

第12回 定例研究会資料

PWR一次系 溶存水素濃度 の最適化に関する取り組み



平成23年3月7日(月)
日本原子力発電株式会社
杉野 亘

背景

＜ステンレス鋼＞

- ・IGSCC（粒界応力腐食割れ, Inter Granular Stress Corrosion Cracking）
- ・IASCC（照射誘起型応力腐食割れ, Irradiation Assisted SCC）

＜ニッケル基合金＞

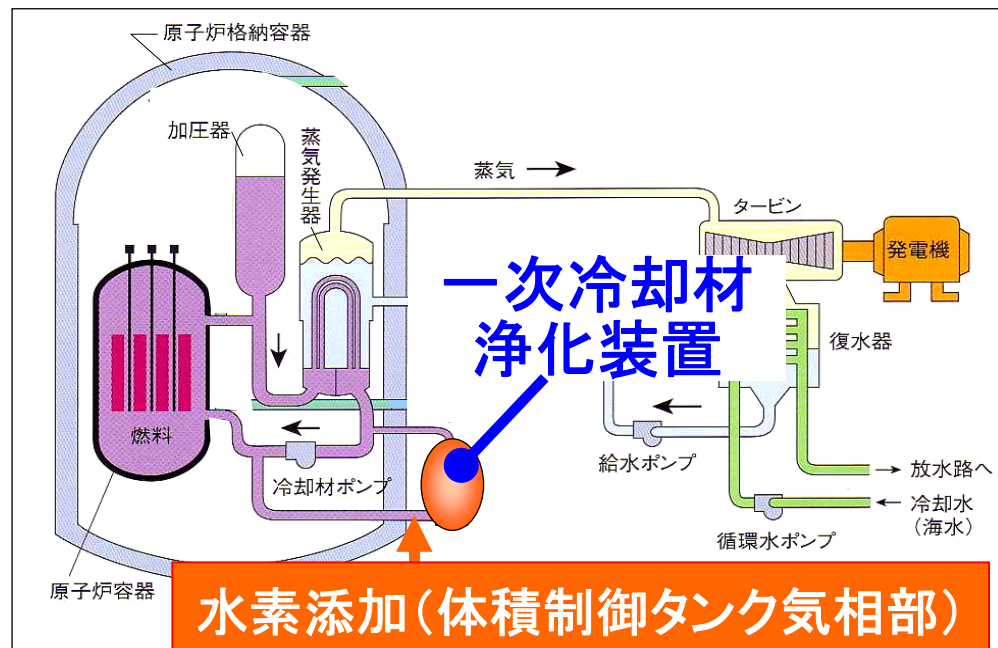
- ・PWSCC（一次系環境下応力腐食割れ, Primary Water Stress Corrosion Cracking）
- プラント運転時間の増加に伴い、国内外で顕在化（600系合金）
- 緩和対策が望まれる

PWR一次系 SCC抑制のための水化学管理

- ・水の放射線分解による酸素，過酸化水素の発生を抑制するため，**高濃度の水素**を添加

<一次冷却材中の濃度>

水素	運用範囲 $25 \sim 35 \text{ cm}^3/\text{kg}$ $(2.2 \sim 3.1 \text{ ppm})$ 保安規定範囲 $15 \sim 50 \text{ cm}^3/\text{kg}$
酸素	5ppb 以下



- ・一次冷却材浄化装置でSCCの原因となる不純物(塩化物イオンなど)を除去

<一次冷却材中の濃度>

塩化物イオン	5ppb 以下
--------	---------

PWR一次系におけるPWSCC事例

国内における主なPWSCC発生部位と原因

発生部位	発生原因
原子炉容器入口管台	局所的な見直し溶接により引張残留応力が発生
①加圧器管台	手直し溶接による周方向応力の増加
原子炉上蓋制御棒駆動装置管台, ②蒸気発生器入口管台	一部にバフ仕上げが行われておらず, 表面に引張残留応力が発生(推定)
蒸気発生器伝熱管	曲げ加工, 管板拡管に伴う高い残留応力が発生

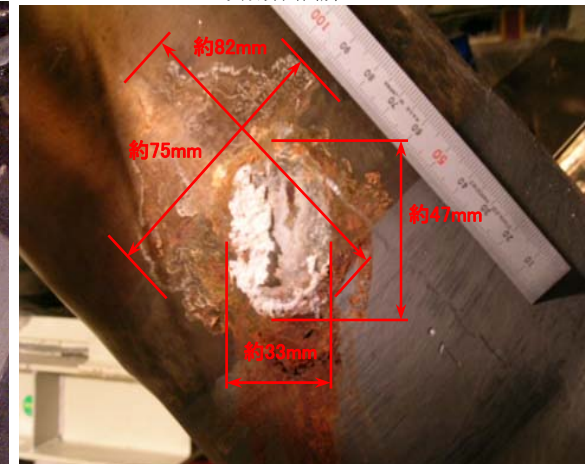
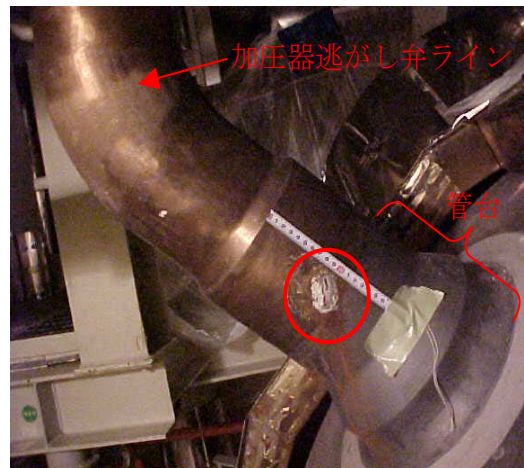
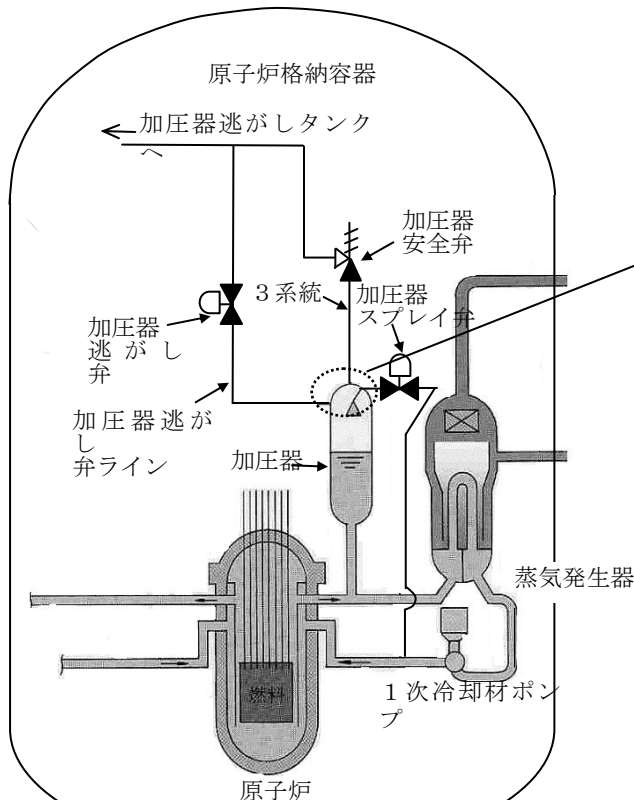
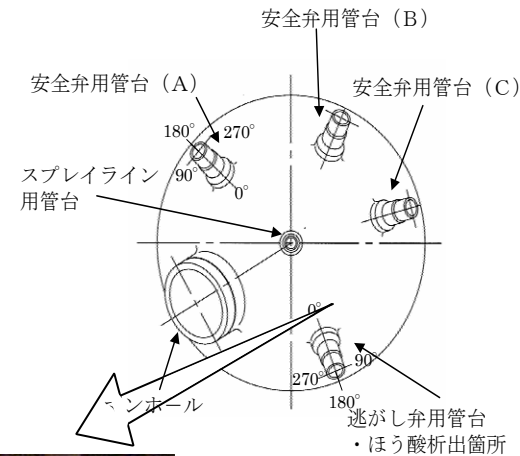
①, ②の事例について紹介

PWR一次系におけるPWSCC事例

①加圧器(逃がし弁ライン)管台: 敦賀2号機

- 営業運転開始 1987年2月17日
- 定格電気出力 1160MWe(4ループ)
- 実運転時間 約12万時間 (2003年9月9日)

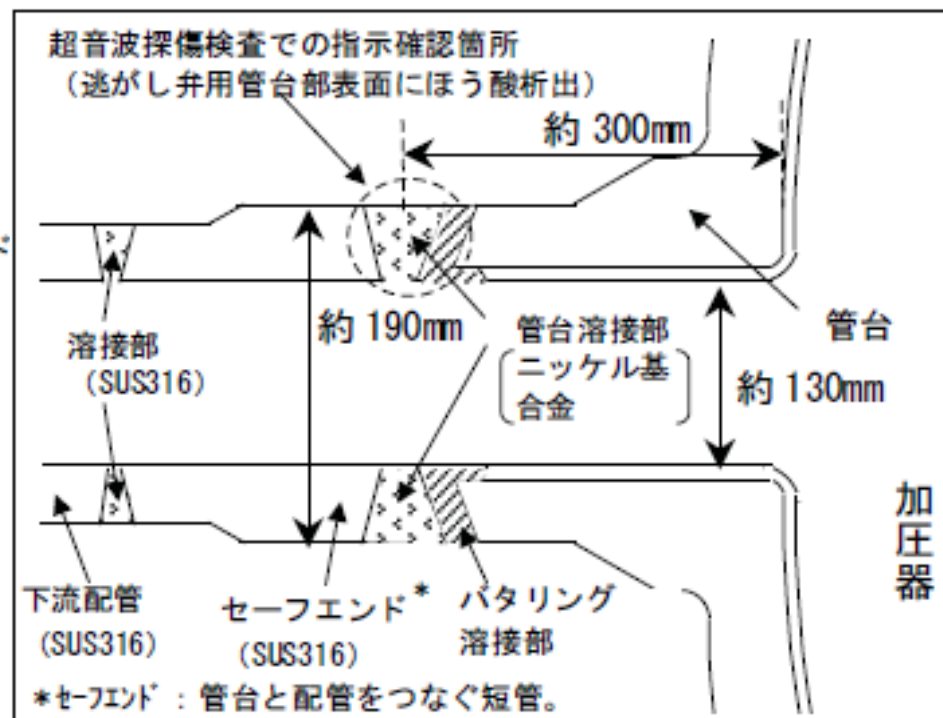
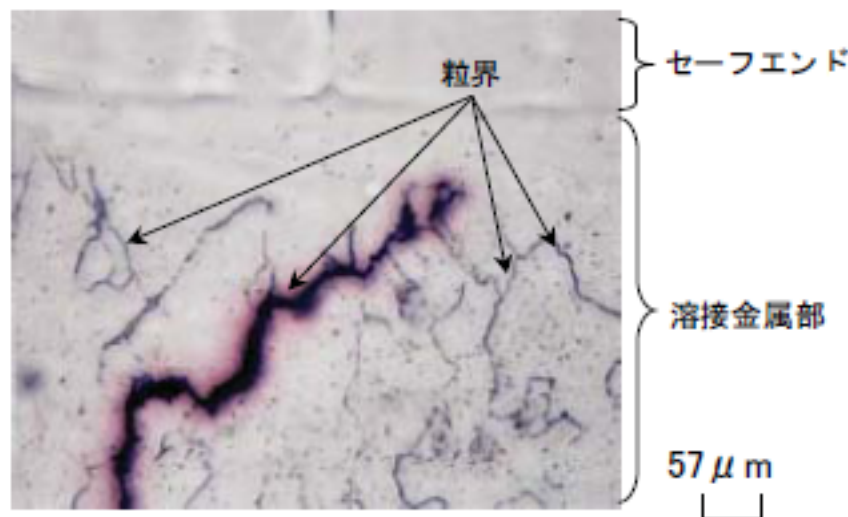
管台配置図(加圧器上部から)



