

ステンレス鋼に関する PWR条件下でのSCC事例

(株)原子力安全システム研究所

寺地巧

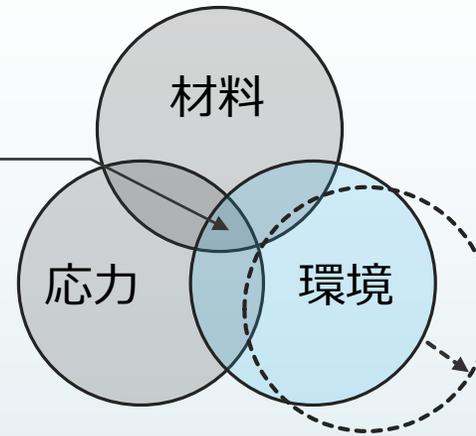
本報告で取り扱う内容

1. 応力腐食割れ(SCC)事例の概要
2. O3スプレー配管でのSCC事例
3. EDFで報告された配管のSCC
4. ATENAにおける取組

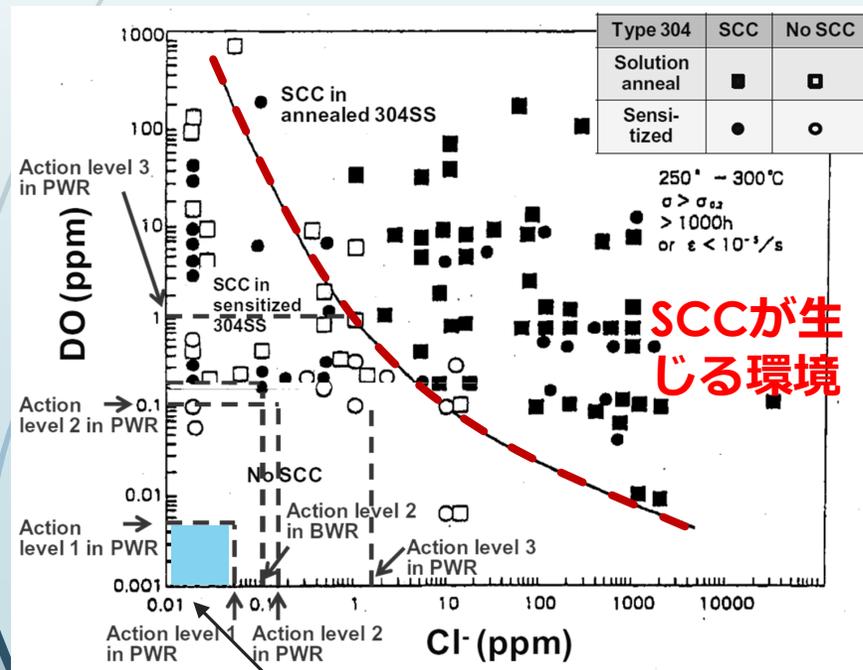
原子力発電所におけるステンレス鋼のSCCへの水化学の影響

応力腐食割れ (SCC)

金属材料に生じる割れ。水化学が影響する材料劣化事象として知られる。



ステンレス鋼のSCCへの水化学影響

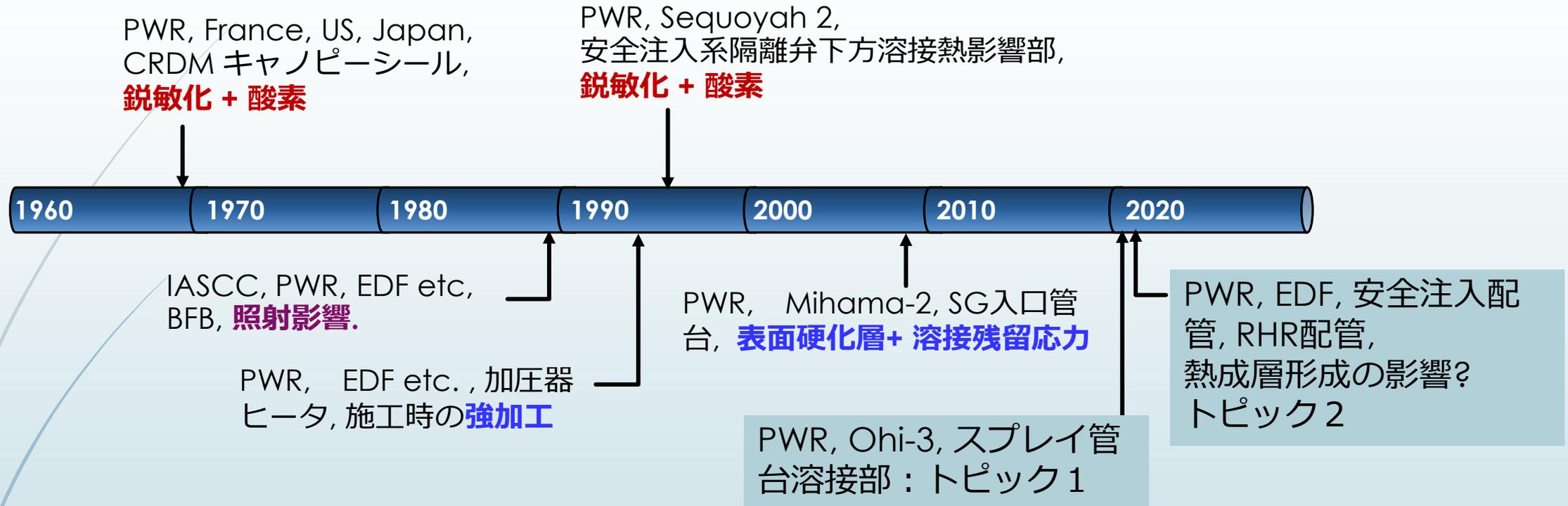


SCCの環境緩和

- 不純物(Cl^- , F^- , SO_4^{2-}) の低減
- 酸素の低減
- 溶存水素濃度の最適化
- (亜鉛注入)

PWR1次系は、SCCが起きないとされている水化学条件が維持されている。

原子力発電所におけるステンレス鋼の主要なSCC事例



- SCCが報告されてきたのは、**酸素**を含む環境下、高**照射**条件、施工時の強**加工**に限定されていた。
- 2020年代になって、特異な粒界割れが報告されている。

