

本図書は速報として整理したものであり、今後、記載の充実により変更となる可能性があります。

PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れの 知見拡充に関する2022年度の検討状況について (亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価)

原子力エネルギー協議会
(ATENA)

2023年 4月 20日

本資料には、経済産業省「令和4年度原子力発電所の安全性向上に資する技術開発事業（原子力発電所の長期運転に向けた高経年化対策に関する研究開発）」の成果が含まれています。

目次

1. 振り返り
2. 2022年度検討内容
 - 2.1 最新知見の調査
 - 2.2 実機詳細調査（損傷部位、比較部位）
 - 2.3 SCC進展特性知見の調査
 - 2.4 SCC進展知見に拠る試評価
3. まとめ

1. 振り返り

2. 2022年度検討内容

2.1 最新知見の調査

2.2 実機詳細調査（損傷部位、比較部位）

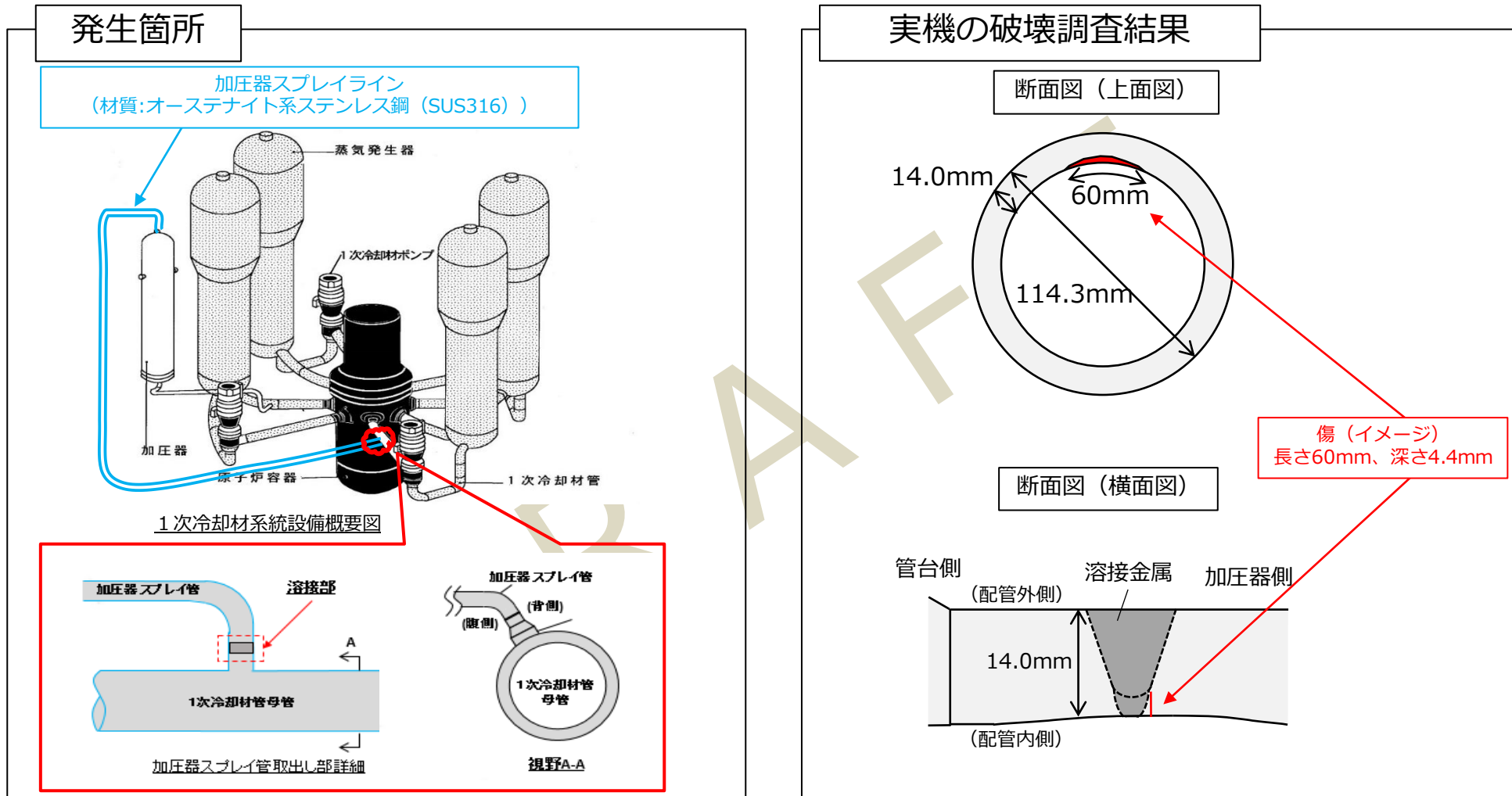
2.3 SCC進展特性知見の調査

2.4 SCC進展知見に拠る試評価

3. まとめ

PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れの概要

本検討の発端となった大飯発電所3号機加圧器スプレイ配管溶接部での事象の概要を以下に示す。



- 供用期間中検査 (ISI) にて、加圧器スプレイラインの1次冷却材管台と管継手 (エルボ部) の配管溶接部に有意な指示が認められた。その後の破壊調査により、**溶接熱影響部にて長さ60mm、深さ4.4mmの亀裂**があることが明らかとなった。

配管溶接部の割れの概要

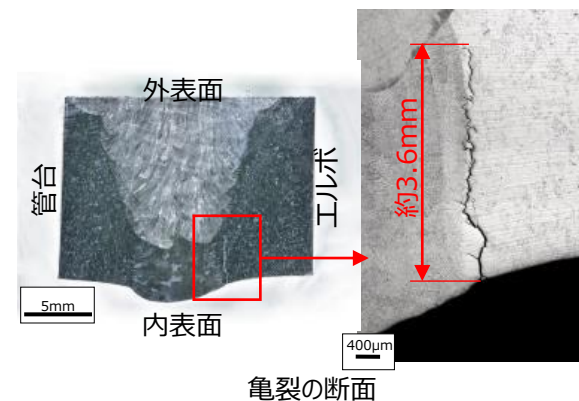
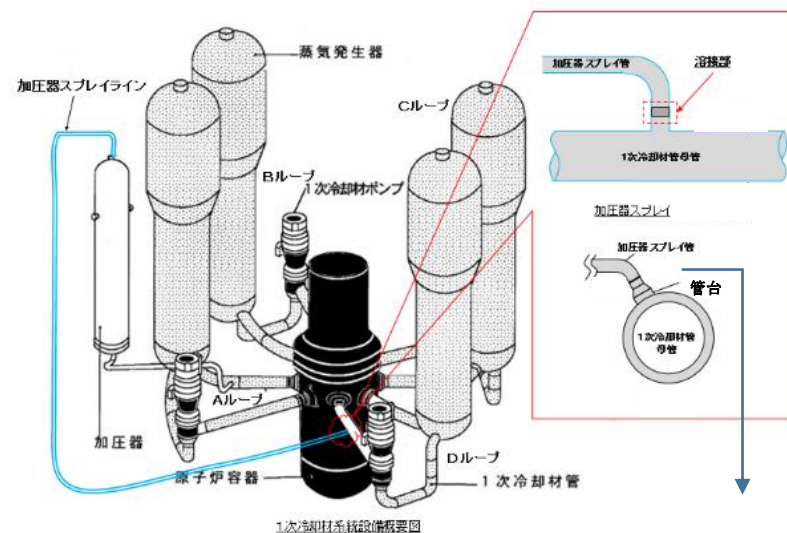
<亀裂発生及び亀裂進展の状況整理>

(公開会合における関西電力説明)

- 過大な溶接入熱と、管台-エルボ部の剛性の影響が重畳し、表層近傍において特異な硬化と応力が影響したことにより割れが発生と推定。
(現時点で、初期欠陥が認められていないが、溶接により微細な割れが発生していた可能性が否定できていない)
- また、**亀裂進展**に対しては、硬化したオーステナイト系ステンレス鋼の割れが進展する既存知見と合致しており、**粒界型SCC**と推定。



- ATENAとして、PWR1次系ステンレス鋼配管における割れについては特異な事象であり、発生メカニズムなど知見がほとんどなく、原因の特定および知見拡充の観点から、研究・調査が必要であると認識。



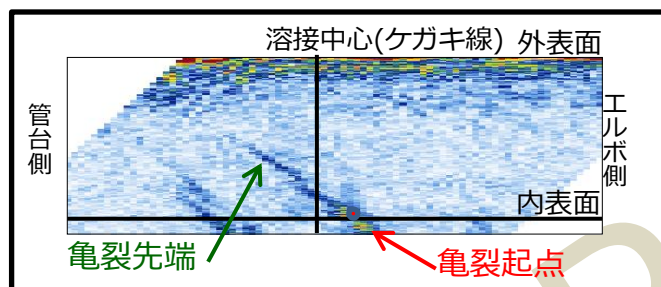
超音波探傷検査の概要

<超音波探傷検査による亀裂性状把握状況> (公開会合における関西電力説明)

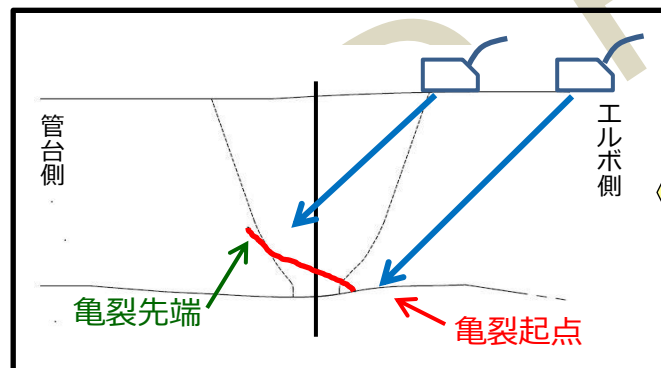
- 超音波探傷検査による非破壊試験で、亀裂の深さについては適切に評価。
 - 亀裂はエルボ側から管台側の方向に溶接部を進展していると推定したが、破壊調査の結果、亀裂はエルボ側母材の溶接部境界で板厚方向に進展していた
- ⇒ **ATENAとして、亀裂性状の誤認に対する検討が必要であると認識。**

現地フェーズドアレイUT結果より推定した亀裂性状

現地フェーズドアレイUTでは、亀裂はエルボ側から管台側の方向に進展していると推定



現地フェーズドアレイUT結果



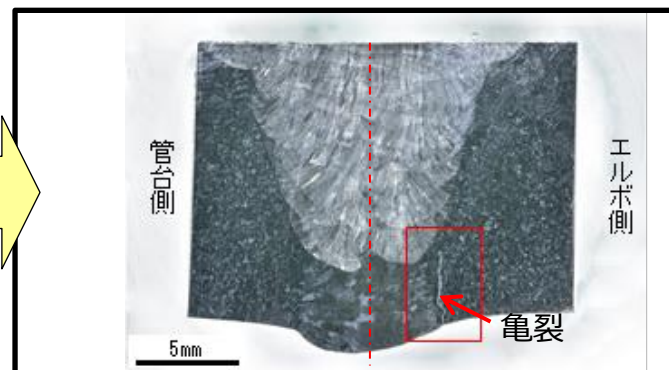
現地フェーズドアレイUT結果より推定した亀裂性状

亀裂の調査結果

亀裂プロファイル	現地UT結果	破壊調査結果
亀裂深さ	4.6mm	4.4mm

破壊調査結果

破壊調査の結果、亀裂は板厚方向に進展していた



断面マクロ組織観察結果

亀裂性状の差異

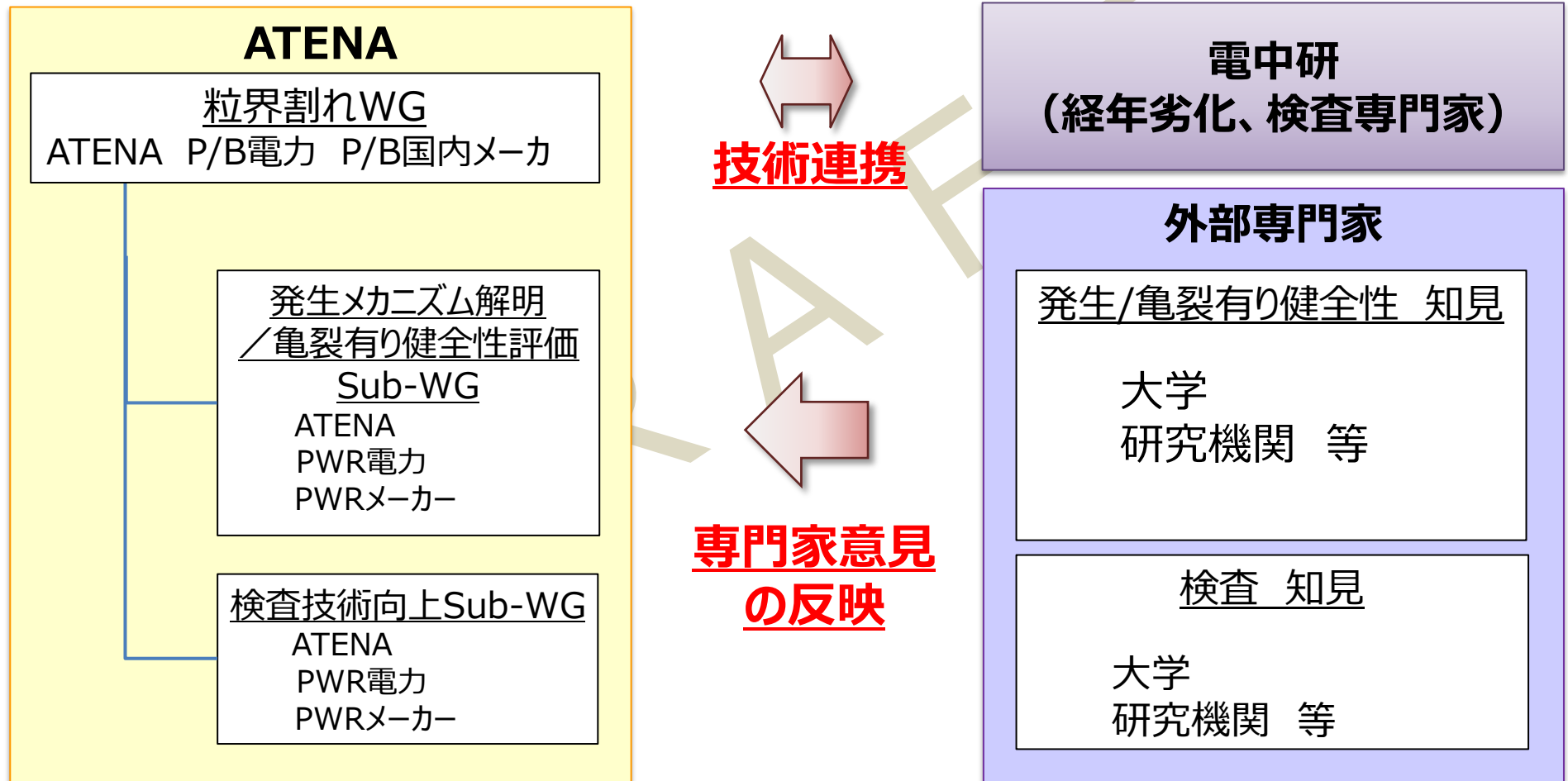
PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れに対するATENAの取り組み

- 大飯3号機において発生した亀裂の更なる調査を含め、PWRの1次冷却材環境下における亀裂の発生及び進展のメカニズムについて研究を行い、亀裂進展評価に用いる基礎データ拡充、フェーズドアレイUTにより亀裂進展方向を誤って評価したことに対する原因調査のため、ATENAはWGを立ち上げ、課題検討の取り組みを実施。
- 検討を進めるにあたり、技術課題は大きく分けて「①発生メカニズムの解明」、「②亀裂有り健全性評価」、「③検査技術の向上」の3分類あると整理。
- 課題検討にあたっては、外部専門家と意見交換を実施した上で、研究計画を策定するとともに、実施状況を踏まえて、計画を見直していく予定。

	①発生メカニズムの解明	②亀裂有り健全性評価	③検査技術の向上
主な課題認識	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 「硬さ」「硬さ以外」各々で割れの要因の再整理 ➤ 「硬くなる要因」は何か（機械加工、溶接、形状、…） ➤ 発生メカニズム自体の探求 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 亀裂有り健全性評価に用いるデータの拡充 <ul style="list-style-type: none"> ・亀裂進展速度 ・亀裂進展評価／亀裂有り健全性評価に用いる応力 ➤ 亀裂進展後の亀裂有り健全性評価手法の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 亀裂性状把握技術 及びその関連検査技術の向上