PWR一次系におけるPWSCC事例

①加圧器(逃がし弁ライン)管台:敦賀2号機

管台部内面側のスンプ結果

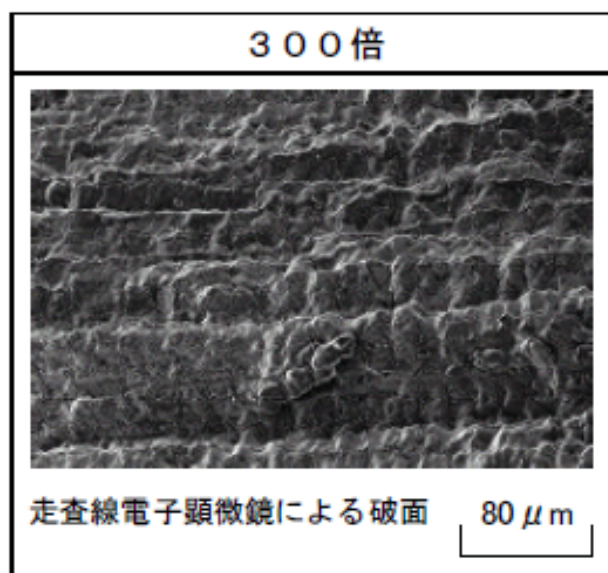


・ ひび割れは、溶接金属部の粒界に沿って枝分れしており、セーフエンドには進展していない。

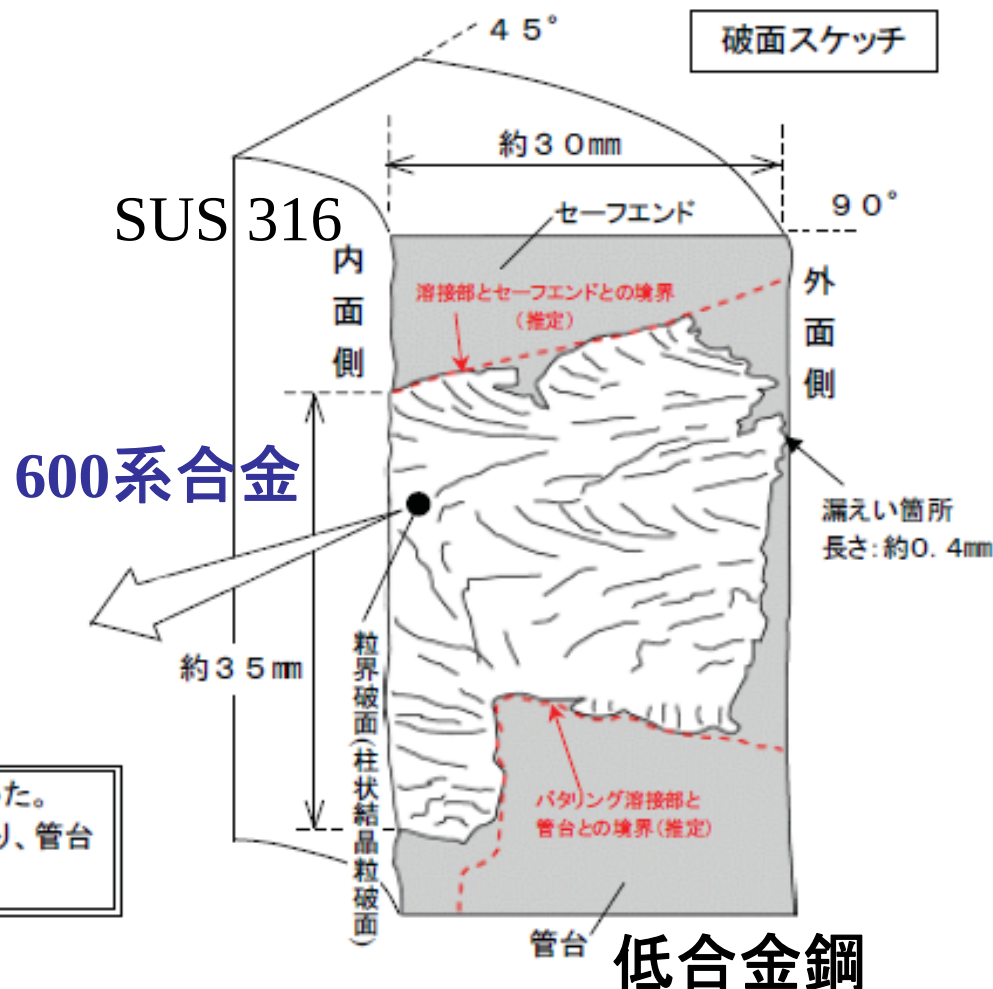
溶接金属: ニッケル基
(600系)合金

PWR一次系におけるPWSCC事例

①加圧器(逃がし弁ライン)管台: 敦賀2号機

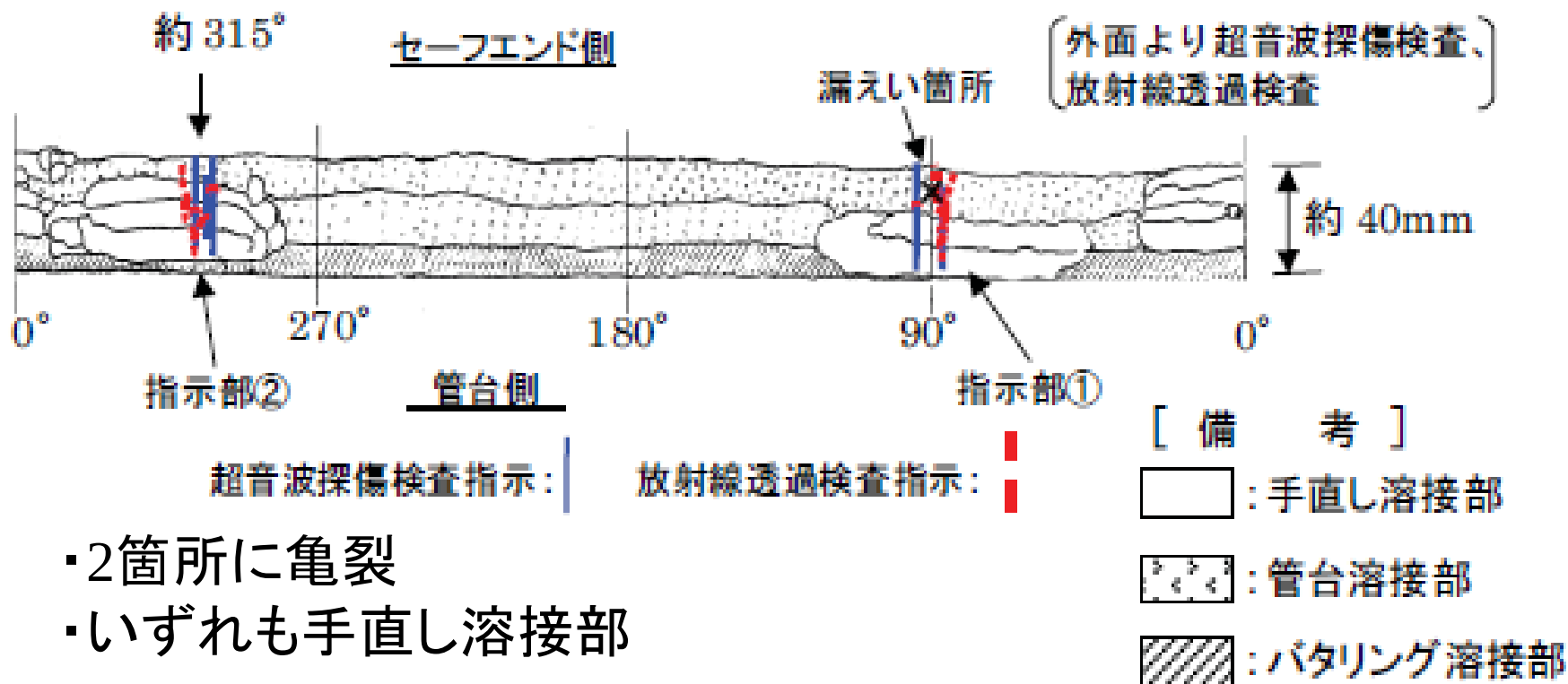


- ・割れ破面は、粒界破面(柱状結晶粒破面)の様相を呈していた。
- ・ひび割れは、ニッケル基合金の溶接金属のみに留まっており、管台およびセーフエンドには進展していない。



