

# 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 9月 5日

本資料には、経済産業省「令和4年度原子力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。

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（当該管、比較管）
  - 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. 2023年度検討方針
4. 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（当該管、比較管）

### 2.3 SCC進展特性知見の調査

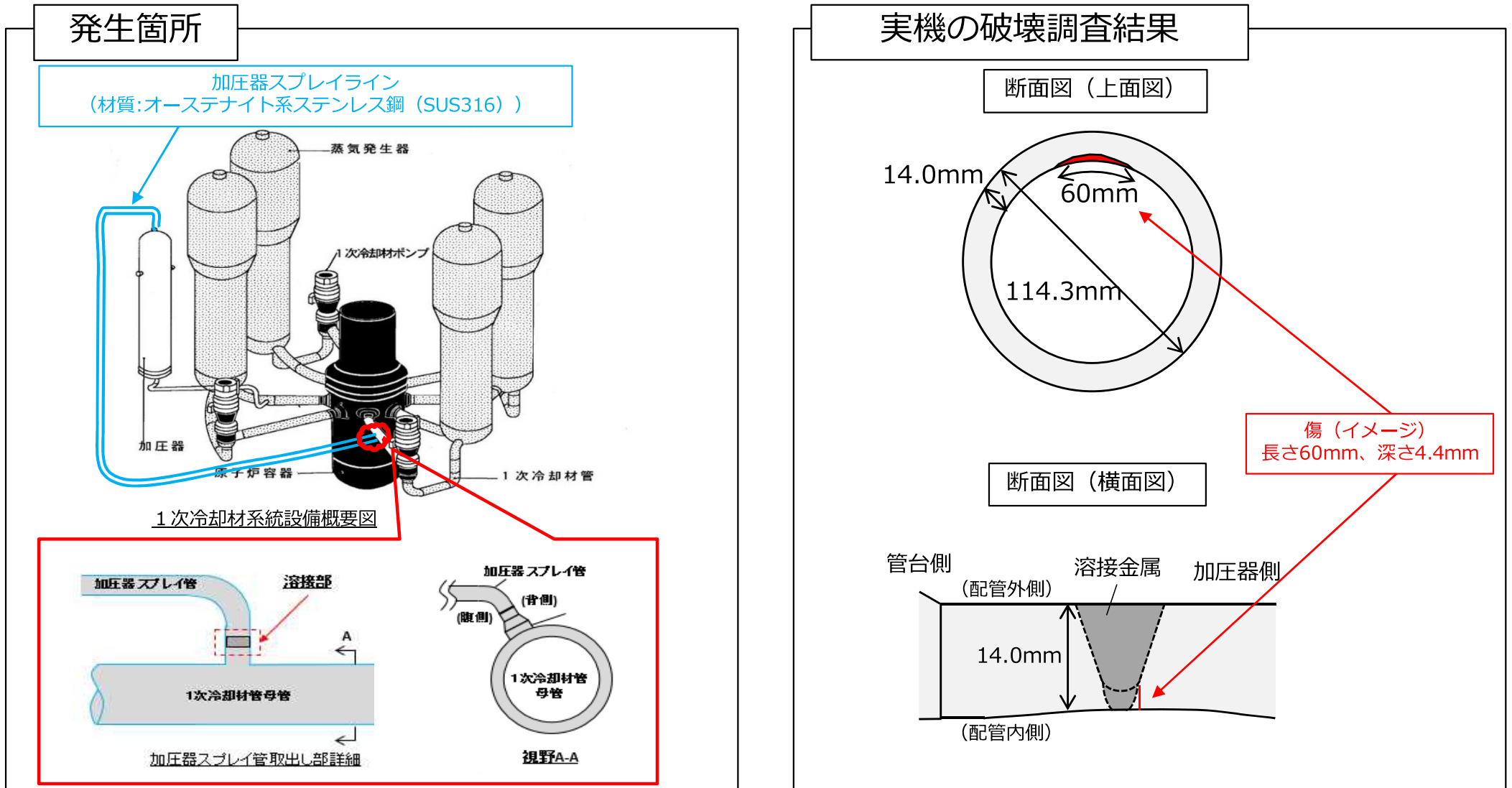
### 2.4 SCC進展知見に拠る試評価

## 3. 2023年度検討方針

## 4. 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

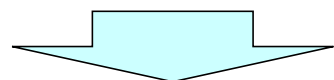
### <亀裂発生及び亀裂進展の状況整理>

(公開会合における関西電力説明)

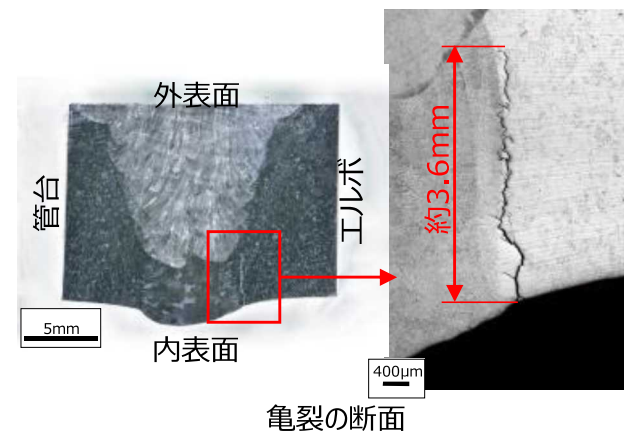
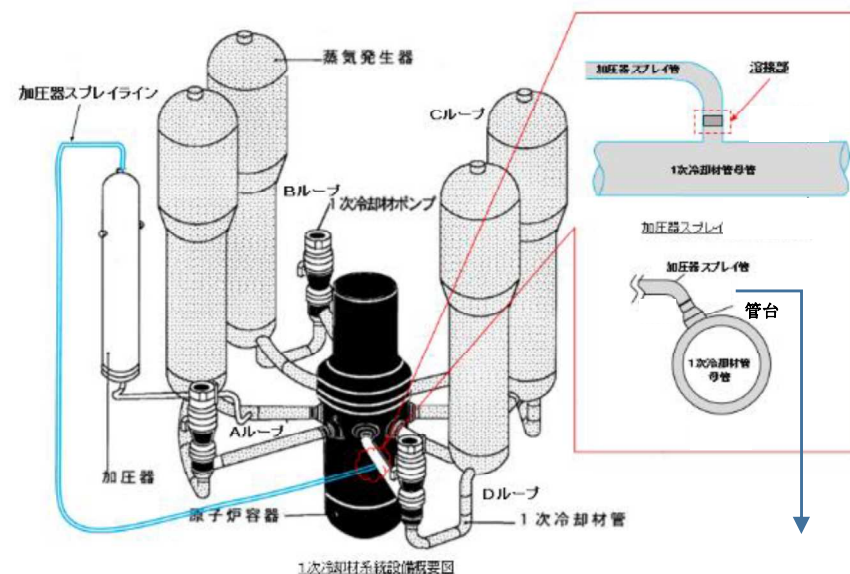
- 過大な溶接入熱と、管台-エルボ部の剛性の影響が重畳し、表層近傍において特異な硬化と応力が影響したことにより割れが発生と推定。

(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。



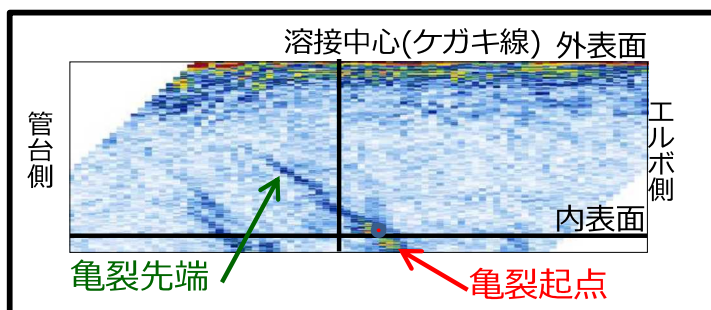
# 超音波探傷検査の概要

## <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)

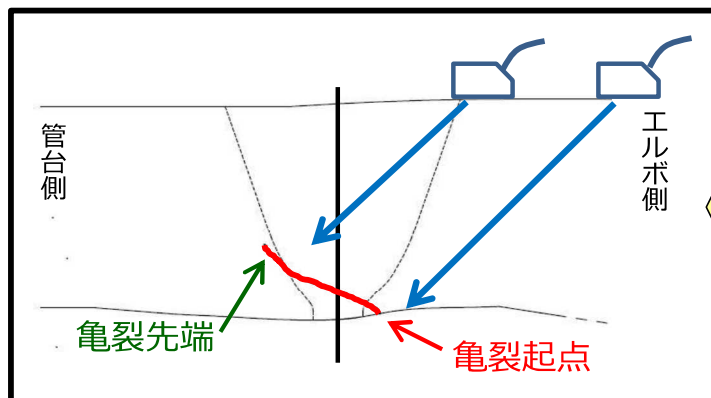
- 超音波探傷検査による非破壊試験で、亀裂の深さについては適切に評価。
  - 亀裂はエルボ側から管台側の方向に溶接部を進展していると推定したが、破壊調査の結果、亀裂はエルボ側母材の溶接部境界で板厚方向に進展していた
- ⇒ **ATENAとして、亀裂性状の誤認に対する検討が必要であると認識。**

### 現地フェーズドレイUT結果より推定した亀裂性状

現地フェーズドレイ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



現地フェーズドレイUT結果



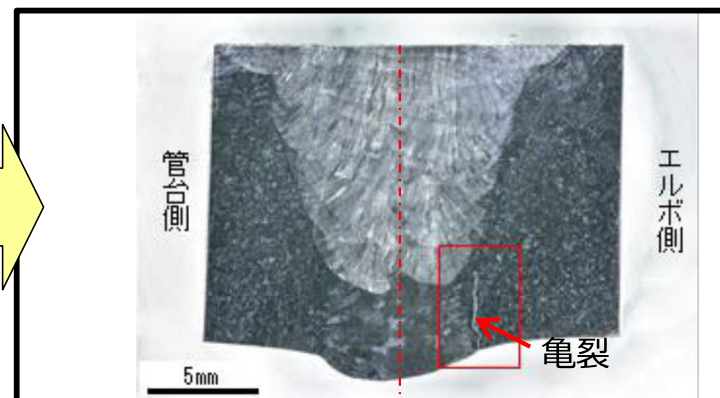
現地フェーズドレイUT結果より推定した亀裂性状

### 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

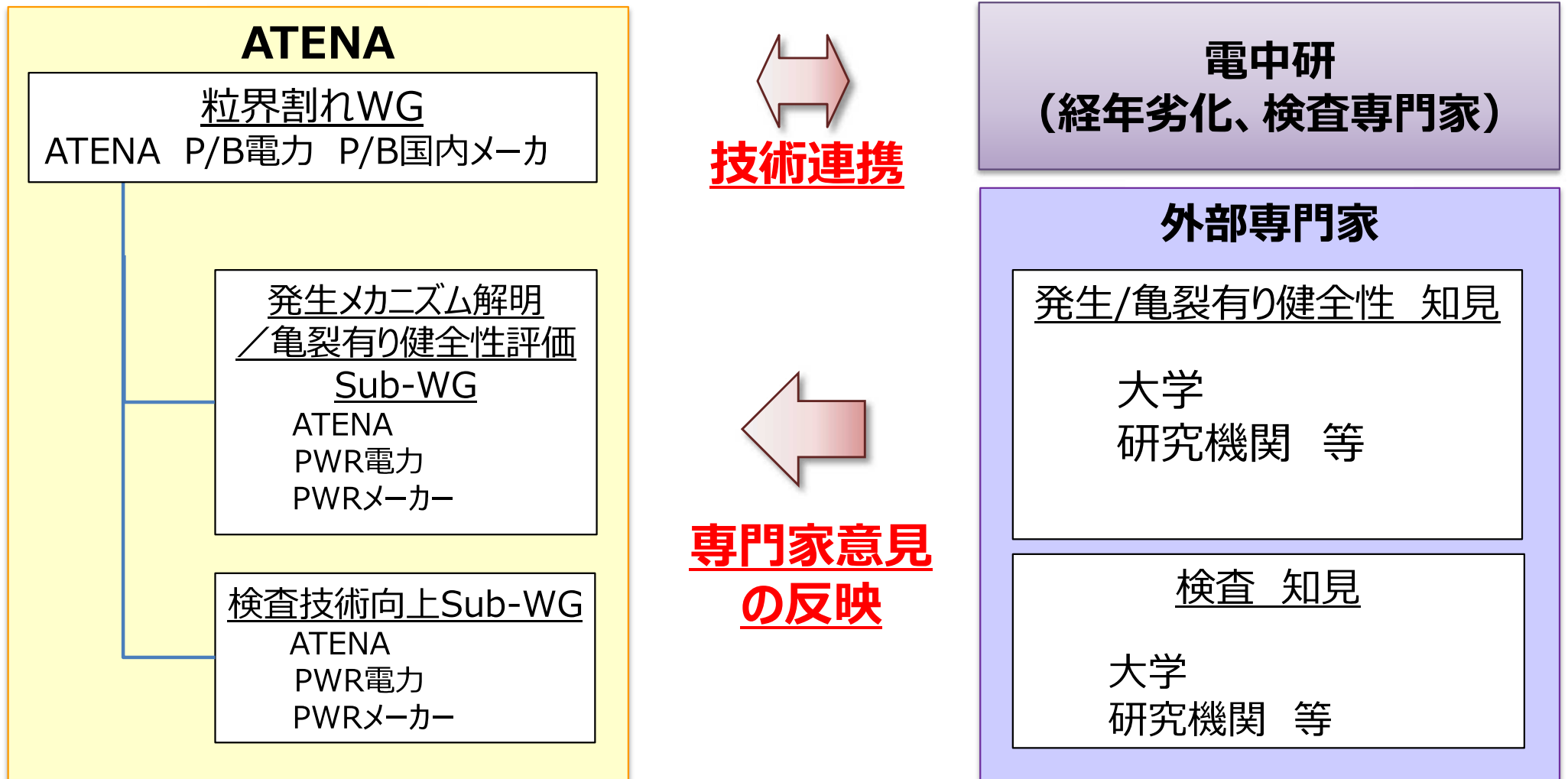
# PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れに対するATENAの取り組み

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

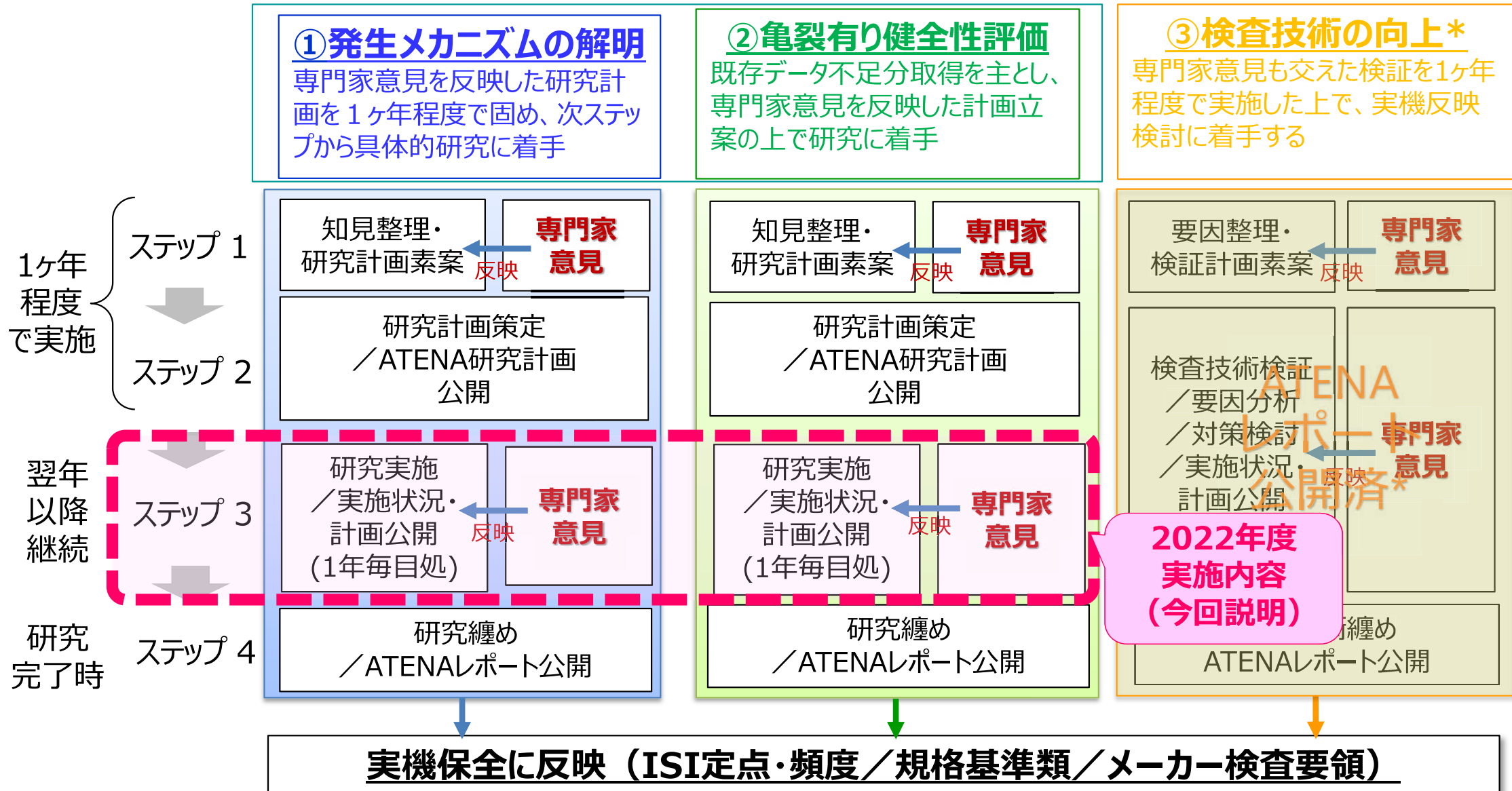
# PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れ検討の体制

