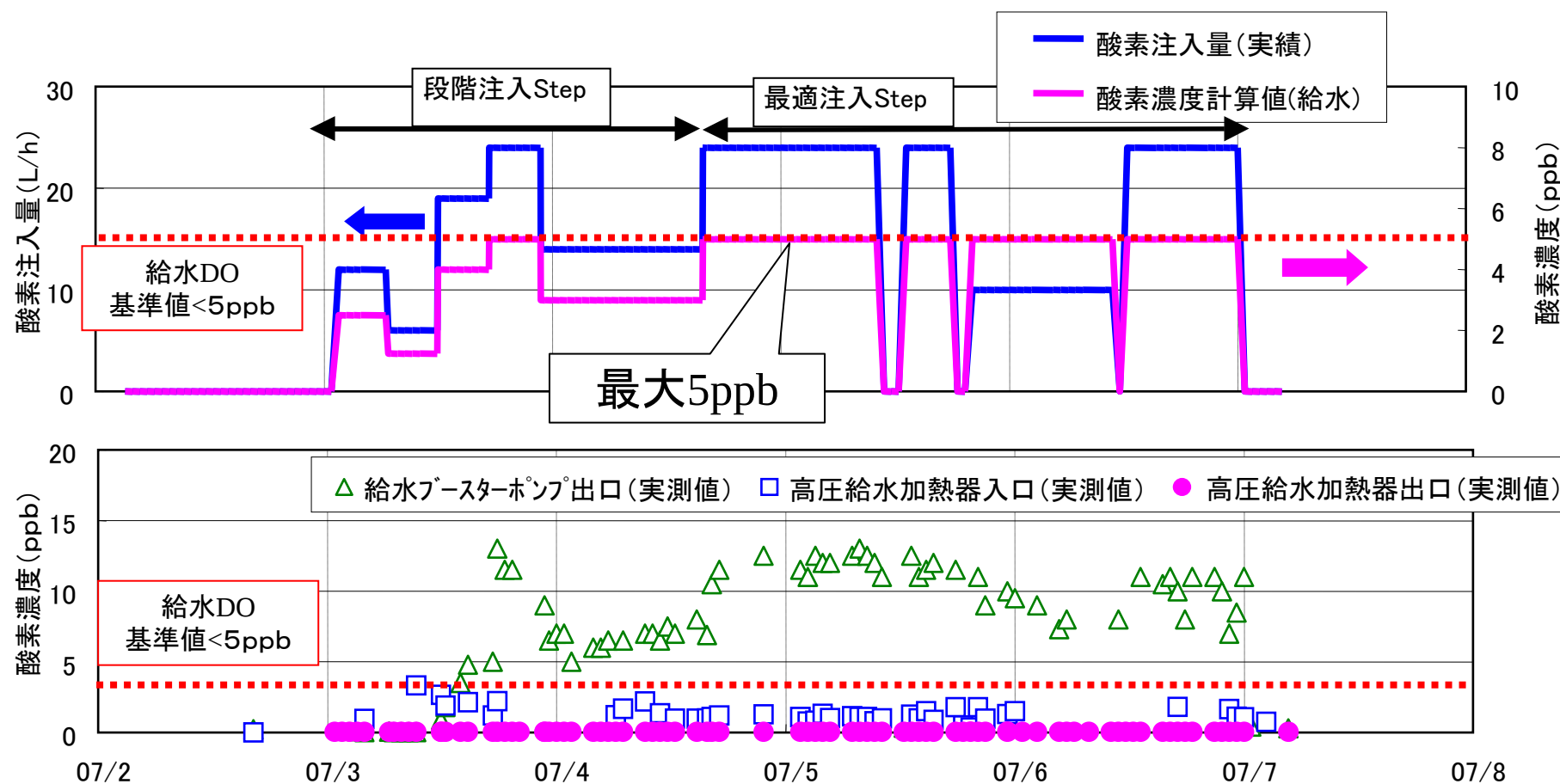
ECP装置概要

主給水配管からECPセンサー(腐食電位計)までの距離は約50cm



- ・母管直近にセンサーを取り付け、サンプリング配管内での酸素消費の影響を排除