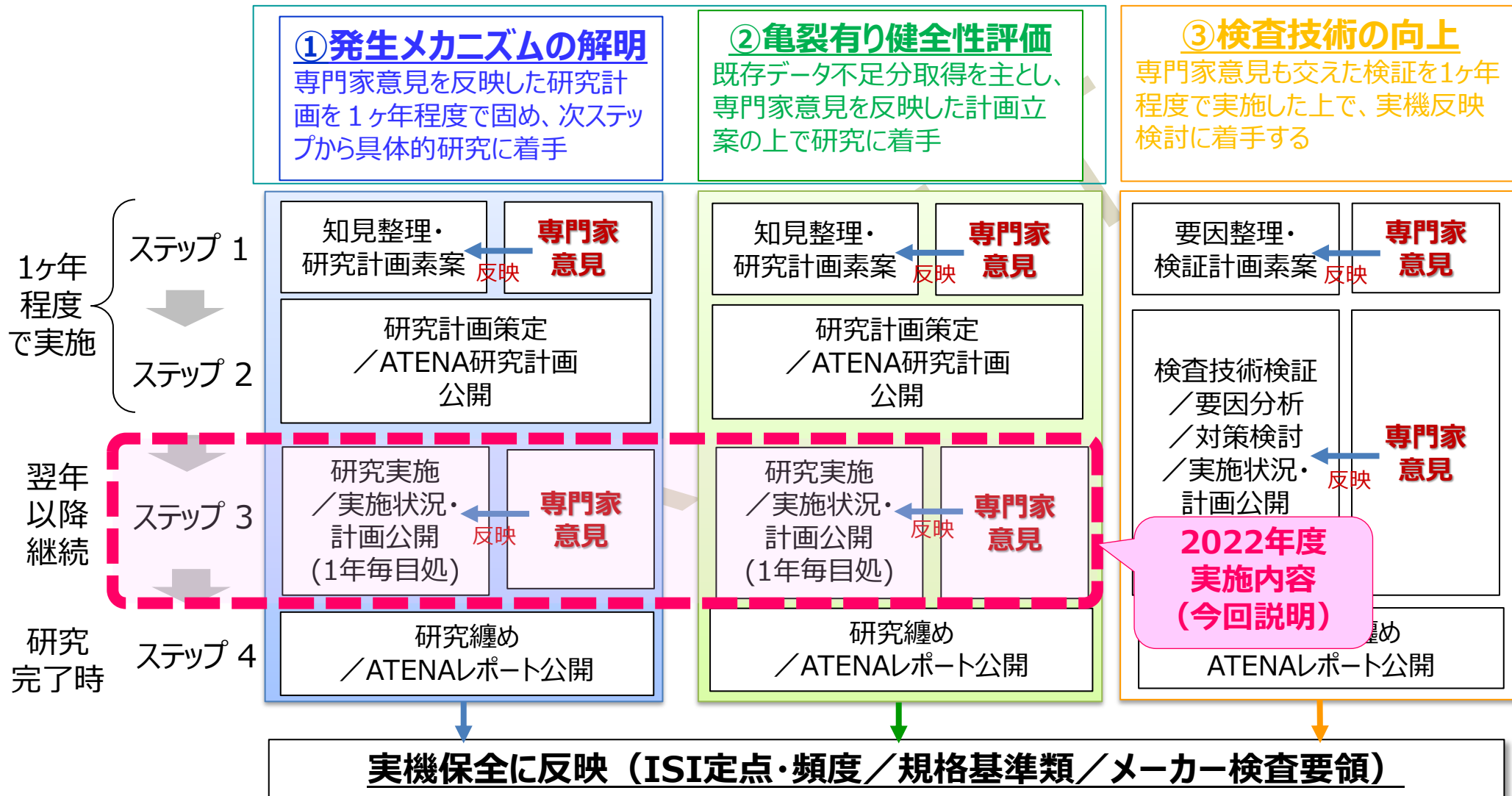
PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れ検討の体制

- 活動にあたっては、ATENA体制下にWG及びSub-WGを立ち上げ、その検討に当たっては、外部専門家の意見含め、考えられ得る検討項目を全て洗い出し、知見拡充に取り組むこととした。



PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れに関する検討方針

➤ 専門家意見を反映した①②の研究計画を元に、研究実施中。



亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する研究計画 ～実施工程～

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）		■ 実機損傷/健全部位	■ モックアップ		
	(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、亀裂先端マイクロ組織分析（TEM）		■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■		
3. 発生特性に関する調査				■		
亀裂有り構造健全性評価の確立	4.(1) SCC進展特性知見の調査		■			
	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					■	

参考：亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する研究計画 ～実施項目の詳細[1/4]～

外部専門家コメントを踏まえ、現状認識に対し必要な対応と実施項目の詳細を示す。
 後続検討に影響を与える亀裂の発生メカニズム・原因をまず確定すべく、実施項目のうち優先度の高いものを2022年度より着手する。

<最新知見の調査>

項目	概要
必要な対応	・ 仏国PWRの安全注入系配管のSCC事例等、継続的に最新知見を調査し、研究計画に反映する。
実施項目	1. 最新知見の調査 (2022年度～)

<亀裂発生メカニズム・原因>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> ・ 溶接熱収縮による硬化が亀裂発生の原因と考えているが、硬化により粒界割れに至る知見が不足。 ・ 亀裂発生形態（単一or 複数亀裂の発生）に関する知見が不足。 ・ 亀裂発生機構はSCCが有力との認識だが微小な潜在亀裂が存在した可能性を否定できていない。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実機損傷部位や健全部（含むモックアップ）に対する下記の調査を行い、既往知見の調査結果と併せて、亀裂発生メカニズム・原因の特定を行う。 ・ 具体的には、亀裂が生じた粒界近傍での局所的な歪や硬さ、特異な残留応力等が生じた可能性について、事業者調査では実施しなかったEBSD等も用いて実機（含むモックアップ）に対する詳細調査を実施し、硬さ、もしくは硬さ以外の粒界割れ発生要因を調査する。 ・ 併せて、SEM、EDS等を用い、微小な潜在亀裂等の初期欠陥の有無を調査する。
実施項目	2. 実機詳細調査（損傷部位、比較部位） (2022年度～) <ul style="list-style-type: none"> (1)-①局所ひずみ測定（SEM/EBSD） (1)-②断面マクロ硬さ測定（裏波幅と硬さの相関取得） (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、亀裂先端マイクロ組織分析（TEM）

参考：亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する研究計画 ～実施項目の詳細[2/4]～

<亀裂発生条件>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂発生メカニズムがSCCであったとしても、その発生条件の明確化が必要。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 前項に示す実機詳細調査により亀裂発生メカニズム・原因を特定しつつ、その発生条件を明確化する。
実施項目	2. 実機詳細調査（損傷部位、比較部位）（前表記載内容を通じて明確化）（2022年度～）

<亀裂発生特性>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> SCC発生特性（発生時間と作用応力の関係）に関する知見が不足している。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 電力共通研究等、SCC発生特性に関する知見に関し、調査を実施する。 本項は、実機詳細調査による亀裂発生メカニズム・原因を見極めた上で、実施する。
実施項目	3. 発生特性に関する調査（2023年度～）

<SCC進展特性>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> PWR1次系環境下のSCCの進展特性は、硬化度（加工度）・応力・高温条件が加速因子である事等、一定の知見は取得されている。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> SCC進展特性に関し得られている既往知見が、本事象の条件（進展速度・進展経路）を十分に網羅できているか調査する。 その進展特性知見の調査結果を踏まえ、必要に応じ本事象の条件に合致するSCC進展データの取得を行う。
実施項目	4.(1)SCC進展特性知見の調査（2022年度～） 4.(2)SCC進展特性データの取得（2023年度～）

<SCC進展評価>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> SCCに対する基本的な亀裂進展評価手法は確立されている一方、維持規格にPWR1次系環境中のSCCに対する亀裂進展速度線図は整備されていない。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> SCC進展特性の項目で整理したSCC進展データを基に、SCC亀裂進展速度線図案を策定する。
実施項目	4.(3)SCC進展速度線図案の策定（2024年度～）

<残留応力評価>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 溶接残留応力の基本的なFEM解析手法は国プロIAFで整備されている一方、詳細な当該部位の条件を押さえた残留応力分布は得られていない。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 本検討で得た実機詳細調査結果を考慮に入れつつ、当該部位の条件を当てはめ、溶接残留応力分布を解析的に得る。
実施項目	5.溶接残留応力評価（2024年度～）

参考：亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する研究計画 ～実施項目の詳細[4/4]～

<健全性評価>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 当該部位に関する暫定的な健全性評価は事業者調査時に実施されているが、本検討で得られた知見を反映した健全性評価を実施する必要がある。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 本検討で得た実機詳細調査結果とそれを基にした残留応力評価、SCC進展特性知見等を用い、亀裂進展評価と破壊評価による健全性評価を実施する。
実施項目	6.(1)構造健全性評価（2024年度～）

<破断前漏えい（LBB）の評価に対する知見拡充>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 今後、仮に亀裂が存在した場合のLBBに対する裕度に関し更なる知見拡充を進める必要がある。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 今後、仮に亀裂が存在したとしても、その亀裂が破損に繋がらないよう管理することが重要である。そこで、SCC進展、破壊評価を高度化しLBBに対する裕度を明確にする。
実施項目	6.(2)LBB評価に対する知見拡充（2024年度～）

<技術基盤の整備>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 粒界割れの水平展開部位に対し、向こう3年間を目途に超音波探傷検査を毎年実施している。 本検討成果を反映した健全性評価手法を確立する必要がある。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 本検討の成果を基に、検査範囲の明確化を図り、検査・健全性評価手法の技術基盤を整備する。
実施項目	7. 技術基盤の整備（2024年度～）

1. 最新知見の調査

- フランスのPWRプラントで認められた安全注入系配管溶接部のSCCと推測される欠陥などの最新情報を収集し、本検討の計画に反映する必要があるか否かについて調査する。

2. 実機詳細調査

(1)-①局所ひずみ測定 (SEM/EBSD)

(1)-②断面マクロ硬さ測定 (裏波幅と硬さの相関取得)

(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、主亀裂先端ミクロ組織分析 (TEM)

次ページに示す。

5. SCC進展特性知見の調査及び試評価

- PWR1次系冷却水環境中のステンレス鋼のSCC進展特性およびSCC進展速度データに関する知見を収取、整理する。
- 既存知見が実機条件を網羅できているか確認し、知見拡充が必要な項目を整理する。

2022年度実機詳細調査の内容

実施項目		実施内容	対象部位
(1)	①局所ひずみ測定 (SEM/EBSD)	<ul style="list-style-type: none"> 当該管0°の主亀裂周辺のHAZ部（結晶粒の粗大化）及び表層側のシンニング部する断面マイクロ試験片を用いたSEM付属のEBSDによるIPF結晶粒分布、KAMマップ等を活用した結晶構造及び局所歪分布の確認。 標準偏差大、粗大粒の重畳により当該部の粒界応力が増大する可能性を調べるために、上記のEBSDでのKAM値等との相関検討として、同断面でのマイクロビッカース硬さ計での追加測定。 	<ul style="list-style-type: none"> 当該管0°(クレータ部)の主亀裂部周辺の断面（管台側/エルボ側） 当該管の320°(クレータ部)、90°、160°、270°の断面 比較管も同様位置（0°(クレータ部)、90°、180°(クレータ部)、225°）の断面
	②断面マクロ硬さ測定		
(2)	①溶接欠陥の調査 (SEM/EDS)	<ul style="list-style-type: none"> 当該管0°主亀裂周辺のHAZ部やその他領域（周方向）での溶接欠陥有無の確認のために、破面SEMでの拡大観察（すべり帯）。 EDS分析での溶接欠陥の識別（Mn、Si、Nb、P、S等の溶接欠陥に起因する元素の同定）。 当該管0°以外の複数（5断面程度）での断面マイクロ観察での潜在亀裂の形態（IG/TG、長さ、幅）や方向性の確認。 比較管でも同様な断面マイクロ観察での潜在亀裂有無の確認。 	<ul style="list-style-type: none"> 当該管0°近傍の破面全体（表面側に着目） 当該管0°の亀裂周辺の断面（5断面程度：管台側/エルボ側） 比較管も同様な位置の断面（4断面程度：エルボ側/直管側）
	②潜在き裂の調査 (SEM/EDS)		

詳細の取り組みは外部専門家の意見も踏まえて実施

目次

1. 振り返り

2. 2022年度検討内容

2.1 最新知見の調査

2.2 実機詳細調査（損傷部位、比較部位）

2.3 SCC進展特性知見の調査

2.4 SCC進展知見に拠る試評価

3. まとめ

最新知見の調査: 仏国PWRプラントでのステンレス鋼製配管のSCC事例一覧

プラント	型式	出力	運開年	状況
Civaux1号機	N4	1561MW	2002年	<ul style="list-style-type: none"> 2021年10月21日に、10年毎点検で安全注入系（RIS）配管エルボの溶接部近傍に複数の亀裂指示を確認。 応力腐食現象による割れ（SCC）と報告。 配管を切り出した調査（以下、詳細調査）を行い、RIS配管と余熱除去系（RRA）配管の溶接部近傍のSCCを報告。
Civaux2号機	N4	1561MW	2002年	<ul style="list-style-type: none"> RIS配管において複数の欠陥指示を確認（2021年12月公表）。
ChoozB2号機	N4	1560MW	2000年	<ul style="list-style-type: none"> RIS配管において欠陥指示を確認（2022年1月公表）。 詳細調査の結果、RRA配管とRIS配管の溶接部近傍のSCCを確認。
ChoozB1号機	N4	1560MW	2000年	<ul style="list-style-type: none"> 配管において欠陥指示を確認。
Penly1号機	P'4	1382MW	1990年	<ul style="list-style-type: none"> RIS配管において欠陥指示を複数確認（2022年1月公表）。 詳細調査の結果、RRA配管とRIS配管の溶接部近傍のSCCを確認。
Cattenom3号機	P'4	1362MW	1991年	<ul style="list-style-type: none"> 一次冷却系の配管の欠陥指示を報告（2022年4月公表）。
Chinon B3号機	CP2	954MW	1987年	<ul style="list-style-type: none"> 一次冷却系の配管の欠陥指示を報告（2022年4月公表）。 詳細調査の結果、RIS配管においてSCCは確認されなかったが、RRA配管の溶接部でSCCを確認。 起点は溶接欠陥であり、一般的な事象でないと報告⇒本事象から除外。
Flamanville2号機	P'4	1382MW	1987年	<ul style="list-style-type: none"> 一次冷却系の配管の欠陥指示を報告（2022年4月公表）。 起点は溶接欠陥であり、一般的な事象でないと報告。
Golfech1号機	P'4	1363MW	1991年	<ul style="list-style-type: none"> 一次冷却系の配管の欠陥指示を報告（2022年4月公表）。
Cattenom1号機	P'4	1362MW	1987年	<ul style="list-style-type: none"> RIS配管においてSCCによる亀裂を複数確認（2022年11月公表）。そのうち2つの亀裂は最大深さ4.7mmと6.1mm。

最新知見の調査:EDFプラントの概要

✓ 56基のPWR (1970s-1990s) が存在

<プラント>

0/32基 : 約900 MW (CP0、CPY)(78-87年)
Chinon-B3→指示は溶接欠陥

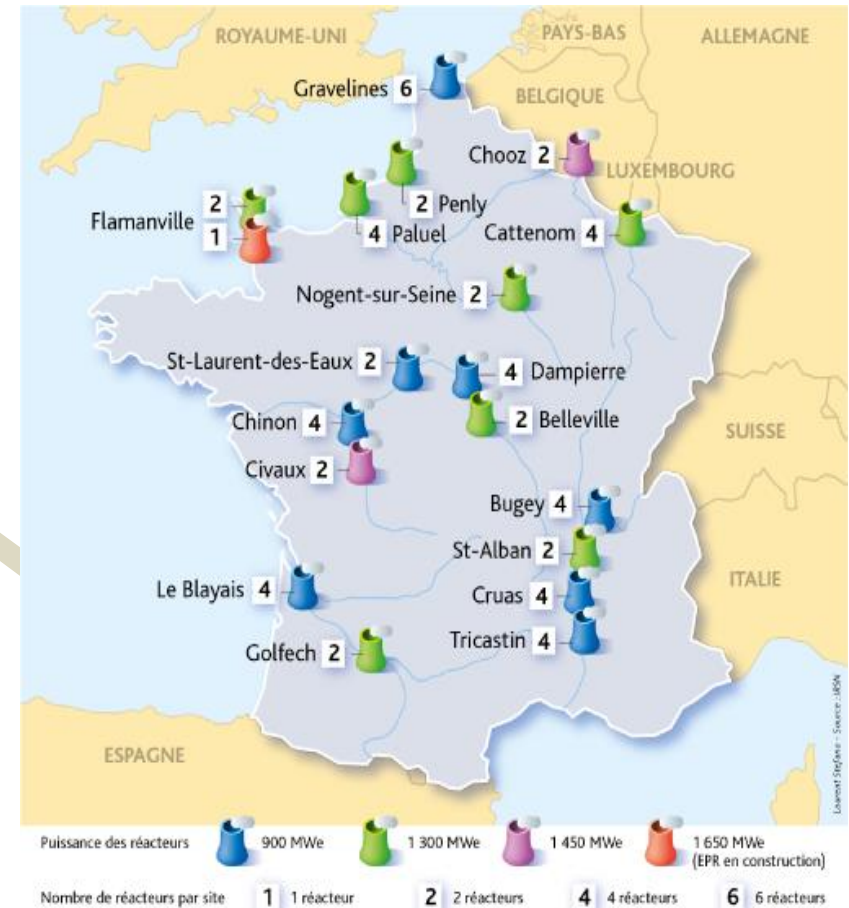
5/20基 : 約1300 MW (P4、P'4)(84-93年)
Penly-1、Cattenom-1/3、
Flamanville-2、Golfech-1