- 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研究計画を元に、①及び②について研究実施中。



# 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）		■	■		
	(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	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
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"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>実機当該管や健全部（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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
実施項目	2. 実機詳細調査（当該管、比較管） (2022年度～) <ul style="list-style-type: none"> <li>(1)-①局所ひずみ測定（SEM/EBSD）</li> <li>(1)-②断面マクロ硬さ測定（裏波幅と硬さの相関取得）</li> <li>(2)-①溶接欠陥の調査(SEM/EDS)</li> <li>(2)-②潜在亀裂の調査(SEM/EDS)</li> <li>(3)被膜分析、亀裂先端ミクロ組織分析（TEM）</li> </ul>

## 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"> <li>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。</li> </ul>
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
実施項目	2. 実機詳細調査（当該管、比較管）（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"> <li>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。</li> </ul>
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
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"> <li>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。</li> </ul>
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
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"> <li>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。</li> </ul>
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
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"> <li>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。</li> </ul>
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
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"> <li>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。</li> </ul>
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
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"> <li>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。</li> </ul>
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
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"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
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潜在亀裂の調査(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。

## 4. 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"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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）</li> <li>当該管の320°(クレータ部)、90°、160°、270°の断面</li> <li>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</li> </ul>
	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"> <li>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）。</li> <li>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）。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>当該管0°近傍の破面全体（表面側に着目）</li> <li>当該管0°の亀裂周辺の断面（5断面程度：管台側/エルボ側）</li> <li>比較管も同様な位置の断面（4断面程度：エルボ側/直管側）</li> </ul>
	②潜在亀裂の調査 (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（当該管、比較管）
  - 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. 2023年度検討方針
4. 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"> <li>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<b>欠陥指示を確認</b>。[1]</li> <li>応力腐食現象による割れ（SCC）と報告。[1]</li> <li>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。[2]</li> </ul>
Civaux2号機	N4	1561MW	2002年	<ul style="list-style-type: none"> <li>RIS配管において<b>複数の欠陥指示を確認</b>（2021年12月公表）。[1]</li> </ul>
ChoozB2号機	N4	1560MW	2000年	<ul style="list-style-type: none"> <li>RIS配管において<b>欠陥指示を確認</b>（2022年1月公表）。[1]</li> <li>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。[2]</li> </ul>
ChoozB1号機	N4	1560MW	2000年	<ul style="list-style-type: none"> <li>配管において<b>欠陥指示を確認</b>。[3]</li> </ul>
Penly1号機	P'4	1382MW	1990年	<ul style="list-style-type: none"> <li>RIS配管において<b>欠陥指示を複数確認</b>（2022年1月公表）。[1]</li> <li>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。[2]</li> </ul>
Cattenom3号機	P'4	1362MW	1991年	<ul style="list-style-type: none"> <li>1次冷却系の配管の<b>欠陥指示を報告</b>（2022年4月公表）。[2]</li> </ul>
Chinon B3号機	CP2	954MW	1987年	<ul style="list-style-type: none"> <li>1次冷却系の配管の欠陥指示を報告（2022年4月公表）。[2]</li> <li>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。[2]</li> <li><b>起点は溶接欠陥であり</b>、一般的な事象でないと報告。[2]⇒<b>本事象から除外</b>。</li> </ul>
Flamanville2号機	P'4	1382MW	1987年	<ul style="list-style-type: none"> <li>1次冷却系の配管の<b>欠陥指示を報告</b>（2022年4月公表）。[2]</li> <li>起点は溶接欠陥であり、一般的な事象でないと報告。[2]</li> </ul>
Golfech1号機	P'4	1363MW	1991年	<ul style="list-style-type: none"> <li>1次冷却系の配管の<b>欠陥指示を報告</b>（2022年4月公表）。[2]</li> </ul>
Cattenom1号機	P'4	1362MW	1987年	<ul style="list-style-type: none"> <li>RIS配管において<b>SCCによる亀裂を複数確認</b>（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。[1]</li> </ul>

&lt;出典&gt;

1 フランス原子力安全局(ASN)のHP (<https://www.french-nuclear-safety.fr/>)2 フランス電力 (EDF) のHP (<https://www.edf.fr/>)3 米国原子力規制当局資料 U.S.NRC, EDF Stress Corrosion Cracking Operating Experience Discussion,2022/5/25,(<https://www.nrc.gov/docs/ML2214/ML22143A834.pdf>)

# 最新知見の調査:EDFプラントの概要

✓ 56基のPWR (1970 s -1990 s ) 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

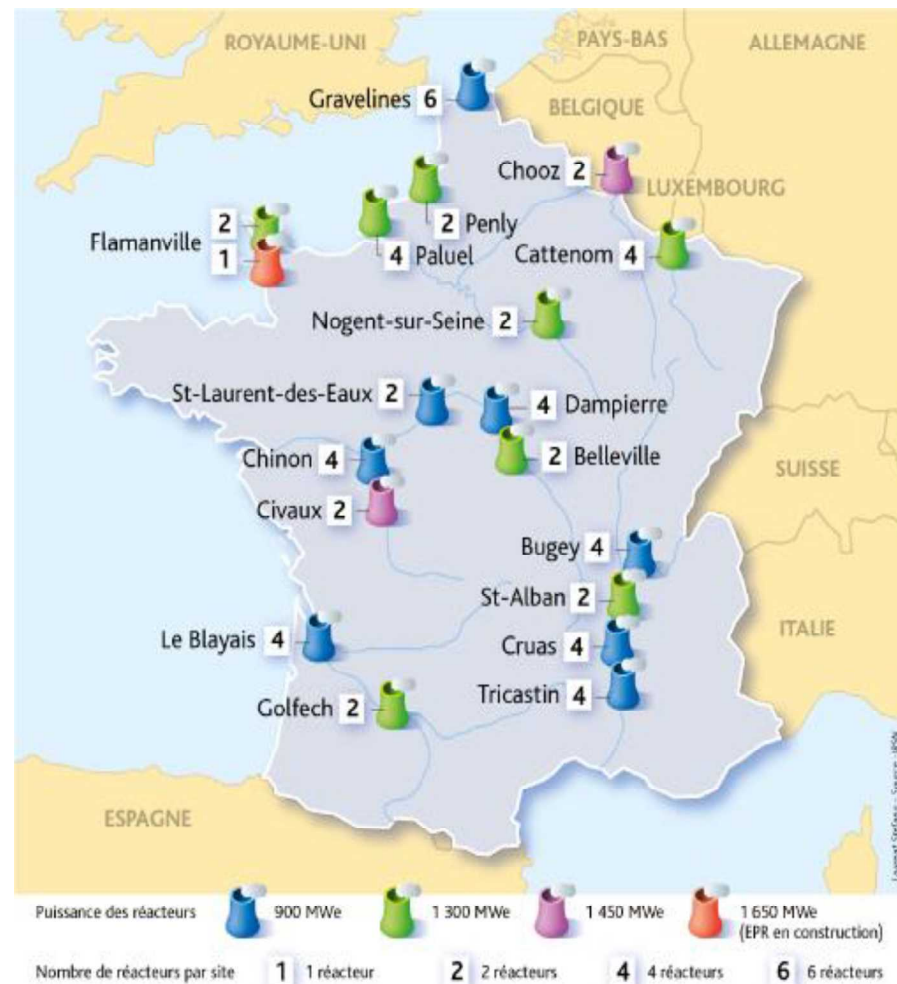
5/20基 : 約1300 MW (P4、P'4)(84-93年)  
Penly-1、Cattenom- 1/3、  
Flamanville-2、Golfech-1

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

<部位>

RIS(SIS)配管とRRA(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。

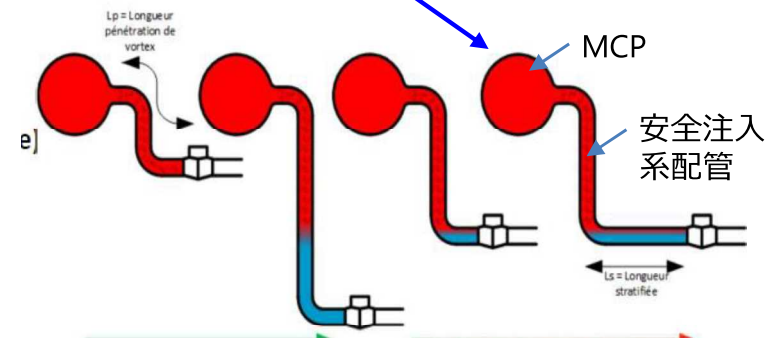
## 亀裂発生要因に対して議論されている項目

- 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、原子炉安全諮問委員会 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

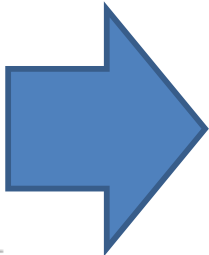
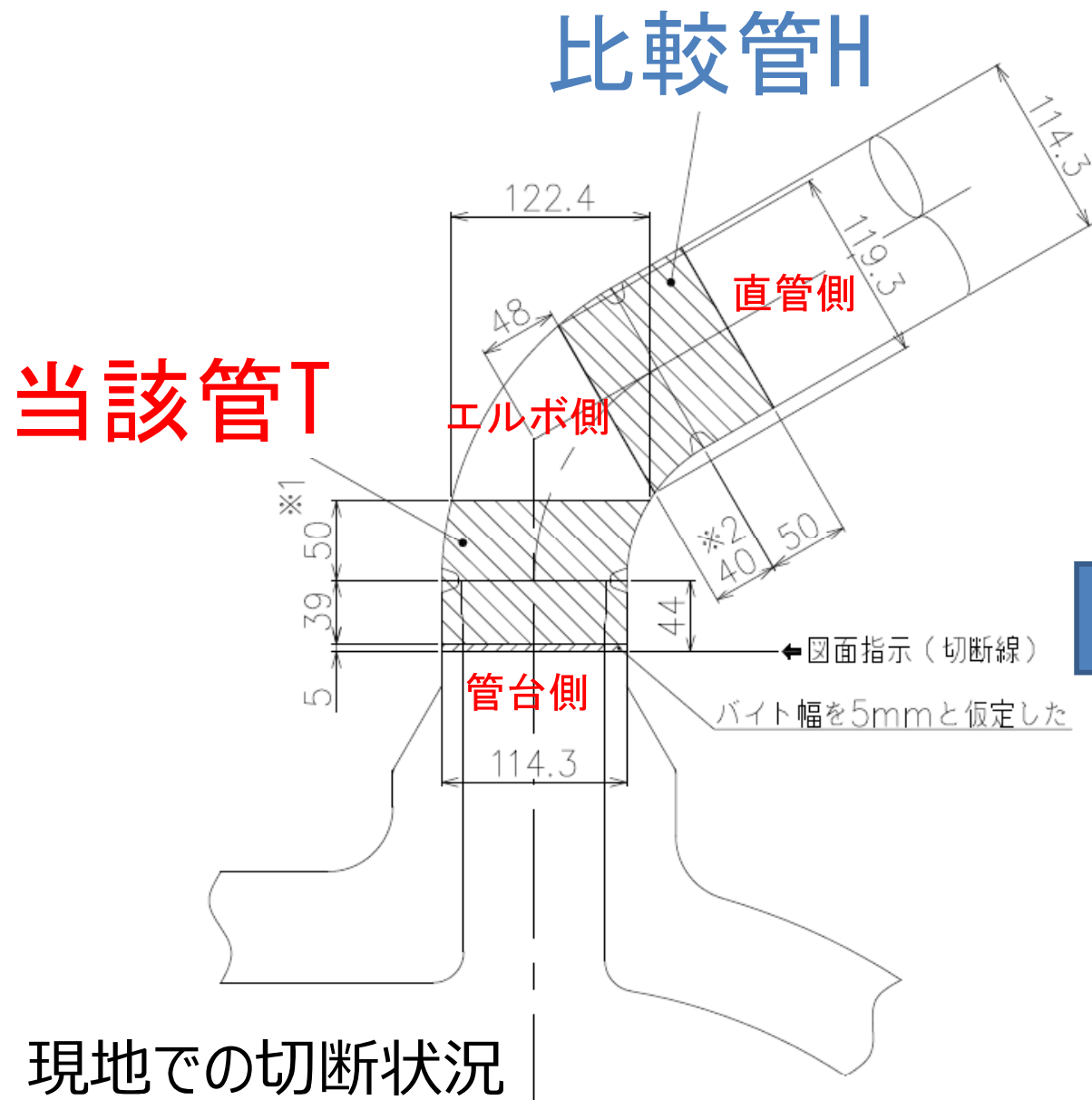
- **類似事例の調査を実施中**。EPRIはMRP-236（SCC実機知見）の改訂に着手。
- 亀裂進展速度線図を作成し公開（MRP-458）。
- 過去10年間のエルボ溶接部について検査を再評価。