PWR一次系におけるPWSCC事例

①加圧器(逃がし弁ライン)管台: 敦賀2号機



- ・2箇所に亀裂
- ・いずれも手直し溶接部

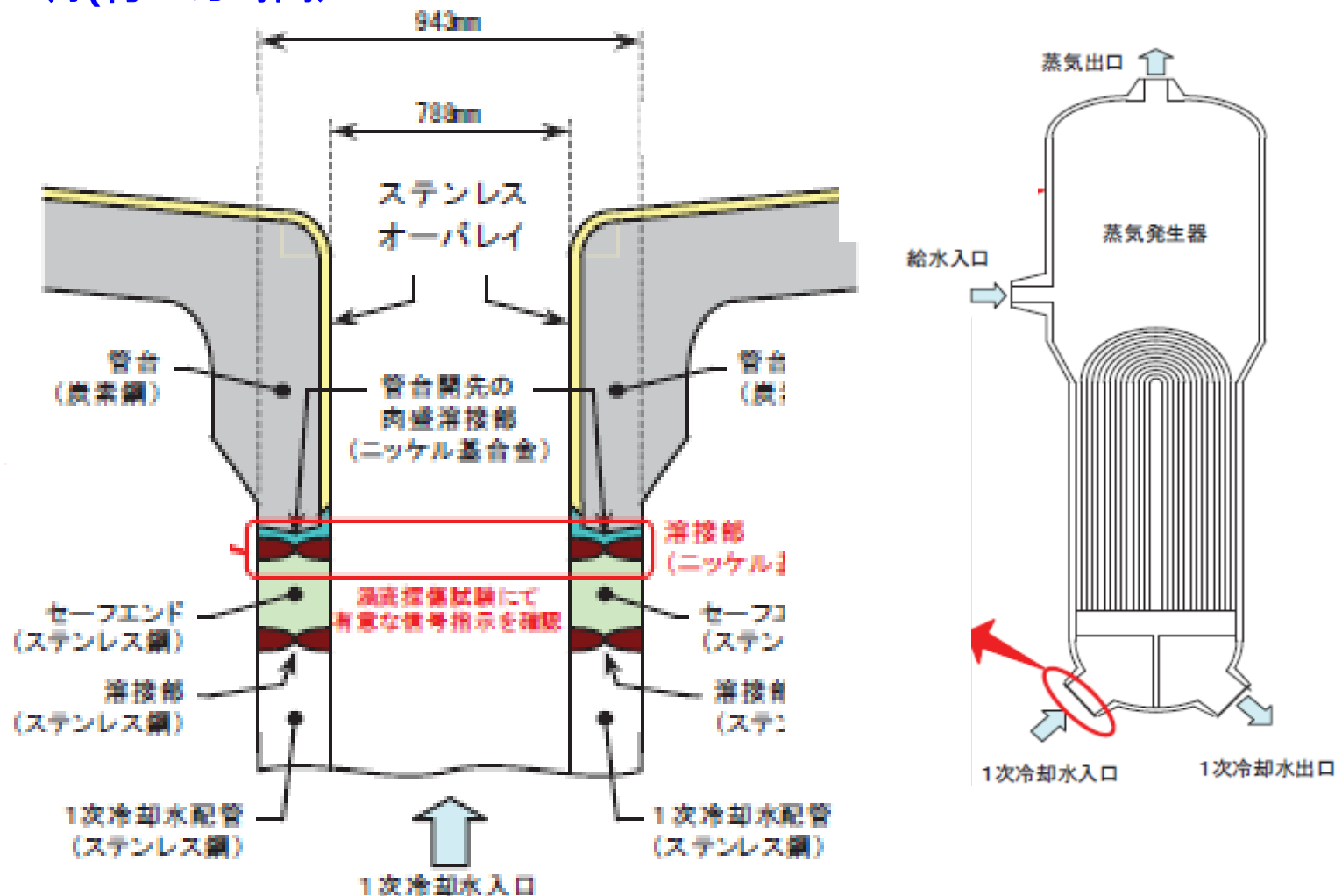
<推定原因>

手直し溶接により引っ張り残留応力が生じ, PWSCCが発生

PWR一次系におけるPWSCC事例

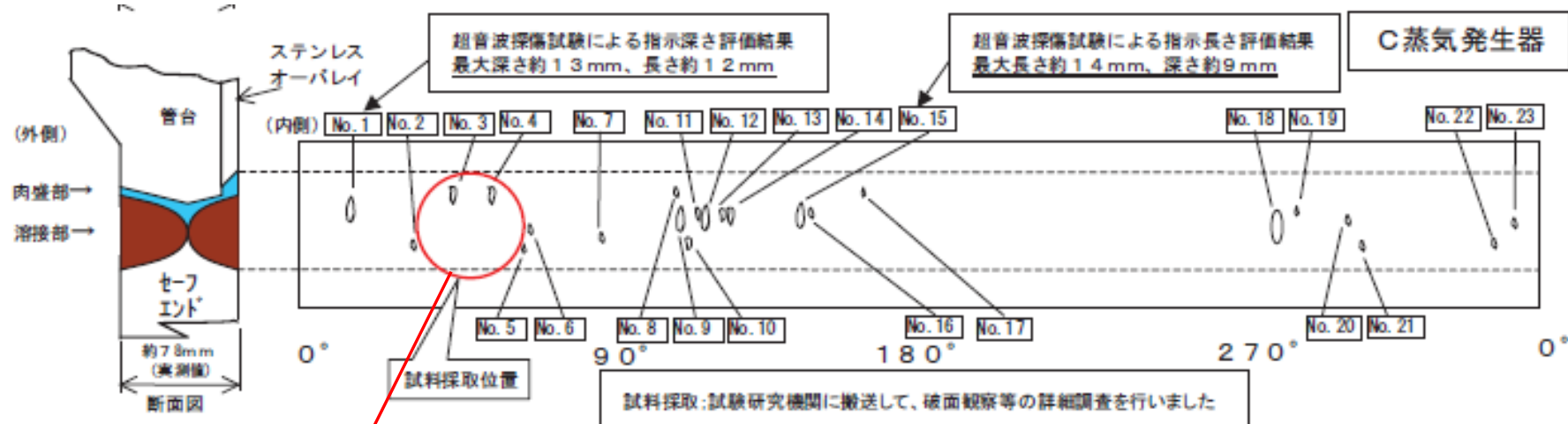
②蒸気発生器入口管台：敦賀2号機

2007年10月(約15万時間)

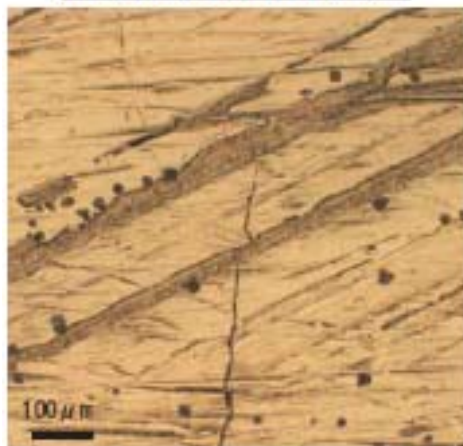


PWR一次系におけるPWSCC事例

②蒸気発生器入口管台：敦賀2号機



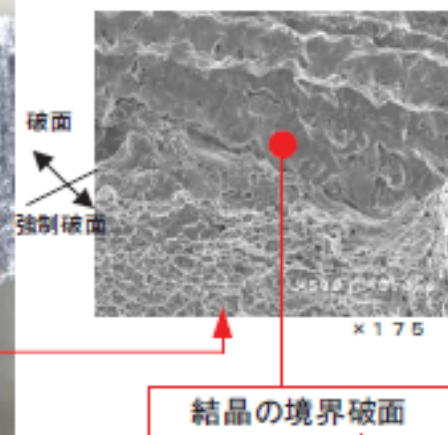
採取試料の表面観察結果



No. 3 割れの破面観察結果



走査型電子顕微鏡観察結果



PWR一次系におけるPWSCC事例

②蒸気発生器入口管台：敦賀2号機

- ・割れ発生部と同様の表面加工（グラインダ掛け）を施した模擬試験体を製作し残留応力を測定
- ・この結果，割れ発生部表面には～470MPaの大きな引っ張り残留応力が生じていた。

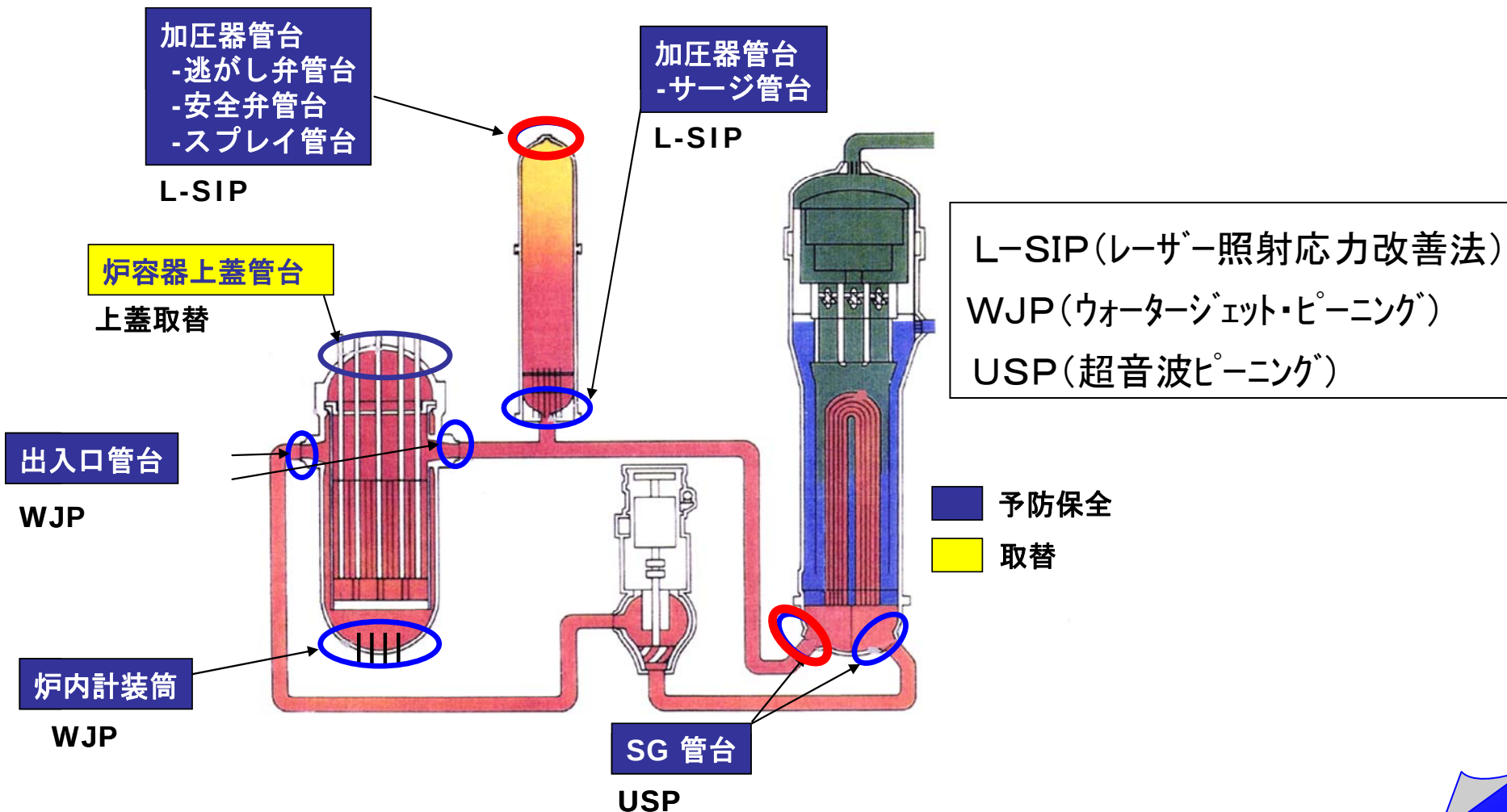
<推定原因>

表面加工により引っ張り残留応力が生じ，PWSCCが発生

- ・敦賀2号機では，高温部（～325℃）でPWSCCが発生
- ・今後は高経年化に伴い低温部（～290℃）で発生する可能性あり
→ 予防保全を実施

敦賀2号機 PWSCC予防保全(材料・応力)