4/4基 : 約1450 MW (N4)(96-99年)
Civaux-1/2、Chooz-B2/B1

<部位>

RIS(SIS)配管とRHR配管の溶接熱影響部

➤ 特定の設計 (新しいプラント) に欠陥が集中している。



最新知見の調査:EDFのSCC事象に関する仏国の見解

EDFの対応

- 詳細な破壊調査による原因究明を実施。
- 亀裂が見つかった配管を交換（2022年11月時点で6基完了、4基実施中）。
- SCCに最適化された検査手法で、今後全プラントを検査。
- 検査手法としてTotal Focusing Method/Full Matrix Capture (TFM/FMC)他を検討。
（新たな検査手法は現時点で規格化（RSE-M）されていない。）
- 全プラントの検査は2025年までに完了見込み。

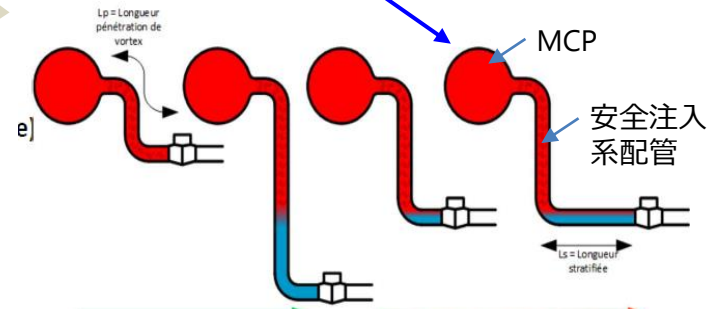
亀裂発生要因に対して議論されている項目

- 補修溶接や、通常と異なる溶接が影響した可能性。
- 発生への酸素の寄与。
- **熱成層が繰返し応力の要因となった？**
（特定の設計に亀裂が集中）

ASNの判断

- **熱成層による応力が、IGSCCの主たる要因**である可能性を認める。
- 全てのプラントについて検査終了後、定期的な検査を計画。
- 検査には、亀裂進展速度と、破壊評価を考慮。

亀裂が多く認められたN4プラントの設計（検査員の線量低減のため水平配管を長くした）



最新知見の調査:Penly 1号機で新たに検出された亀裂（2023年3月にASNが下記を報告）

- Penly 1号機で新たな亀裂を検出。
 - 亀裂は安全注入系配管の溶接部近傍に位置している。
 - 亀裂幅は155mmであり、配管の円周長の4分の1に及ぶ。
 - 亀裂深さは23mm。管厚は27mmであり、板厚の85%に及ぶ。
 - EDFは当該配管の形状からSCCは生じにくいと想定していた。
 - 当該溶接部は建設中に二重の補修溶接（“double repair”）が行われており、機械的特性や内部応力が変化した可能性が考えられている。
 - 同亀裂により当該配管の強度は担保できなくなるが、原子炉の安全性の評価においては同配管が1本破断することも考慮されている。
- ASNは、同事象の潜在的な影響と破断確率の高さから、Penly 1号機についてはINES基準でレベル2、その他関連の原子炉についてはレベル1に分類した。また、当該損傷事例を考慮し、EDFに対して対応方針を見直すよう求めた。

ASN : <https://www.asn.fr/l-asn-informe/actualites/corrosion-sous-contrainte-a-penly-niveau-2-sur-l-echelle-ines>

REUTERS : <https://jp.reuters.com/article/edf-nuclear-penly/update-1-frances-nuclear-watchdog-says-corrosion-crack-flagged-by-edf-at-penly-1-reactor-idUSL1N35F2B0>

- ✓ 2022年11月に行われた「米国NRC、原子炉保障措置に関する諮問委員会 燃料・材料・構造分科会」でSCC事象を議論

米国NRCの認識

- ASME Section XIでは25%／10年で検査を規定。
- 多くのプラントでRI-ISIを適用しているため、**10-15%を検査**。
- 約50年の運転経験プラントを含め、**類似のSCCは検出されていない**。
- 一方、2013年以降、**熱疲労の亀裂は7箇所**で検出。**うち3箇所はリーク**で検出。
- EPRIは熱疲労の検出強化のため、MRP-146 を2018に改定。
- NRCは引き続きSCC発生と検査手法の研究を実施。

EPRIおよびPWROGの取り組み

- **類似事例の調査を実施中**。EPRIはMRP-236（SCC実機知見）の改訂に着手。
- 亀裂進展速度線図を作成し公開（MRP-458）。
- 過去10年間のエルボ溶接部について検査を再評価。

現時点で**亀裂報告なし**（56基の結果（残り17基は調査中））。

- 安全注入配管（大口径）～130箇所。
- 安全注入配管（中小口径）～250箇所。
- RHR配管（大口径）～180箇所。
- 加圧器スプレイ配管～60箇所。
- 配管破断は設計基準事象として考慮されている。
- 事例が少なく検査でカバーされているため、複数配管の破断は生じ難い。

1. 振り返り

2. 2022年度検討内容

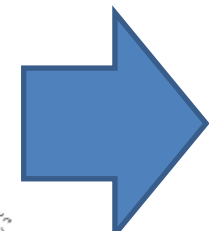
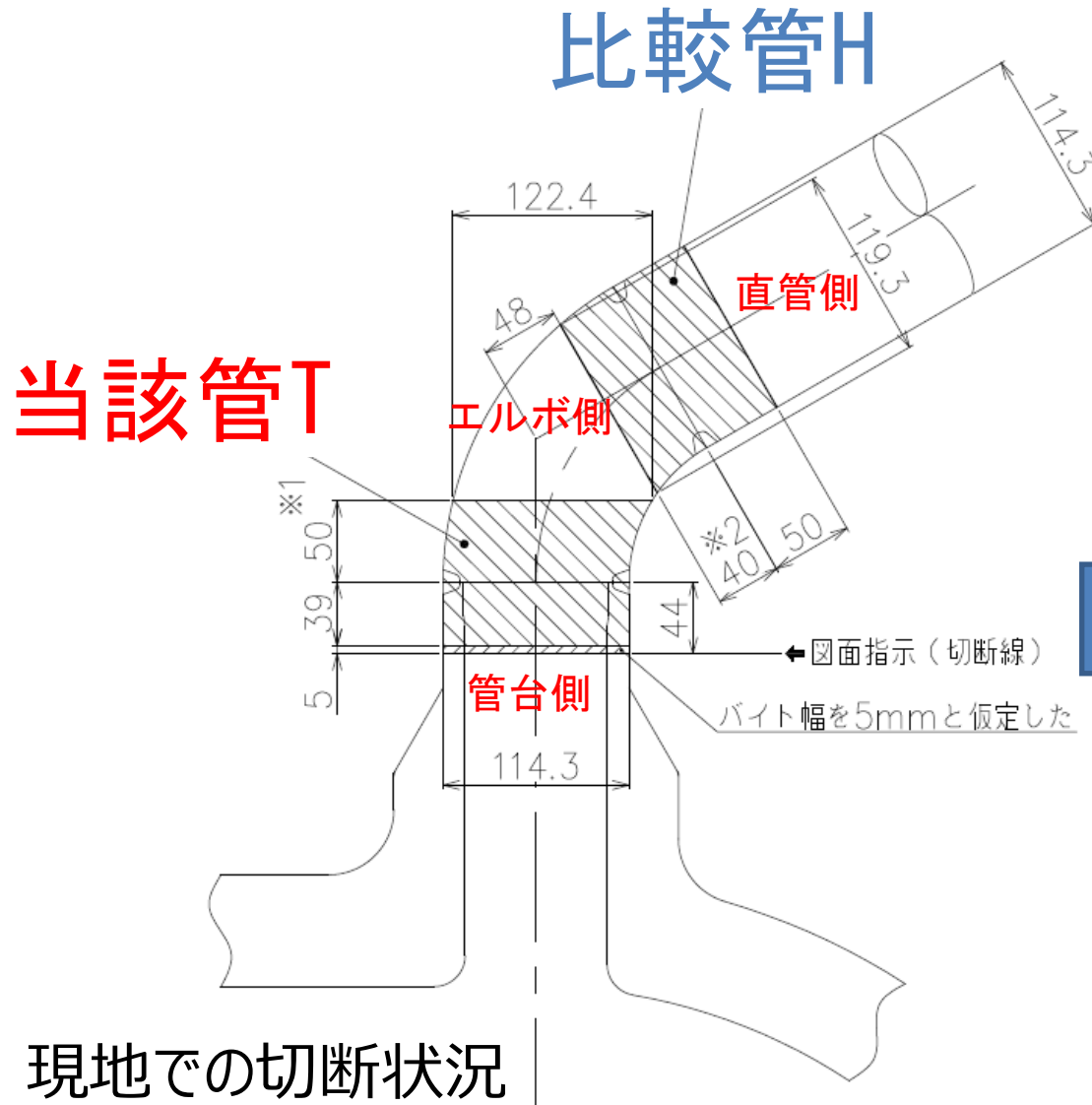
2.1 最新知見の調査