- ・センサー上流にECP値の妥当性を評価できる装置を組み込んだ。

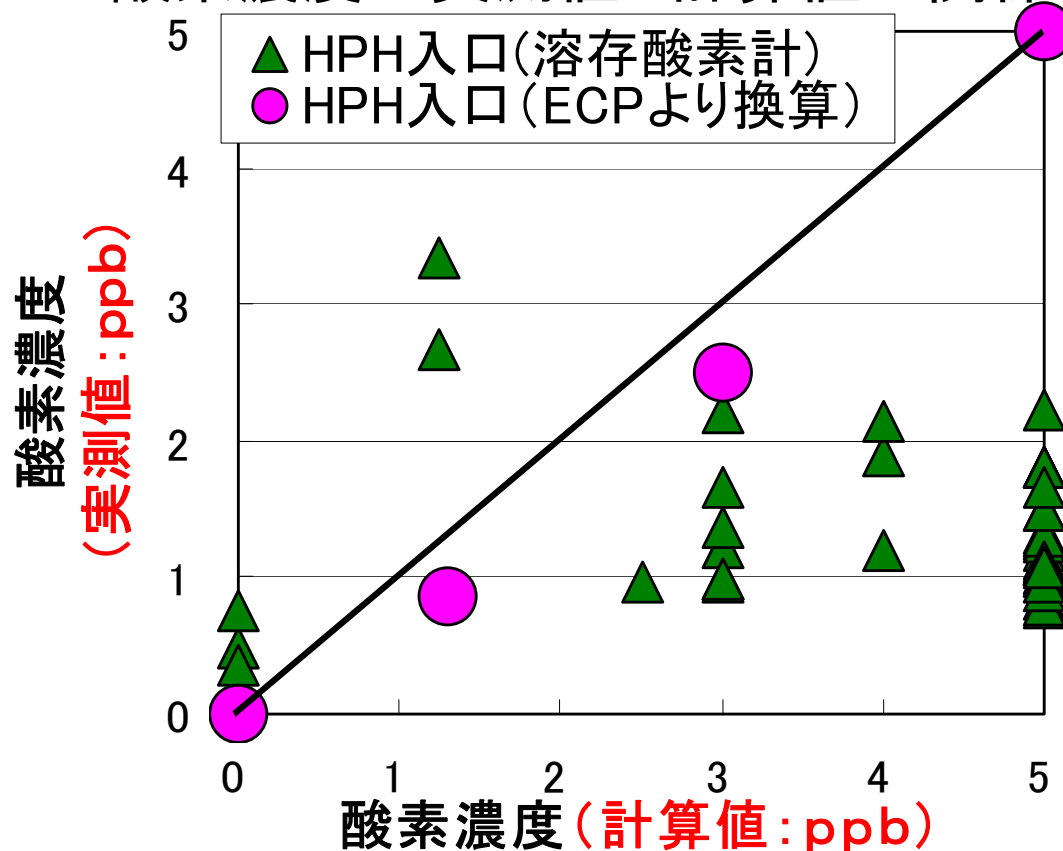
酸素注入調査における酸素注入実績(1/2)