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。

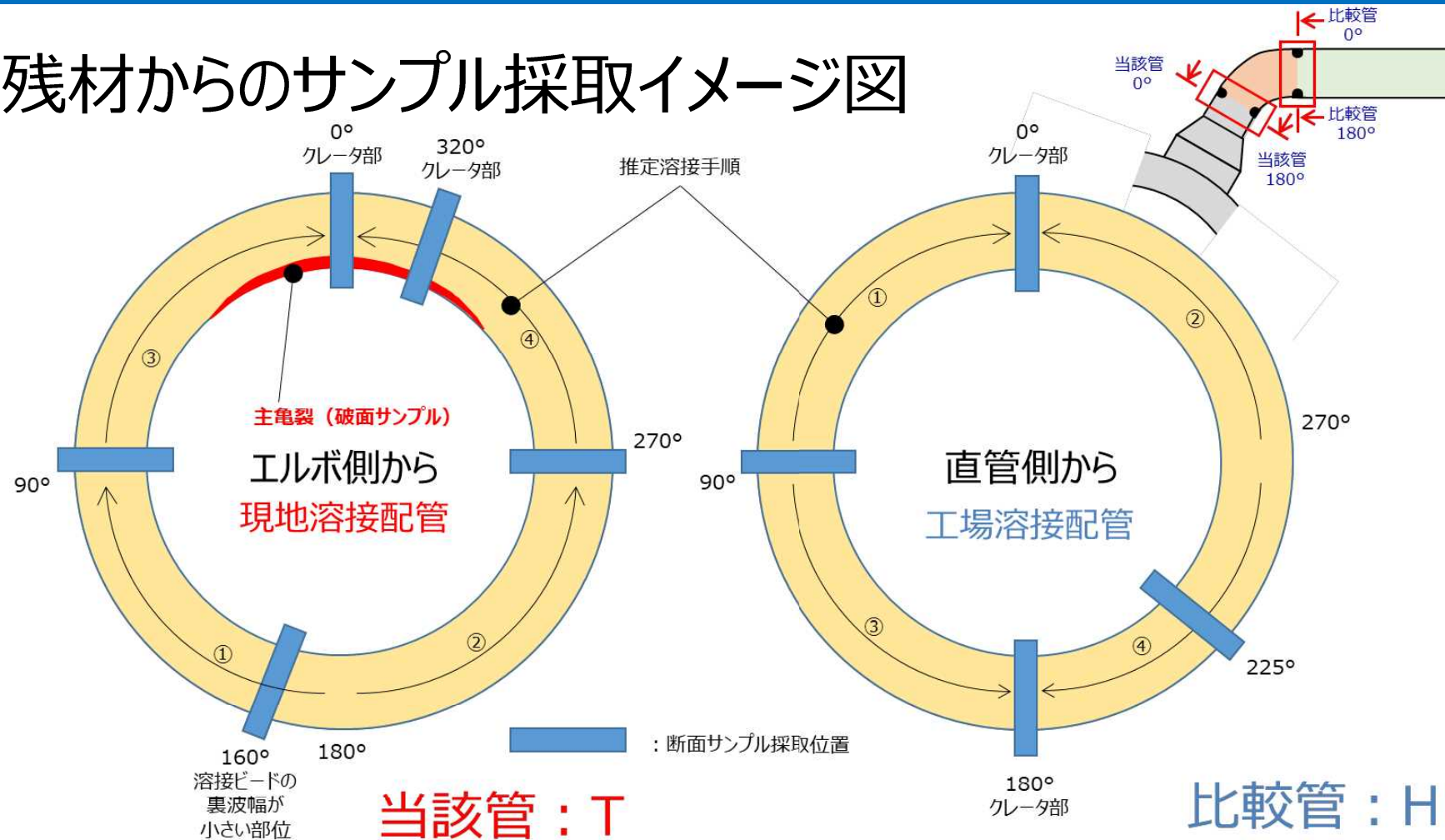
- ✓ EDFプラントのSCC事象に関しては、事象発生が特定のプラントに集中しており、候補となる発生要因が幾つか挙げられているが、最終的な要因特定には至っていない状況である。
- ✓ 現在も仏国で調査・検討を継続しており、国内に取り込むべき知見が無いか、引続き当研究でも情報を収集していく。

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（当該管、比較管）
  - 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. 2023年度検討方針
4. 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



- 当該管からは、亀裂損傷部位の特異性を明らかにするために、0°のクレータ部の断面、比較とした終始端部の90°及び270°断面、溶接ビード裏波幅が小さい160°断面に加え、320°のクレータ部の断面の計5箇所を詳細調査した。
- 比較管からは、当該管の特異性を明らかにするために、同位置の0°の断面、終始端部の90°及び180°断面、終始端とならない代表部として225°断面の計4断面を詳細調査した。

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"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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）</li> <li>当該管の320°(クレータ部)、90°、160°、270°の断面</li> <li>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</li> </ul>
	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"> <li>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）。</li> <li>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）。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>当該管0°近傍の破面全体（表面側に着目）</li> <li>当該管0°の亀裂周辺の断面（5断面程度：管台側/エルボ側）</li> <li>比較管も同様な位置の断面（4断面程度：エルボ側/直管側）</li> </ul>
	②潜在亀裂の調査 (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



# 当該管及び比較管の調査マトリックス（実績）

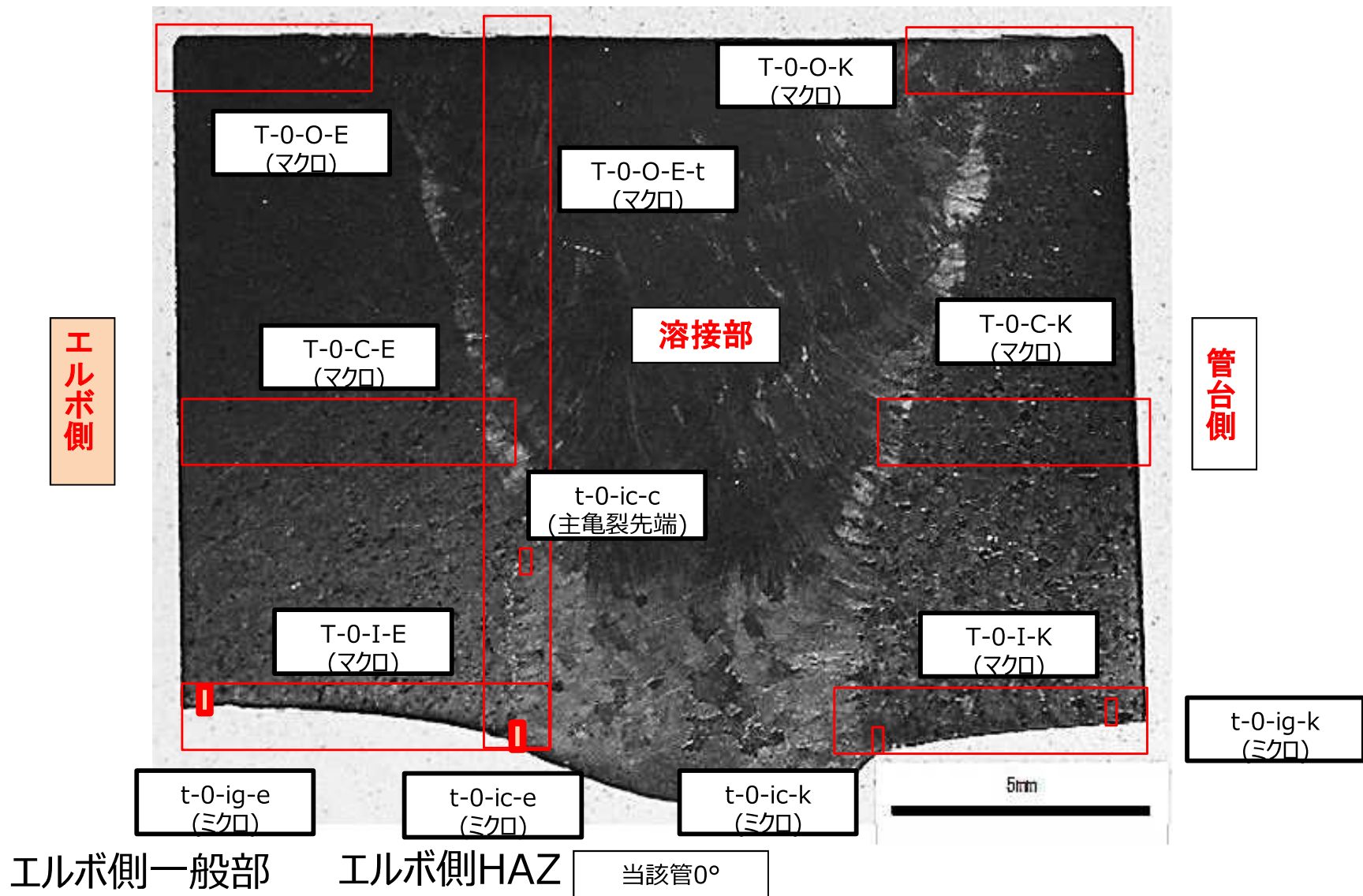
実施項目	サンプル形態	当該管/断面					比較管/断面				
		0° (クレータ部)	320° (クレータ部)	90°	160°	270°	0° (クレータ部)	90°	180° (クレータ部)	225°	
(1)	①局所ひずみ測定 SEM/EBSD 結果例：[29]~[33]	断面マイクロサンプル (軸方向：管台側 /エルボ側)	●* ①エルボ側 主亀裂 周辺部 ②管台側	● ①エルボ側 (破面) ②管台側	●* ①エルボ側 ②管台側	● ①エルボ側 ②管台側	● ①エルボ側 ②管台側	●* ①エルボ側 ②直管側	●* ①エルボ側 ②直管側	●* ①エルボ側 ②直管側	● ①エルボ側 ②直管側
	②断面マクロ 硬さ測定 結果例：[34]	断面マイクロサンプル (軸方向：管台側 /エルボ側)	●* 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 結果例：[37]~[39]	破面サンプル	●* ①エルボ側 ②管台側 破面部	-	-	-	-	-	-	-	-
	②断面における 潜在亀裂の調査 結果例：[40]~[43]	断面マイクロサンプル (軸方向：管台側 /エルボ側)	●* 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)	断面ミクロ /破面サンプル →TEM薄膜 サンプル	●* 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

# (1)-① 局所ひずみ測定(SEM/EBSD) (計画：代表)

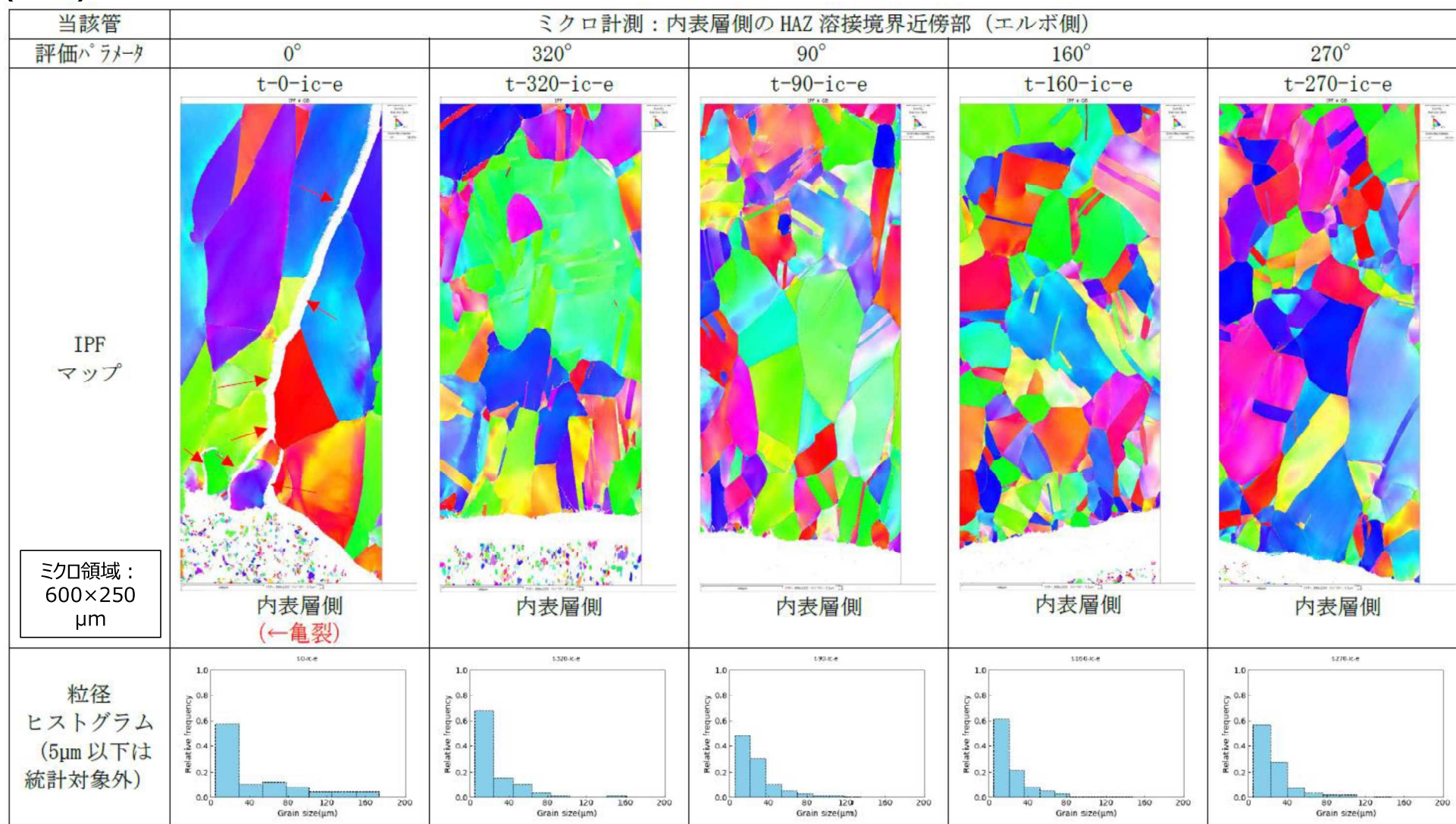
600×250μm : ミクロ領域

1.5×最長9mm : マクロ領域



# (1)-① 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))

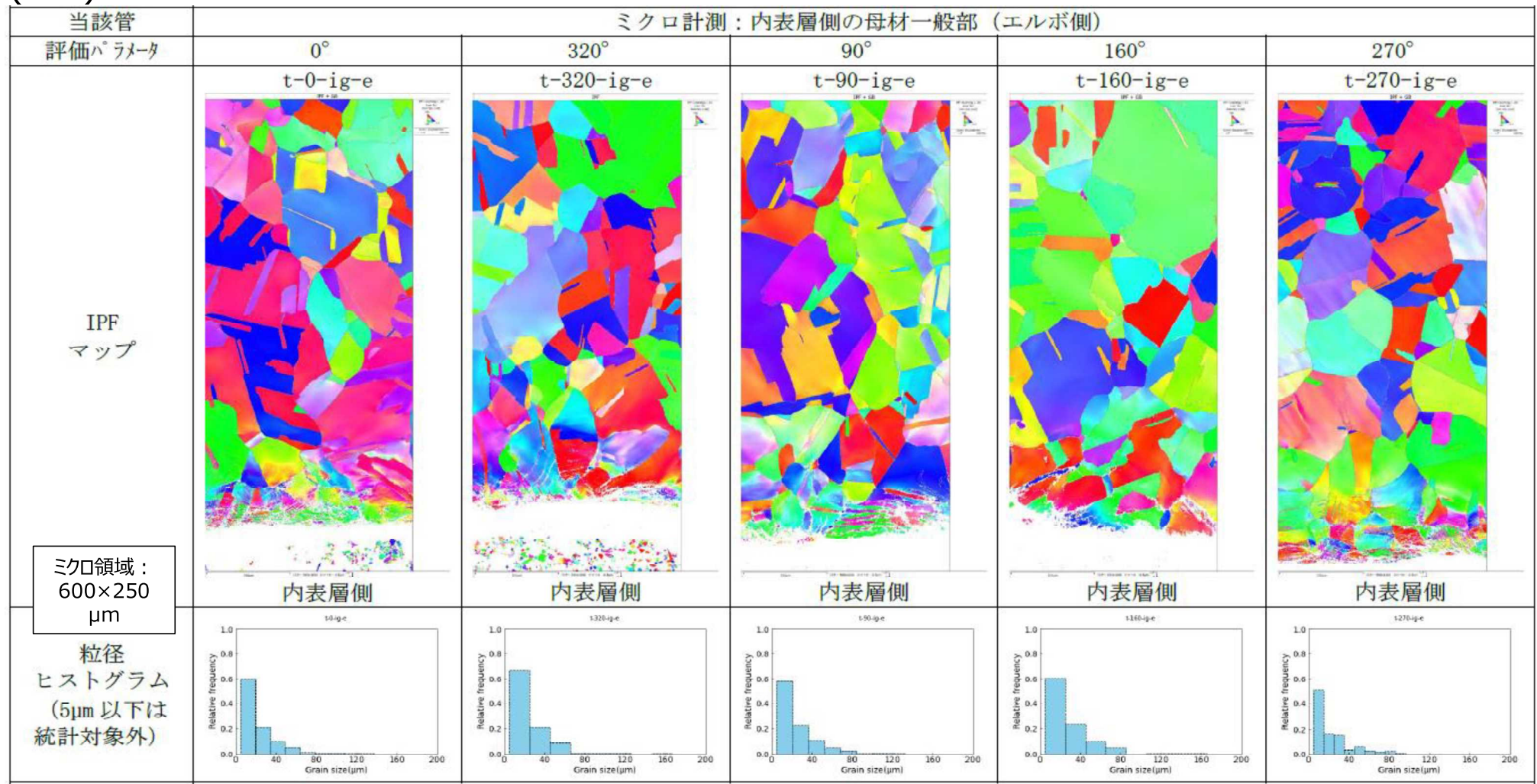


- 当該管 (160°断面を除く) の内表層側のHAZ割れ周辺部 (エルボ側) では、板厚内部に進むにつれて100μm以上の比較的粗大な結晶粒であり、0°断面が他に比べて粗大化が大きく特異であった。