2.2 実機詳細調査（損傷部位、比較部位）

2.3 SCC進展特性知見の調査

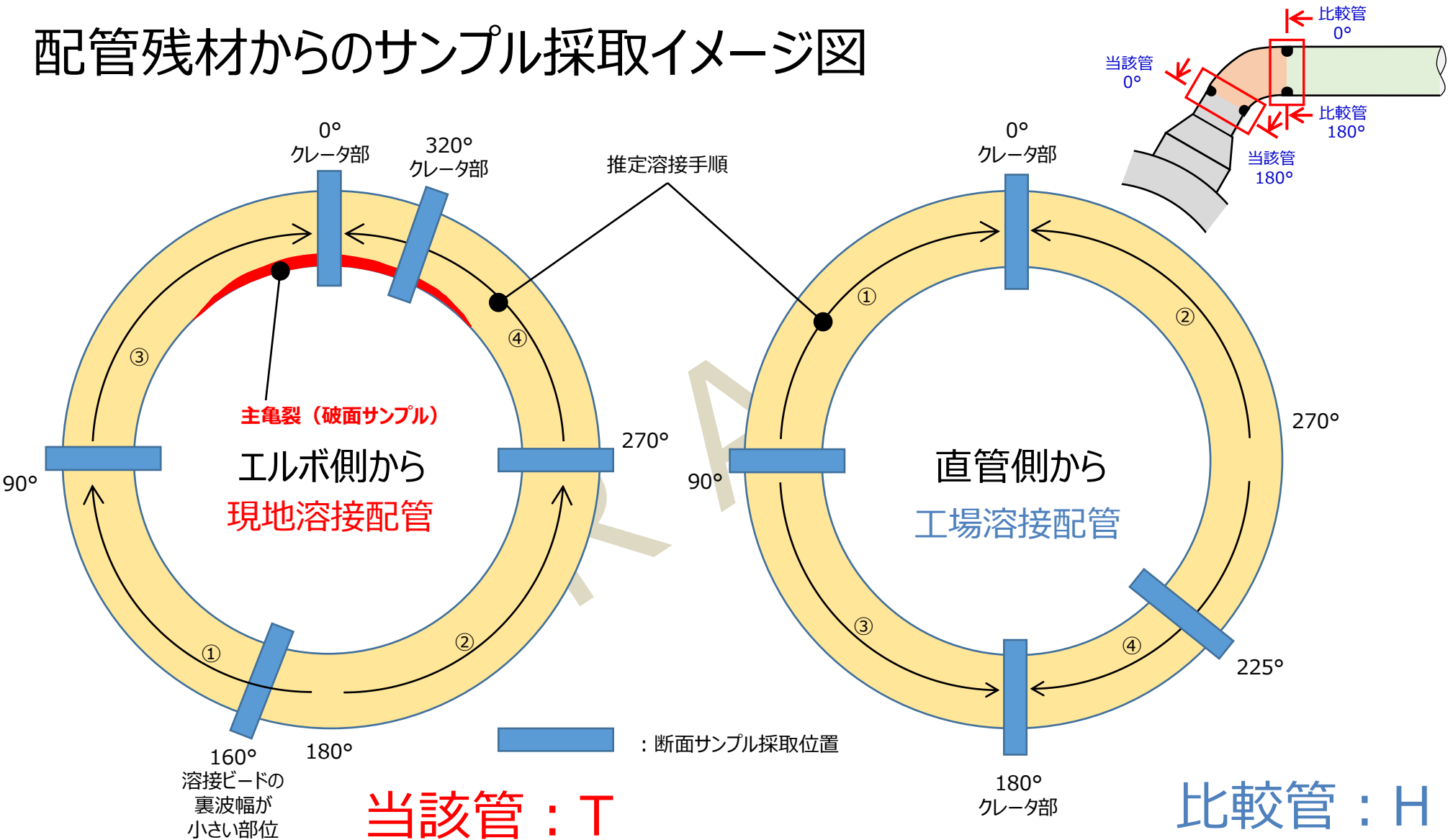
2.4 SCC進展知見に拠る試評価

3. まとめ



先行調査(2020年秋)に実施した切断後の残材をNDCラボで保管

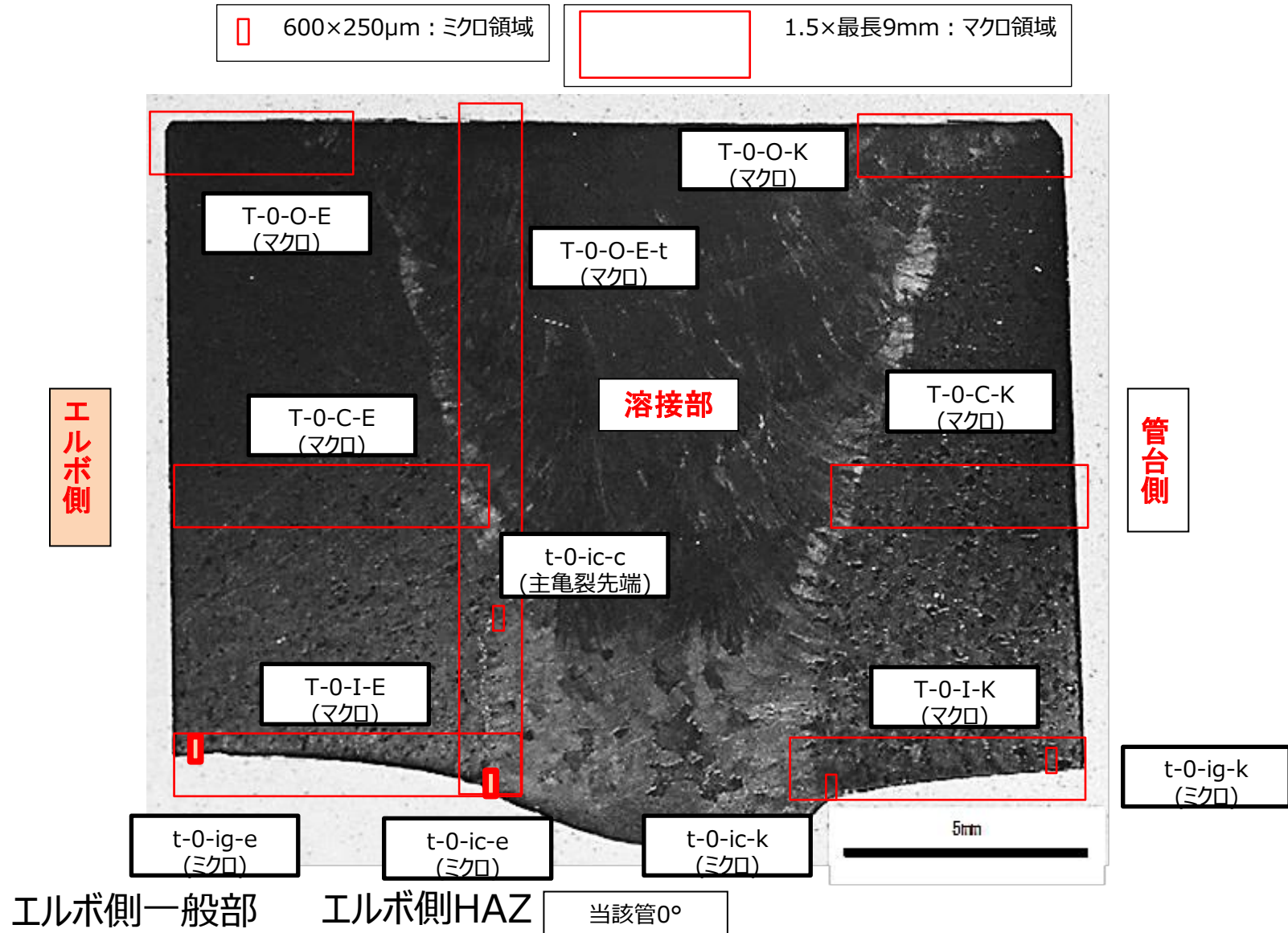
配管残材からのサンプル採取イメージ図



当該管及び比較管の調査マトリックス（実績）






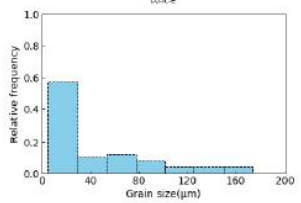
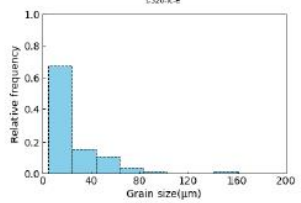
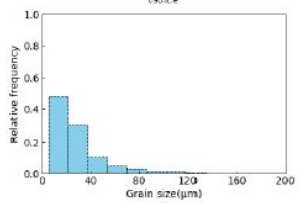
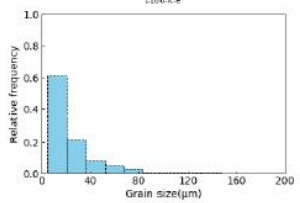
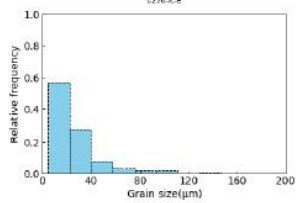
実施項目	サンプル形態	当該管/断面					比較管/断面			
		0° (クレータ部)	約320° (クレータ部)	90°	160°	270°	0° (クレータ部)	90°	180° (クレータ部)	225°
(1)	①局所ひずみ測定 SEM/EBSD	●* ①エルボ側 主亀裂 周辺部 ②管台側	● ①エルボ側 (破面) ②管台側	●* ①エルボ側 ②管台側	● ①エルボ側 ②管台側	● ①エルボ側 ②管台側	●* ①エルボ側 ②直管側	●* ①エルボ側 ②直管側	●* ①エルボ側 ②直管側	● ①エルボ側 ②直管側
	②断面マクロ 硬さ測定	●* ①エルボ側 主亀裂 周辺部 ②管台側	● ①エルボ側 (破面) ②管台側	●* ①エルボ側 ②管台側	● ①エルボ側 ②管台側	● ①エルボ側 ②管台側	●* ①エルボ側 ②直管側	●* ①エルボ側 ②直管側	●* ①エルボ側 ②直管側	● ①エルボ側 ②直管側
(2)	①破面における 溶接欠陥の調査	●* ①エルボ側 破面部	—	—	—	—	—	—	—	—
	②断面における 潜在亀裂の調査	●* ①エルボ側 主亀裂 周辺部 ②管台側	● ①エルボ側 (破面) ②管台側	●* ①エルボ側 ②管台側	● ①エルボ側 ②管台側	● ①エルボ側 ②管台側	●* ①エルボ側 ②直管側	●* ①エルボ側 ②直管側	●* ①エルボ側 ②直管側	● ①エルボ側 ②直管側
(3)	①TEM試料準備 及び輸送 (2022年度： 加工・輸送のみ)	●* ①エルボ側 主亀裂 周辺部 ②管台側 ③破面部	—	—	● ①エルボ側 ②管台側	—	●* ①エルボ側 ②直管側	●* ①エルボ側 ②直管側	—	—

●：実施、—：実施無し、*：先行調査の残材活用




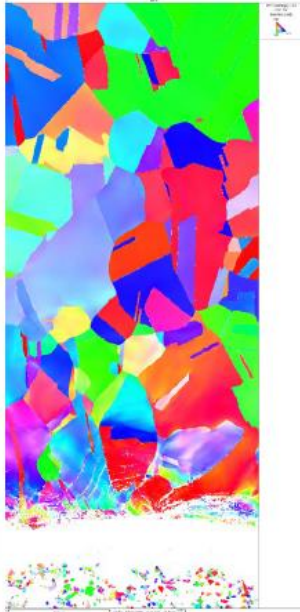



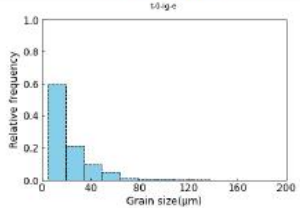
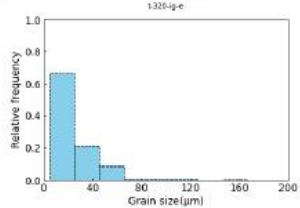
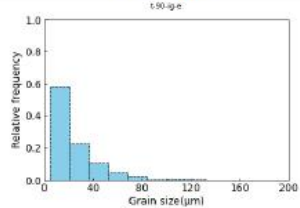
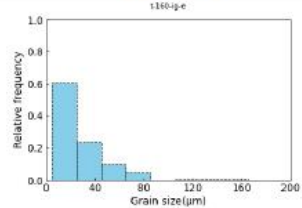
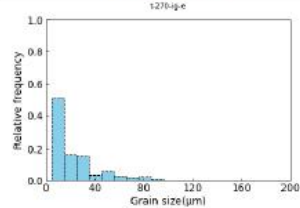
局所ひずみ測定(IPF : 当該管エルボ側HAZ) (実績)

(1-1)EBSD計測評価パラメータを用いたマイクロ領域データ整理 (IPFマップZ軸 (当該管エルボ側HAZ))

当該管 評価パラメータ	マイクロ計測：内表層側のHAZ 溶接境界近傍部 (エルボ側)				
	0°	320°	90°	160°	270°
IPF マップ	<p>t-0-ic-e</p>  <p>内表層側 (←亀裂)</p>	<p>t-320-ic-e</p>  <p>内表層側</p>	<p>t-90-ic-e</p>  <p>内表層側</p>	<p>t-160-ic-e</p>  <p>内表層側</p>	<p>t-270-ic-e</p>  <p>内表層側</p>
粒径 ヒストグラム (5μm 以下は 統計対象外)	<p>t-0-ic-e</p> 	<p>t-320-ic-e</p> 	<p>t-90-ic-e</p> 	<p>t-160-ic-e</p> 	<p>t-270-ic-e</p> 
評価結果	<p>➤ 当該管 (160° 断面を除く) の内表層側の HAZ 溶接境界近傍部 (エルボ側) では、若干結晶粒が小さいが板厚内部に進むにつれて 100 μm 以上の比較的大きな結晶粒であった。</p>				

局所ひずみ測定(IPF：当該管エルボ側一般部) (実績)

(1-2)EBSD計測評価パラメータを用いたマイクロ領域データ整理 (IPFマップZ軸 (当該管エルボ側一般部))

当該管 評価パラメータ	マイクロ計測：内表層側の母材一般部 (エルボ側)				
	0° t-0-ig-e	320° t-320-ig-e	90° t-90-ig-e	160° t-160-ig-e	270° t-270-ig-e
IPF マップ	 内表層側	 内表層側	 内表層側	 内表層側	 内表層側
粒径 ヒストグラム (5μm 以下は 統計対象外)					
評価結果	<p>➢ 当該管の内表層側の一般部 (エルボ側) では、シンニング加工の影響と思われる結晶粒が大きく崩れた領域 (50~100 μ m 幅) であった。内部に進むにつれて、比較的均一な結晶粒 (100 μ m 以下) であった。</p>				

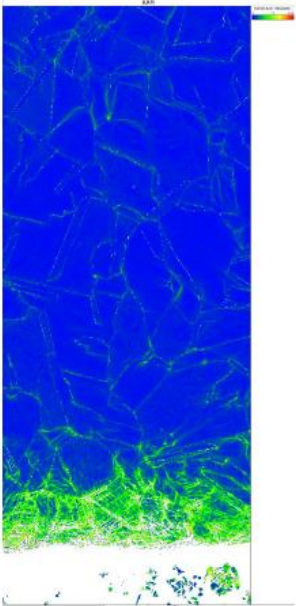
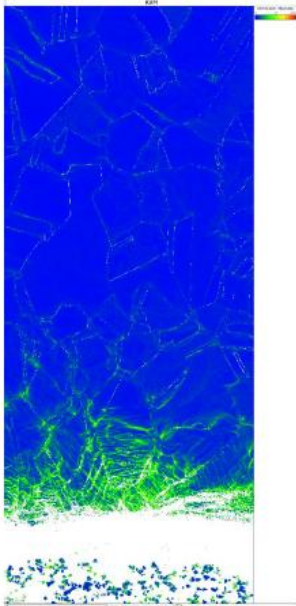
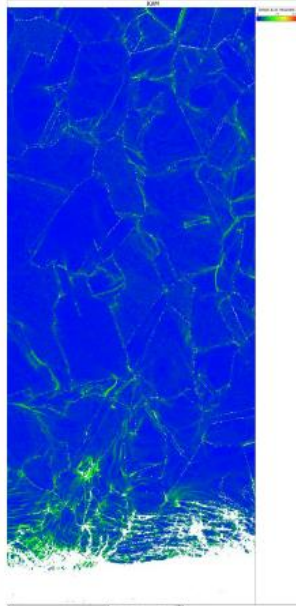
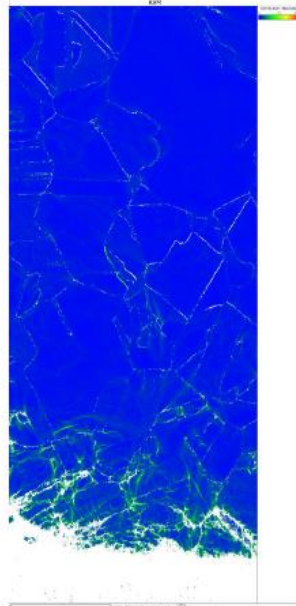
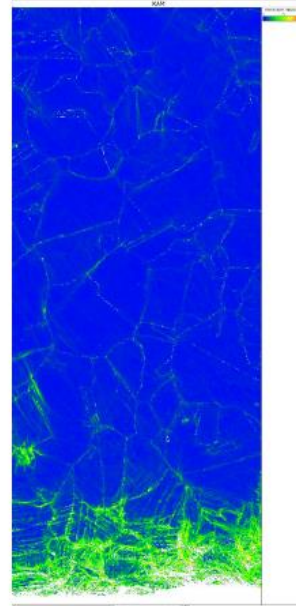
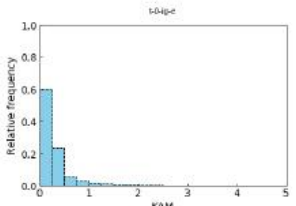
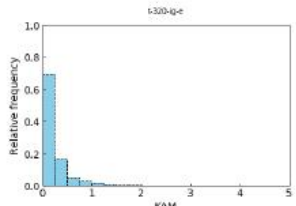
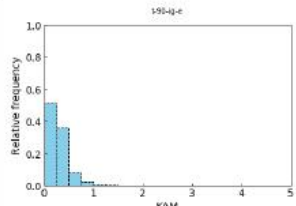
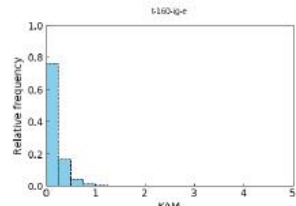
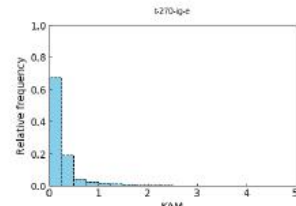
局所ひずみ測定(KAM：当該管エルボ側HAZ) (実績)

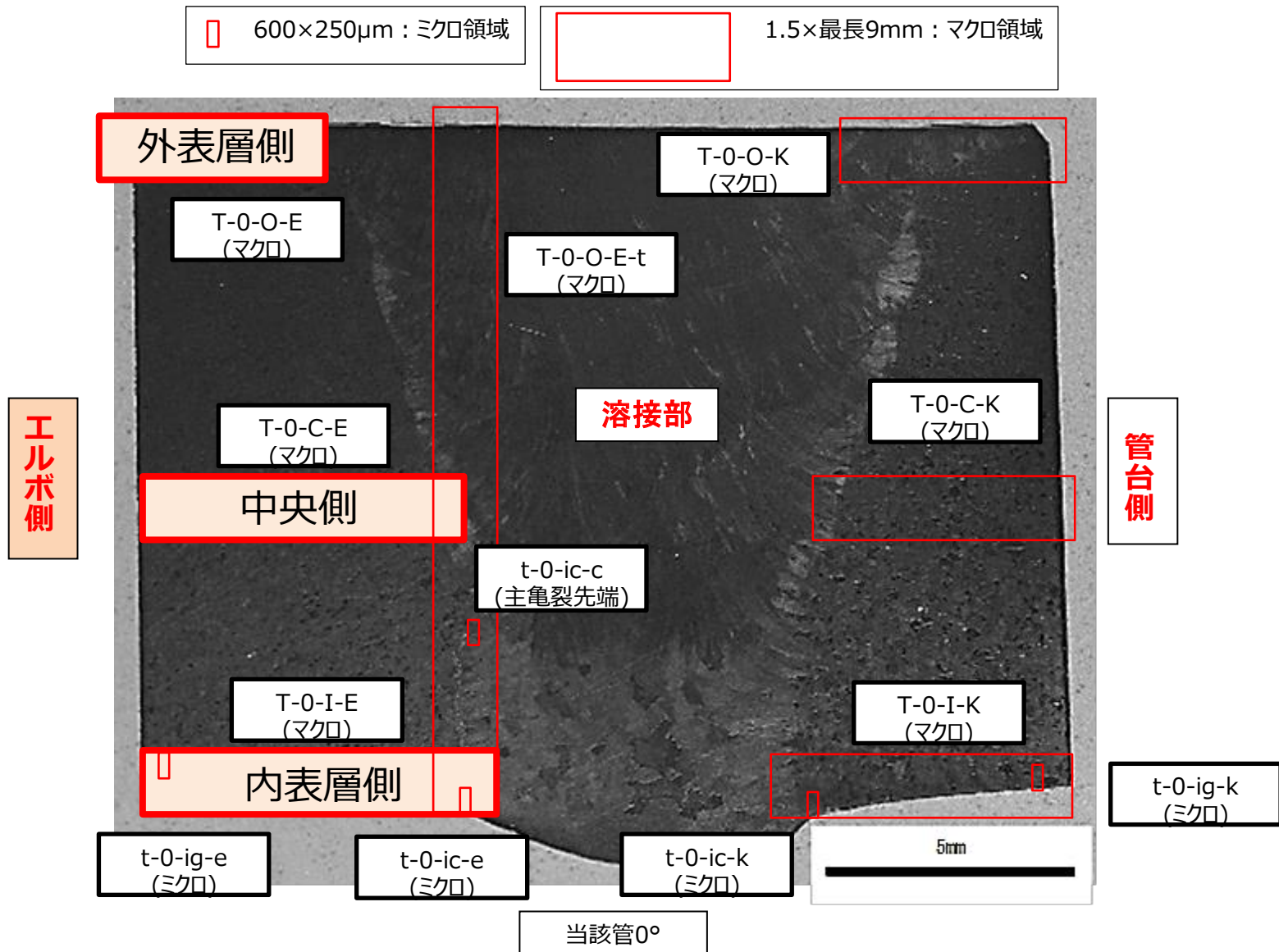
(2-1)EBSD計測評価パラメータを用いたマイクロ領域データ整理 (KAMマップ (当該管エルボ側HAZ))

当該管	マイクロ計測：内表層側の HAZ 溶接境界近傍部 (エルボ側)				
評価パラメータ	0°	320°	90°	160°	270°
	t-0-ic-e	t-320-ic-e	t-90-ic-e	t-160-ic-e	t-270-ic-e
KAM マップ					
	内表層側 (←亀裂)	内表層側	内表層側	内表層側	内表層側
KAM ヒストグラム					
評価結果	<ul style="list-style-type: none"> 当該管の内表層側の HAZ 溶接境界近傍部 (エルボ側) では、内表層近傍で高 KAM 値、結晶粒界でも高 KAM 値であった。 0° 断面では、他に比べて内表層側で高 KAM 値の結晶粒界が顕著であった。 				

局所ひずみ測定(KAM：当該管エルボ側一般部) (実績)

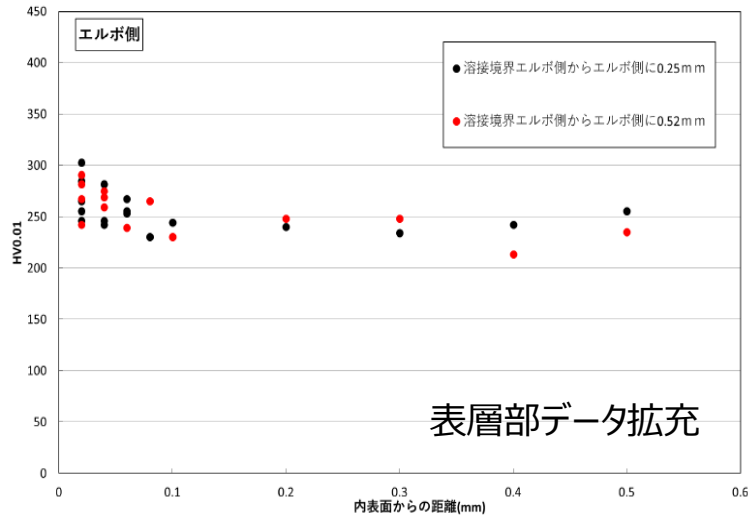
(2-2)EBSD計測評価パラメータを用いたマイクロ領域データ整理 (KAMマップ (当該管エルボ側一般部))