- ・給水酸素濃度管理値の5ppbとなるまで段階的に注入量を増加
- ・しかし、給水系(高圧給水加熱器入口)における実測の酸素濃度は殆ど上昇せず

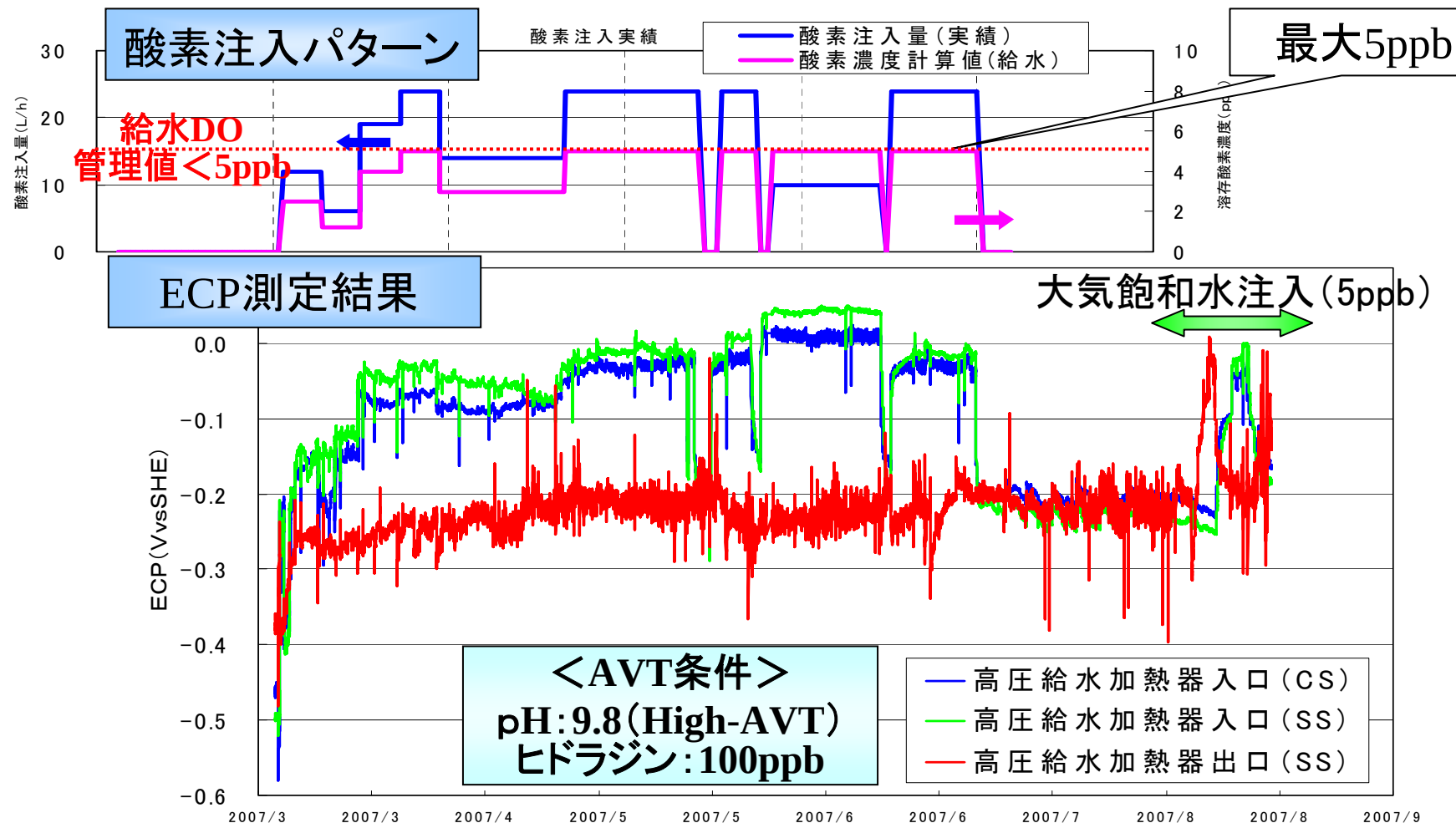
酸素注入調査における酸素注入実績(2/2)

酸素濃度の実測値と計算値の関係



- ・表面積／体積比の大きなサンプリング配管内では、 $O_2-N_2H_4$ の反応が促進
- ・ヒドラジン共存下における高温系統の微量酸素濃度は、従来の方法(サンプル配管で移送・冷却後溶存酸素計にて測定)では精度が低い。
- ・ECPによる高精度の監視が有効

調査結果 ①SGへの酸素持込抑制技術の確立(1/2)