# (1)-① 局所ひずみ測定(IPF：当該管エルボ側一般部) (実績)

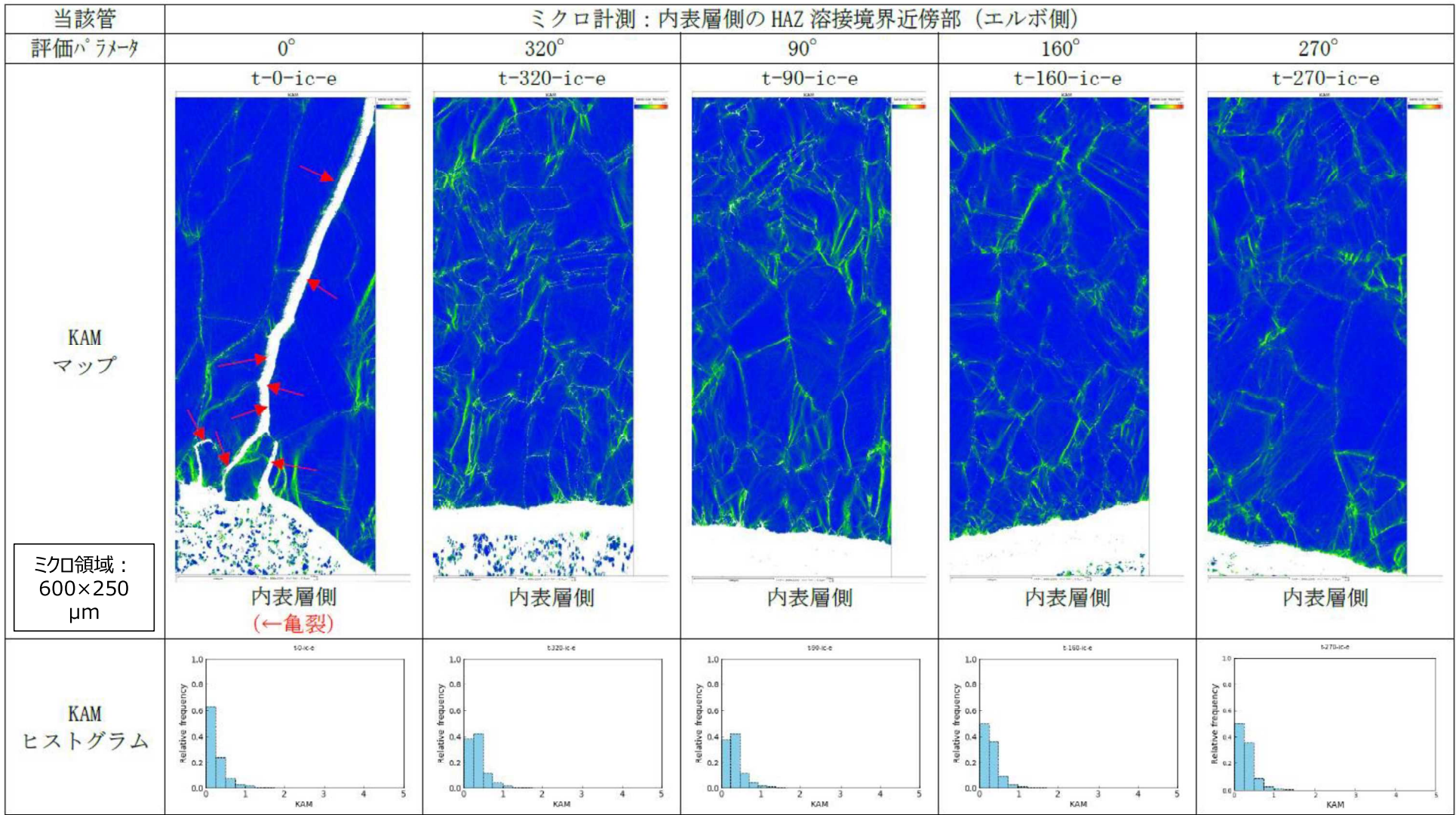
(1-2)EBSD計測評価パラメータを用いたマイクロ領域データ整理 (IPFマップZ軸 (当該管エルボ側一般部))



- 当該管のエルボ側一般部では、内表層側で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 (50~100μm幅)であったが0°エルボ側HAZのような亀裂は認められなかった。また、板厚内部に進むにつれて、比較的均一な結晶粒 (100μm以下) であった。

# (1)-① 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) )

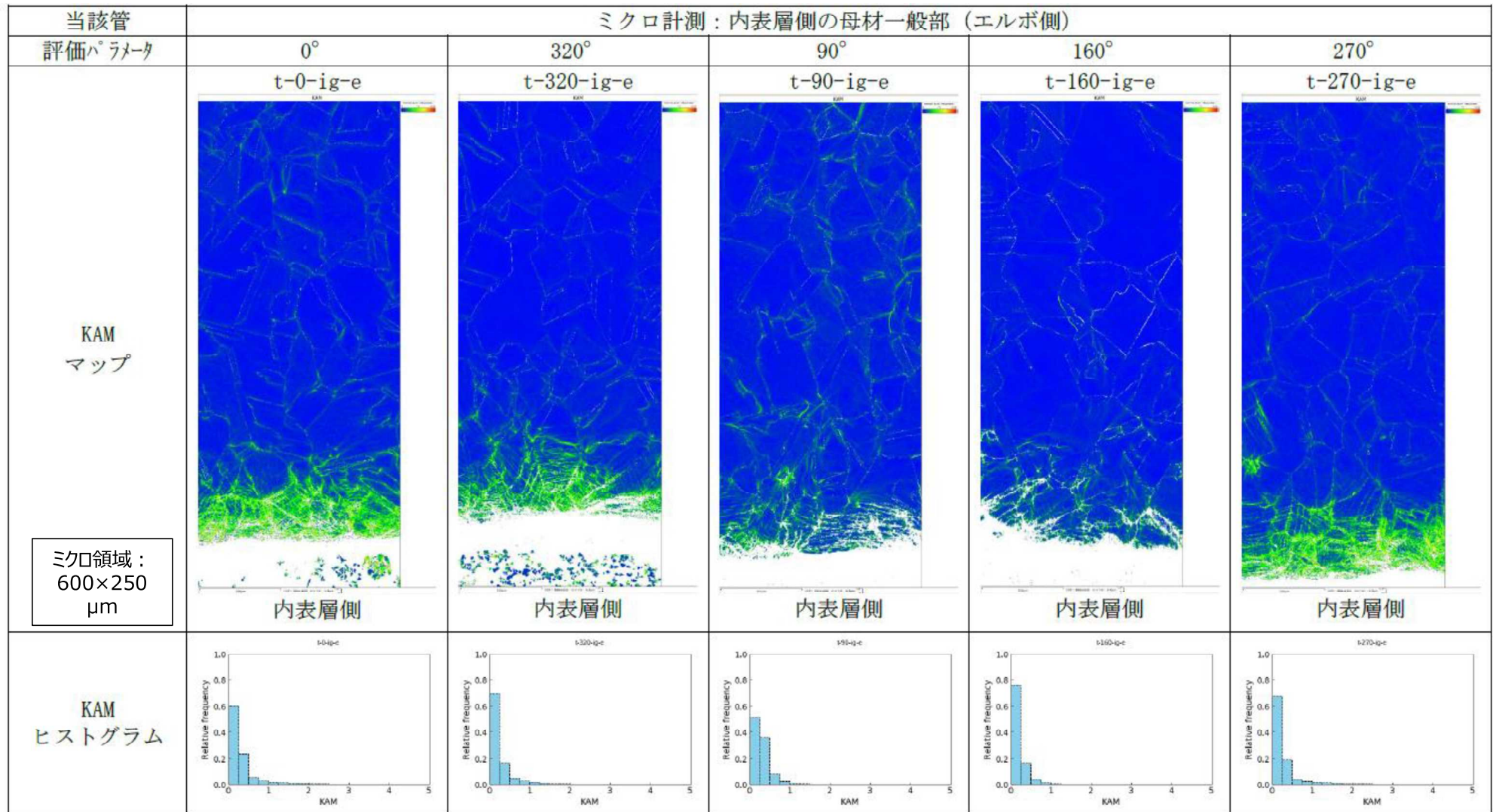


- 当該管のエルボ側HAZ周辺部では、内表層近傍で高KAM値であった。
- 0°断面には亀裂が認められており、他に比べて内表層側で高KAM値の結晶粒界が顕著であった。



# (1)-① 局所ひずみ測定(KAM : 当該管エルボ側一般部) (実績)

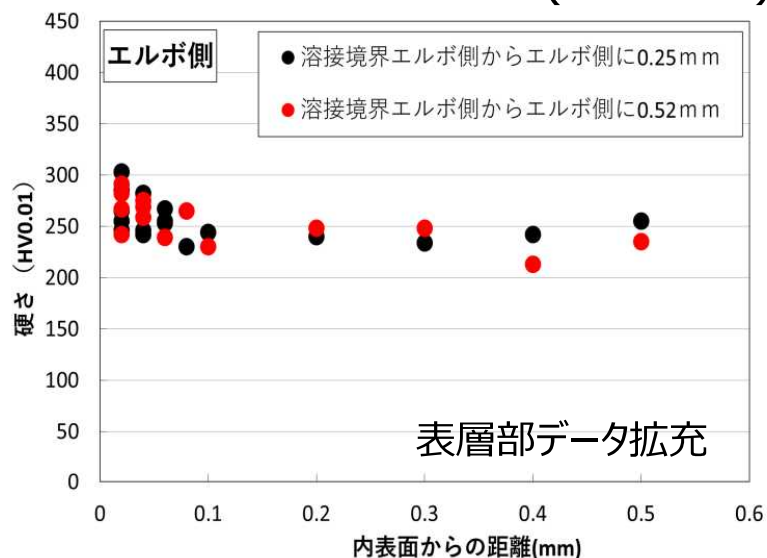
## (2-2)EBSD計測評価パラメータを用いたマイクロ領域データ整理 (KAMマップ (当該管エルボ側一般部) )



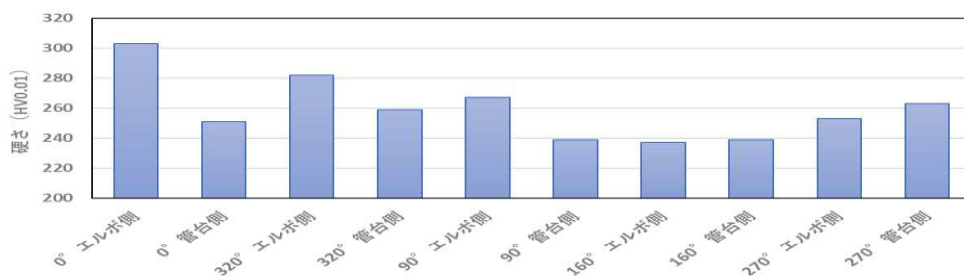
- 当該管のエルボ側一般部では、内表層側ではシンニング加工の影響と思われる高KAM値であった。
- また、この部位は高KAM値ではあったが亀裂は認められなかった。

# (1)-② 断面硬さ測定 (実績)

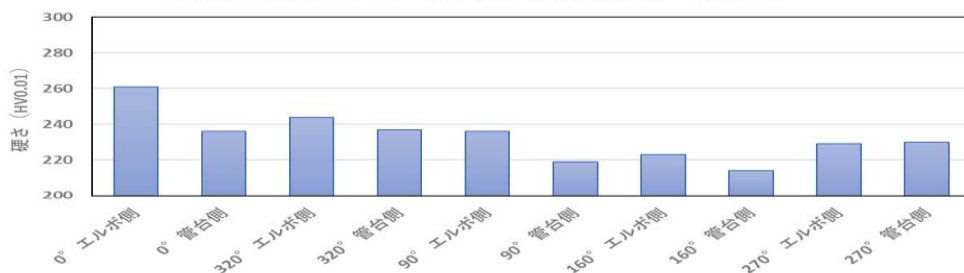
## 当該管0°エルボ側の硬さ計測(HV0.01)



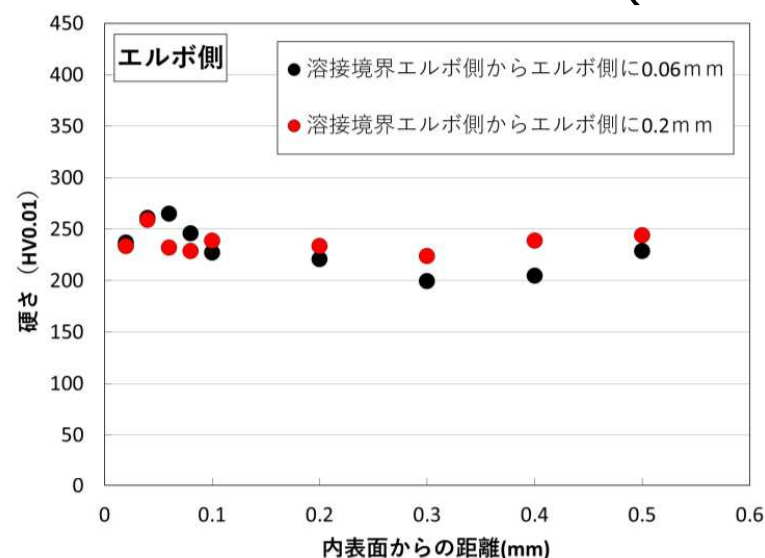
当該管の各断面での最大値 (0.2×0.1mm範囲) (HV0.01)



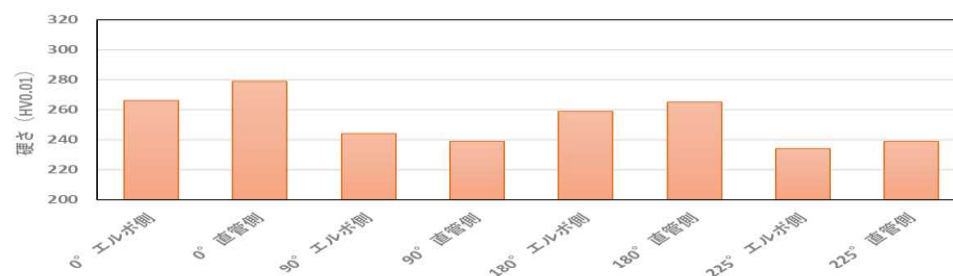
当該管の各断面での平均値 (0.2×0.1mm範囲) (HV0.01)



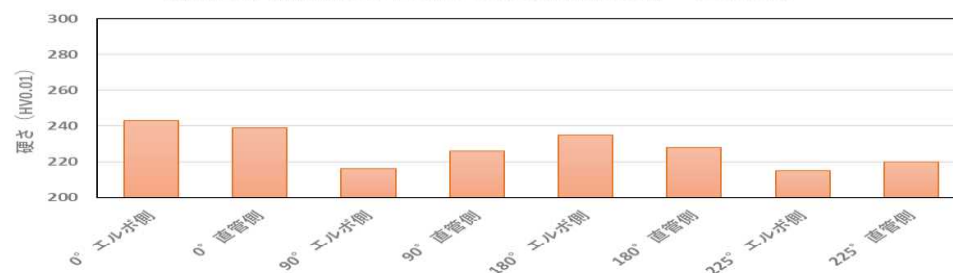
## 比較管0°エルボ側の硬さ計測(HV0.01)



比較管の各断面での最大値 (0.2×0.1mm範囲) (HV0.01)



比較管の各断面での平均値 (0.2×0.1mm範囲) (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) の傾向が大きかった。

## 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"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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）</li> <li>当該管の320°(クレータ部)、90°、160°、270°の断面</li> <li>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</li> </ul>
	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"> <li>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）。</li> <li>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）。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>当該管0°近傍の破面全体（表面側に着目）</li> <li>当該管0°の亀裂周辺の断面（5断面程度：管台側/エルボ側）</li> <li>比較管も同様な位置の断面（4断面程度：エルボ側/直管側）</li> </ul>
	②潜在亀裂の調査 (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