当該管 評価パラメータ	マイクロ計測：内表層側の母材一般部 (エルボ側)				
	0°	320°	90°	160°	270°
KAM マップ	t-0-ig-e  内表層側	t-320-ig-e  内表層側	t-90-ig-e  内表層側	t-160-ig-e  内表層側	t-270-ig-e  内表層側
KAM ヒストグラム	t-0-ig-e 	t-320-ig-e 	t-90-ig-e 	t-160-ig-e 	t-270-ig-e 
評価結果	<ul style="list-style-type: none"> 当該管の内表層側の一般部 (エルボ側) では、内表層側ではシンニング加工の影響と思われる KAM 値が大きくなっており、結晶粒界でも顕著に KAM 値が大きかった。 				

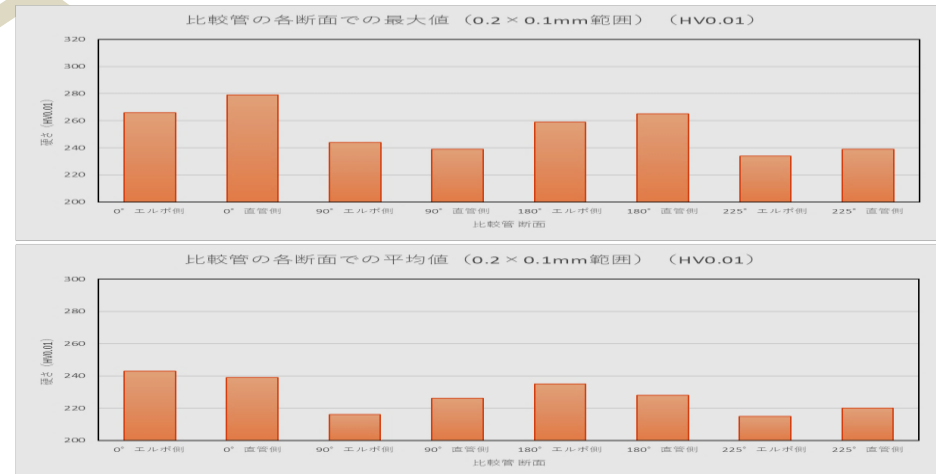
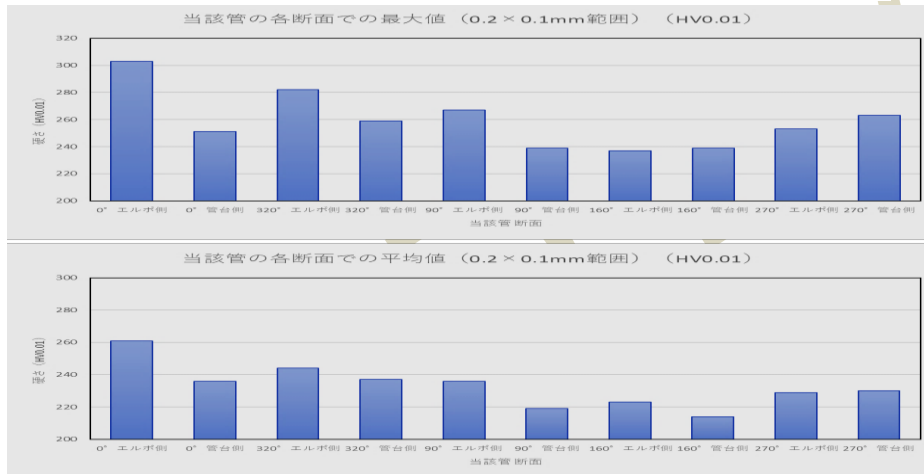
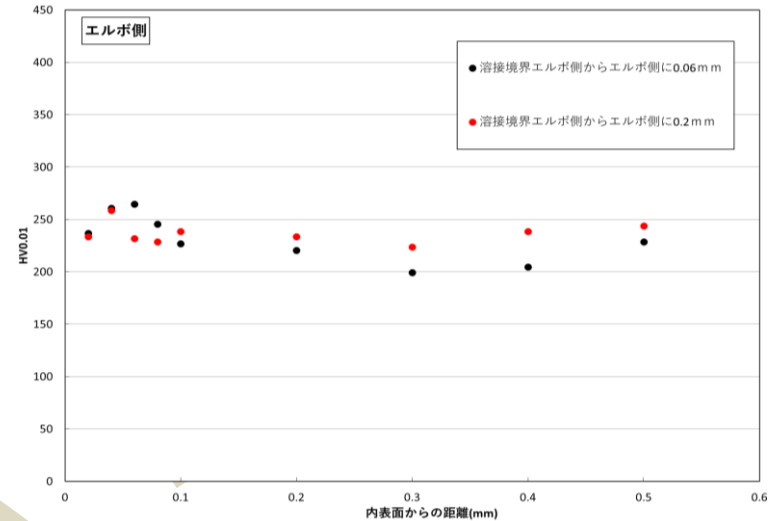


断面硬さ測定（実績）

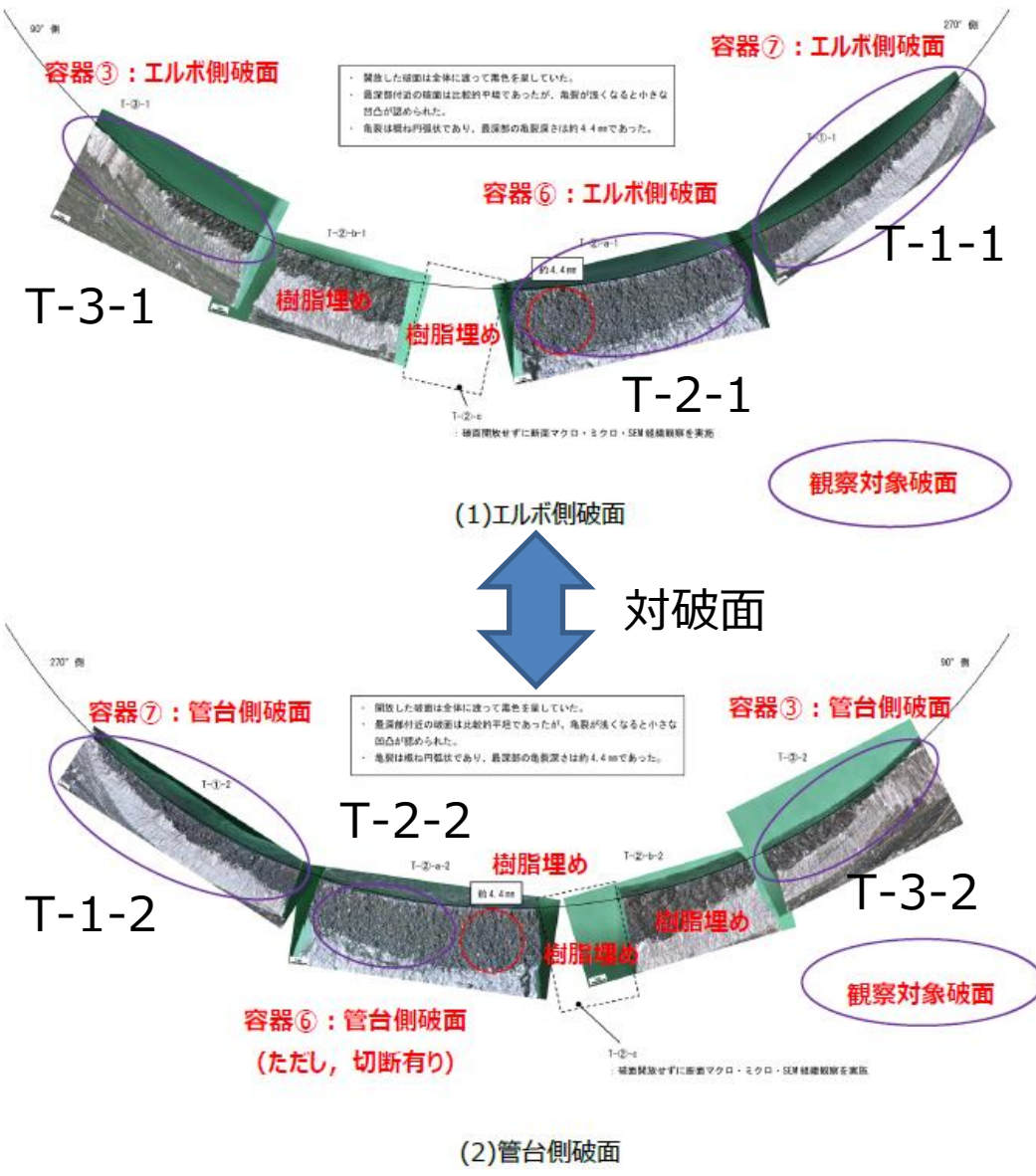
当該管0°エルボ側の硬さ計測(HV0.01)



比較管0°エルボ側の硬さ計測(HV0.01)

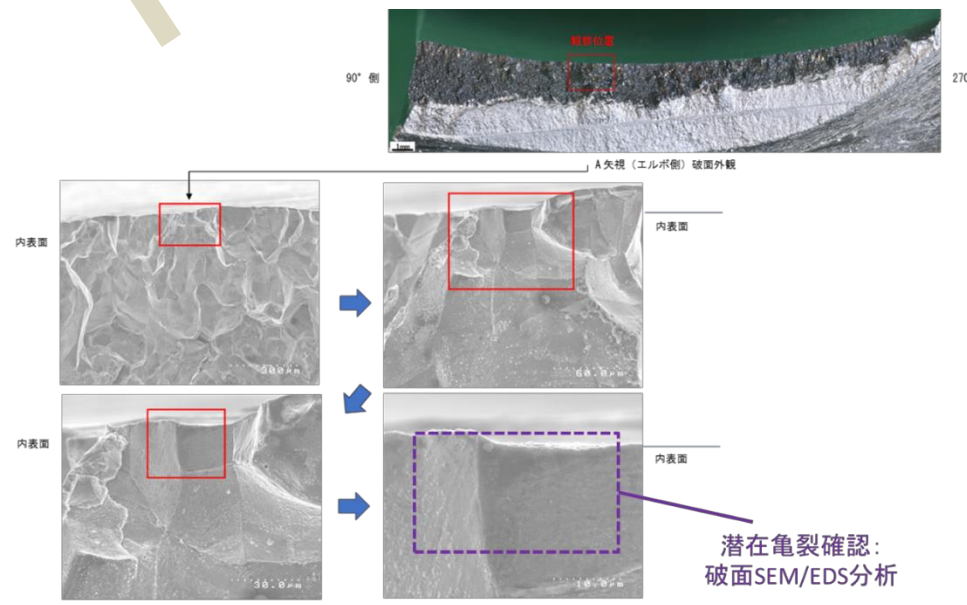


- ミクロ硬さ（HV0.01）からは、比較管0°エルボ側、また、他の断面と比べても当該管0°エルボ側の主亀裂周辺での内表層側では硬化（最大303HV0.01）の傾向が大きい。

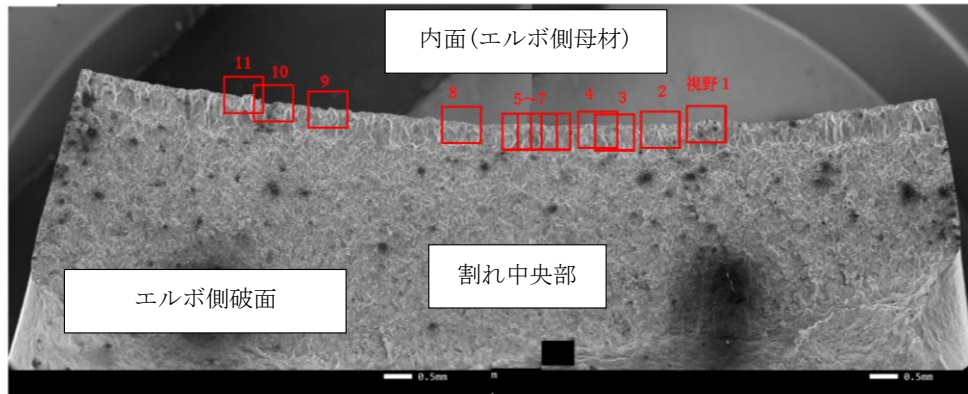


破面SEM詳細観察の部位：

- 当該管0°のHAZ近傍で認められた主亀裂破面（約60mm長さ）は、先行調査で5分割されており、中央近傍は、断面マクロ・ミクロのために一部樹脂埋めされている。
- 本調査では、樹脂埋めされていない破面（エルボ側及び管台側）に対してSEMにて拡大観察することとした（○印の破面を対象）。

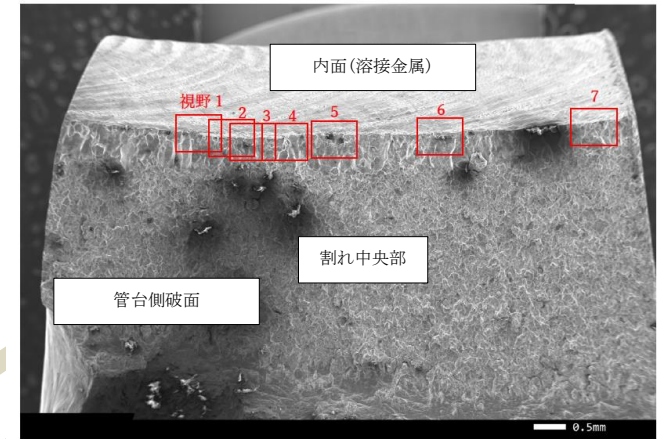


当該管クレータ部のHAZ粒界割れ破面SEM拡大観察結果



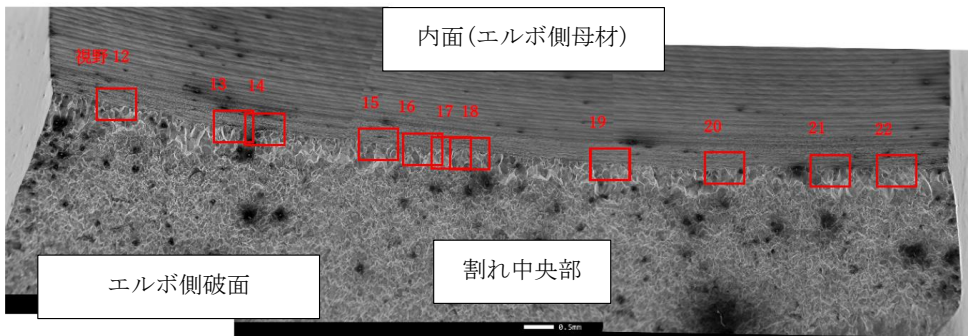
□：観察位置(視野)

当該管 (T-2-1) の破面SEM (全体：エルボ側)



□：観察位置(視野)

当該管 (T-2-2) の破面SEM (全体：管台側)



□：観察位置(視野)

当該管 (T-2-1) の破面SEM (傾斜40°：エルボ側)



□：観察位置(視野)

当該管 (T-2-2) の破面SEM (傾斜40°：管台側)

当該管(T-2-1：主亀裂中央部エルボ側)の破面

当該管(T-2-2：主亀裂中央部管台側)の破面

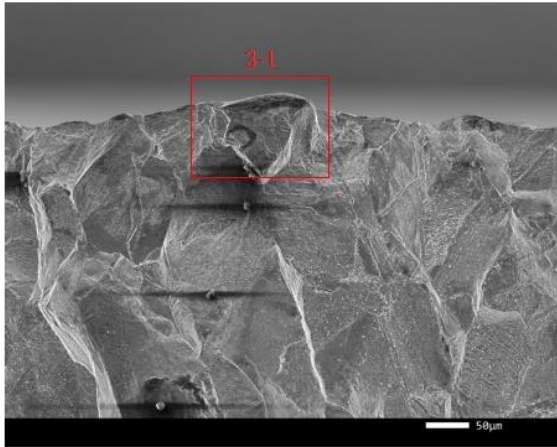
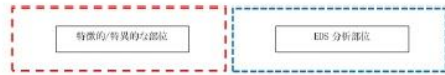


図 3.3.2.3-7-8 当該管(T-2-1)の破面 SEM 観察結果 (視野 3)