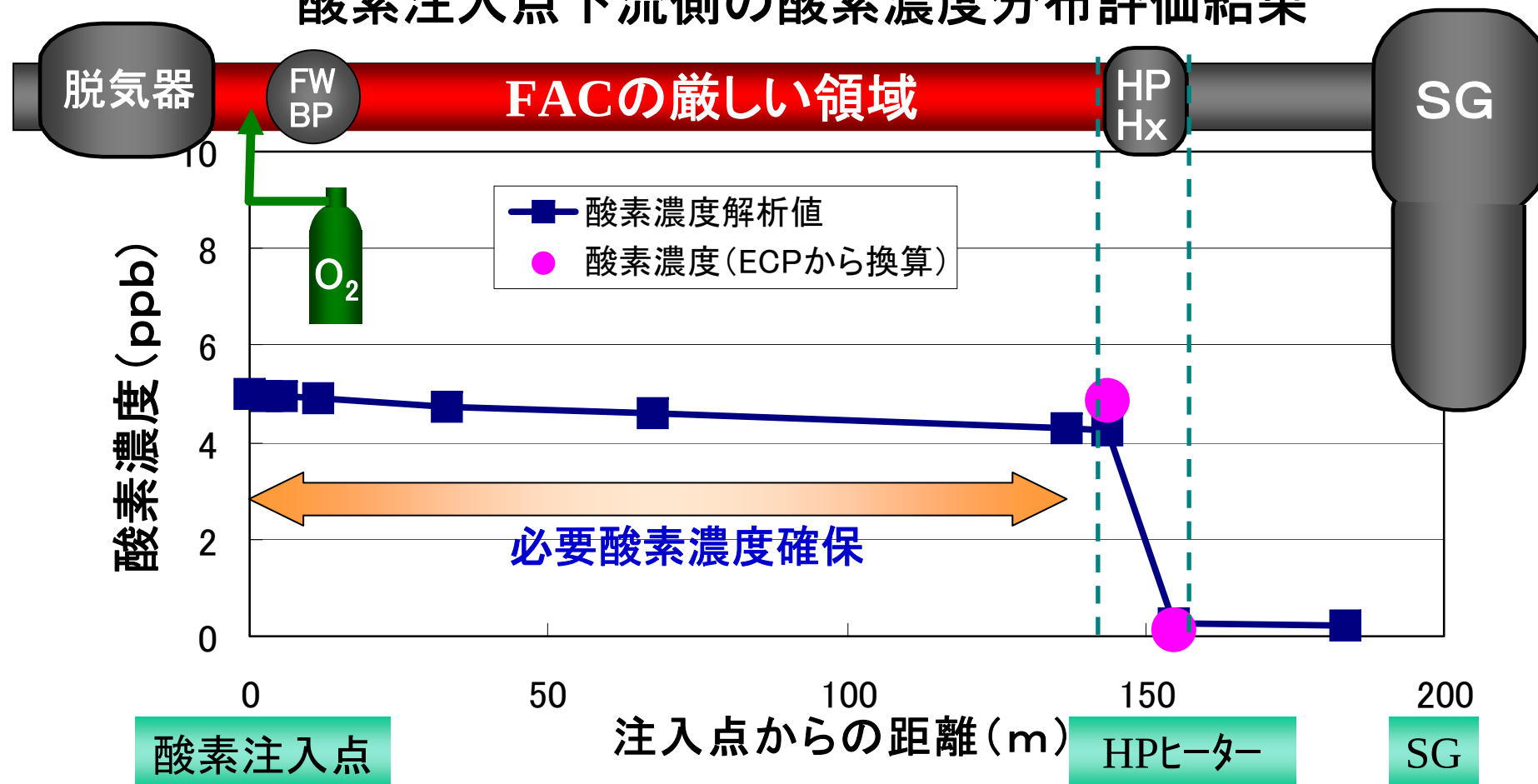
・高圧給水加熱器(HPH)入口ECPは、酸素注入量に応じて変化、HPH出口のECPは、ほぼ一定で推移

→ HPH入口では、炭素鋼表面被膜がヘマタイト化する。

→ SG給水(HPH出口)の酸素濃度は上昇しない。

調査結果 ①SGへの酸素持込抑制技術の確立(2/2)