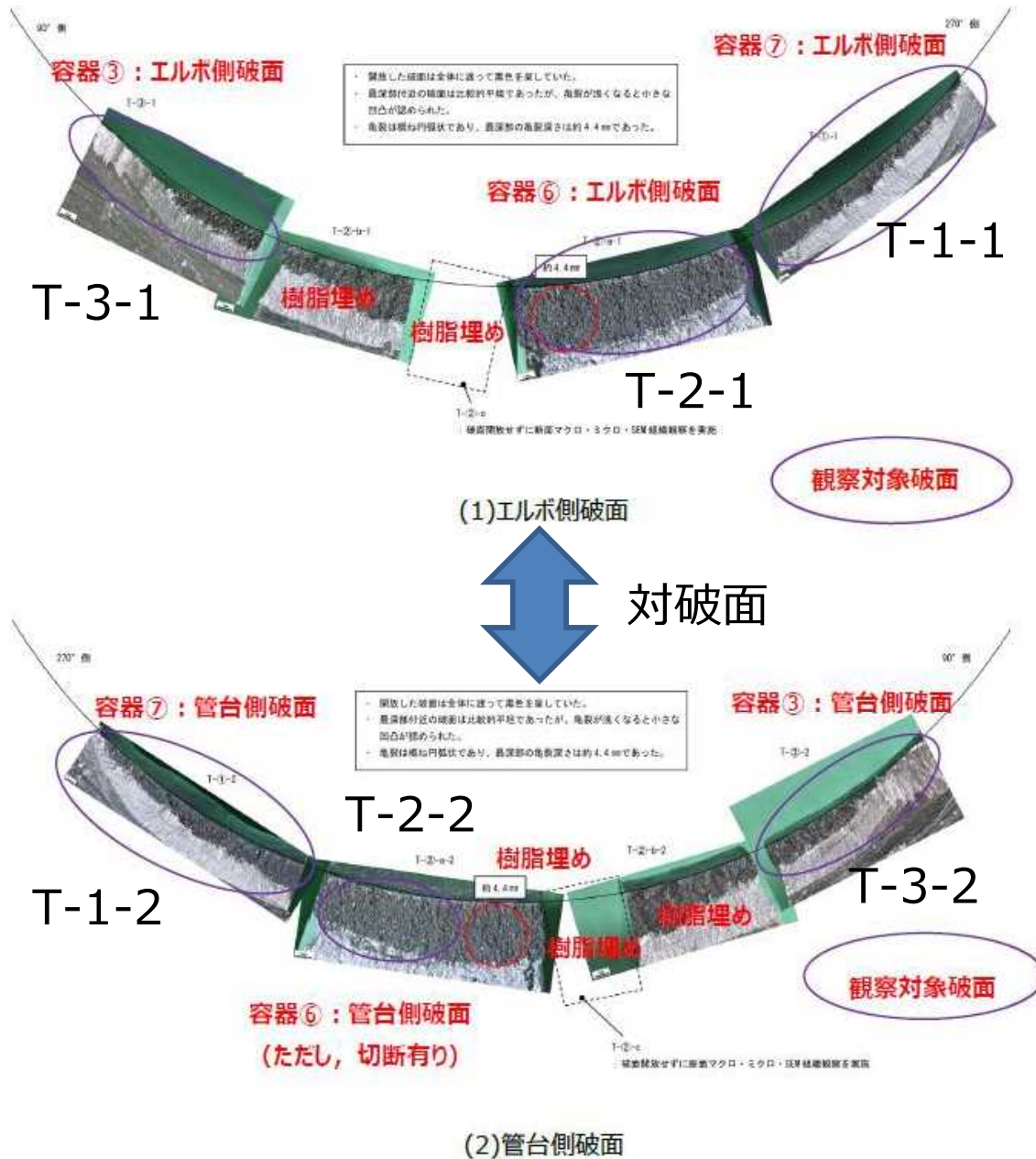


# 当該管及び比較管の調査マトリックス（実績）

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)	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 結果例：[29~33]	断面マイクロサンプル (軸方向：管台側 /エルボ側)	●* 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 結果例：[34]	断面マイクロサンプル (軸方向：管台側 /エルボ側)	●* 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 結果例：[37~39]	破面サンプル	●* ①エルボ側 ②管台側 破面部	-	-	-	-	-	-	-	-
	②断面における 潜在亀裂の調査 結果例：[40~43]	断面マイクロサンプル (軸方向：管台側 /エルボ側)	●* 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)	断面ミクロ /破面サンプル →TEM薄膜 サンプル	●* 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	-	-

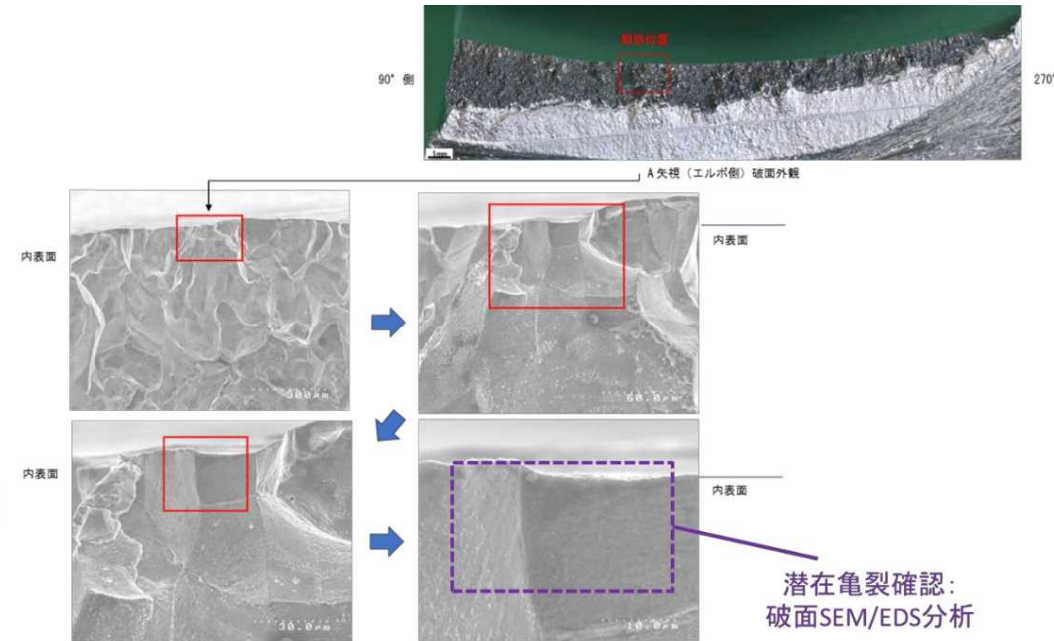
●：実施、-：実施無し、\*：先行調査の残材活用

# (2)-① 破面における溶接欠陥の調査 (SEM/EDS) (計画)



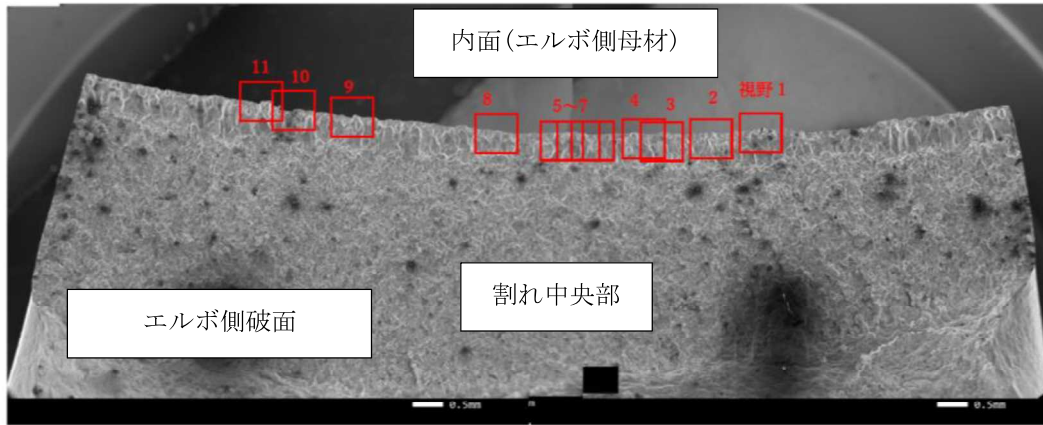
## 破面SEM詳細観察の部位：

- 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）。



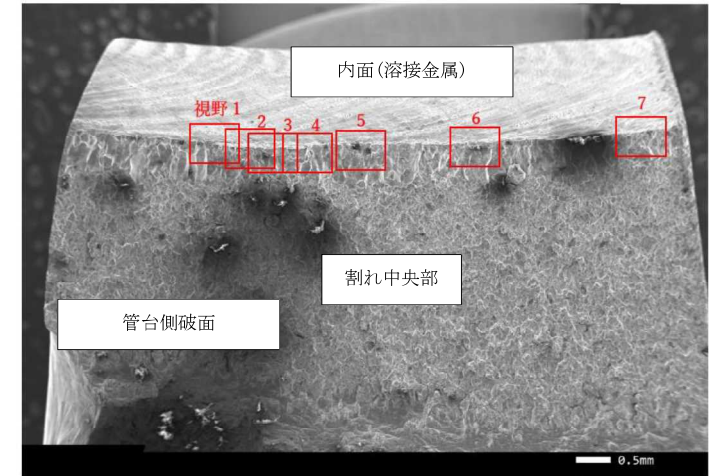
当該管クレータ部のHAZ粒界割れ破面SEM拡大観察結果

## (2)-① 破面における溶接欠陥の調査 (SEM/EDS) (実績：代表)



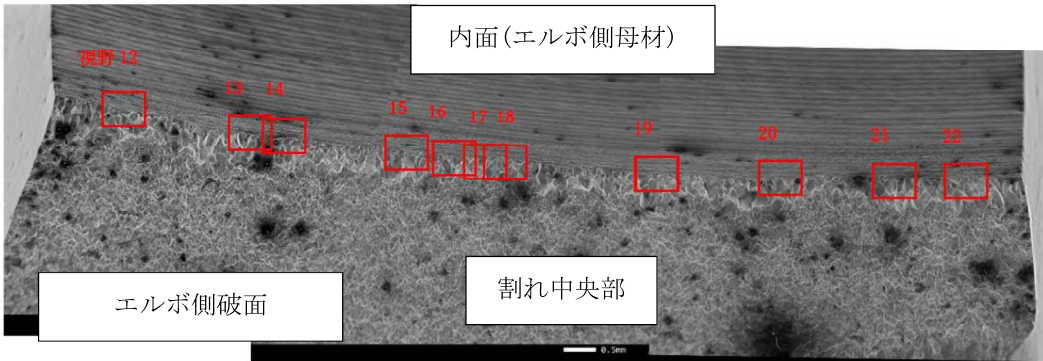
□：観察位置(視野)

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)

当該管(T-2-1：主亀裂中央部エルボ側)の破面



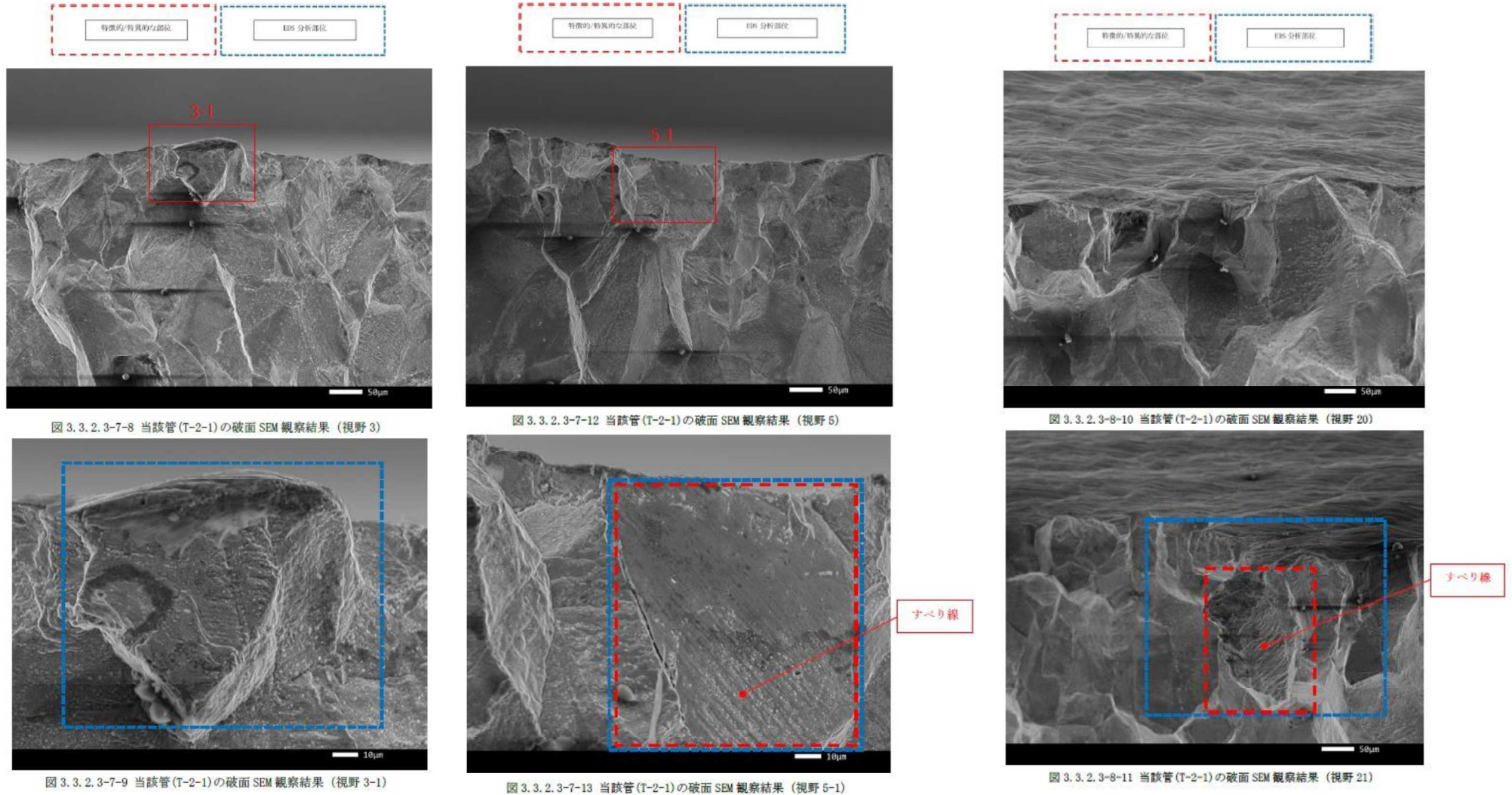
□：観察位置(視野)

当該管 (T-2-2) の破面SEM (傾斜40°：管台側)