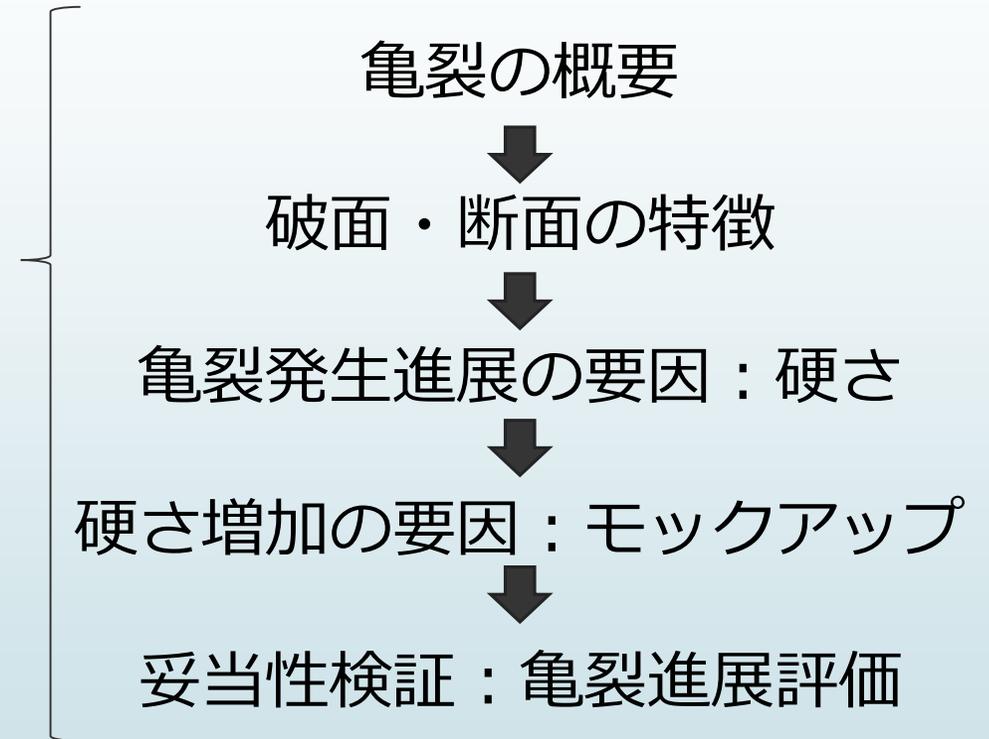
本報告で取り扱う内容

1. 応力腐食割れ(SCC)事例の概要

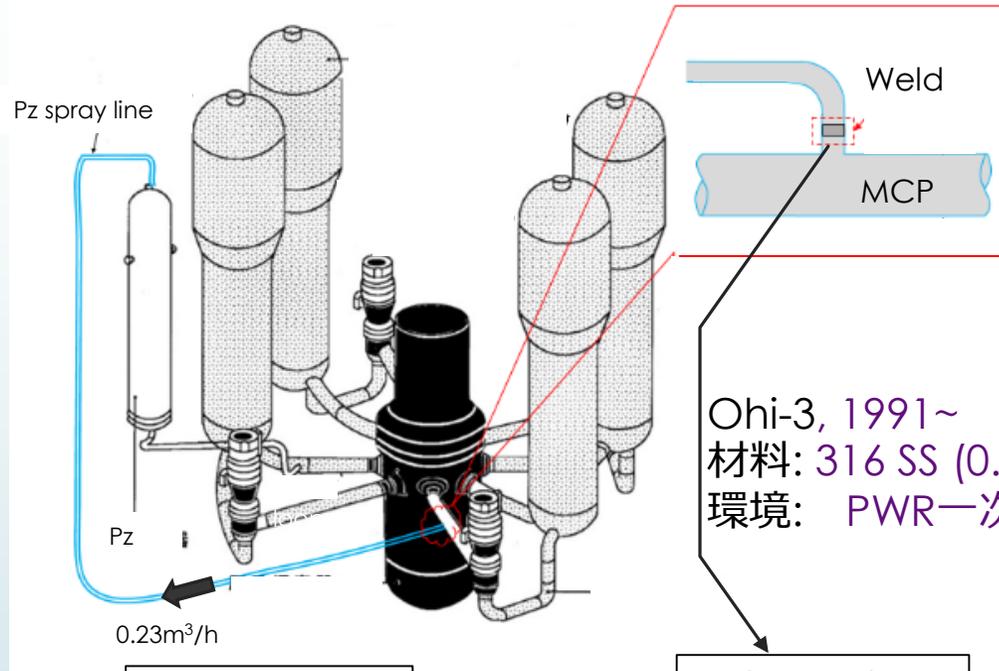
2. O3スプレイ配管でのSCC事例

3. EDFで報告された配管のSCC

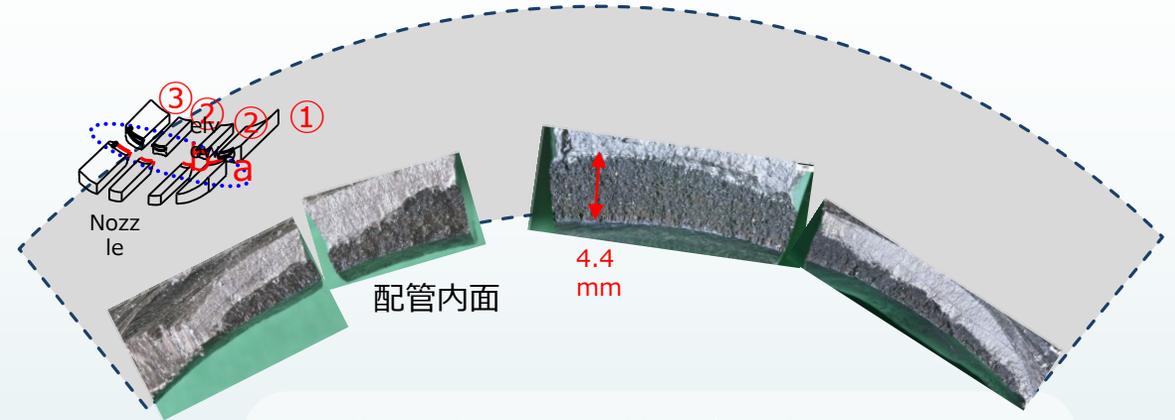
4. ATENAにおける取組



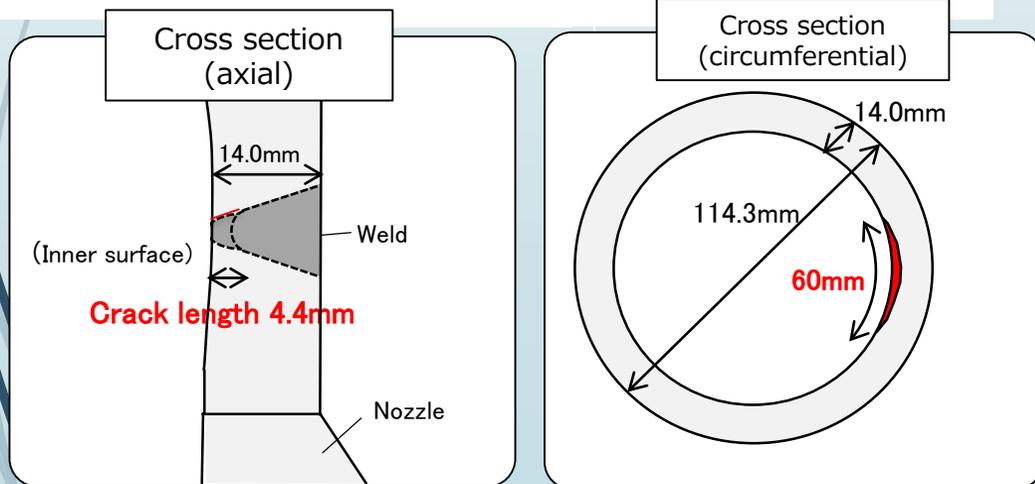
大飯3号機スプレイ配管における亀裂の概要



Ohi-3, 1991~
 材料: 316 SS (0.04%C)
 環境: PWR一次系水 (290℃)

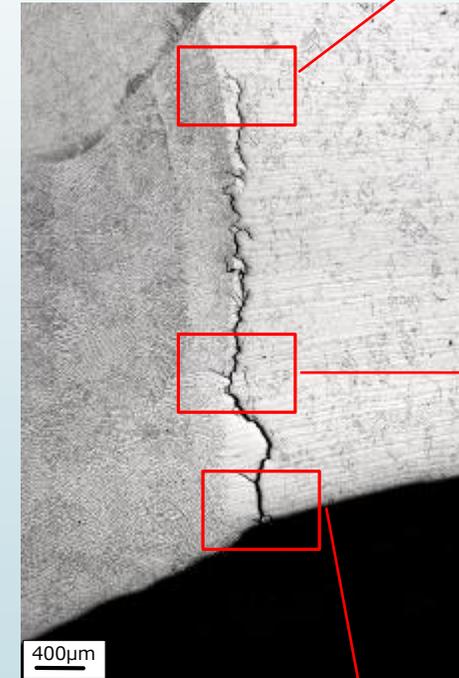
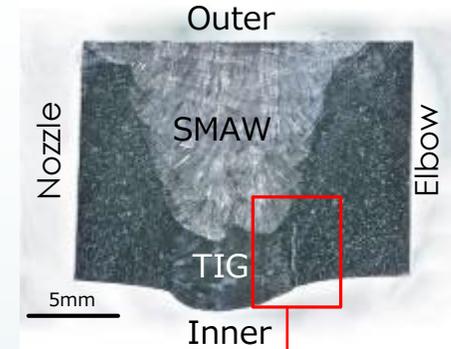
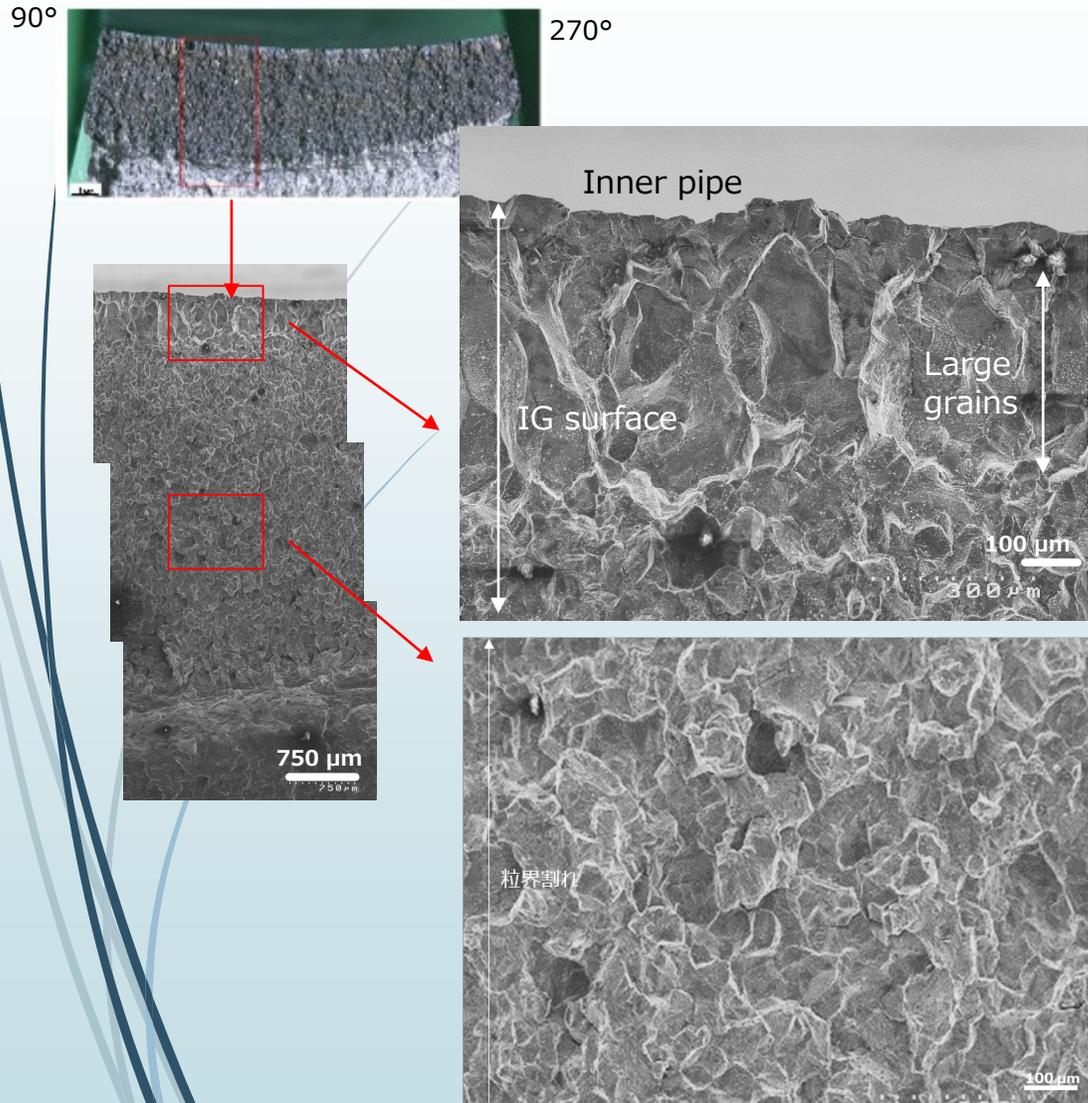
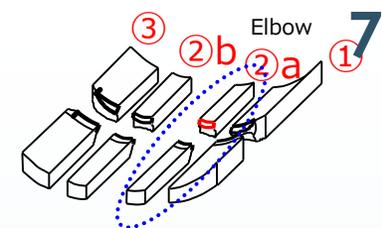