酸素注入点下流側の酸素濃度分布評価結果



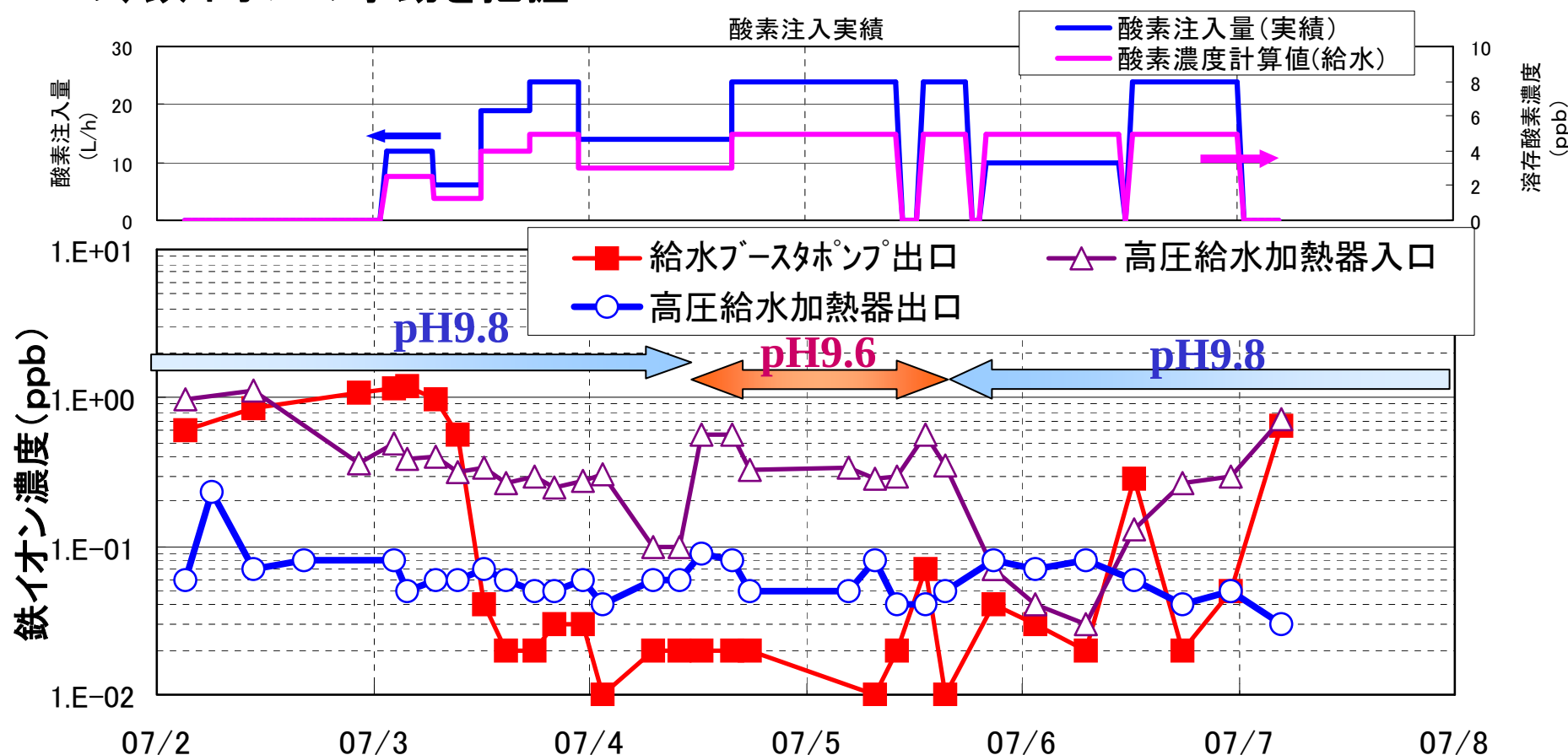
・高圧給水加熱器 (HPH) により酸素が消費

(表面積／体積比の大きな給水加熱器細管内で $O_2 - N_2H_4$ 反応が促進)

→ 酸素濃度が 5ppb 程度であれば, SG に酸素を持ち込ませない制御が可能

調査結果 ②実機でのFAC抑制効果の評価(1/3)