当該管(T-2-2：主亀裂中央部管台側)の破面



## 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)

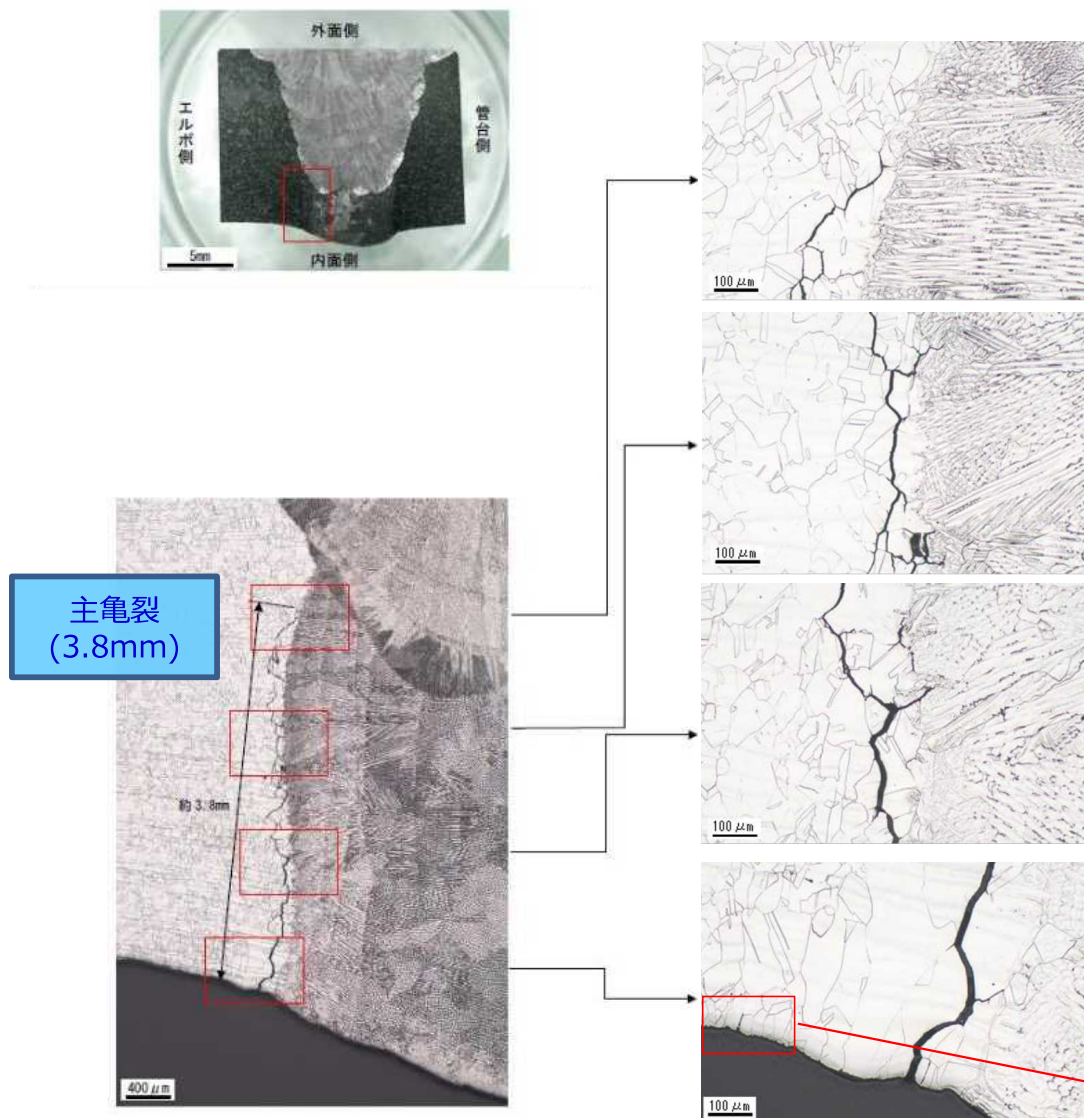


➤ 主亀裂の破面観察からは、溶接欠陥や、溶接欠陥に起因するような影響ある元素(P,S等)\*は認められなかった。

\*：分析対象元素：Fe, Cr, Ni, Mn, P, S, Ti, Si, Al, Nb, Mo, Zn, Ca, O

## (2)-② 断面マクロ・マイクロ観察（実績：代表①）

### 当該管0°エルボ側の主亀裂の断面マクロ・マイクロ観察結果（潜在亀裂有無の確認）



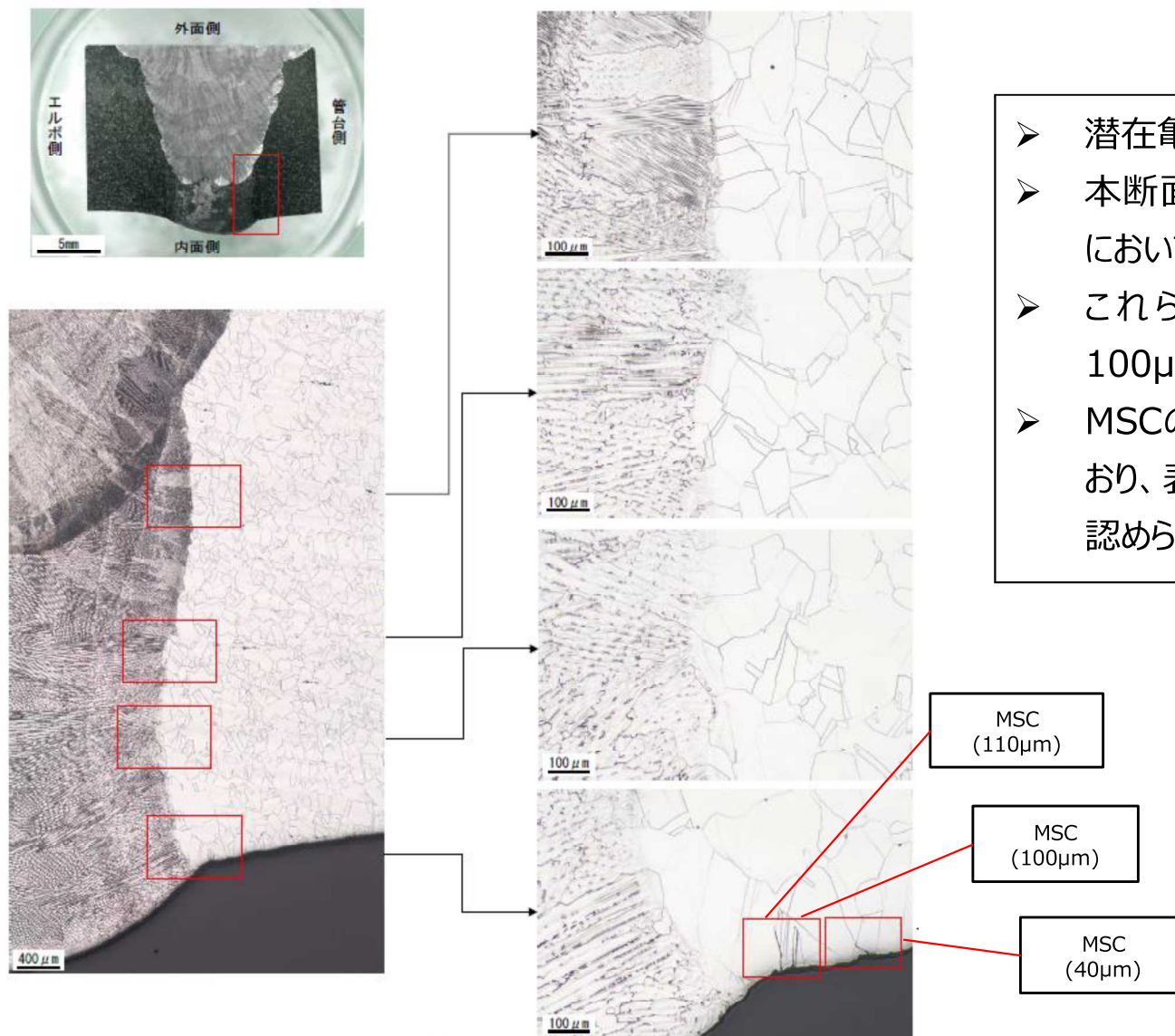
- 潜在亀裂は認められなかった。
- 本断面観察位置では、エルボ側のHAZの内表層において、先行調査で認められていた主亀裂が認められた。
- 主亀裂は、結晶粒界（境界）で進み、約3.8mm長さ（深さ）であった。
- 主亀裂の近傍には、約50μmのMSCが認められた。
- 主亀裂の表層周辺には、母材とは色調が異なっており、表層部及び選択的な粒界での酸化挙動が認められた。

\*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、断面マイ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。



## (2)-② 断面マクロ・マイクロ観察（実績：代表②）

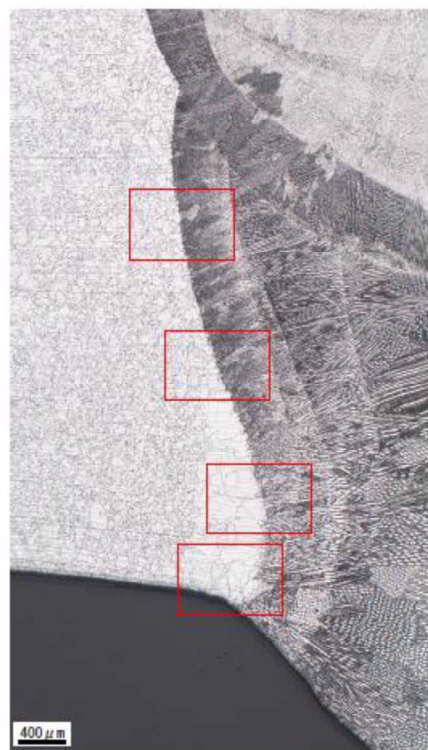
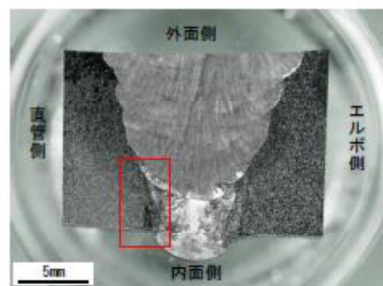
### 当該管0°管台側の断面マクロ・マイクロ観察結果（潜在亀裂有無の確認）



- 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110 $\mu\text{m}$ 、約100 $\mu\text{m}$ 、約40 $\mu\text{m}$ 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。

## (2)-② 断面マクロ・マイクロ観察（実績：代表③）

### 比較管180°直管側の断面マクロ・マイクロ観察結果（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、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。

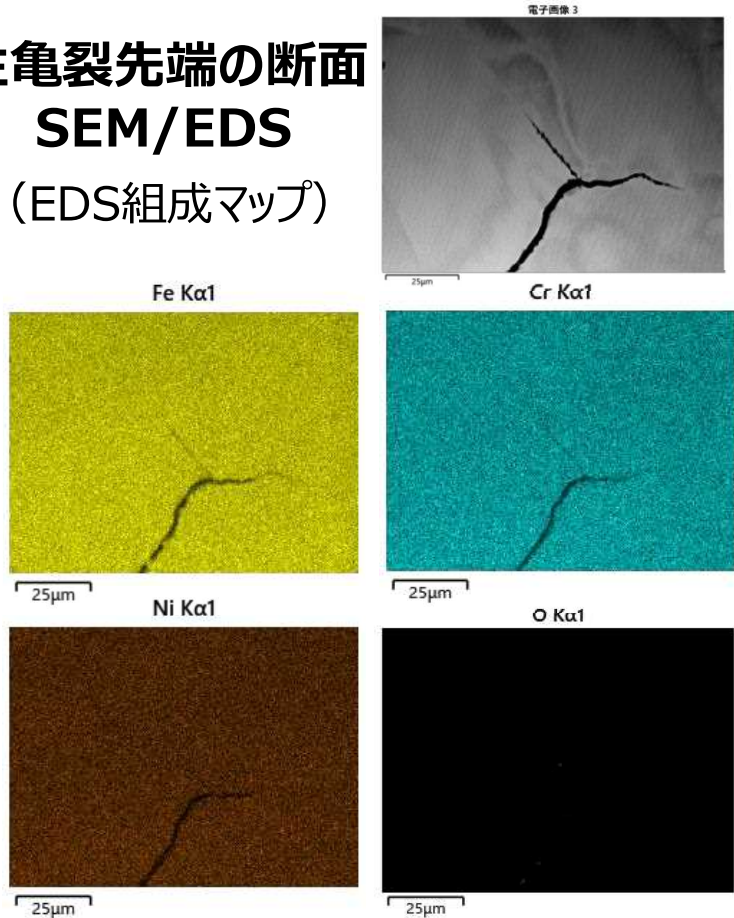
MSC  
(280μm)



潜在亀裂有無の詳細調査の過程において、MSC\*の存在が確認された。

⇒ 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）が検出されている。

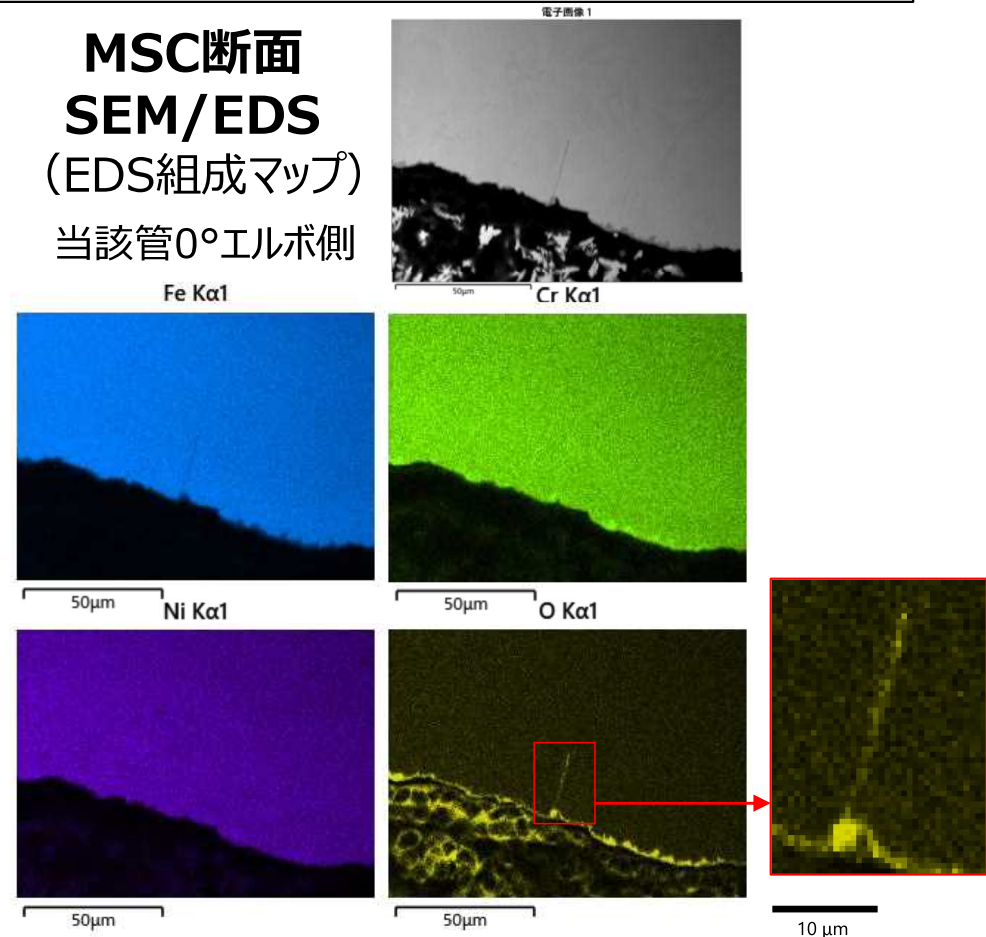
## 主亀裂先端の断面 SEM/EDS (EDS組成マップ)



- 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) 当該管0°エルボ側



- MSCでは先端まで酸素が検出されている。

➤ 長時間の停留を示唆

# 実機詳細調査（当該管、比較管）のまとめ

## ①SEM/EBSDでの局所ひずみ測定（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。
- 他方、内表層側での一般部となるシンニング部位では、EBSD計測結果から、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ていない。
- 主亀裂発生位置の特異性を明らかにするためにも、局所でのひずみ量に着目して、EBSD計測結果に対する新たなデータ整理法を含めて、更なる分析を行う。
- 更に従前の計画に沿って、主亀裂における金属組織等（Cr欠乏層、元素偏析、析出物、転位密度）の特異性有無に関して、TEM/EDSを用いた詳細調査を行う。
- なお、大飯3号の事象以降、PWRプラントでは水平展開対象として延べ800箇所以上の溶接部に対し超音波探傷試験が実施されているが、亀裂が確認されたのは大飯3号の当該主亀裂のみであり、特異という状況に変わりはない。各プラントで3定検に亘り検査を行う予定であり、知見が蓄積される見込である。