- 典型的な円弧状の亀裂
- 腐食生成物に覆われた破面
- 最大深さ 4.4 mm



- 共用期間中検査 (ISI) において、PWR1次系スプレイ配管の溶接熱影響部にて亀裂を検出
- 316ステンレス鋼の溶接熱影響部に、周方向亀裂が生じていた。
- 酸素の影響が想定されない環境条件

亀裂の破面及び断面の状況

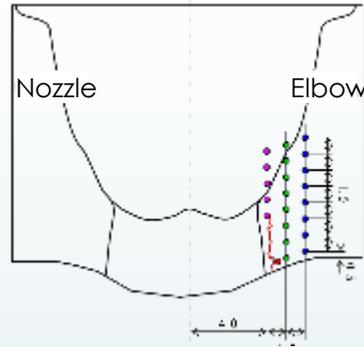
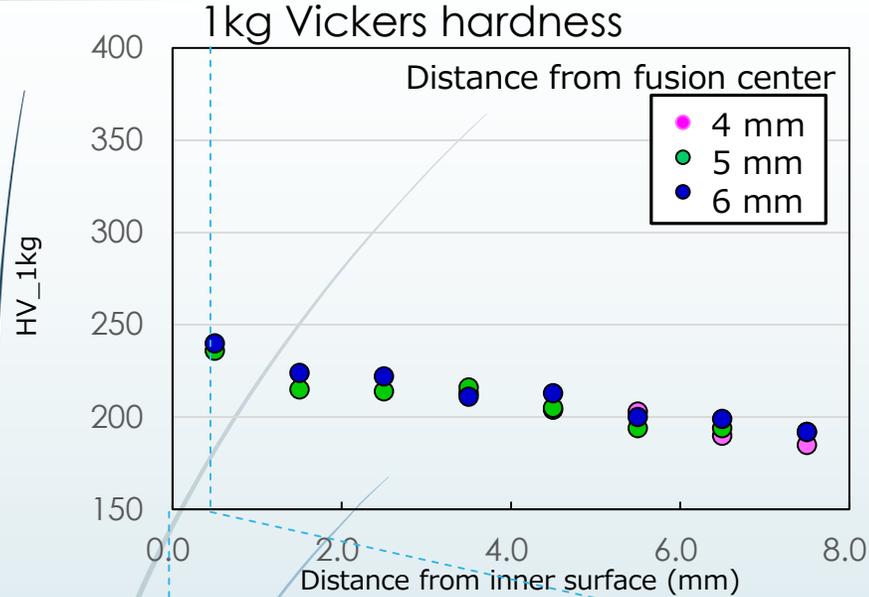


Cross-section

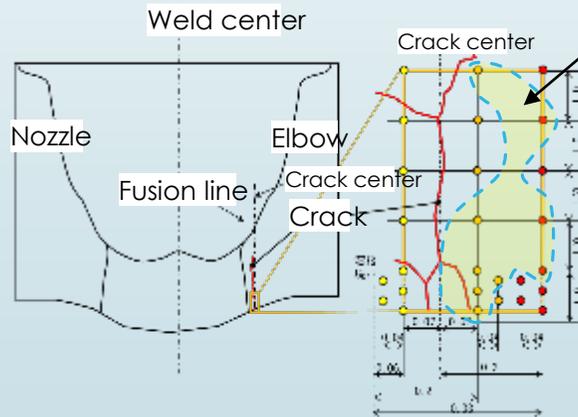
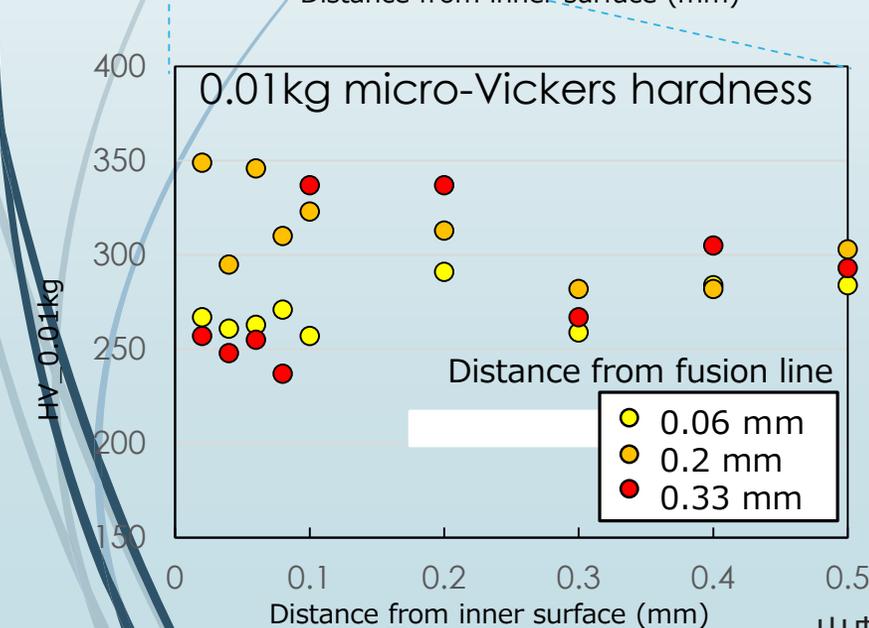