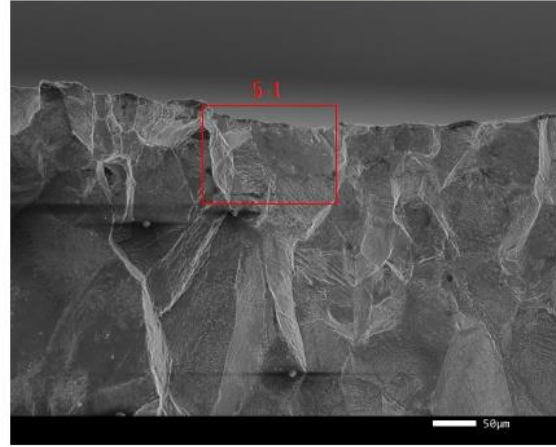
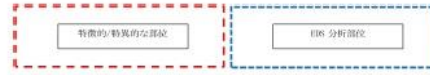


図 3.3.2.3-7-12 当該管(T-2-1)の破面 SEM 観察結果 (視野 5)

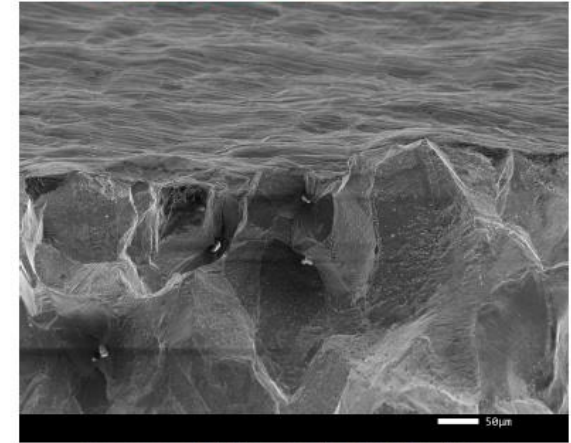


図 3.3.2.3-8-10 当該管(T-2-1)の破面 SEM 観察結果 (視野 20)

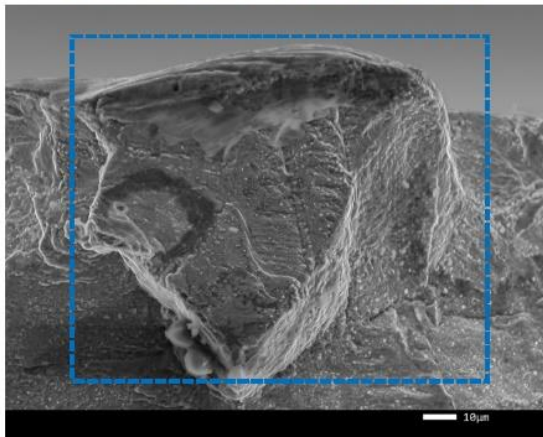


図 3.3.2.3-7-9 当該管(T-2-1)の破面 SEM 観察結果 (視野 3-1)

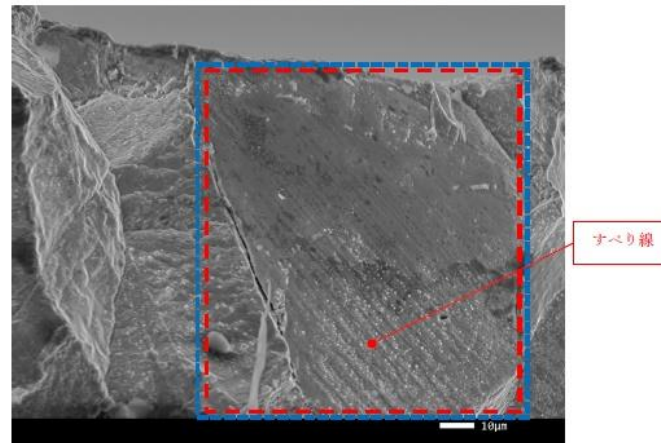


図 3.3.2.3-7-13 当該管(T-2-1)の破面 SEM 観察結果 (視野 5-1)

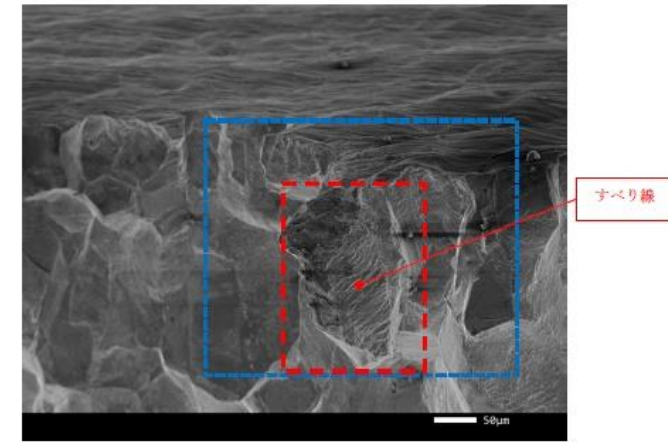
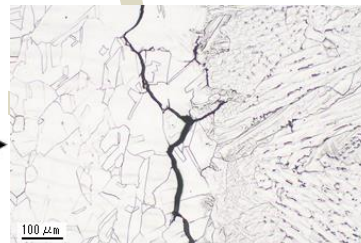
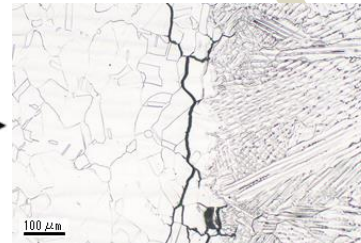
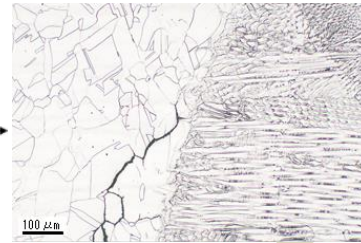
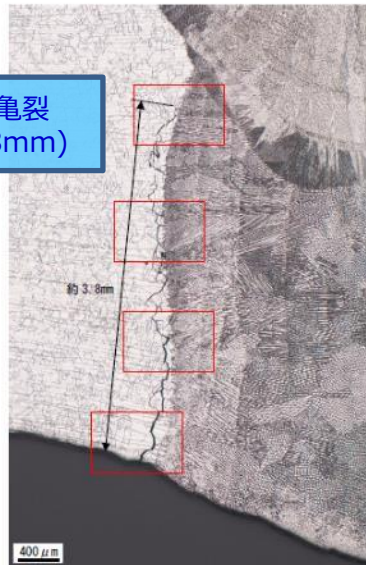
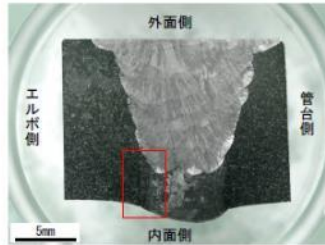


図 3.3.2.3-8-11 当該管(T-2-1)の破面 SEM 観察結果 (視野 21)

当該管(T-2-1 : 主亀裂中央部エルボ側)の破面SEM観察結果 (代表破面)

断面マクロ・ミクロ観察（実績：代表①）

当該管0°エルボ側の主亀裂の断面マクロ・ミクロ観察結果（溶接欠陥有無の確認）



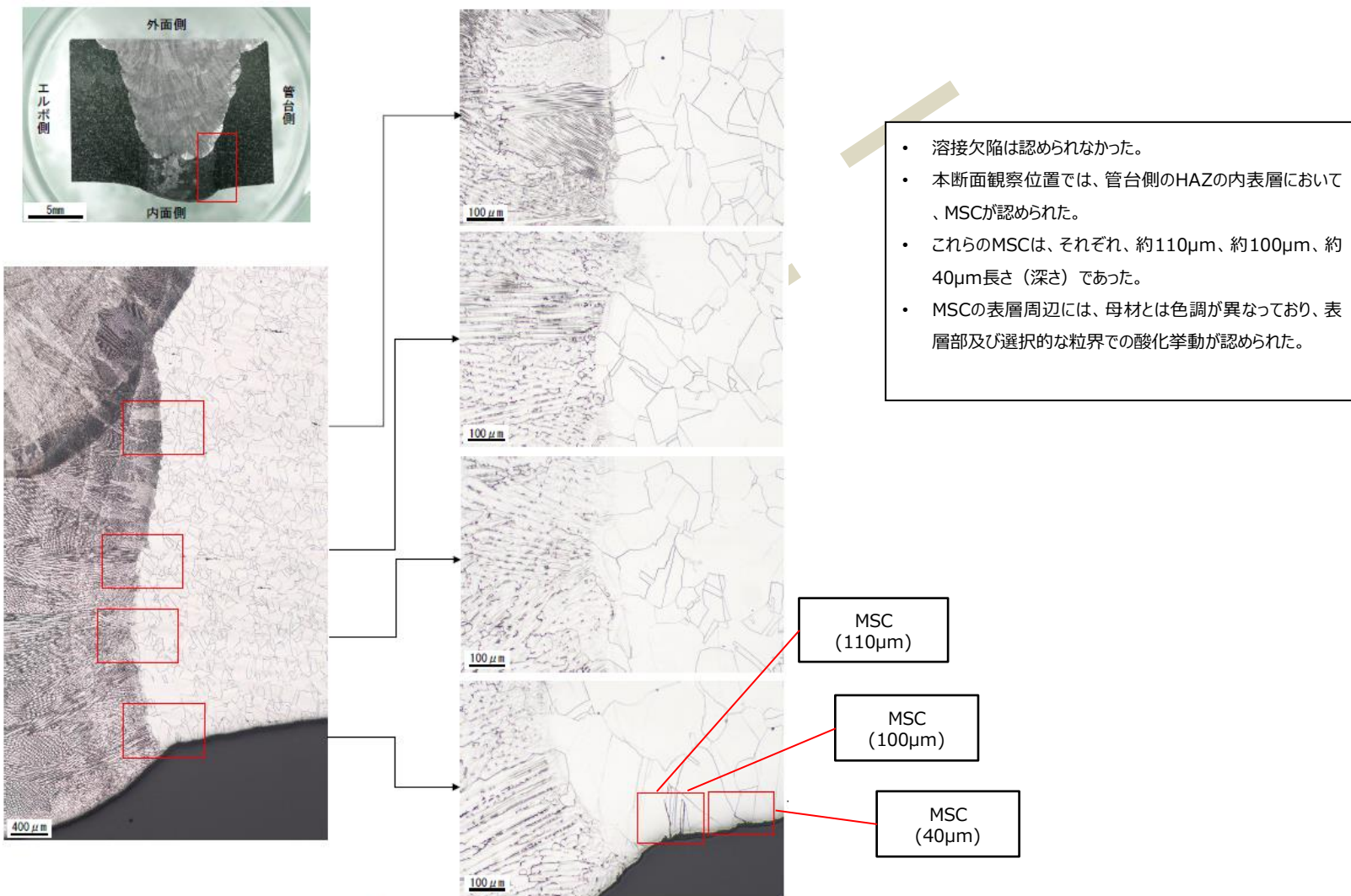
- 溶接欠陥は認められなかった。
- 本断面観察位置では、エルボ側のHAZの内表層において、先行調査で認められていた主亀裂が認められた。
- 主亀裂は、結晶粒界（境界）で進み、約3.8mm長さ（深さ）であった。
- 主亀裂の近傍には、約50μmのMSCが認められた。
- 主亀裂の表層周辺には、母材とは色調が異なっており、表層部及び選択的な粒界での酸化挙動が認められた。

*MSCとは、Microstructurally Small Crackの略。ここでは、非破壊検査（目視、PTなど）では検出されることが無い、断面ミクロ観察等の拡大観察により確認可能な、溶接熱影響部に生じる1結晶粒程度の非常に微細な裂け目と定義。

MSC
(50μm)

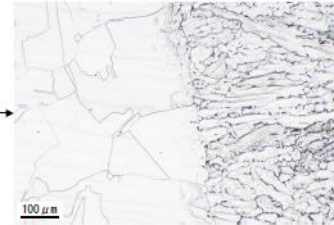
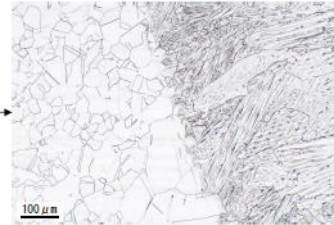
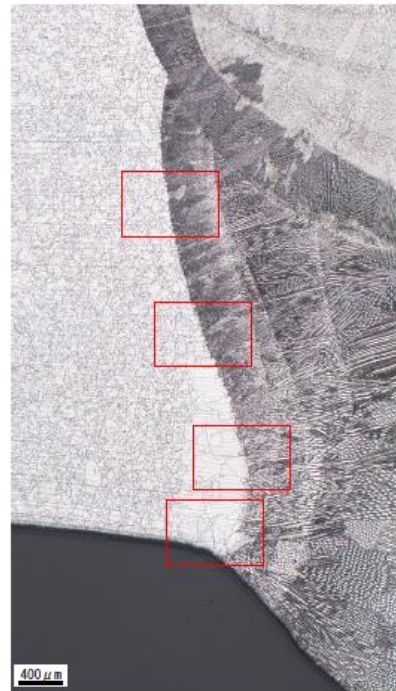
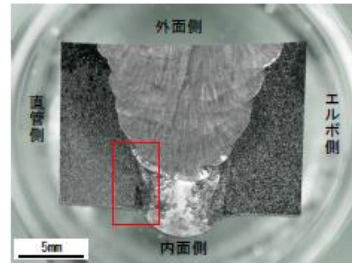
断面マクロ・ミクロ観察（実績：代表②）

当該管0°管台側の断面マクロ・ミクロ観察結果（溶接欠陥有無の確認）



断面マクロ・ミクロ観察（実績：代表③）

比較管180°直管側の断面マクロ・ミクロ観察結果（溶接欠陥有無の確認）

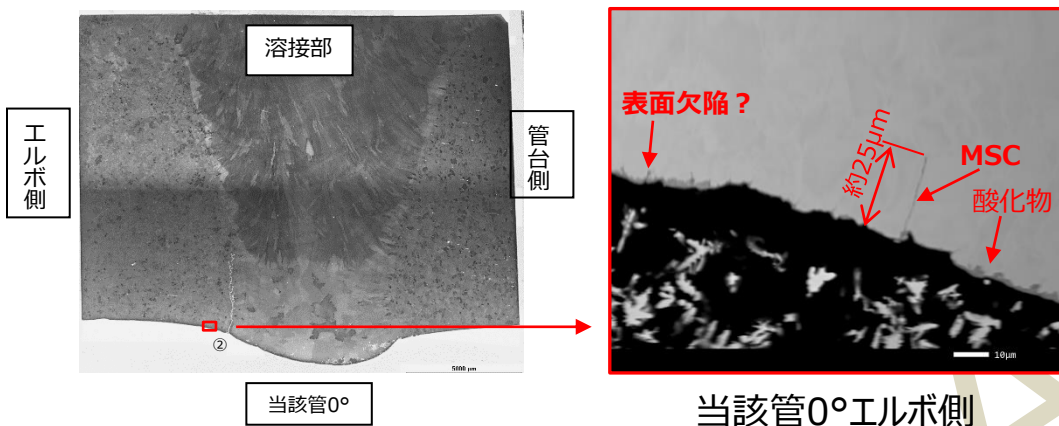


- 溶接欠陥は認められなかった。
- 本断面観察位置では、直管側のHAZの内表層においてMSCが認められた。
- MSCは、約280μm長さ（深さ）であった。

MSC
(280μm)

SCC発生に関する考察① -断面観察結果からの情報-

- 断面マクロ・ミクロによる観察の結果、溶接欠陥は確認されなかった。
- その他の事項としては、MSCが確認された。

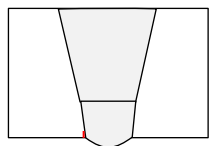


Microstructurally Small Crack(MSC) :
ここでは、「非破壊検査では検出されない、1結晶粒程度の微細な裂け目」と定義

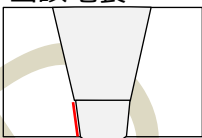
- 溶金とHAZの境界近傍に形成。
- 微細な表面欠陥をとして形成？
- MSCから粒界割れ亀裂への移行には特異な硬さが重要な役割を果たしたと推察。

当該管0°断面マクロ観察結果

溶接時に微細な
表面欠陥が形成か？

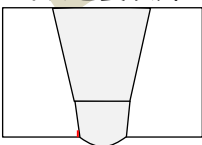


当該亀裂

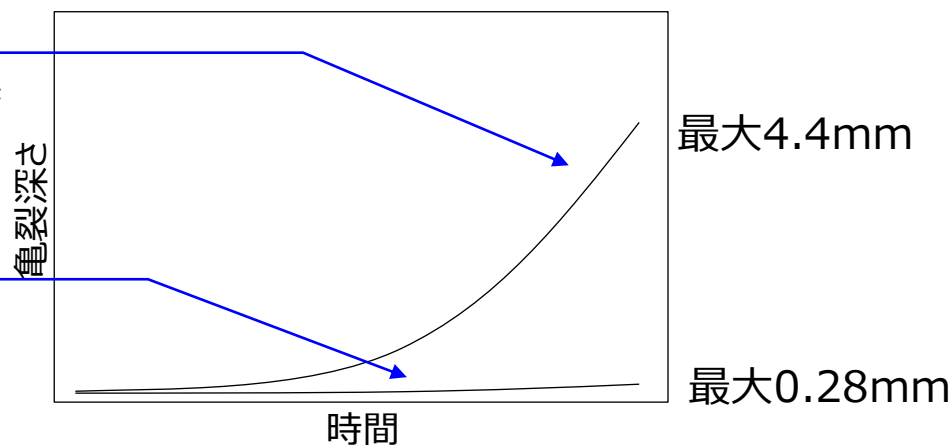


SCCによる進展
特異な硬化により亀裂に成長？
(O3スプレ配管)