- ①材料改善: 600系合金から耐食性の高い690系合金に変更
- ②応力改善: 表面処理により引っ張り残留応力を緩和



敦賀2号機 PWSCC予防保全(環境改善)

③環境改善:

①, ②の対策は全ての部位に適用できるわけではなく, 一次系全体をケアするためには環境対策(水化学改善)の併用が必要

PWSCC発生機構: 現段階では明確となっていない

- ・水素脆化説: 水素吸収により結晶粒界が脆化※しSCCに至る
- ・内部酸化説: 酸素が粒界に拡散し粒界でCrなどが酸化され割れる
- ・クリープ説 : クリープによって粒界すべりが起き粒界割れに至る

※水素脆化にも以下の複数の説がある。

＜水素吸着説＞ 水素原子が金属原子に吸着することで表面エネルギーが低下し, 破壊エネルギーが低下

＜転位説＞ すべり面上を運動する転位に水素が捕捉され, すべりが阻害され, そこを起点としてクラックが進展

＜水素ガス圧説＞ 粒界などに進入した水素原子がそこで再結合し水素分子となり, 高圧を生じることで破壊

→PWSCCは, 冷却材に添加している水素に依存する可能性あり

→溶存水素濃度の最適化に取り組む

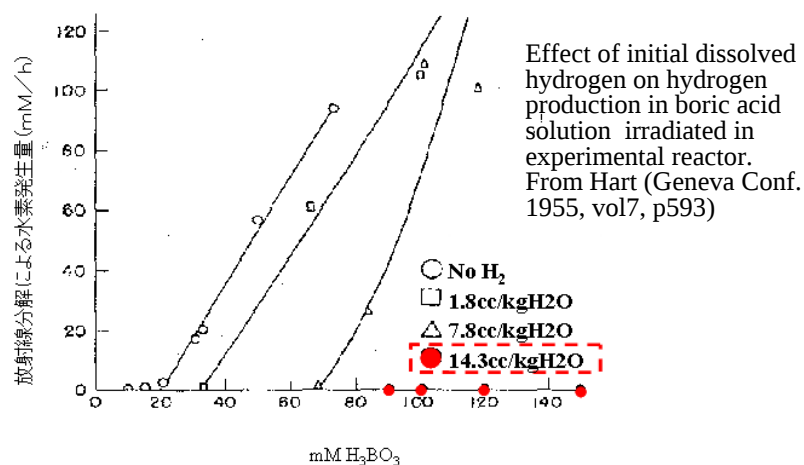
現在の溶存水素(DH)濃度管理と根拠

保安規定の範囲($15 \sim 50 \text{ cm}^3 / \text{kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$)に余裕を持たせ管理

→ 実運用: $25 \sim 35 \text{ cm}^3 / \text{kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$

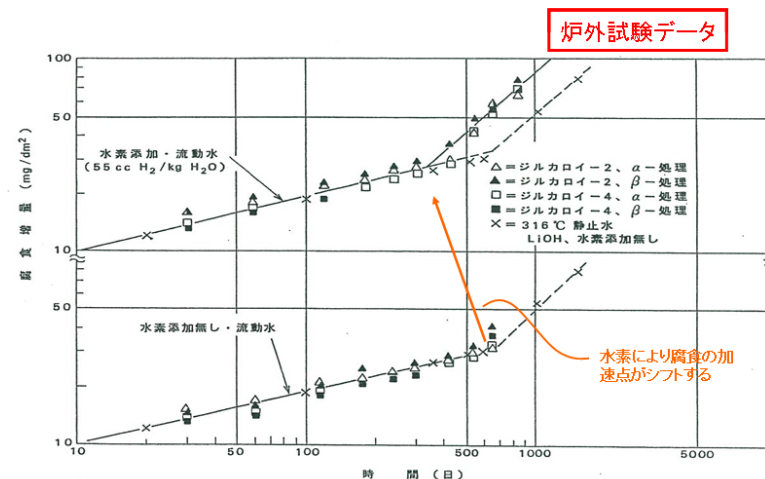
下限($15 \text{ cm}^3 / \text{kg}$)の根拠

保安規定下限($15 \text{ cm}^3 / \text{kg}$)は、Hartらの実験結果が根拠(実験温度 60°C)