• 粒界型の破面形態が観察され、SCCが進展したものと判断された。

亀裂発生進展の要因：硬さの特異性



- 1kgのビッカース硬さ測定値は180-240HV1



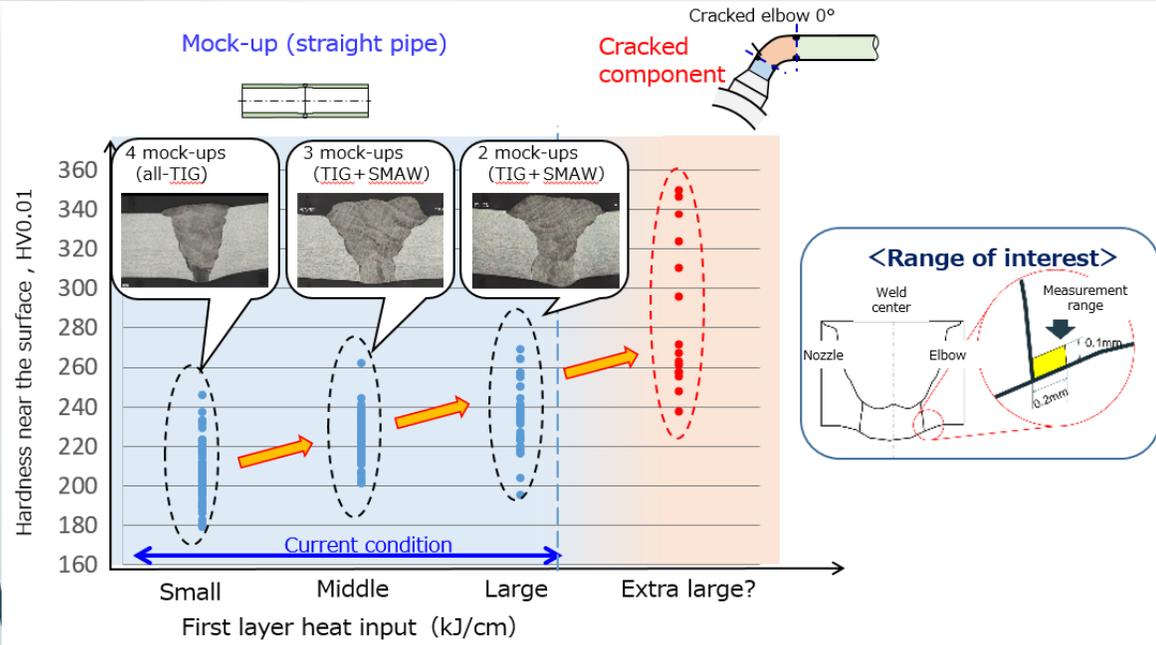
>300HV

- **表面近傍**では、10gで局所的な硬さを評価した結果では、一部に**300HV0.01**

* 補足) 10gでは1kgでの測定より高いHVとなることが知られている。

- **特異な硬さが亀裂発生・進展に影響したと推定された。**

硬化の要因 :モックアップを用いた検証

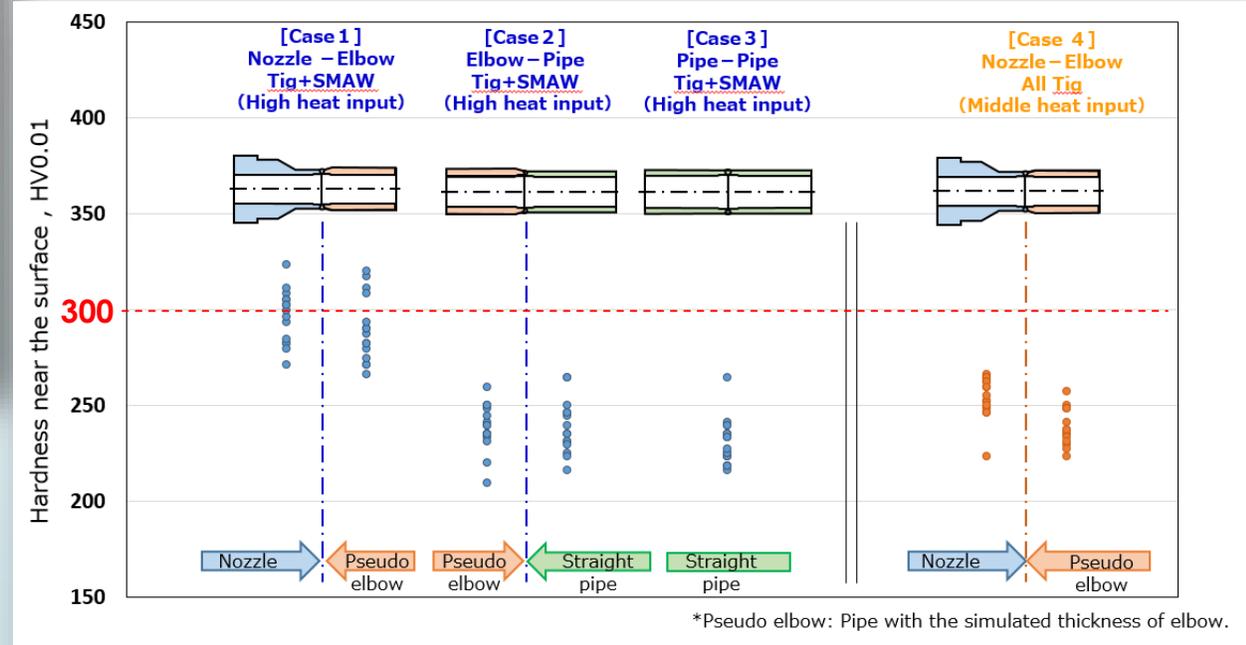


直管を用いた硬さへの入熱影響

- 初層高入熱が硬さを増加させることを確認
- 直管では300HV0.01が再現されず。

硬さへの配管形状の影響

- Tig+SMAW条件の管台と模擬エルボ条件+大入熱で**300HV0.01**を超える硬さを確認。



特異な硬さが生じた理由は

- 高い初層入熱
- 管台とエルボ接続による高い剛性

可能性が否定できない部位は全て検査。
2024年7月時点で述べ896か所に対して検査を実施²。
有意な指示は確認されていない。

出典 1 : Terachi et al. ICONE 30, Kyoto, 1087, 2023

出典 2 : ATENA、第25回新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合資料、2024年8月22日

妥当性検証：亀裂進展速度の評価 評価手法

既往知見と比べて、亀裂のサイズは妥当か？

点検頻度の妥当性を確認するには、亀裂進展評価が重要。

$$CGR = 3.19 \times 10^{-18} K^{2.5} HV^{6.0} \exp(-85000 / RT)$$

EPRI式に応力、硬さを導入することで、亀裂の進展評価が可能

亀裂進展式
EPRI, MRP-458
として提案されている。

残留応力推定値
(FEMによる計算)

実機の特異な硬さ
(測定値)

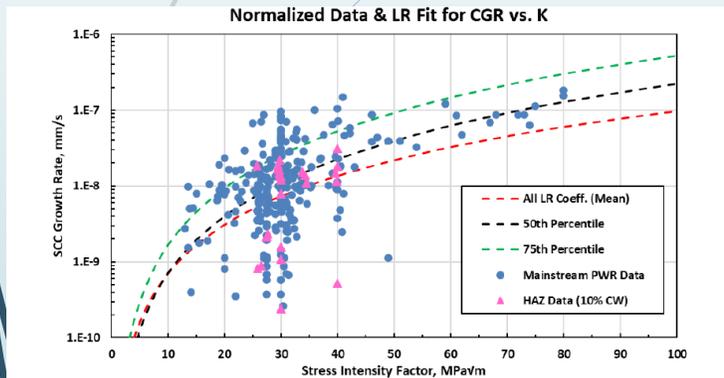
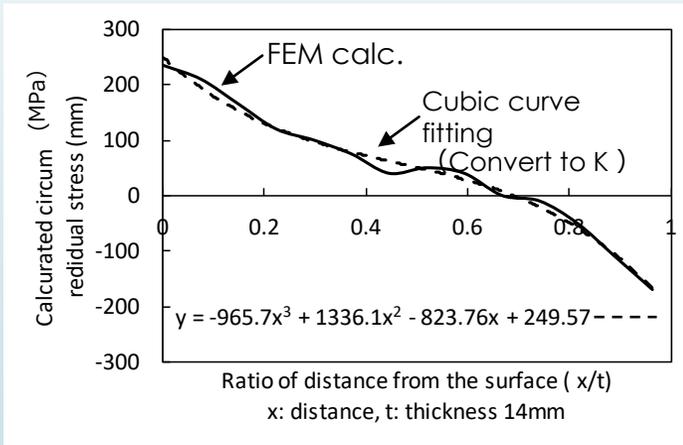
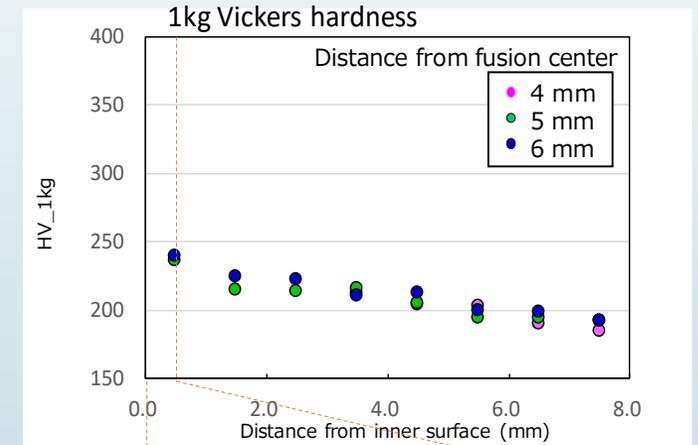


Figure 3-20
SCC growth rate data (mm/s) vs. K with the 50th percentile and 75th percentile curves. The individual data points are normalized to, and the curves are drawn for $H_v = 220$ and 290°C .