## ②断面マクロ硬さ測定

- 硬さは、当該部位では硬化傾向（最大303HV0.01）であった。

## ③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。

## ④断面ミクロにおける潜在亀裂の調査

- 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については、追加の詳細観察や分析での評価を行う。

# 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（当該管、比較管）

### 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

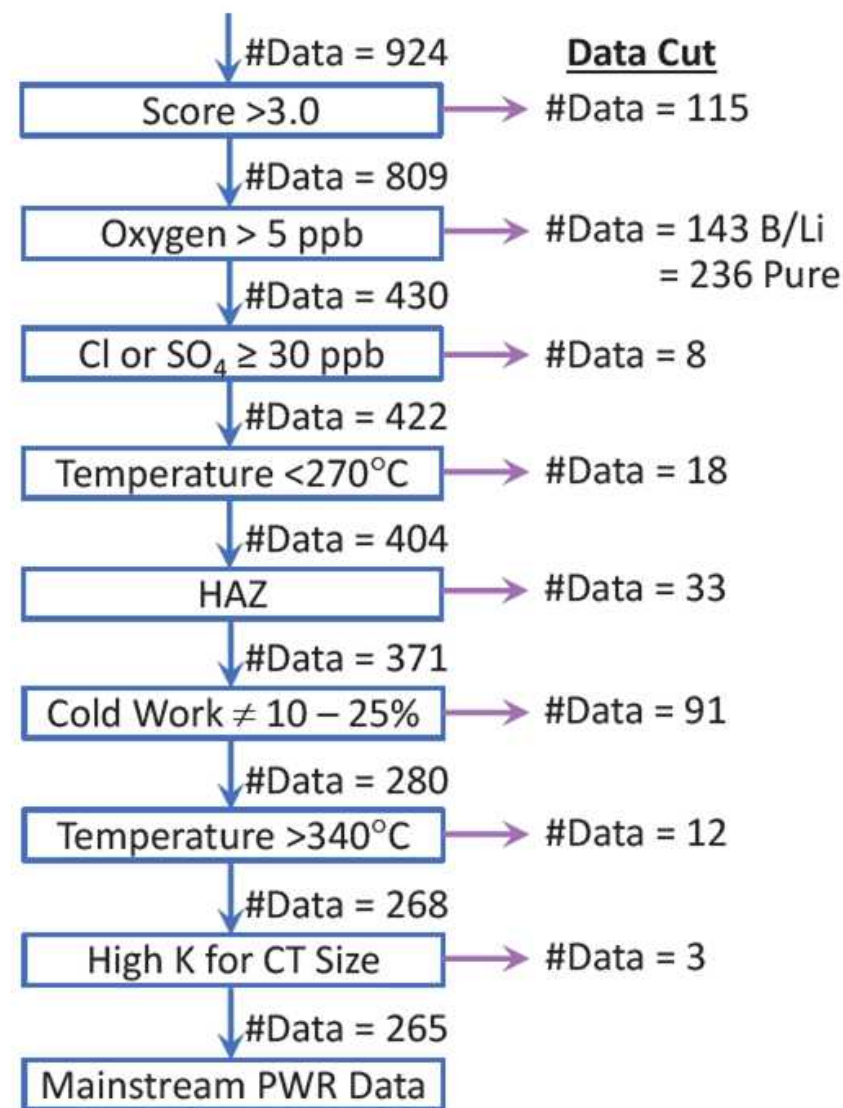
## 3. 2023年度検討方針

## 4. 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を用い、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調査する。
- 国内の実機適用にあたっては、本進展式を参考に、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）

- 924点のオーステナイト系ステンレス鋼のSCC進展速度データを収集しデータベースを構築。個別データがExcelファイルとして報告書に添付される形で公開。
- 右に示すフローチャートに従ってデータスクリーニングを実施し、PWR一次系環境を代表するデータとして265データを選定（MRP-458 3.2節）。
- 試験データと既存知見から、温度、硬さ(HV)、応力拡大係数を進展式におけるパラメータとして採用（MRP-458 3.3節）。
- 硬さが不明な進展速度データについては、MRP-458 3.1節に示されている換算式を用いてCW率、0.2%耐力から硬さを推定する。
- EPRIは、Ni基合金の進展式等（MRP-55, MRP-115等）において、75%包絡の速度式による評価が、実機評価上非安全側となった事例がないこと等を理由に、75%包絡式を亀裂進展評価に用いることを推奨（MRP-458 4.2節）。

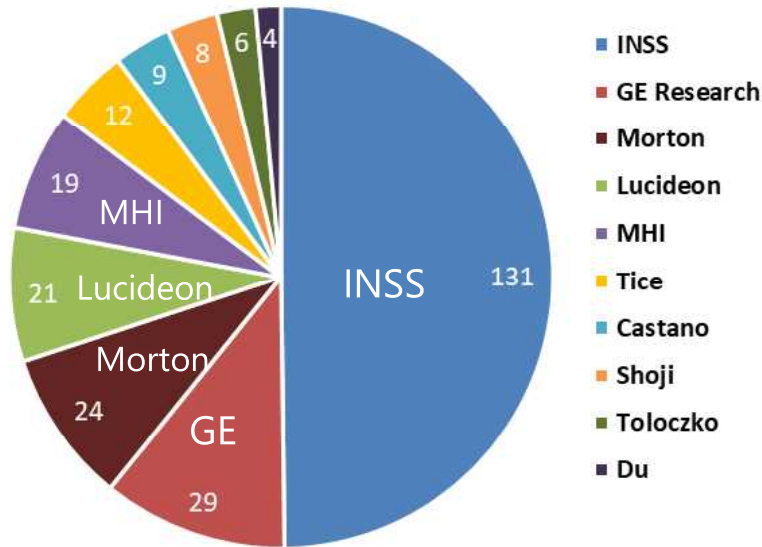


MRP-458 Figure 3-12  
Flow Chart to Define Mainstream PWR Data.

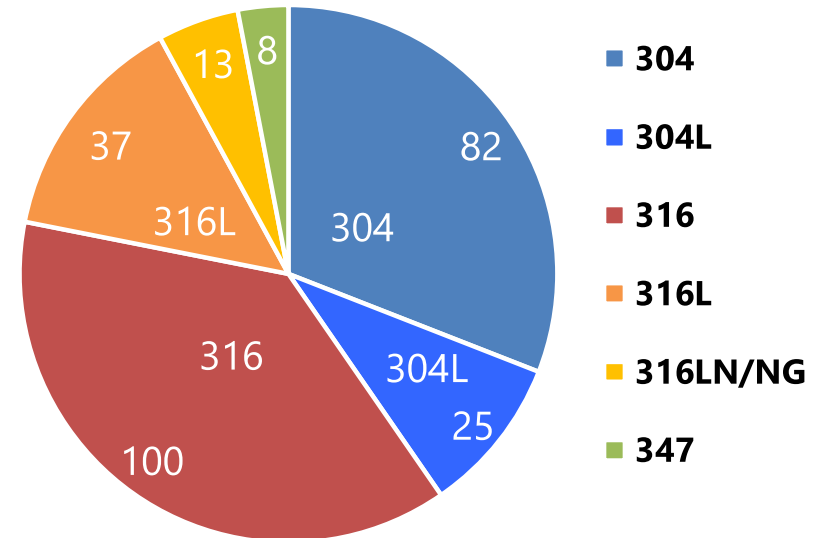


# SCC進展特性知見の調査：EPRI式（MRP-458）のデータベース

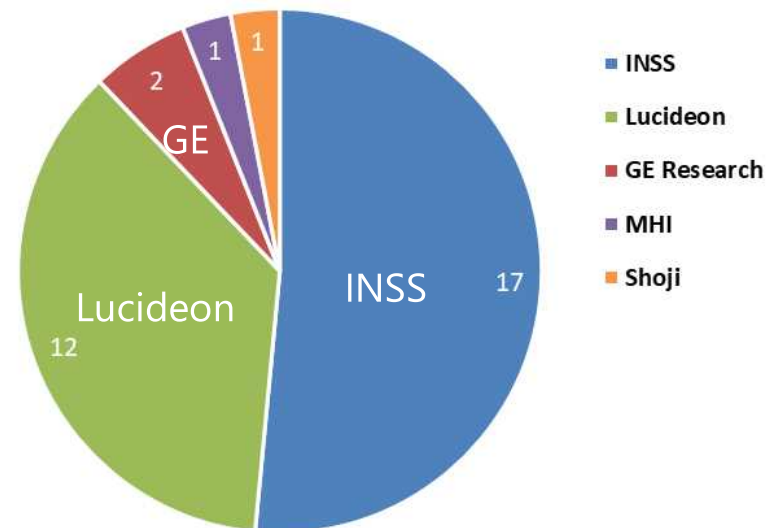
PWR Mainstream Data (265 data)



PWR Mainstream Data (265 data) 鋼種内訳



PWR Representative HAZ Data (33 data)



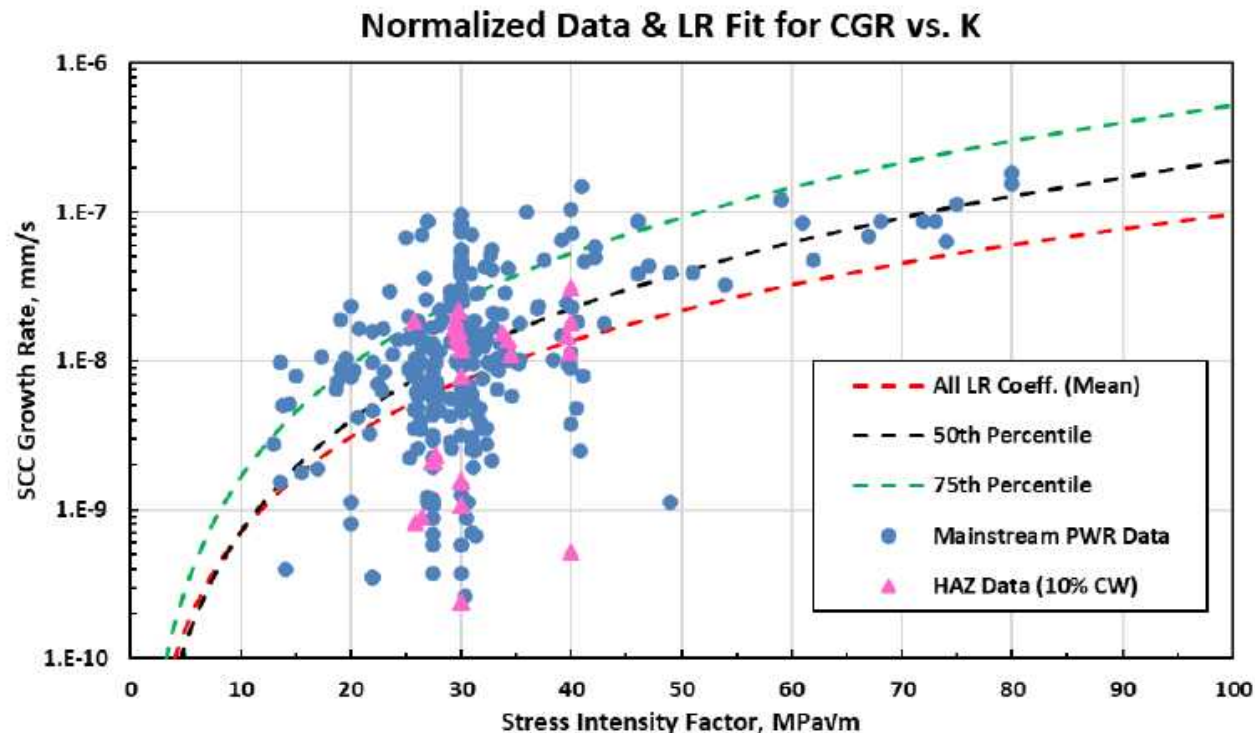
- データベースは半数以上を日本国内の材料を用いた進展データ（INSS・MHI）が占める。
- 鋼種の割合は304系が約40%、316系が約57%となっている。

# 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℃に換算した値としてプロットされている。

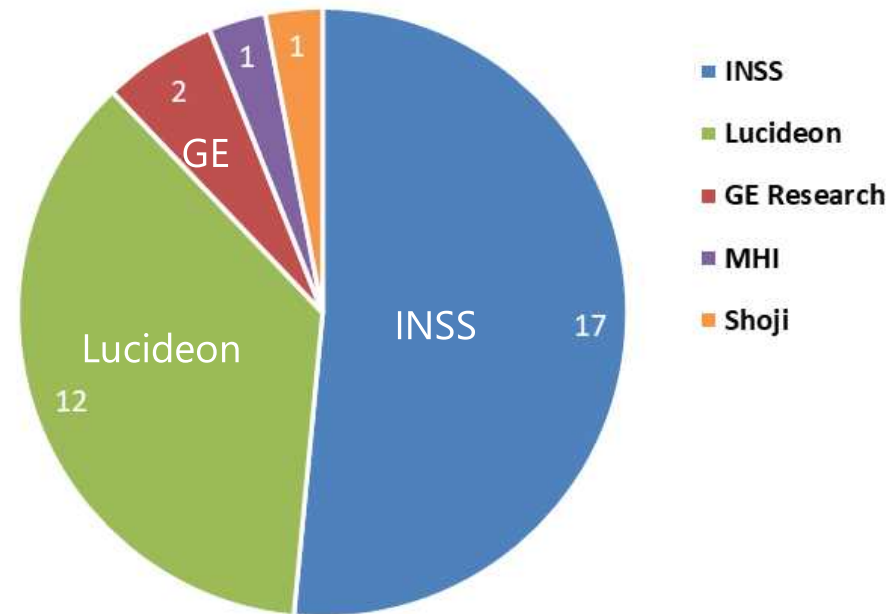
Figure 3-20

SCC growth rate data (mm/s) vs. K with the 50<sup>th</sup> percentile and 75<sup>th</sup> percentile curves. The individual data points are normalized to, and the curves are drawn for  $H_v = 220$  and  $290^\circ\text{C}$ .

※ K値及び硬さ（Hv）の指数並びに活性化エネルギー85,000J/moは亀裂進展データの重回帰分析及び同一条件試験データ分析を踏まえて設定

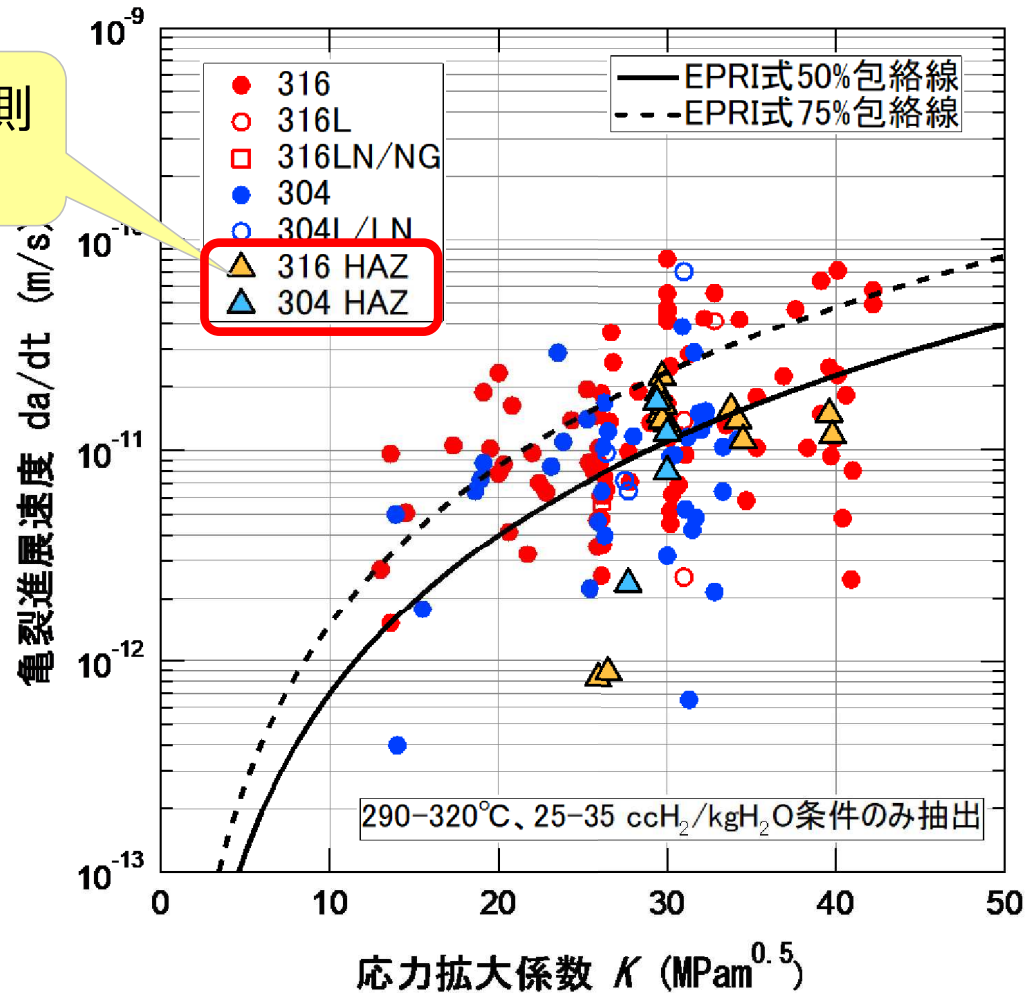


PWR Representative HAZ Data (33 data)