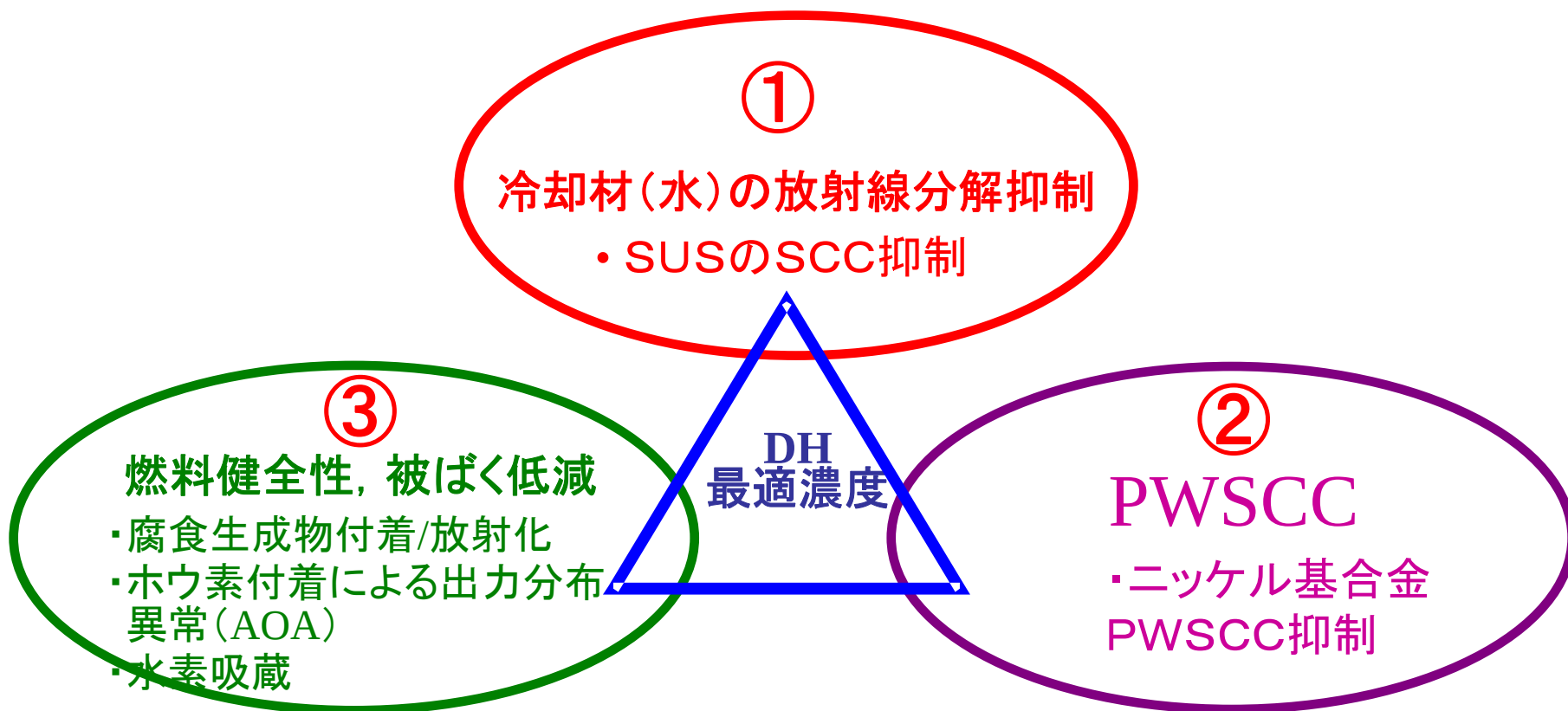
上限($50 \text{ cm}^3 / \text{kg}$)の根拠

水素濃度 $55 \text{ cm}^3 / \text{kg}$ では、水素を添加しない場合に比べてジルカロイの腐食量大



→ 保安規定範囲内であれば、現在の運用幅を広げても基本的には問題ないと考えられる。

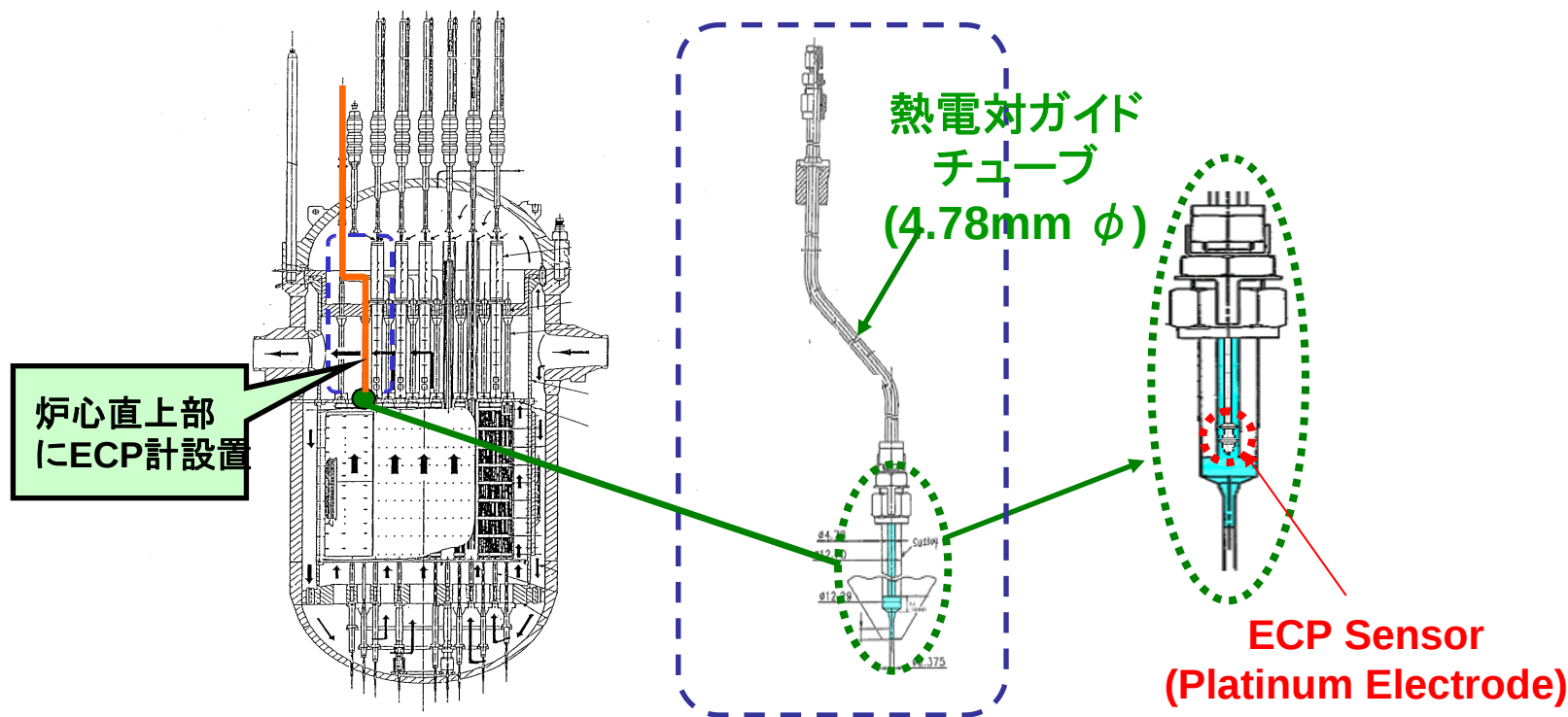
DH 最適化の際に考慮すべき点



DH濃度の最適化は、PWSCC抑制だけでなく、
・ 水の放射線分解抑制
・ 燃料健全性確保, 被ばく低減
も考慮する必要有り。

①放射線分解への影響評価

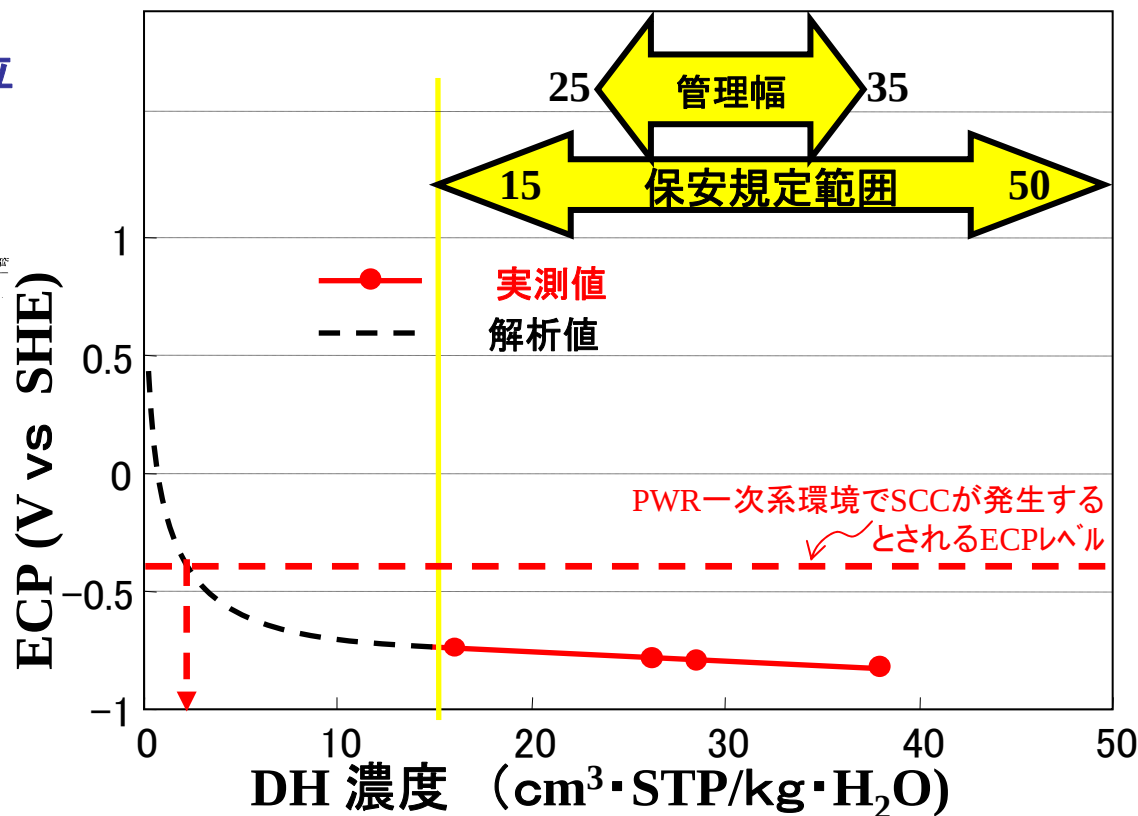
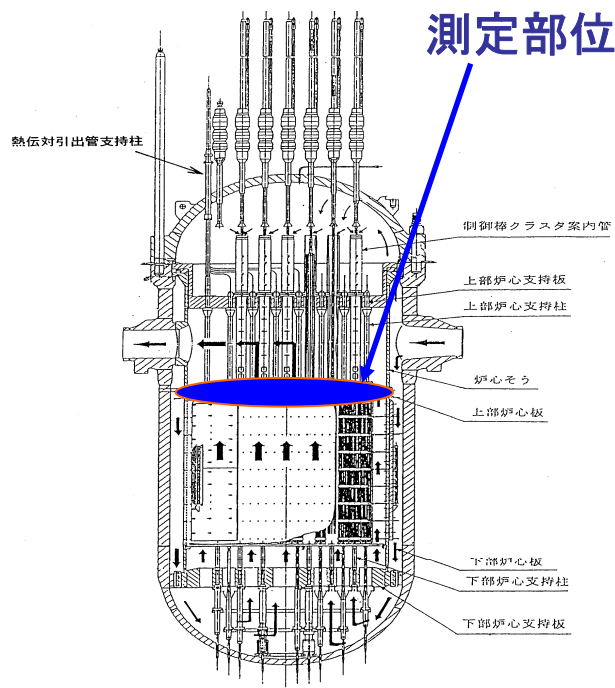
敦2において DHを15-40の範囲で変動させ，炉内で腐食電位（ECP）を計測（2005年）



炉内温度計測用熱電対ガイドチューブより，ECP計3本を装荷

①放射線分解への影響評価

ECP測定結果



- ・15cm³/kg近傍までDHを低減しても冷却材の放射線分解は十分に抑制
- ・解析では、数cm³/kgまではSCCを生じない環境を維持できると評価

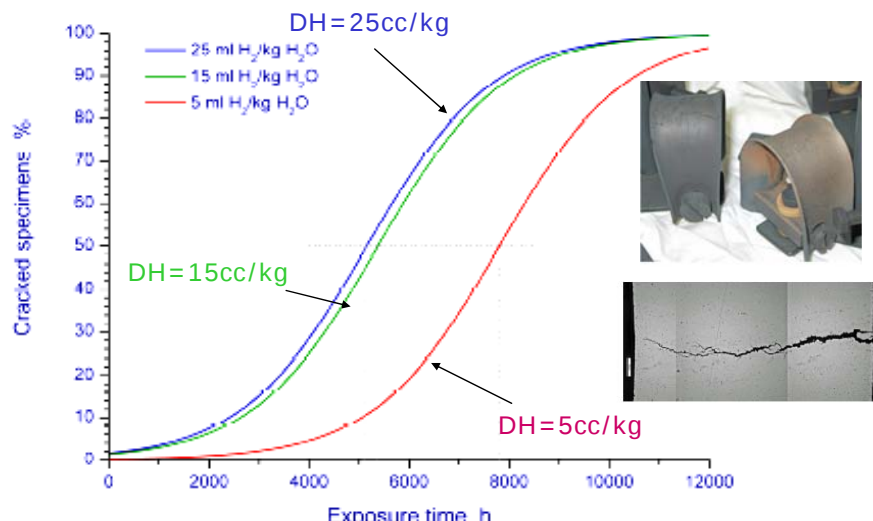
②PWSCC抑制効果(発生)

RUB試験片による亀裂発生試験(原電自社研究)

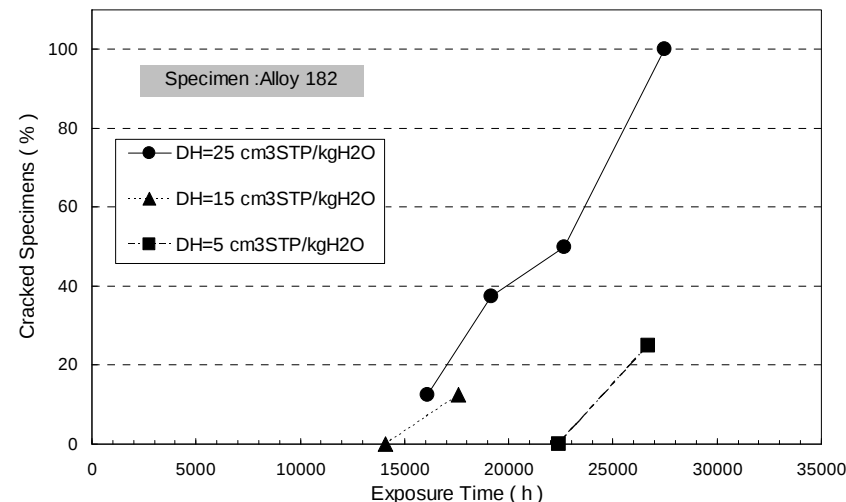
試験条件	No.1	No.2	No.3
試験材	600MA, 600TT, 182溶接金属		
温度 (°C)	320°C (PWR実機相当)		
DH (cc/kg)	25	15	5
ほう素 (ppm)	1200		
リチウム (ppm)	2.2		

- ・実機温度で試験し、温度依存性を排除
- ・600MA合金は試験完了
- ・182溶接金属は試験途中

②PWSCC抑制効果(発生)