+



+



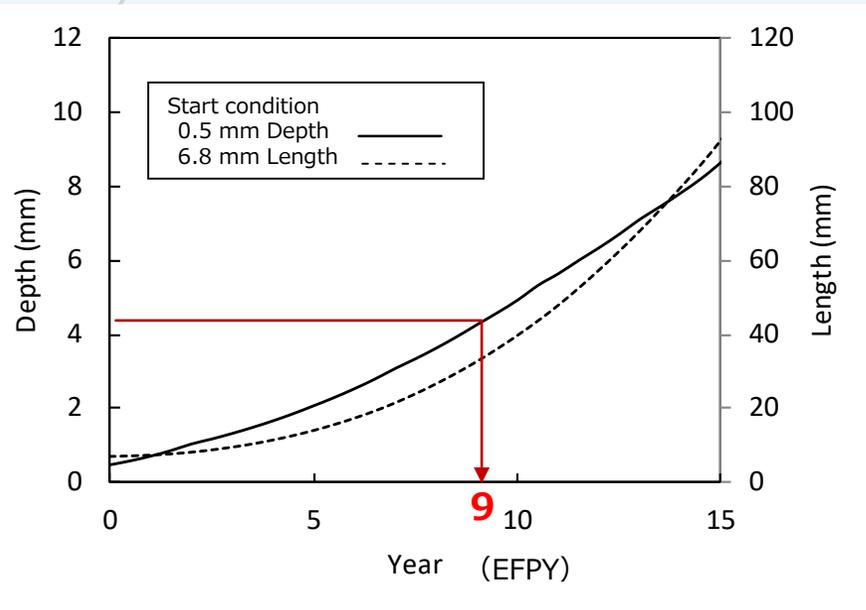
・深さ方向の硬さ分布

計算条件：溶接残留応力 (Tig + SMAW) + 運転応力(100MPa) :
(<https://www2.nra.go.jp/data/000339736.pdf>)

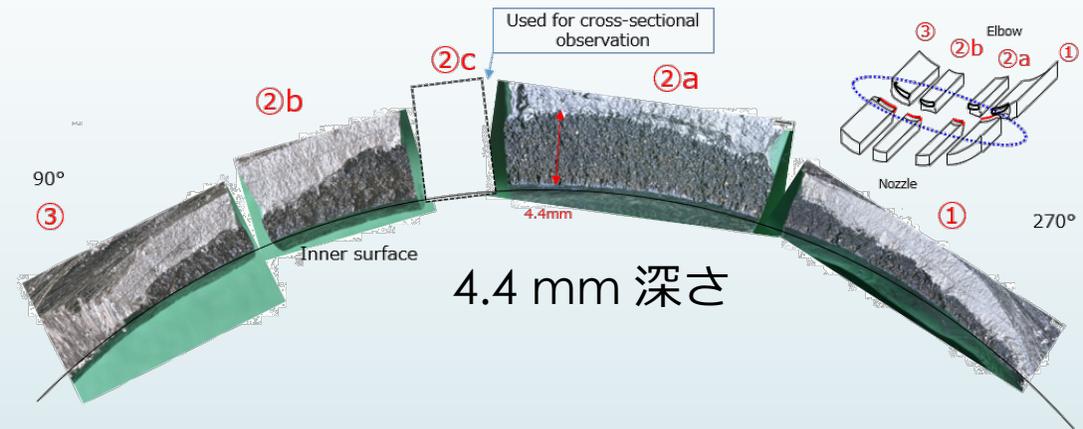
類似亀裂が生じた場合の進展速度推定手法 その2

微小亀裂(0.5 mm) が観察された 4.4 mm深さに成長するまでに要する時間を計算した。

初期亀裂:
(0.5mm:Ohi-3 の粗大粒の大きさ)



EPRI MRP-458, 75%包絡式
硬さ: Ohi-3 測定値
応力: FEM計算値



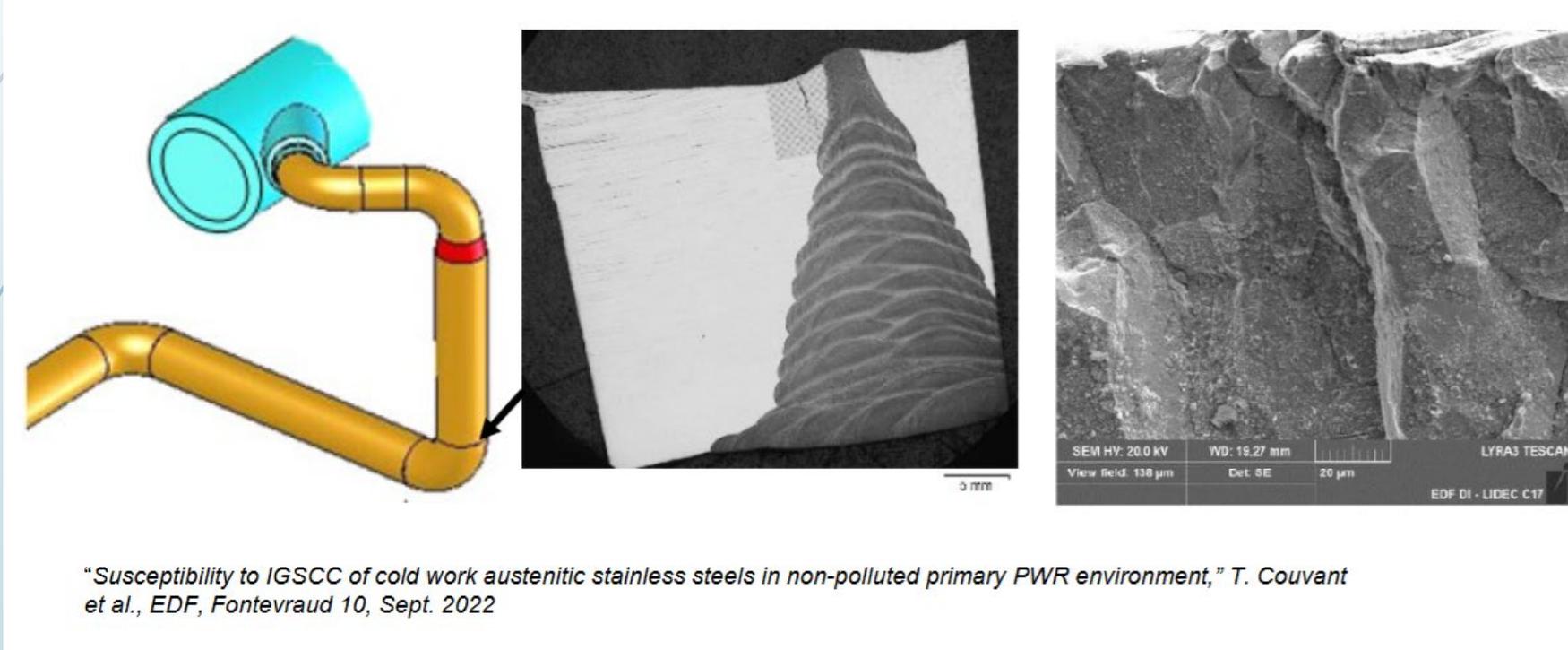
- 75%包絡線(保守的な計算評価式) で0.5 mmの亀裂が4.4mmに成長するのに約9年。
- 19.3EFPYのプラント運転期間と比較しても妥当な値。
- 計画的に評価するところで亀裂の検知が可能。

本報告で取り扱う内容

1. 応力腐食割れ(SCC)事例の概要
2. O3スプレー配管でのSCC事例
3. EDFで報告された配管のSCC
4. ATENAにおける取組

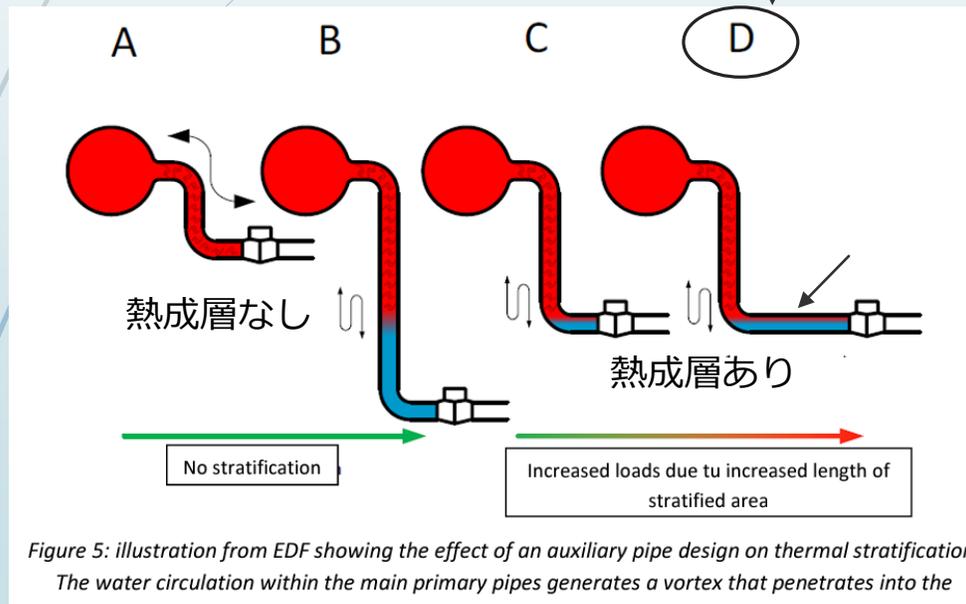
EDFにおけるステンレス鋼のSCC 2021年

- 2021年10月 Civaux 1号機の安全注入配管で検査時に亀裂が確認された。
- 破壊調査でSCCと判明。
- その後、Civaux 2号機でも類似の亀裂が確認された。