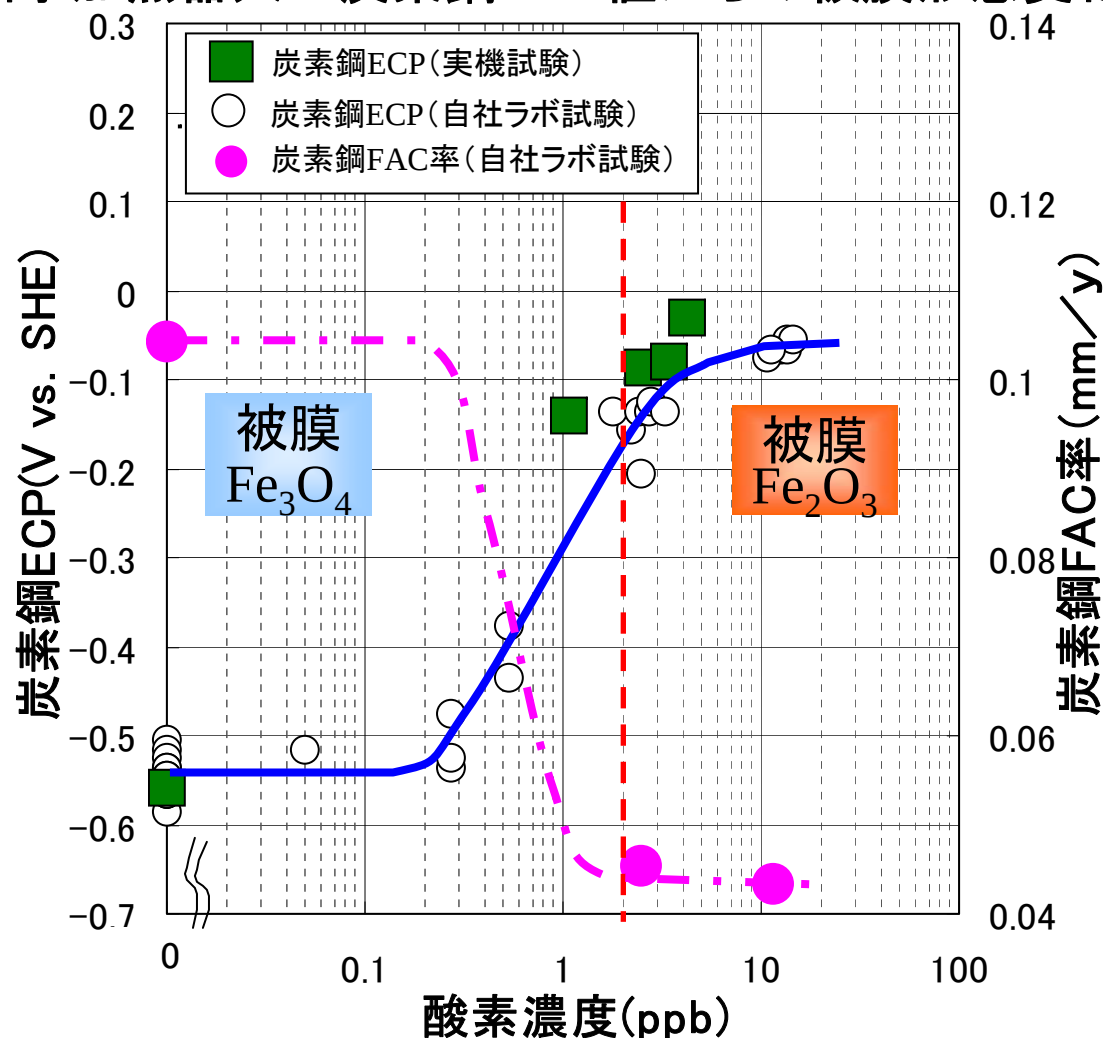
- ・酸素注入は、鉄の溶出抑制(形態変化による溶解度低下)を目的としているため、鉄イオンの挙動を把握



- ・酸素注入により、鉄イオン濃度は低下
- ・pHが低下すると鉄イオンは上昇するケース有り
→High-AVT + 微量酸素注入が有効

調査結果 ②実機でのFAC抑制効果の評価(2/3)