600MA合金の溶存水素濃度ときれつ発生時間との関係



182溶接金属のDHとき裂発生時間との関係

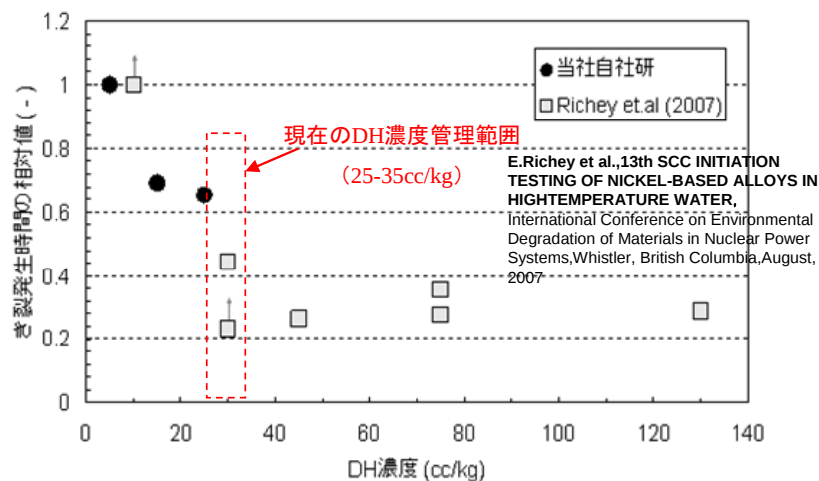
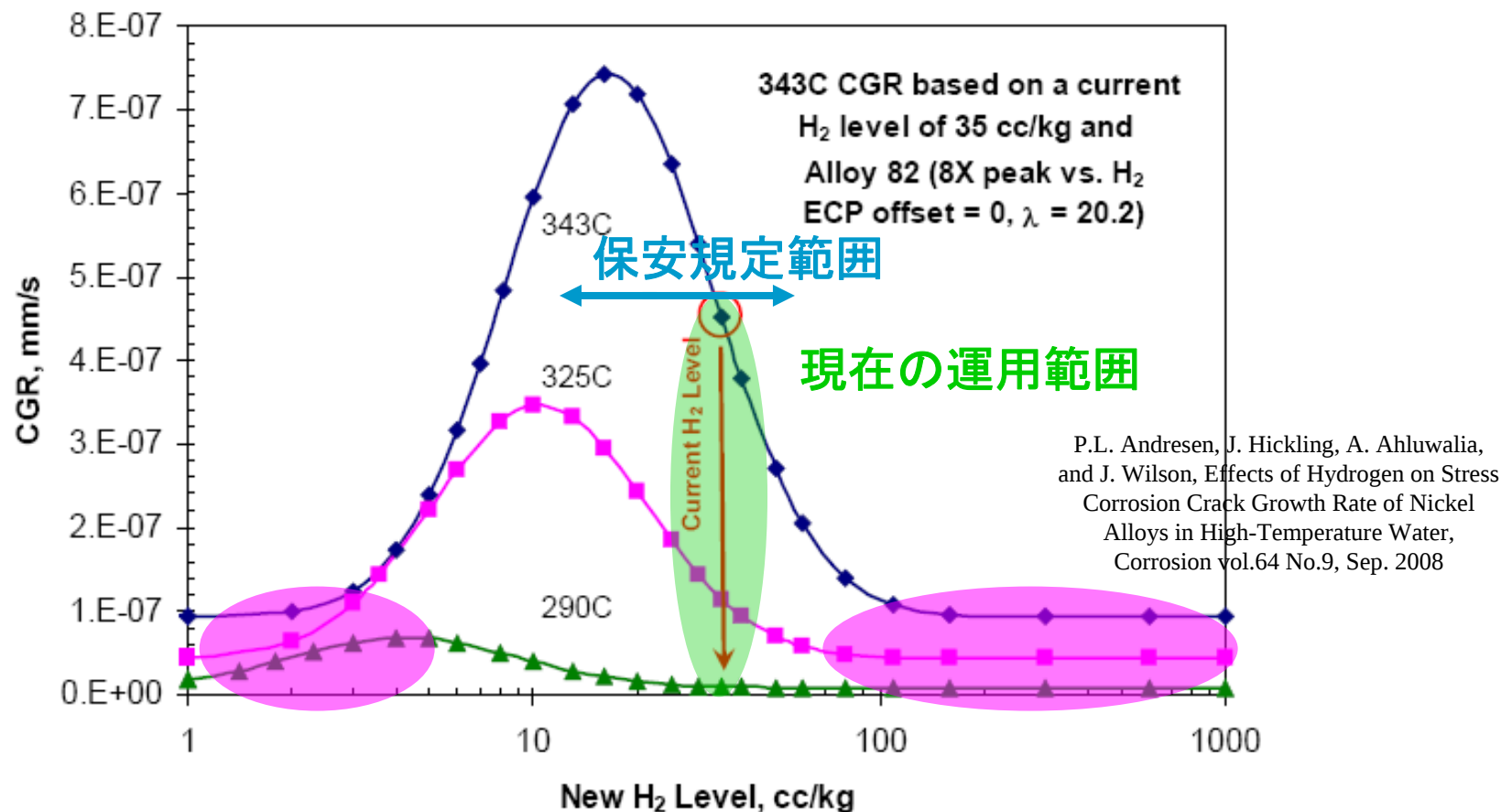


図 溶存水素濃度ときれつ発生時間との関係
(●:原電自社研 □:先行研究)

・DHが低いほどPWSCCき裂発生時間が長くなる。

・更に, 保安規定下限値以下 ($5\text{cm}^3/\text{kg}$)まで低下すると大幅に延長される。

②PWSCC抑制効果(進展)

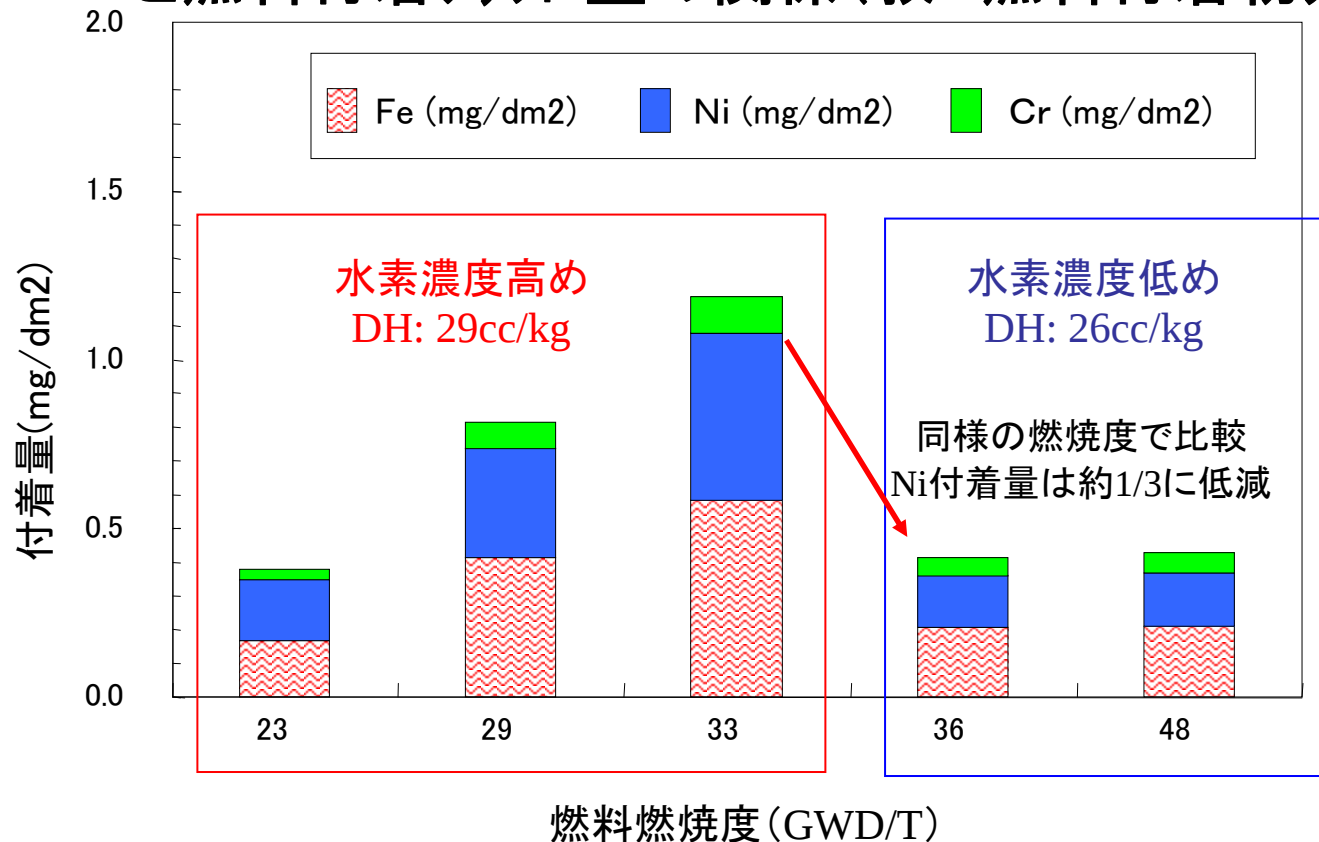


Crack growth rate dependency on DH content based on model analysis by EPRI

現在のDH運用範囲より 高濃度側, 低濃度側でき裂進展速度が低下する。

③燃料健全性, 被ばく低減効果の評価

DHと燃料付着クラッド量の関係(敦2燃料付着物分析結果)



K.Hisamune et al., JAIF conference, 1998

- ・DH低減により燃料付着物が減少する傾向
→ 更にDHを低減することで, 被ばく低減, クラッド付着による燃料出力分布異常(AOA)が期待できる。

DH最適濃度の検討

① 水の放射線分解抑制
(ステンレス鋼のSCC抑制)

効果小

効果大

② PWSCC 発生抑制

進展抑制

効果大

効果小

効果大

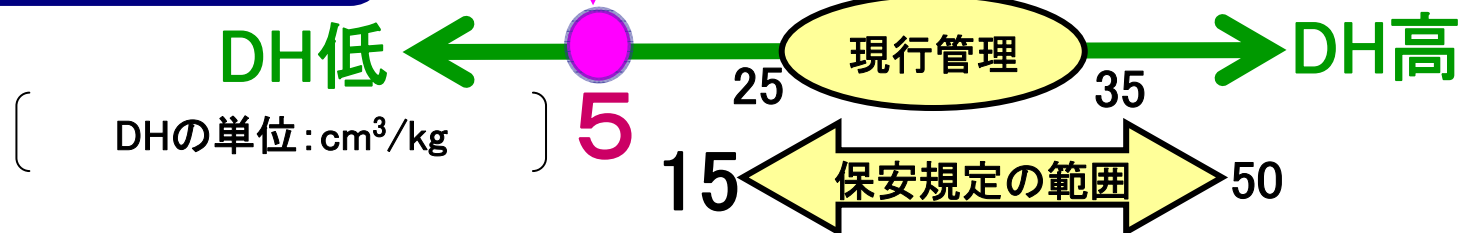
効果小

効果大

③ 燃料表面クラッド付着
(被ばく低減)