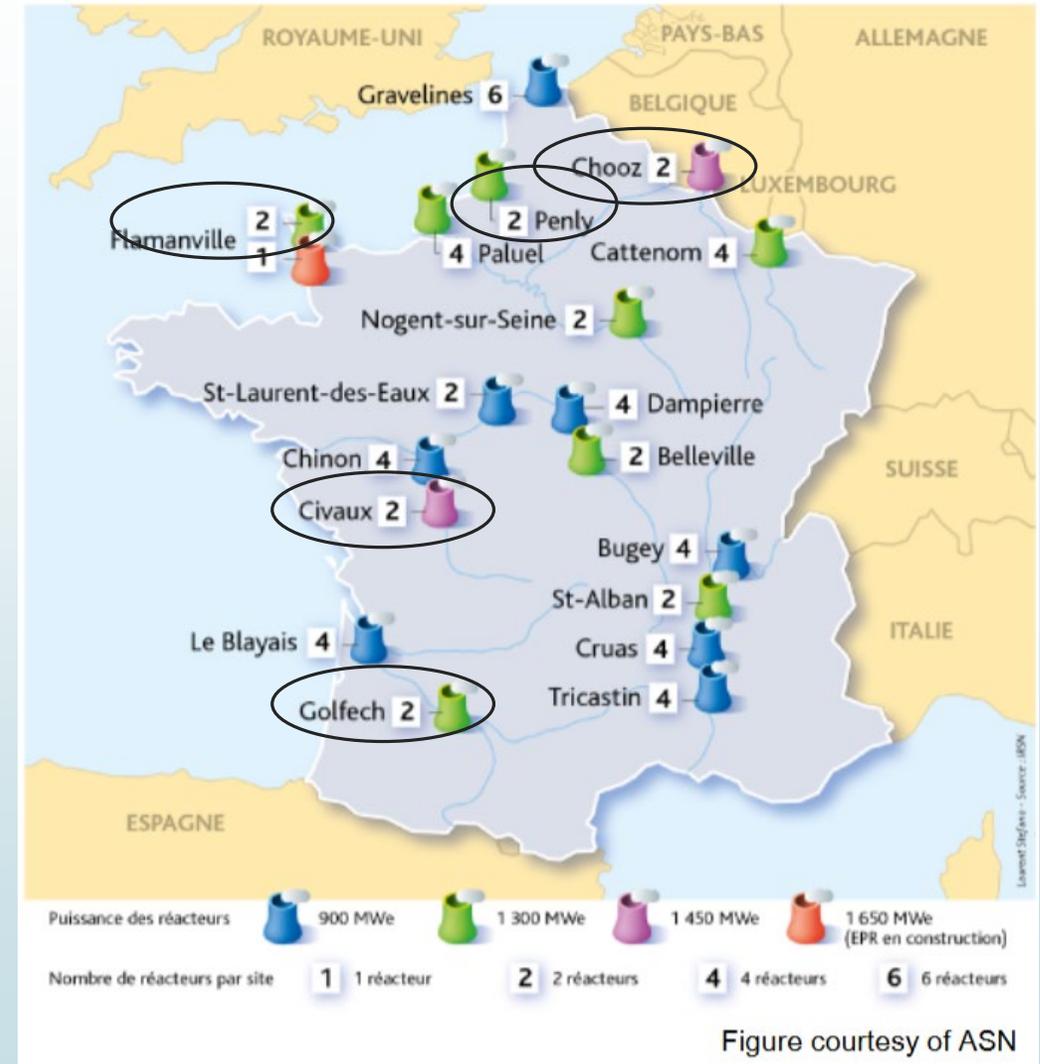


EDFにおけるステンレス鋼のSCC 2022年

- 検査範囲を拡大した結果、Chooz-B2/B1、Penly-1、Cattenom-1/3, Flamanville-2, Golfech-1でも新たに亀裂が報告された。
- 多数の亀裂が報告されたが、深さは~6mm。
- 熱成層が形成する設計のプラントに亀裂が生じていることが報告された。

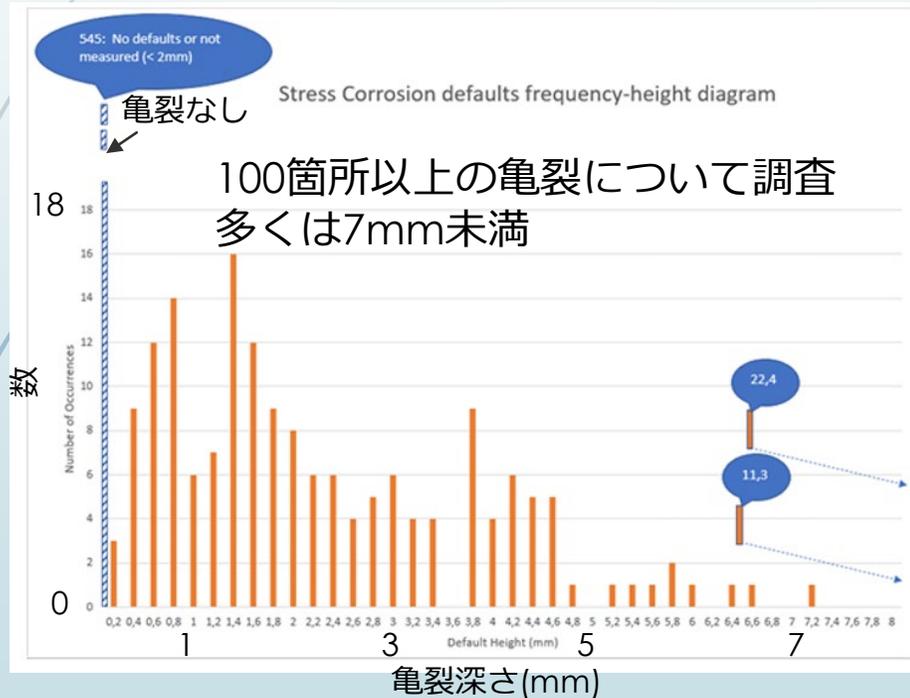


推定発生要因：熱成層の影響？



EDFにおけるステンレス鋼のSCC 2023年

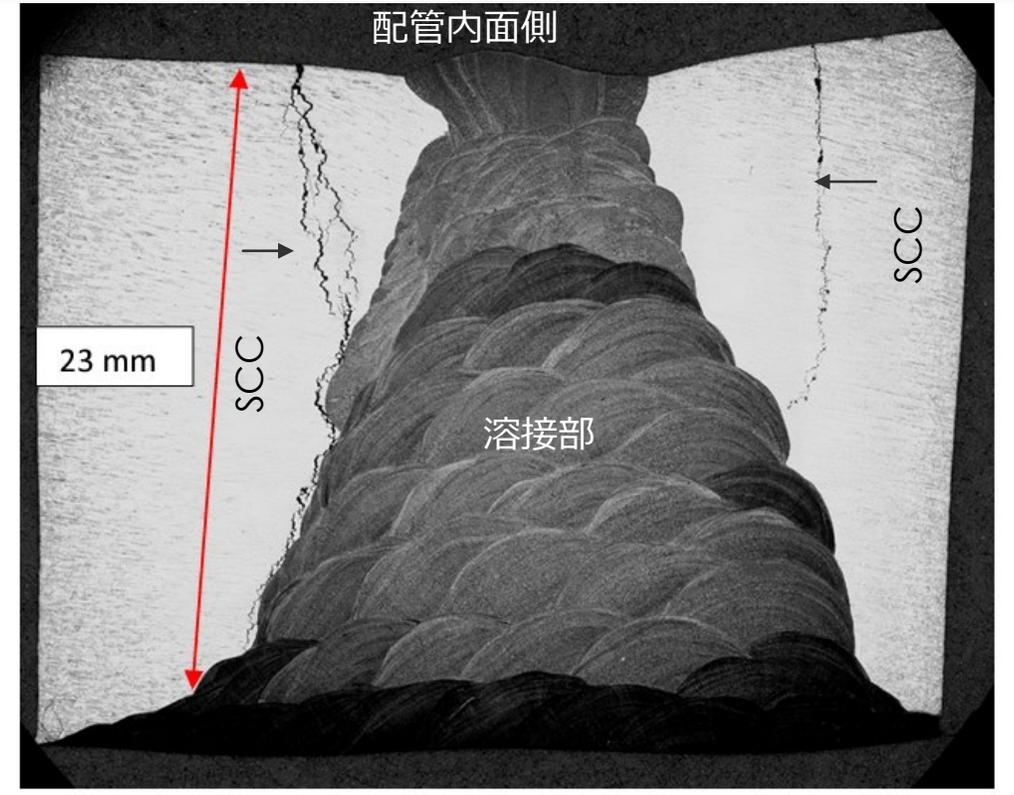
- 板厚の85%に至る比較的深い亀裂がPenly1号機で確認された。
- 2度の補修溶接が行われた領域で特異な応力状況となっていたと考えられている。



亀裂深さの分布

出典：WENRA report, 2023,

<https://wenra.eu/sites/default/files/publications/WENRA%20recommendation%20on%20SCC.pdf>