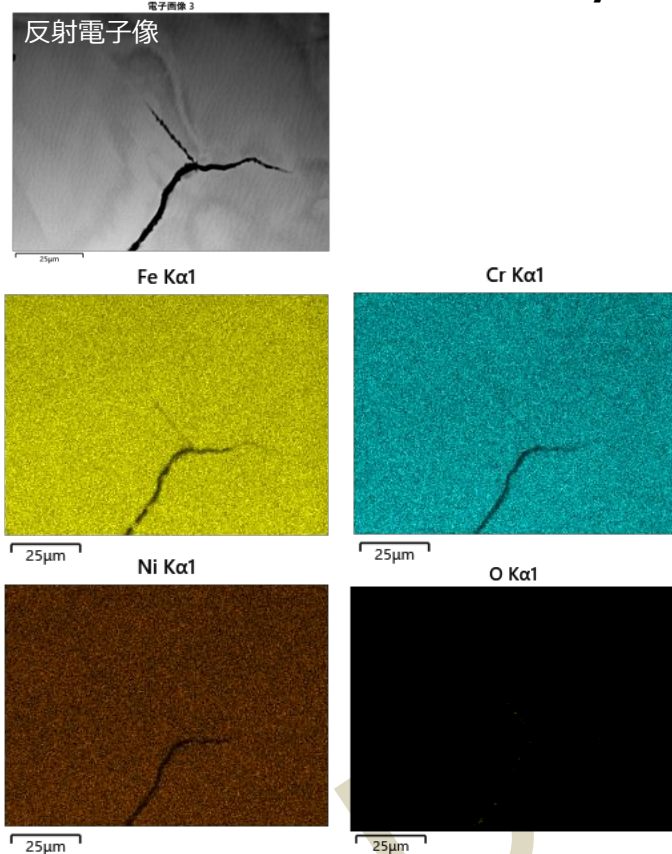
当該亀裂以外



MSC
通常の硬化程度では殆ど進展しなかった？



主亀裂先端の断面SEM/EDS

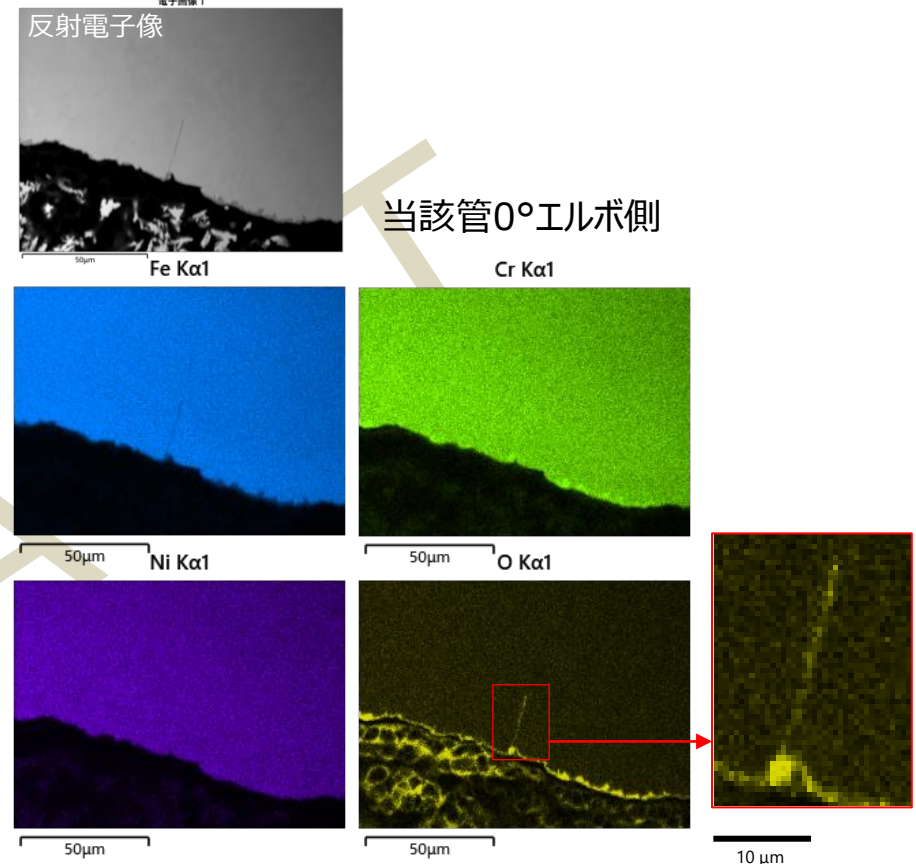


EDS組成マップ

主亀裂先端では酸素が検出されていない。

➤ 進展性を示唆

MSC断面SEM/EDS



EDS組成マップ

MSCでは酸素が検出されている。

➤ 長時間の停留を示唆

⇒ 特異な硬化が生じていない部位のMSCはいずれも1結晶粒程度の大きさであり、更に、主亀裂先端とは異なり、停留を示唆する酸素（酸化物）が検出されている

実機詳細調査（損傷部位、比較部位）のまとめ

①当該管0°エルボ側の主亀裂の特異性

- 主亀裂発生位置に対する特異性の有無に関して、EBSD計測結果から、結晶粒粗大化、HAZの内表層側で高ひずみ（KAM値等）が認められた。
- 硬さは、当該部位では硬化傾向（最大303HV0.01）であった。
- 一方、内表層側での一般部となるシンニング部位でもひずみ量が高い領域が認められていたが、亀裂は認められなかった。
- このシンニング部位の領域では、先行調査で顕著な硬化（350HV0.01）が認められていたこともあり、EBSD計測結果に関しては、新たなデータ整理法を含め、更なる分析を行う。
- 更に、主亀裂に対する金属組織等（Cr欠乏層、元素偏析、析出物、転位密度）の差に関しては、TEM/EDSを用いた詳細調査を行う。

②破面における溶接欠陥の調査

- 内表層部の起点側に着目してSEMでの拡大観察及びEDS分析を行ったが、溶接欠陥に起因するような影響ある元素は認められなかった。

③断面ミクロにおける潜在欠陥の調査

- 先行調査で認められていた主亀裂（当該管0°エルボ側）以外に有意な亀裂は認められなかった。
- ただし、非破壊検査（PT検査）では検出されない、MSC*が当該管や比較管で認められた。
- 特異な硬化が生じていない部位のMSCはいずれも1結晶粒程度の大きさであり、更に、主亀裂先端とは異なり、停留を示唆する酸素（酸化物）が検出された。
- ただし、これらの1結晶粒程度のMSCが、溶接時または運転時に粒界結合力の低下で生じた可能性を明らかにするためにも、追加した詳細観察や分析での評価が必要である。

*MSCとは、Microstructurally Small Crackの略。ここでは、非破壊検査（目視、PTなど）では検出されることが無い、断面ミクロ観察等の拡大観察により確認可能な、溶接熱影響部に生じる1結晶粒程度の非常に微細な裂け目と定義。

目次

1. 振り返り

2. 2022年度検討内容

2.1 最新知見の調査

2.2 実機詳細調査（損傷部位、比較部位）

2.3 SCC進展特性知見の調査

2.4 SCC進展知見に拠る試評価

3. まとめ

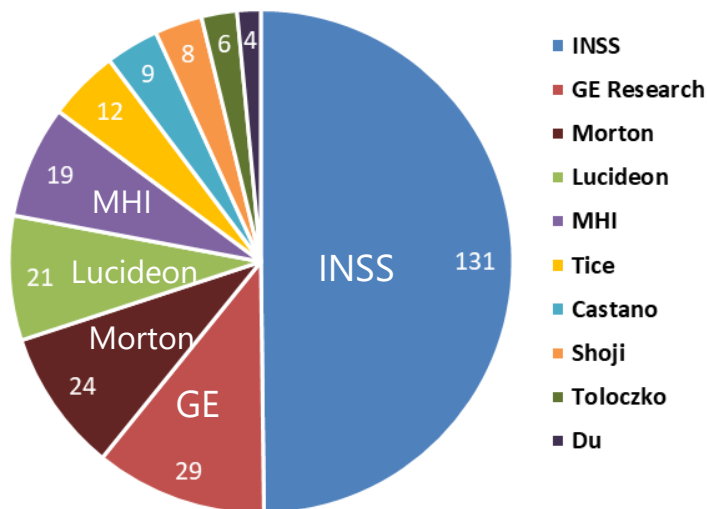
- PWR一次系環境中におけるオーステナイト系ステンレス鋼のSCC進展速度式が、EPRI MRP-458として2022年8月に公開された。
- 上記提案式を調査し、どのような試験データから、どういった影響因子を考慮して進展式を構築しているかを明らかにすることで、大飯3号の事例を念頭に、国内で整備する進展速度式において考慮が必要と考えられる事項を整理し、今後拡充すべきデータに関する知見を収集する。

SCC進展特性知見の調査：EPRI式（MRP-458）

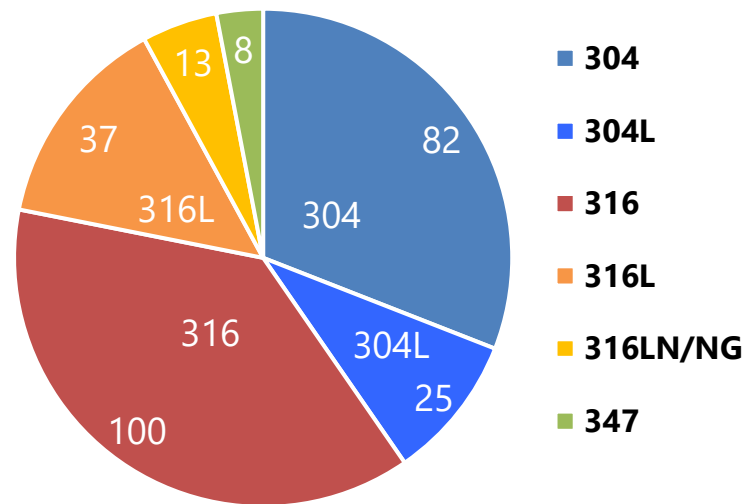
- 試験環境を問わずオーステナイト系ステンレス鋼に関する924点の進展データを収集して試験条件とデータ品質の観点からスクリーニングを実施し、PWR一次系環境のSCC進展を代表するデータベースとして265点を選定。個別データが報告書に添付される形でexcelファイルとして公開されている。
- データベースの試験条件はPWR実機の条件を考慮しており、冷間加工(CW)率10-25%、試験温度270-340℃、 $K = 13-80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。
- データ品質的に有効と判定された場合についても、HAZは定式化のためのデータベースには含まれていない。
- 周期的除荷を含むデータはデータベースに含まれていない。
- 試験データと既存知見から、温度、硬さ(HV)、応力拡大係数をパラメータとした。
- 硬さデータが不明な場合は、CW率、0.2%耐力から換算式により推定する。
- 実験データと実機の条件の比較等により、75%包絡線は評価上十分に保守的であるとして推奨。

SCC進展特性知見の調査：EPRI式（MRP-458）のデータベース

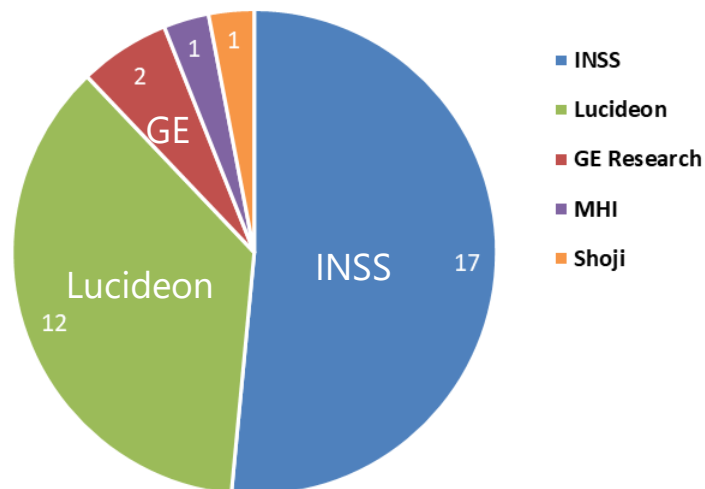
PWR Mainstream Data (265 data)



PWR Mainstream Data (265 data) 鋼種内訳



PWR Representative HAZ Data (33 data)



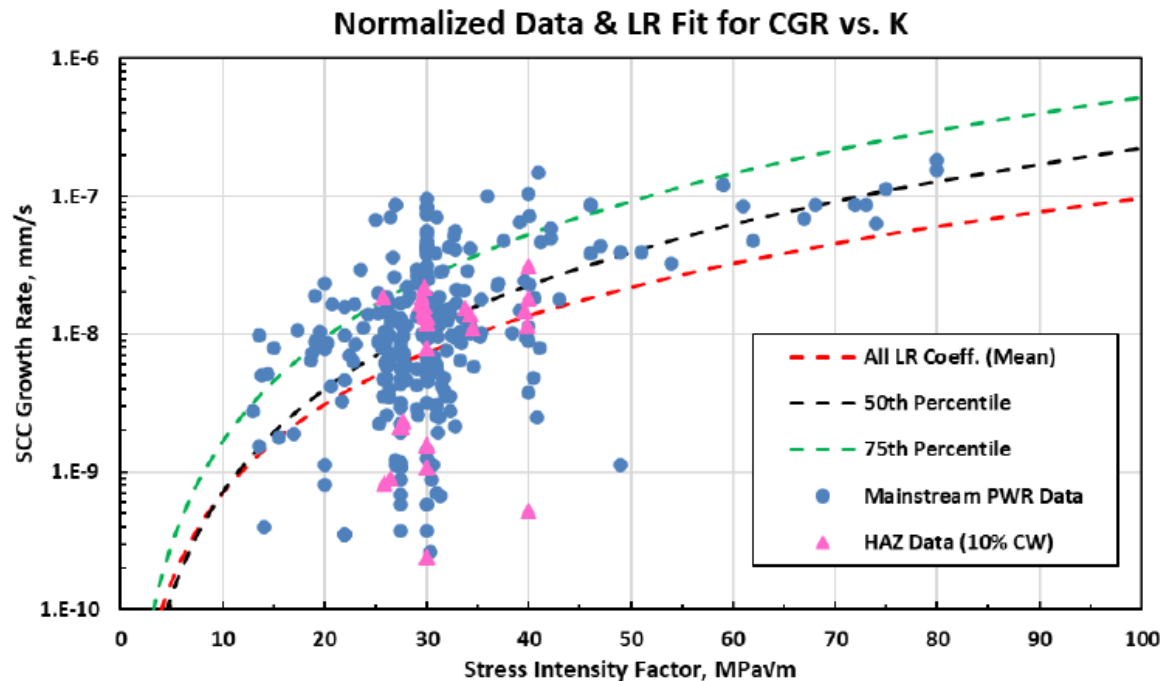
- データベースは半数以上を国内データ（INSS・MHI）が占める。
- 鋼種の割合は304系が約40%、316系が約57%となっている。

SCC進展特性知見の調査：EPRI式（MRP-458）

EPRI報告書にて提案されたSCC速度式（50%、75%包絡線）

$$\text{CGR} = 1.50 \times 10^{-18} K^{2.5} H_V^{6.0} \exp(-85,000/RT) \quad (50\% \text{包絡線})$$

$$\text{CGR} = 3.19 \times 10^{-18} K^{2.5} H_V^{6.0} \exp(-85,000/RT) \quad (75\% \text{包絡線})$$