効果大

効果小



- ・現在の保安規定下限値より低い $5\text{cm}^3/\text{kg}$ 付近が最適濃度と考える。
- ・保安規定下限値($15\text{cm}^3/\text{kg}$)の見直しが必要。

敦賀2号機におけるDH低減計画(案)

- 2011年度, 敦賀2号機において保安規定下限値($15\text{cm}^3/\text{kg}$)まで低下
- 最終目標は保安規定下限値以下の $5\text{cm}^3/\text{kg}$
- このためには, 保安規定($15\sim 50\text{cm}^3/\text{kg}$)の変更が必要であり, 更なる根拠データの蓄積に取り組む

＜DH $5\text{cm}^3/\text{kg}$ を実現するための検討課題＞

①水のラジオリシスへの影響

- ・ラジオリシス解析コードの精度向上, 照射試験による検証
- ・実機でのラジオリシス モニタリング(炉内ECP計測)

②燃料健全性評価

- ・実機被覆管の腐食挙動モニタリング, 照射試験による評価
- ・AOAへの影響評価

③SCCデータの拡充

- ・PWSCき裂発生, き裂進展, SUSのIGSCC, IASCC

④DH制御への影響評価

- ・低濃度での濃度コントロール性
- ・バランスガス(窒素)によるアンモニア生成への影響

国内でのDH最適化検討体制

DH最適化検討委員会

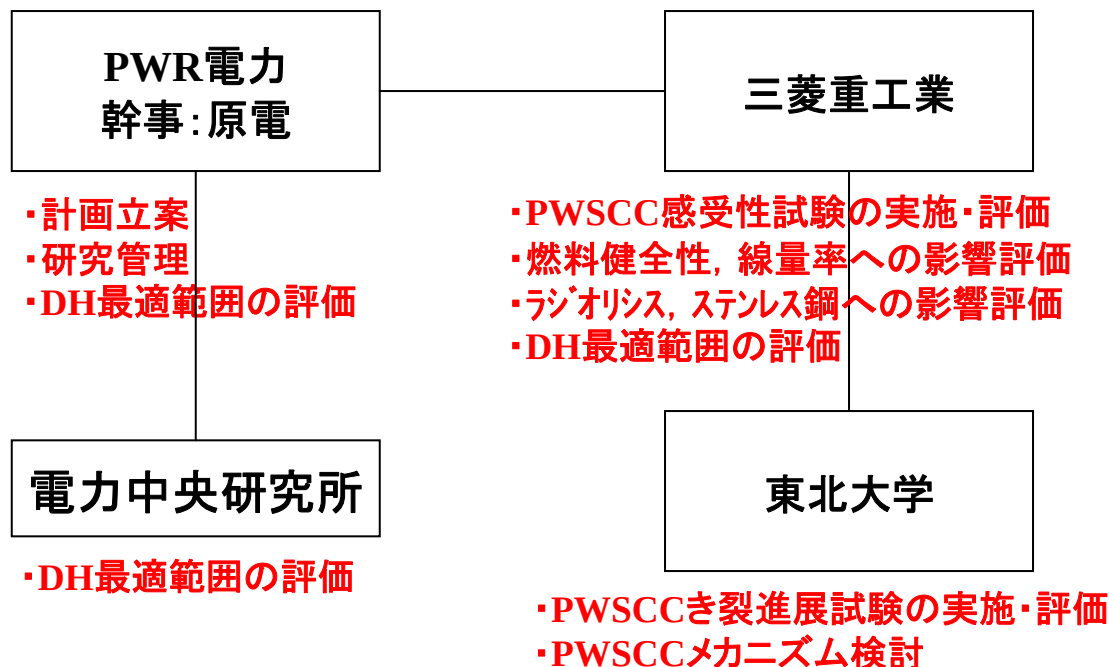
- ・主査: 庄子先生(東北大)
- 【材料】
- ・米澤先生(東北大)
- 【水化学・燃料】
- ・石樽先生(東大名誉教授)
- ・勝村先生(東大)
- ・山中先生(阪大)
- ・電中研
- ・INSS
- ・PWR全電力
- ・三菱重工業
- ・事務局: 電中研

助言

報告

PWR電力共通研究

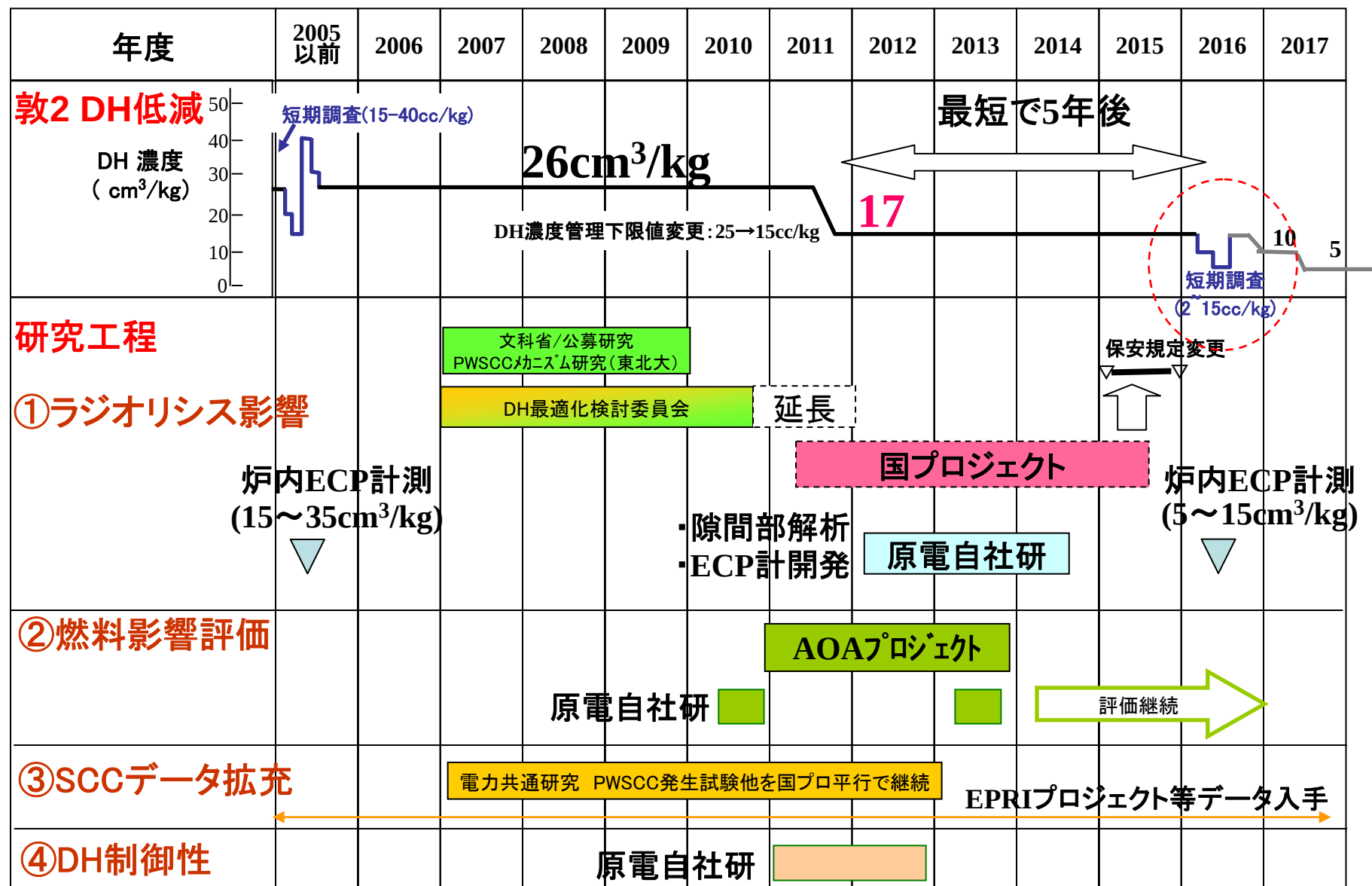
H19～H20年度 「PWSCC抑制のためのPWR一次系溶存水素濃度最適化に関する研究」
H20～H21年度 「Ni基合金の290℃におけるPWSCC溶存水素濃度依存性に関する研究」



委員会報告書(公開)

電共研報告書(非公開)

敦賀2号機におけるDH低減工程(案)



DH濃度最適化に対する世界の動向

- **米国(EPRI)の動向(高DH)**

- 水の放射線分解抑制, PWSCC進展速度上昇に懸念のない高DH濃度側を指向(50→**80cm³/kg**)
(但し, 高DH化を断念したとの間接的な情報あり)

- **日本の方向性(低DH)**

- PWSCC進展特性だけでなく発生特性にも着目
- ステンレス鋼のSCC(放射線分解)は確実に抑制できる範囲を確保
- 燃料への影響、被ばく線源低減にも着目
- **あらゆる観点から総合的に最適管理幅を追及**

- **欧州の動向**

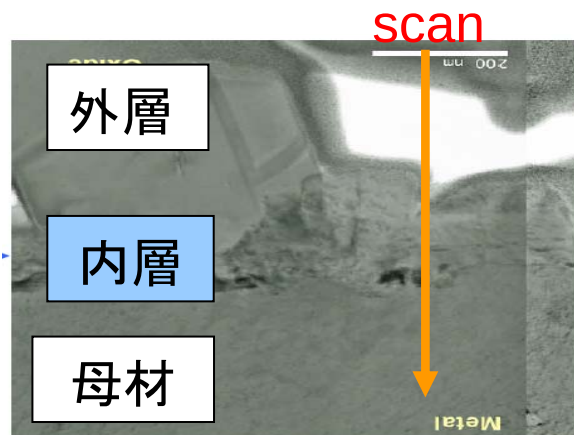
- EdF等は特に方向性を示してはいない
(低DH側に興味があるが日米の様子見)