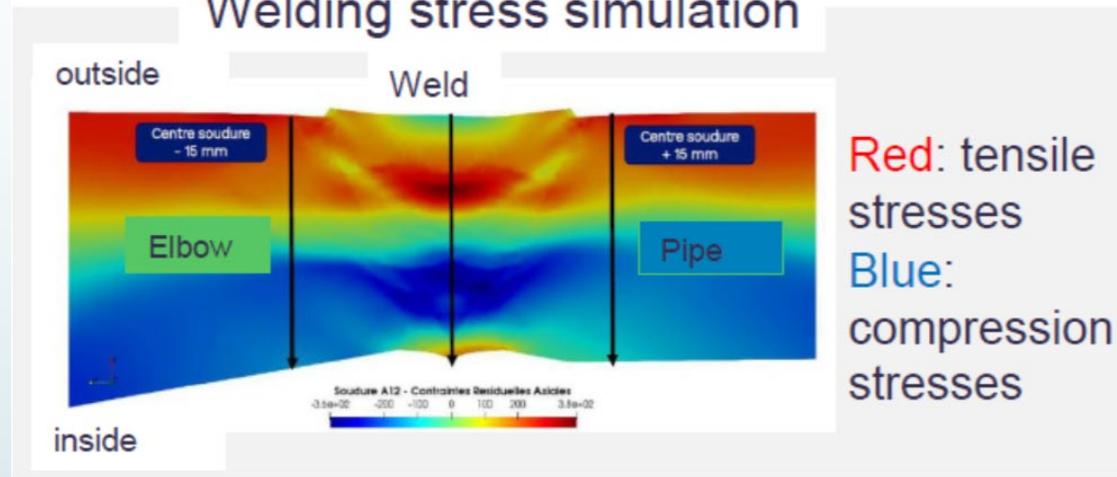


最大亀裂 (Penly1)の断面観察像：補修溶接が実施された特異な領域で、亀裂深さ23mm (板厚の85%) (2023)

EDFにおけるステンレス鋼のSCC 現在の状況

応力解析の結果(NRC資料)

Welding stress simulation



- 多くの亀裂が<6mmで確認されている要因は圧縮残留応力の影響。
- 2度の補修溶接部(23mmの亀裂)では、この圧縮応力機能しなかった可能性がある。
- 仏国の特定のプラント、特定の設計で多く生じており、引き続き要因については議論されている。
- 酸素の影響についても議論となっている。

- 米国プラントでは類似の亀裂が報告されていない。
- 日本でもEDFのような安全注入系、RHR系統での亀裂は報告されていない。
- 米国規制庁は直ちに措置を講じる必要はないと判断している。(ML23151A238)
- EDFは2025年までにすべてのプラントの検査を実施する計画。

本報告で取り扱う内容

1. 応力腐食割れ(SCC)事例の概要
2. O3スプレー配管でのSCC事例
3. EDFで報告された配管のSCC
4. ATENAにおける取組

ATENAにおける取組

大飯3号機スプレイ配管での亀裂発生以降、原因の特定及び知見拡充の観点から、ATENAが研究・調査を主導している。

定期的にATENA-NRAが会合を開き、その状況が公開されている。

実施項目		2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度
0. 研究計画の策定		■				
1. 最新知見の調査			■			
亀裂発生メカニズム解明	2. 実機詳細調査 (損傷部位、比較部位) (1)-①局所ひずみ測定 (SEM/EBSD) (1)-②断面マクロ硬さ測定 (2)-①溶接欠陥の調査 (SEM/EDS) (2)-②潜在き裂の調査 (SEM/EDS) (3)被膜分析、亀裂先端ミクロ組織分析 (TEM)		■ ■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■	
	3. 発生特性に関する調査			■		
	4. (1) SCC進展特性知見の調査		■			
亀裂有り構造健全性評価の確立	4. (2) SCC進展特性データの取得			■		
	4. (3) SCC進展速度線図案の策定				■	
	5. 溶接残留応力評価				■	
	6. (1) 構造健全性評価				■	
	6. (2) LBB成立性の検討				■	
7. 技術基盤の整備					■	



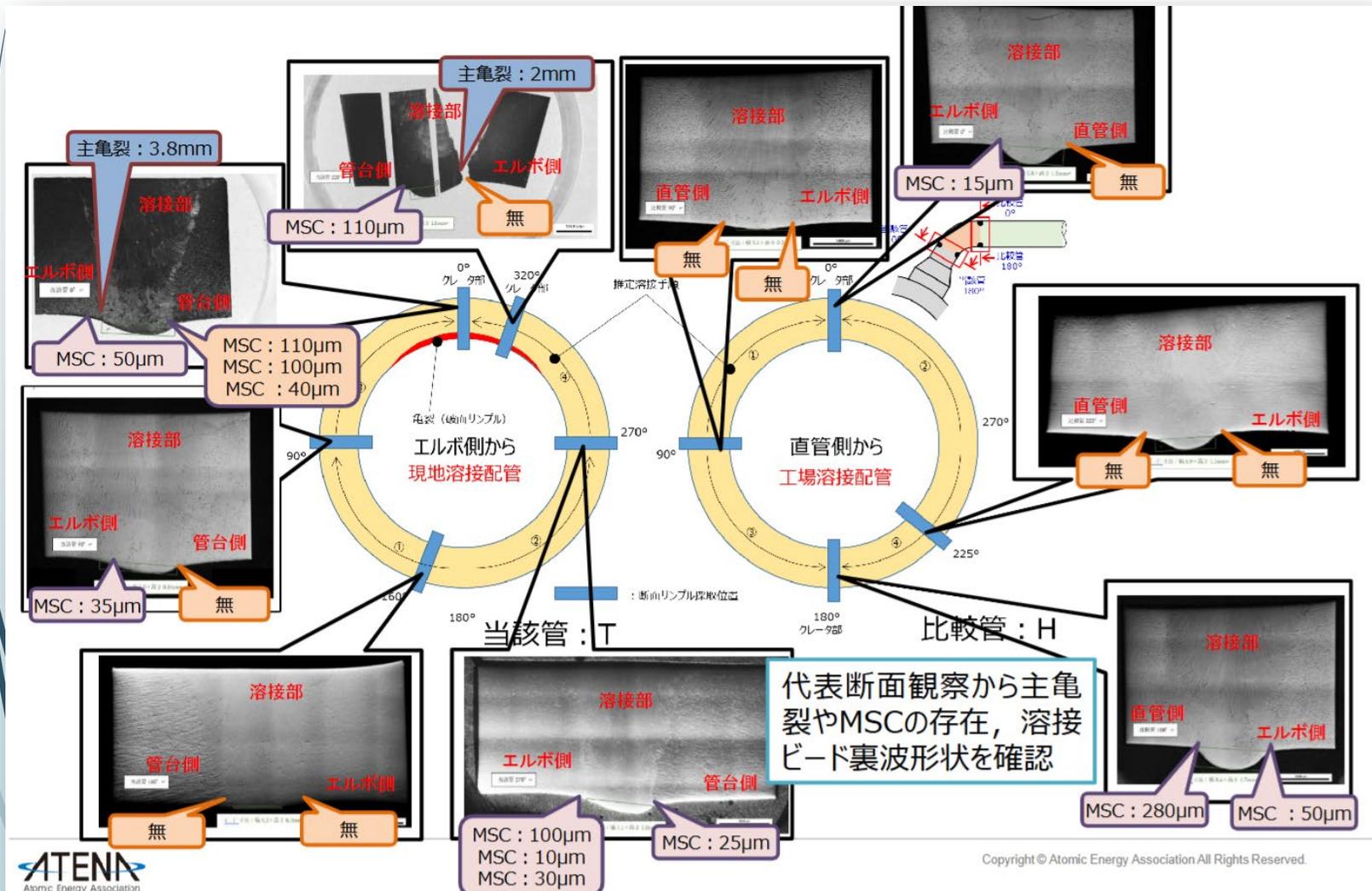
実施項目のロードマップ(当初計画)