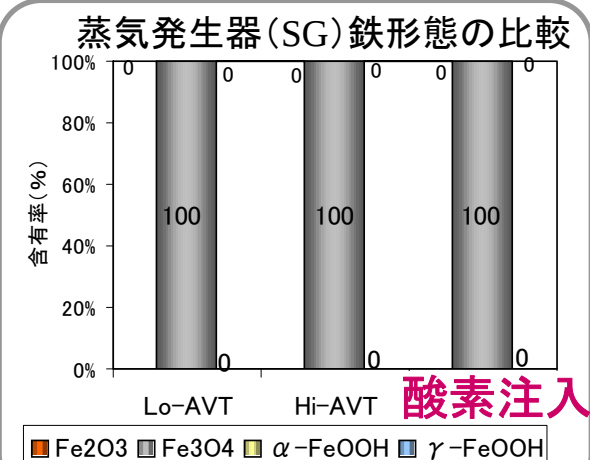
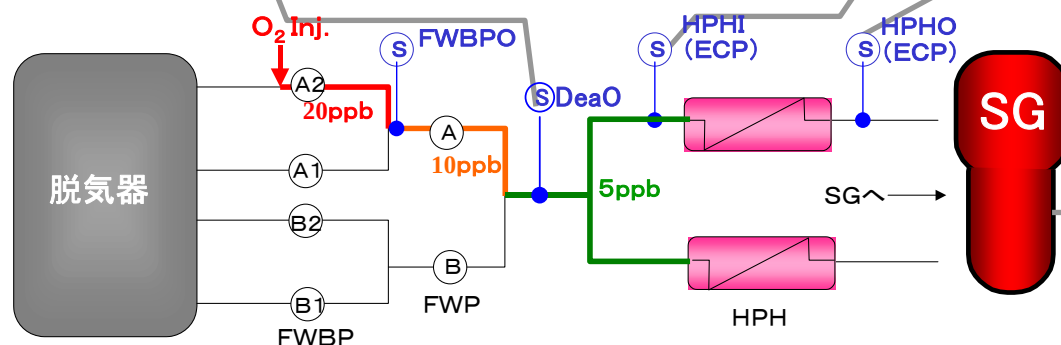
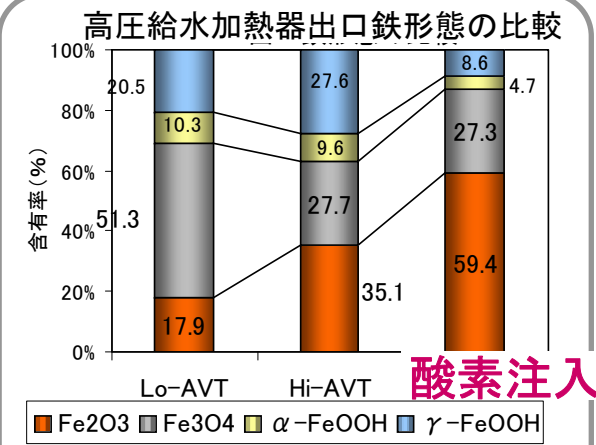
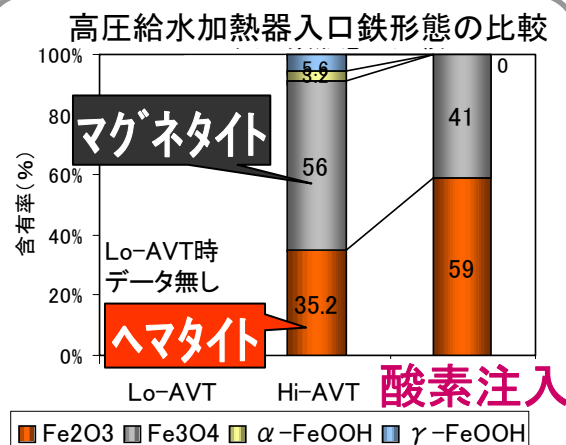
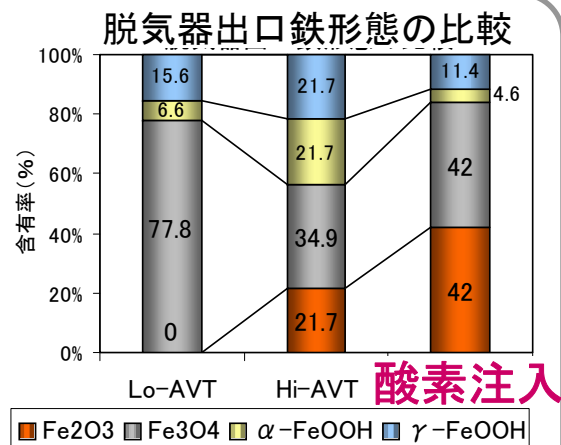
高圧給水加熱器入口炭素鋼ECP値からの被膜形態変化の考察



・実機でも、ラボ試験同様に酸素濃度2ppb以上で炭素鋼表面の被膜がヘマタイト(Fe_2O_3)化 →微量の酸素でFACを抑制できる可能性あり

調査結果 ②実機でのFAC抑制効果の評価(3/3)

鉄クラッド形態からの被膜形態変化の考察



- 酸素注入(OWC)によりヘマタイト(Fe₂O₃)が増加
→ 酸素注入によるヘマタイト化を形態からも把握
- 酸素注入時もSGは全てマグネタイト(Fe₃O₄)
→ SG内は還元性が維持(酸素の持込み無し)

PWRにおける低濃度酸素処理のまとめ

- ・ High-AVT+微量酸素注入というPWR二次系FAC抑制コンセプトを構築
- ・ 実機試験により、高圧給水加熱器内で酸素が消費され、5ppb以下の給水酸素濃度では、SGに酸素を持ち込まない制御が可能であることを実証
- ・ ラボ試験と同様に2ppb程度の僅かな酸素濃度で、炭素鋼のECPがヘマタイト域まで上昇し、FAC抑制効果が実機でも得られることが期待できる。
- ・ ヒドラジン共存下での低濃度の酸素測定にはECP計が有効



High-AVT条件下での微量酸素注入という、二相流系を含めた二次系全体の腐食を抑制しつつ、給復水系炭素鋼配管の減肉抑制策が実機で成立することを実証