まとめ

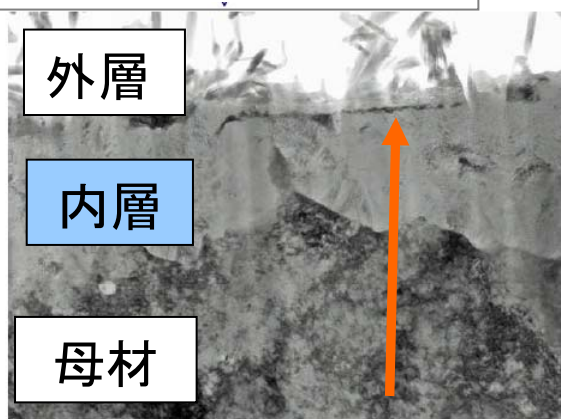
- ・高経年化に伴いPWR一次系 ニッケル基合金のPWSCCが国内外で顕在化
- ・ハード対策(材料改善, 応力緩和)だけでなく, 環境対策(DH最適化)による対策が必要 → DH最適化による緩和
- ・最適DHは, 燃料健全性, 被ばく低減などあらゆる観点から総合的に評価し, $5\text{cm}^3/\text{kg}$ 付近と推定
- ・敦賀2号機において, 保安規定下限値(DH低減: $15\text{cm}^3/\text{kg}$)までDHを低減し, 根拠データを蓄積した上で $5\text{cm}^3/\text{kg}$ を目指す。
→産・官・学の連携が必須

<参考>亀裂発生試験片断面観察結果(原電自社研究)

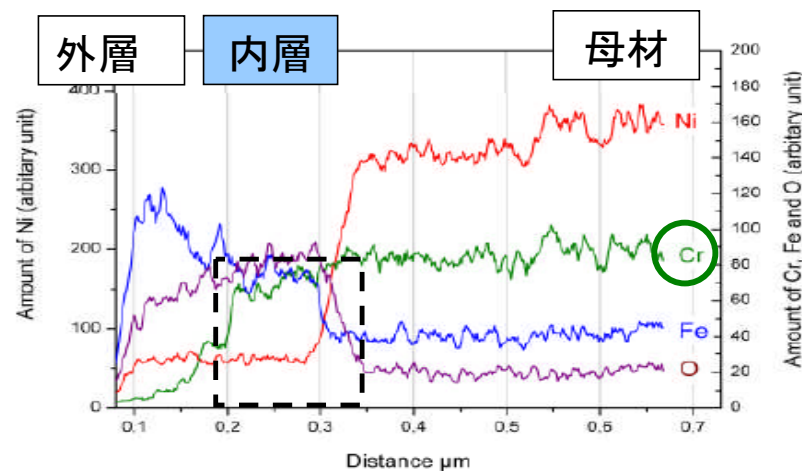
DH: 25 cm³/kg



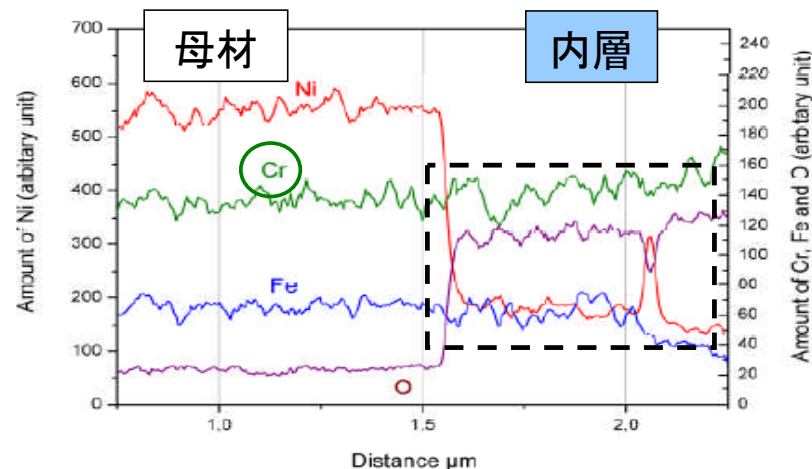
DH: 5 cm³/kg



TEM/EDS 分析



内層は
Cr, Fe, O
(40~100nm)



内層は主に
Cr, O
(~500nm)

DH: 5 cm³/kgで形成される内層皮膜はCrリッチで厚い

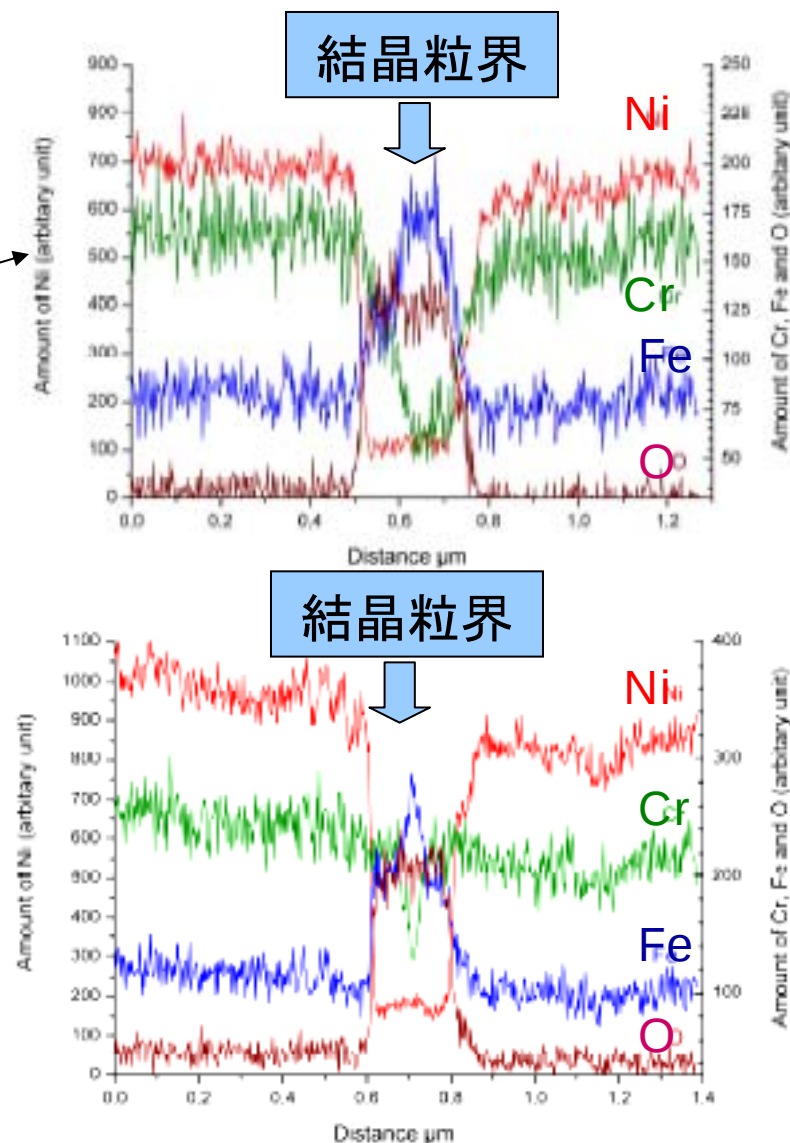
<参考>亀裂発生試験片断面観察結果(原電自社研究)

TEM/EDS 分析



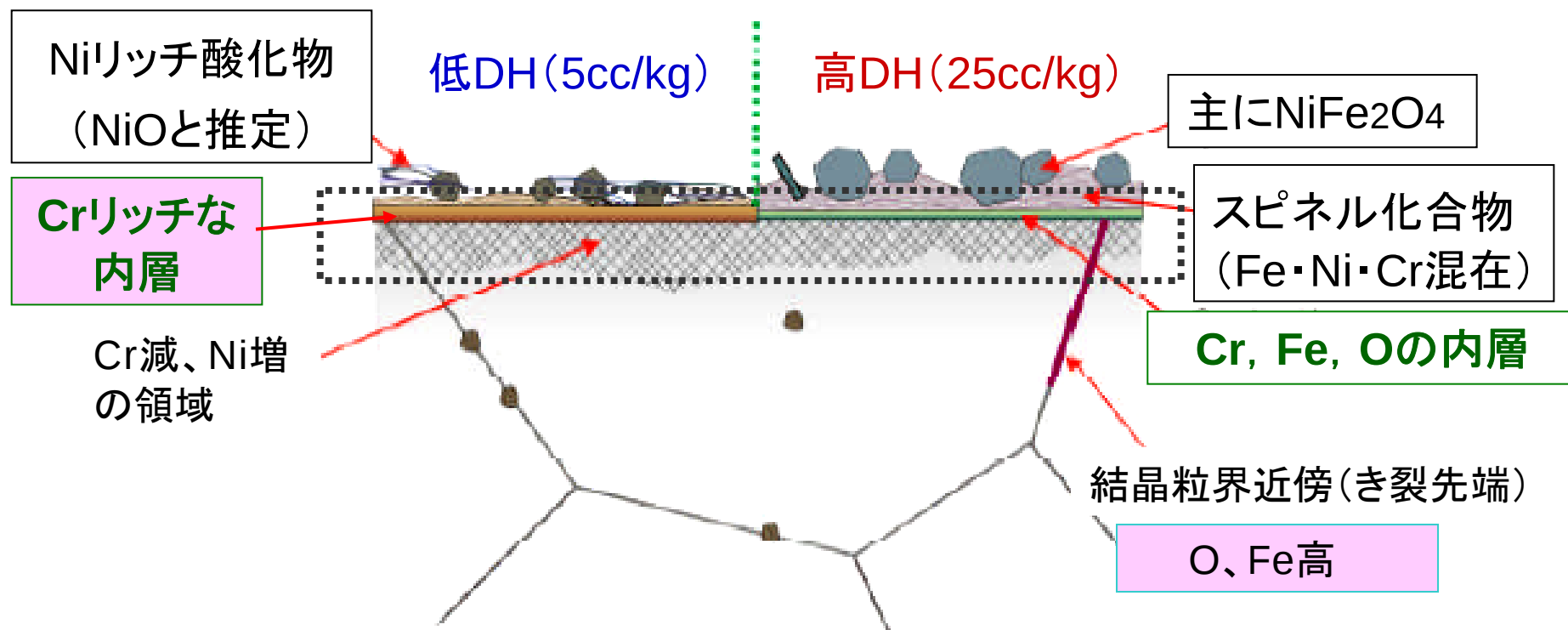
き裂先端の結晶粒界近傍

結晶粒界はNiが欠乏し, O, Fe含有率が高いことが確認された。



<参考>亀裂発生試験片断面観察結果

まとめ



- ・Crリッチな内層が、PWSCC発生感受性に関与している可能性あり
- ・き裂発生部の粒界でFe, O含有率が高くなっている理由は今後継続して検討

THE END

Thank you for your attention