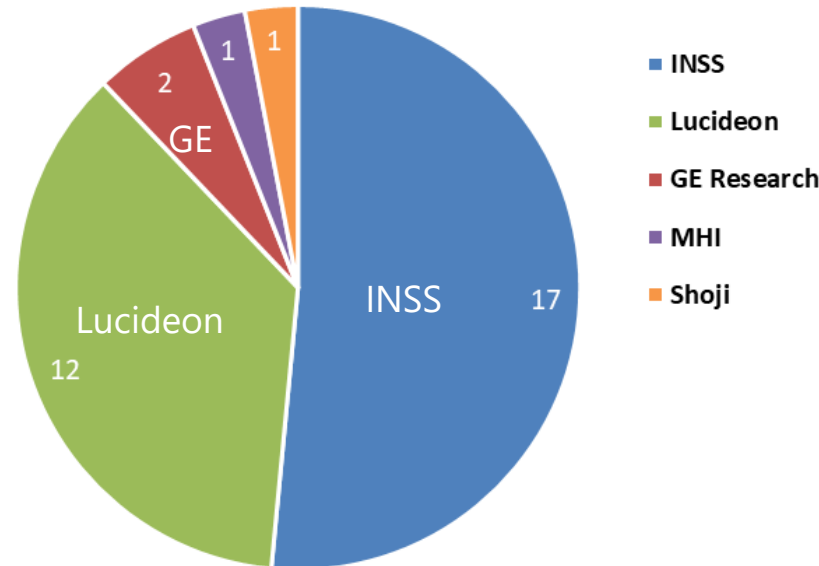


個別データは220 HVおよび290°Cに換算した値としてプロットされている。

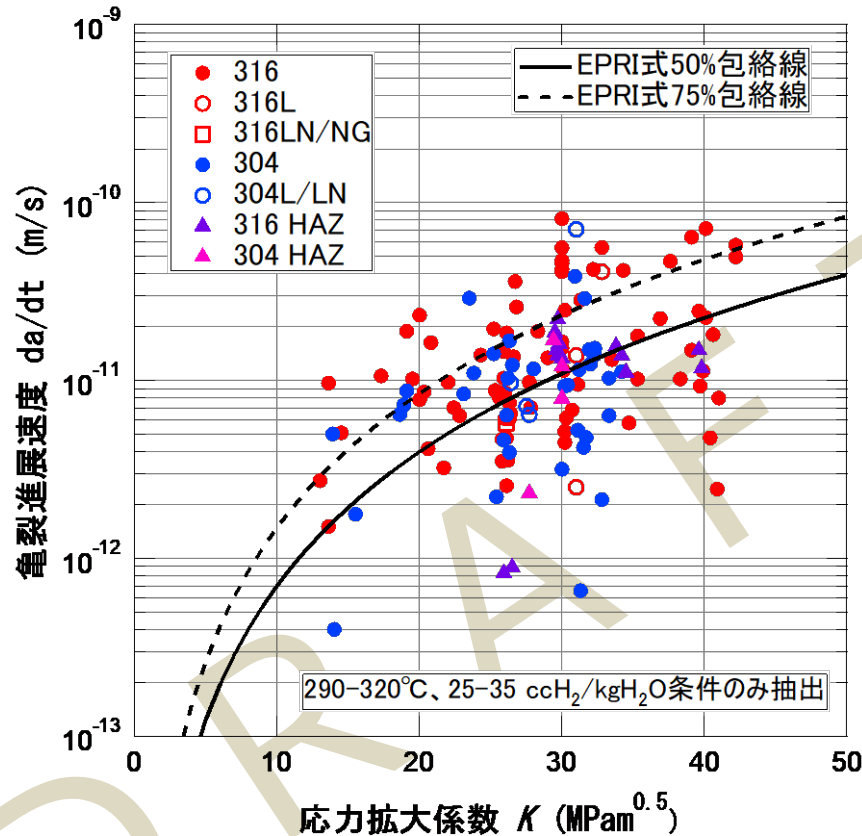
Figure 3-20

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 .

PWR Representative HAZ Data (33 data)



- 290℃～320℃の条件に絞った場合は18データとなり、国内データのみで構成される（1データは周期的荷重除荷条件）。
- INSSデータについては、実測硬さ（HV0.05もしくはHV0.01）をグラフからの読み取り値として把握できる。
- 供試材とした板材の突き合わせ溶接材HAZ（SUS304とSUS316）については、進展速度に差がないことを報告している※。



- MRP-458に含まれるデータにおいて、290-320°C、25-35 cc/kg H₂に限定した場合、当該データはほぼ国内データで構成される。
- この場合、鋼種、CW材とHAZの間に顕著な差異は認められない。
- HAZデータは75%包絡線によって安全側の評価となる。

- ✓ MRP-458を調査した結果、定式化のデータベースには多数の国内データが含まれていることを確認した。
- ✓ データベースに含まれる全データを参照した場合には比較的大きなばらつきを持つデータとなるものの、国内PWR一次系環境を代表する条件のデータ（290-320℃、25-35 cc/kg H₂条件）のみを参照した場合、CW材とHAZのデータに特徴的な差異は認められず、暫定的にはEPRI式でSCCによる亀裂進展評価を実施することが可能と考えられるが、さらに検討を深める。

目次

1. 振り返り

2. 2022年度検討内容

2.1 最新知見の調査

2.2 実機詳細調査（損傷部位、比較部位）

2.3 SCC進展特性知見の調査

2.4 SCC進展知見に拠る試評価

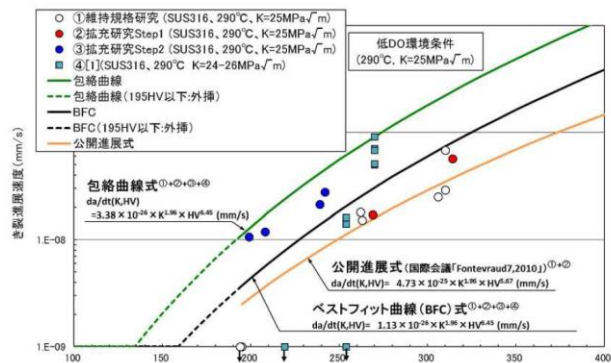
3. まとめ

亀裂進展評価 背景と取り組み

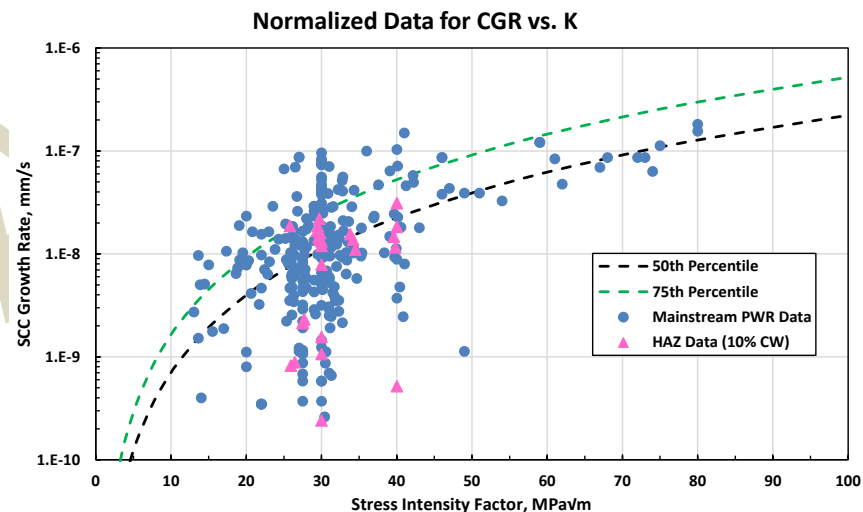
<背景>

- 大飯3号スプレイ配管事象は、**10年毎**に行われる供用期間中検査で確認された。
- 当該部と類似性が認められた領域は、水平展開として**毎定検検査**を実施している。
- **適切な検査頻度**を確立するためには、保守的な亀裂進展評価が必要。
- 事象発生時は限定的なデータで判断していたが、2022年EPRIが亀裂進展速度式を発行した。

事象発生時は限定的なデータ



2022年EPRIが発行した進展データ (MRP-458)



<今後の取り組みおよび2022年度の検討>

- **ATENAは、今後、適用可能な亀裂進展評価手法を検討し、その妥当性を確認していく。**
- そのような中で2022年に**EPRI式**が発行され、その検討には国内データも含まれている。
- そこで、**大飯3号の条件をEPRI式に入力した場合の亀裂進展に関する試評価**を行った。

EPRI式を用いた進展評価の方法

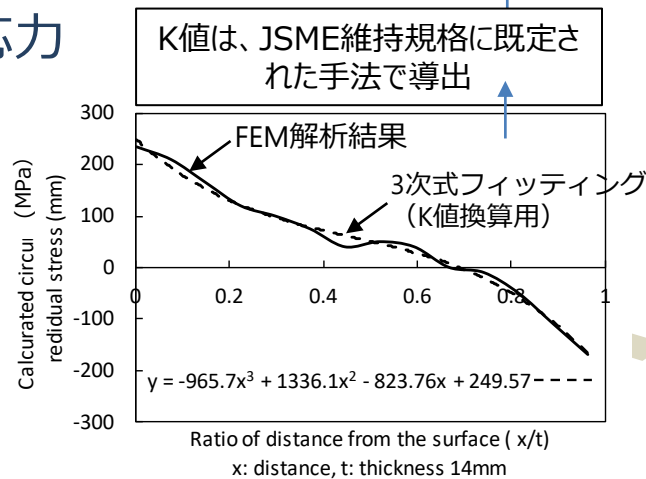
- EPRI式では、①評価式に②応力、③硬さを導入することで亀裂進展速度を計算可能
- 試評価には以下のパラメータを採用。

①評価式

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

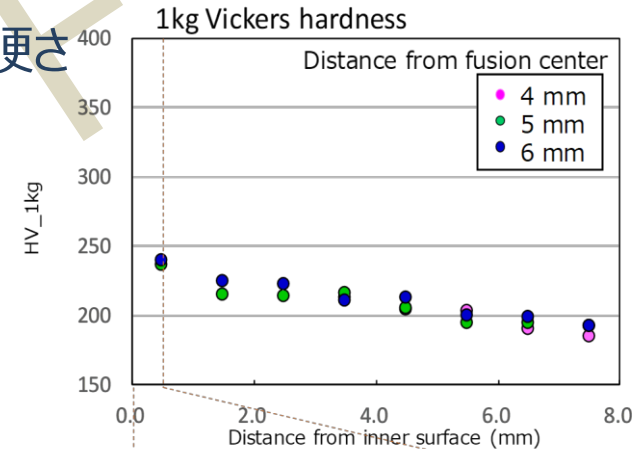
亀裂進展速度 (CGR) ← $K^{2.5}$ ← 応力 (K) ← FEM解析結果
 $HV^{6.0}$ ← 硬さ (HV) ← 1kg Vickers hardness
 $\exp(-85000 / RT)$ ← 活性化エネルギー (J/mol) ← RT ← 温度 (290°C) × 気体定数 8.314 J/mol·K

②応力



IAF事業の手法によりMHIが評価した残留応力 + 運転応力を板厚方向の応力として活用
 (出典: <https://www2.nra.go.jp/data/000339736.pdf>)

③硬さ



大飯3号スプレイ配管の実測値
 ・深さ方向の進展は1kg荷重での測定実績
 ・長さ方向は10g荷重の表面最大 (350HV)

以下の初期亀裂を前提条件として、進展に関し試評価を実施

初期亀裂：
0.5 mm深さ（発生部に認められた大粒径のサイズ）
6.8 mm長さ（実機の深さ/長さ比率）
 （4.4/60の実機アスペクト比）

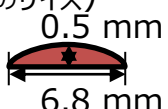
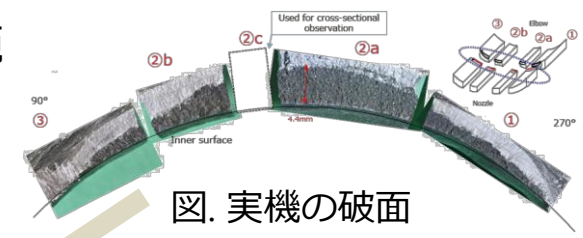
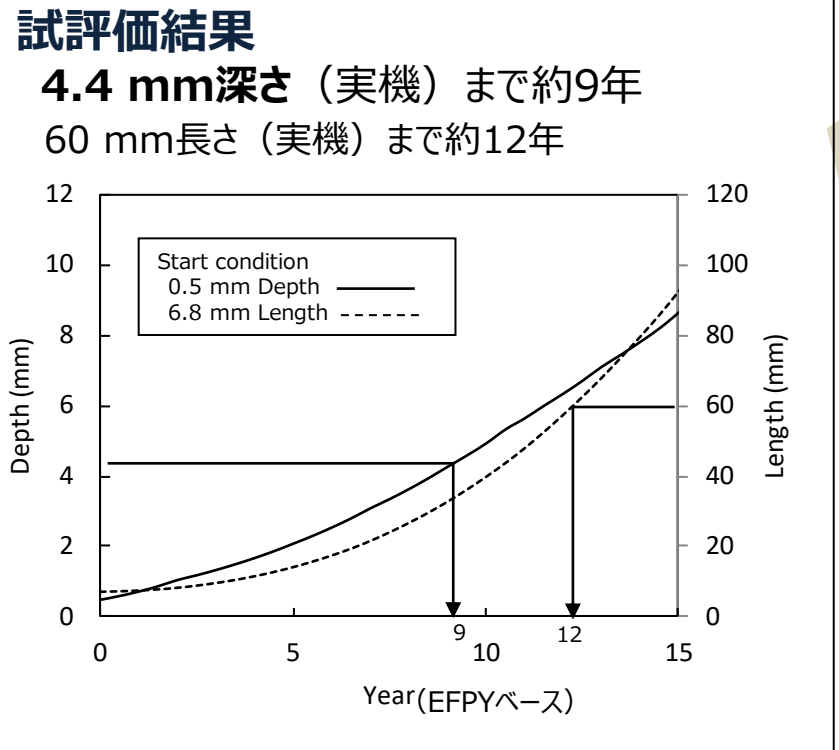



図. 実機の破面

<認識>

- 初期亀裂に至る期間は評価困難。
- EFPY 19.3年に対して、9年で4.4 mmの主亀裂の深さ(実機事象の深さ)に至った。

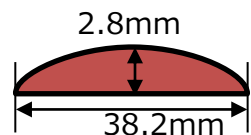
EPRI式での亀裂進展試評価（検出下限値の亀裂前提）

検出下限値の亀裂が存在する前提での進展について試評価を実施。**許容欠陥寸法の限界値**に至るまでの亀裂進展を計算した。

初期欠陥条件：

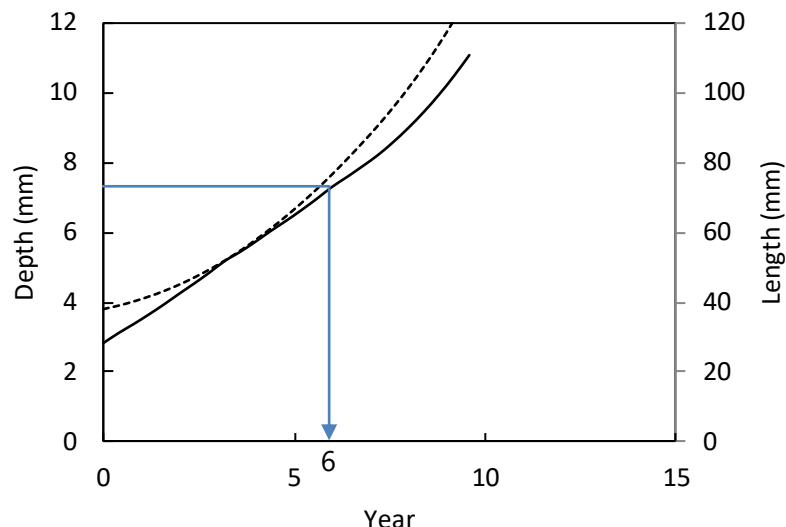
2.8 mm（検出下限値）

38.2 mm（実機の深さ/長さ比率）
（4.4/60 の実機アスペクト比）



許容欠陥寸法の限界※1に到達する期間

7.3 mm 深さ※2 → 約6年



※1 技術基準規則18条 使用中の亀裂等による破壊の防止

※2 原子力規制庁、「加圧器スプレイルイン配管公開会合の状況について（令和2年10月21日）」

<https://www.nra.go.jp/data/000332090.pdf>

<認識>

- 実機で主亀裂が顕在化したスプレイ配管の条件（特異な硬化条件）で、仮に検出下限値相当の亀裂が存在しても、許容欠陥寸法に到達するまで**約6年**を要する。

<検討結果>

- EPRI式に大飯3号スプレイ配管の条件をあてはめ、**主亀裂の進展に関する試評価**を実施。結果として、EFPY 19.3年に対して、9年で4.4 mmの主亀裂の深さ(実機事象の深さ) に至った。

目次

1. 振り返り

2. 2022年度検討内容

2.1 最新知見の調査

2.2 実機詳細調査（損傷部位、比較部位）

2.3 SCC進展特性知見の調査

2.4 SCC進展知見に拠る試評価

3. まとめ

まとめ

- 外部専門家の意見も交え2021年度に策定した計画に基づき、2022年度から具体的研究に着手し、知見の拡充を進めた。
 - ・最新知見の調査、及び実機詳細調査においては、有益な情報が得られたものの、亀裂発生メカニズムの特定・差別化には至っておらず、引続き2023年度も検討を継続する。
 - ・SCC進展特性知見の調査については、2022年度に米国EPRI式が発表され、その式に基いて大飯3号機当該部の試評価を実施した結果、実機挙動と矛盾しない結果が得られた。将来的な規格化を念頭におき、引続き2023年度も検討を継続する。
- 以上の進捗については、従前同様、規制当局と定例面談等で適宜情報共有し、必要に応じ会合にて説明させて頂く。
- なお、大飯3号機の事例を受け、PWR各プラントにおいては至近3定検の間、対象となる部位について超音波探傷試験を実施することとしている。当検討の進展特性知見を踏まえ、今後の検査継続の考え方（頻度設定等含む）について、別途議論させて頂きたい。