- 亀裂発生メカニズムの研究
- 亀裂有り構造健全性評価の確立に注力

過去の公開会合

- 2022年6月24日
- 2023年9月05日
- 2024年8月22日

ATENAにおける取組：発生要因の調査

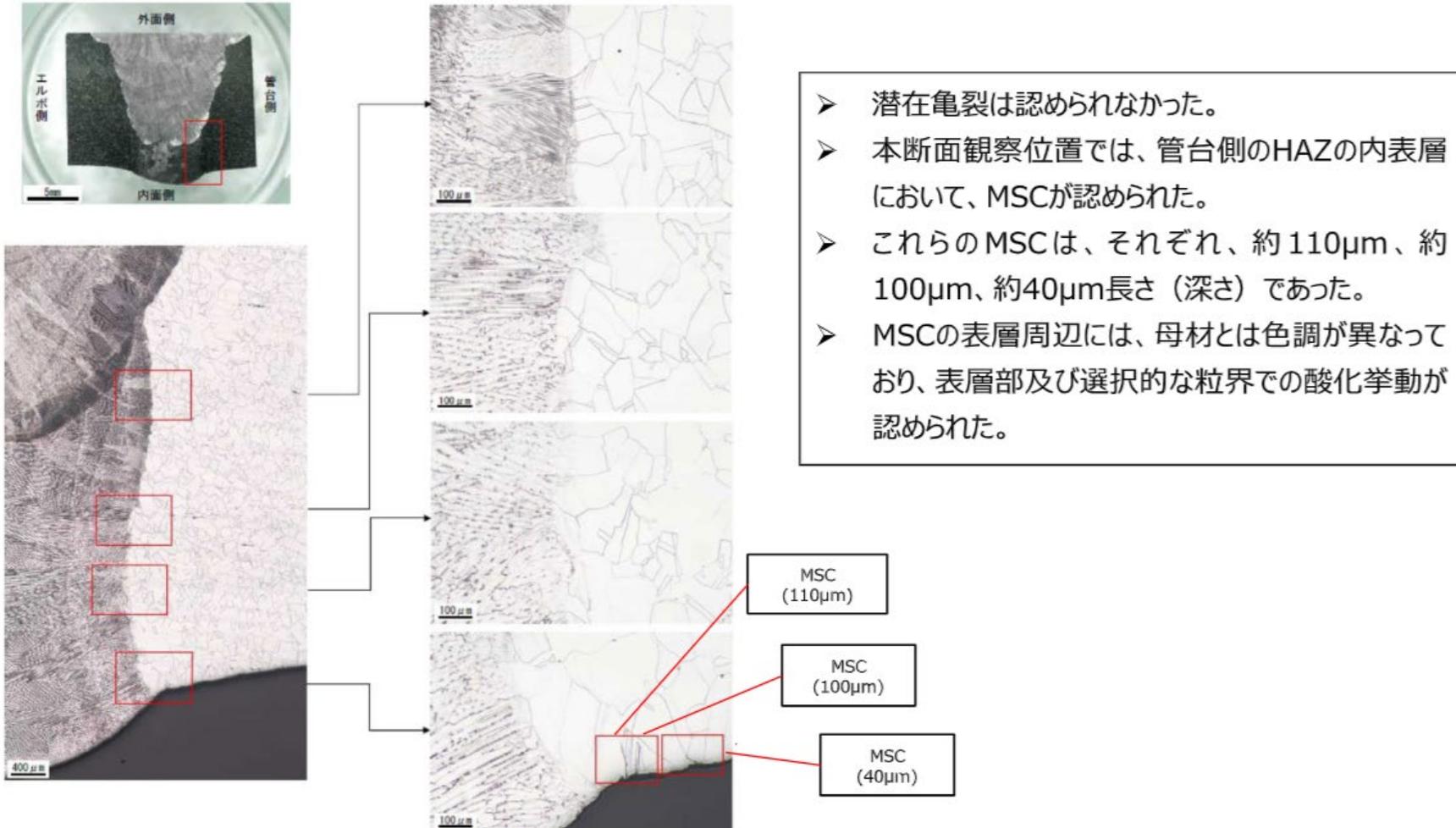


発生に対して溶接欠陥の影響について議論されていたため、亀裂発生部周辺を精緻に観察。

溶接欠陥の痕跡は認められていない。

ATENAにおける取組：発生要因の調査 2

当該管0°管台側の断面マクロ・ミクロ観察結果（潜在亀裂有無の確認）



- 潜在亀裂は認められなかった。
- 本断面観察位置では、管台側のHAZの内表層において、MSCが認められた。
- これらのMSCは、それぞれ、約110μm、約100μm、約40μm長さ（深さ）であった。
- MSCの表層周辺には、母材とは色調が異なっており、表層部及び選択的な粒界での酸化挙動が認められた。

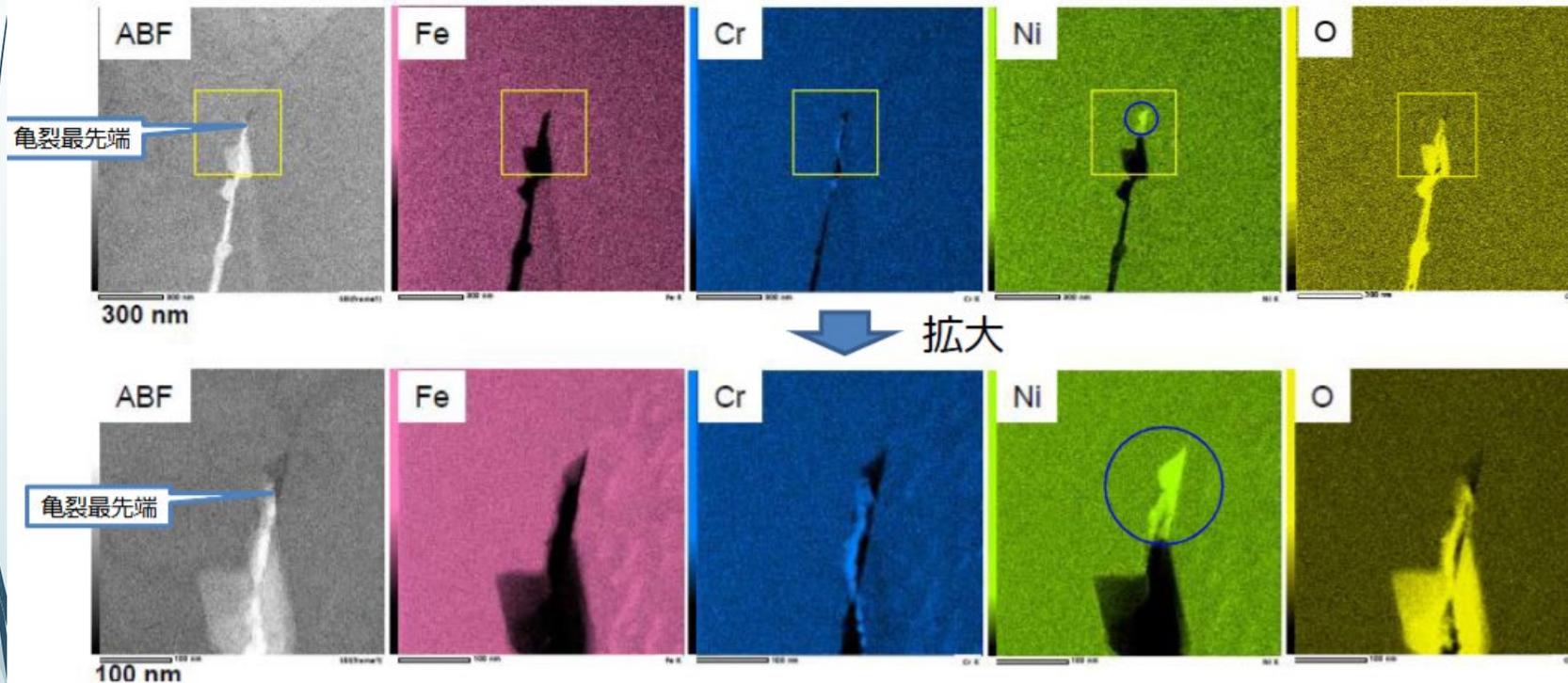
主亀裂以外に1粒界程度の微細なMSC (Microstructurally small crack)が複数見ついている。

特異な硬さがなければ、MSCは停留すると推定。

MSCを含む亀裂発生過程にも着目し検討する。

ATENAにおける取組例の紹介：TEM/EDSによる亀裂先端分析

亀裂最先端のマッピング分析結果（上：15万倍／下：50万倍）



実機亀裂の先端を精緻に観察。

SCC試験片との類似性を確認。

- 2022年度のSEMでは、酸素は有意に検出されなかったが、2023年度の高分解能/高解像度のTEMを用いると、酸素の存在が認められており、亀裂最先端域の粒界酸化を示唆。(詳細は参考2)
- Fe, Crが選択的に酸化(FeおよびCrの溶解)することから、亀裂最先端の前方の粒界部分には、100nm程度の領域に明確な**Ni濃化** (○部分)を確認。

➤ ラボ試験のPWR1次系模擬環境中SCC亀裂先端域の観察結果(次頁参照)と同様にNi濃化が確認されており、**主亀裂は進展性を有するSCCであったことを示唆。**

本報告で取り扱う内容

1. 応力腐食割れ(SCC)事例の概要

- 酸素や照射、強加工の影響を含まない亀裂が2020年代に報告されている。
- 何れも検査で適切に検知されている事例。

2. O3スプレイ配管でのSCC事例

- 施工時の溶接の影響で特異に硬化した溶接熱影響部で4.4mmの割れ。
- 延べ890箇所以上の追加検査が行われているが類似亀裂は見つかっていない。

3. EDFで報告された配管のSCC

- 2021年以降、特定の設計を含むプラントで、計100箇所以上の亀裂。
- プラント設計として熱成層形成が影響した可能性が指摘。
- 多くは<6mmだが、2度の補修溶接部で板厚の85%まで亀裂が成長。

4. ATENAにおける取組

- 引き続き産業界で知見拡充が進められている。