- 290℃～320℃の条件に絞った場合は18データとなり、日本国内の材料を用いた進展データのみで構成される（1データは周期的除荷条件）。
- 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※。

75%包絡線よりも下側にのみプロットがある



- MRP-458に含まれるデータにおいて、290-320°C、25-35 cc/kg H<sub>2</sub>に限定した場合、当該データはほぼ日本国内の材料を用いた進展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。

- ✓ MRP-458を調査した結果、定式化のデータベースには多数の日本国内の材料を用いた進展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 H<sub>2</sub>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。

## 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（当該管、比較管）

### 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. 2023年度検討方針

## 4. まとめ

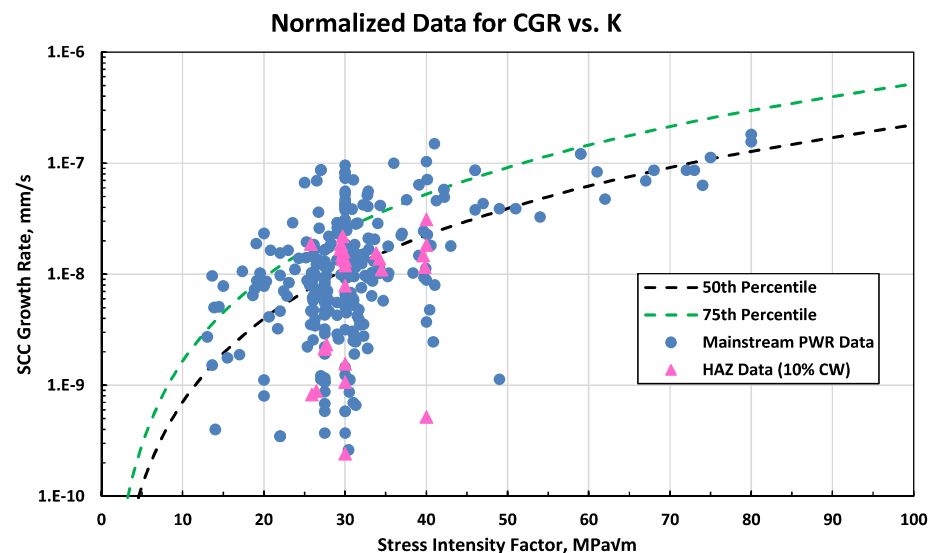
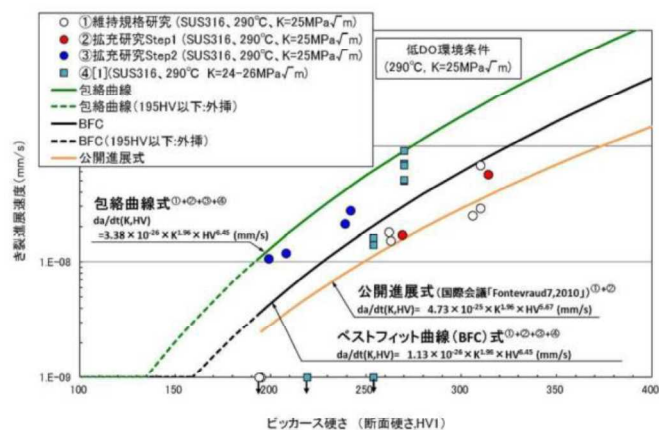
# 亀裂進展評価 背景と取り組み

## <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。
- 当該事象は、亀裂の発生メカニズムについて解明中であるものの、特異な硬さを一因として亀裂が発生したものと推察されている。
- 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**を確立するには、亀裂進展評価を参考とする事が可能。
- 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

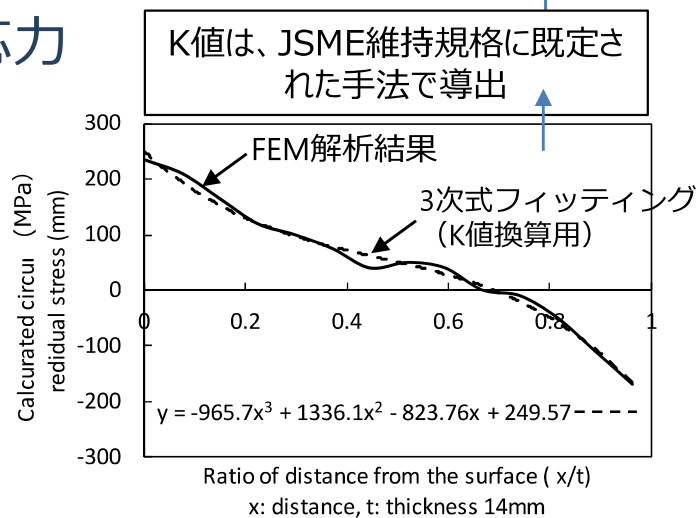
気体定数8.314 J/mol·K 温度 (290℃)

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

亀裂進展速度

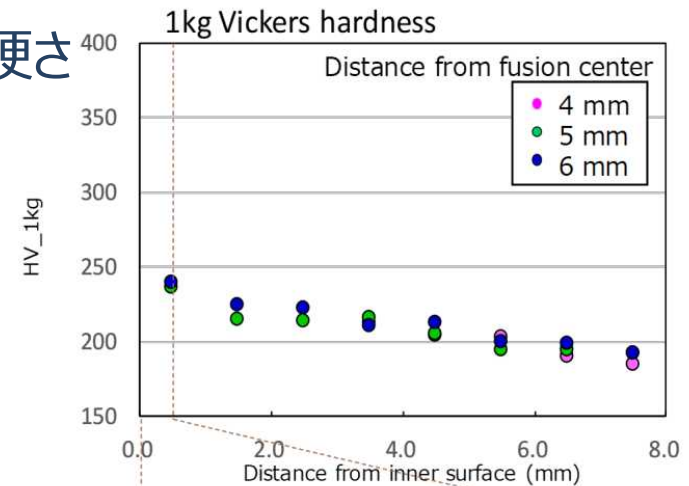
活性化エネルギー (J/mol)

## ②応力



IAF事業の手法により評価した残留応力 + 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号スプレィ配管の実測値  
 ・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）


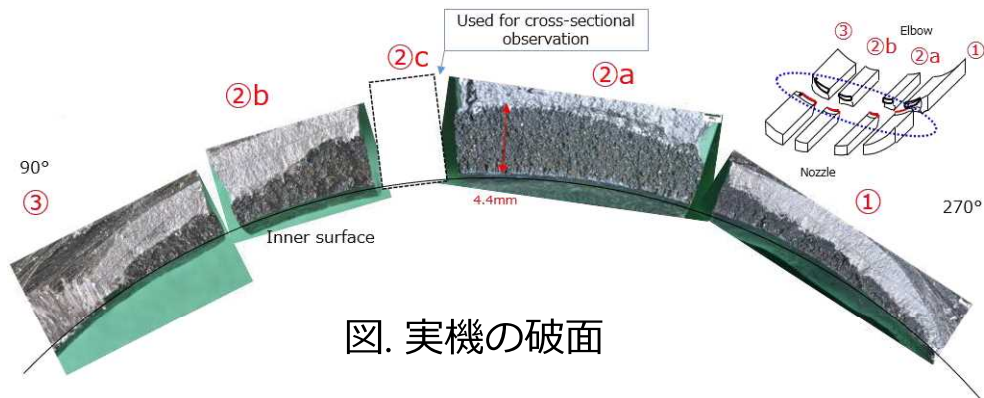
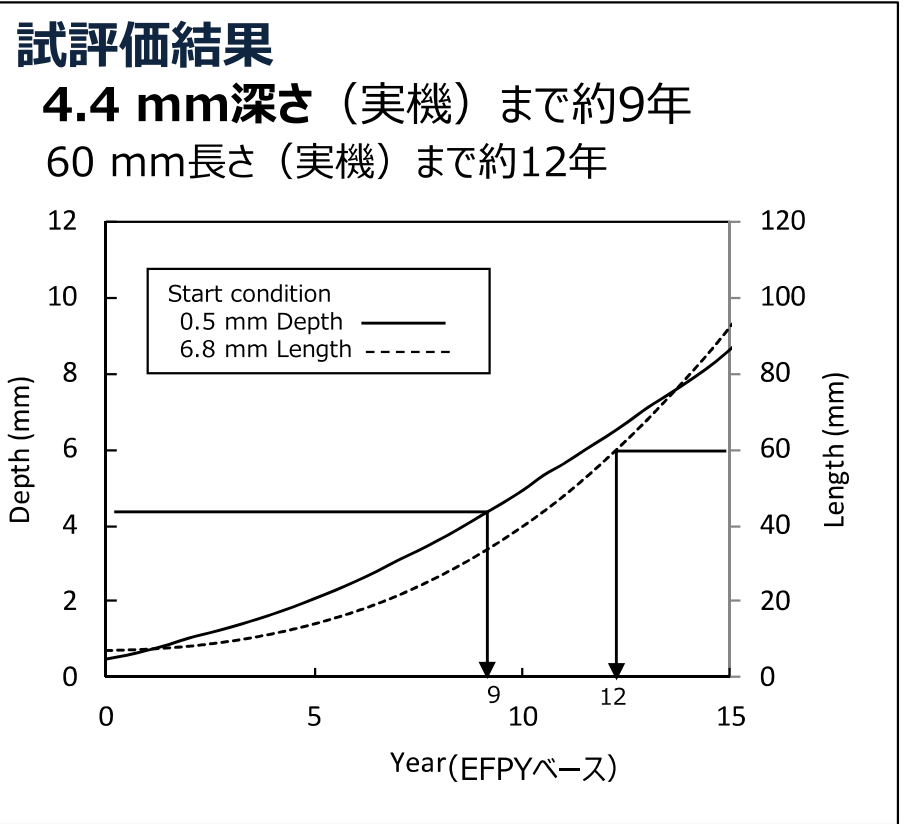



図. 実機の破面

<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。



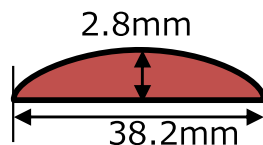
# EPRI式での亀裂進展試評価（検出下限値の亀裂前提）

**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：

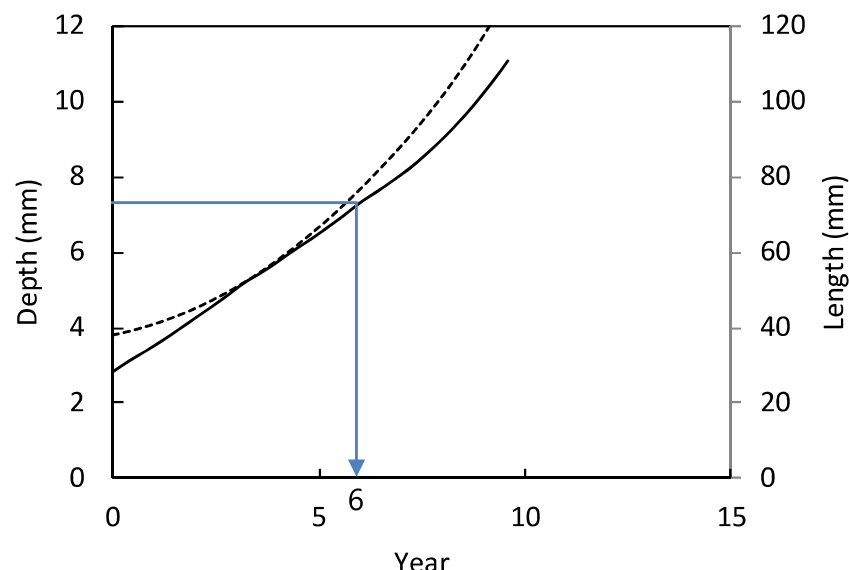
**2.8 mm**（検出下限値\*）

**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、「加圧器スプレラ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、実稼働年数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)に達すると試算された。

## <外部専門家会議での主要コメント>

- EPRI式を用いた**亀裂進展評価は工学的に問題ない**と思う。初期亀裂の想定もリーズナブル。
- 国内で**規格化**を行う場合は、**硬さの扱い**などを簡素化した手法が望ましい。硬さデータの拡充や、低K値・高K値領域における**亀裂進展速度の考察**など、引き続き議論が求められる。

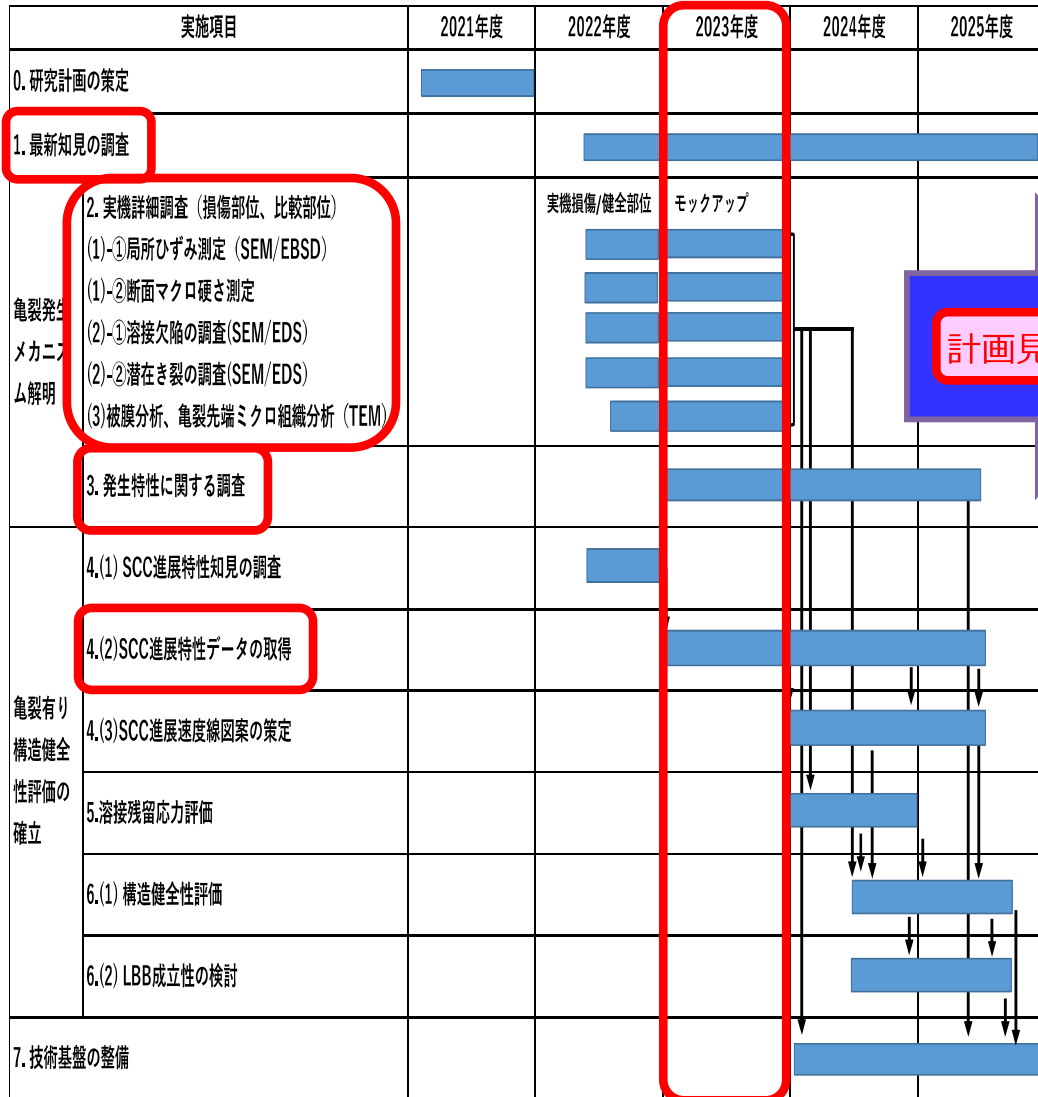
# 目次

---

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（当該管、比較管）
  - 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. 2023年度検討方針
4. まとめ

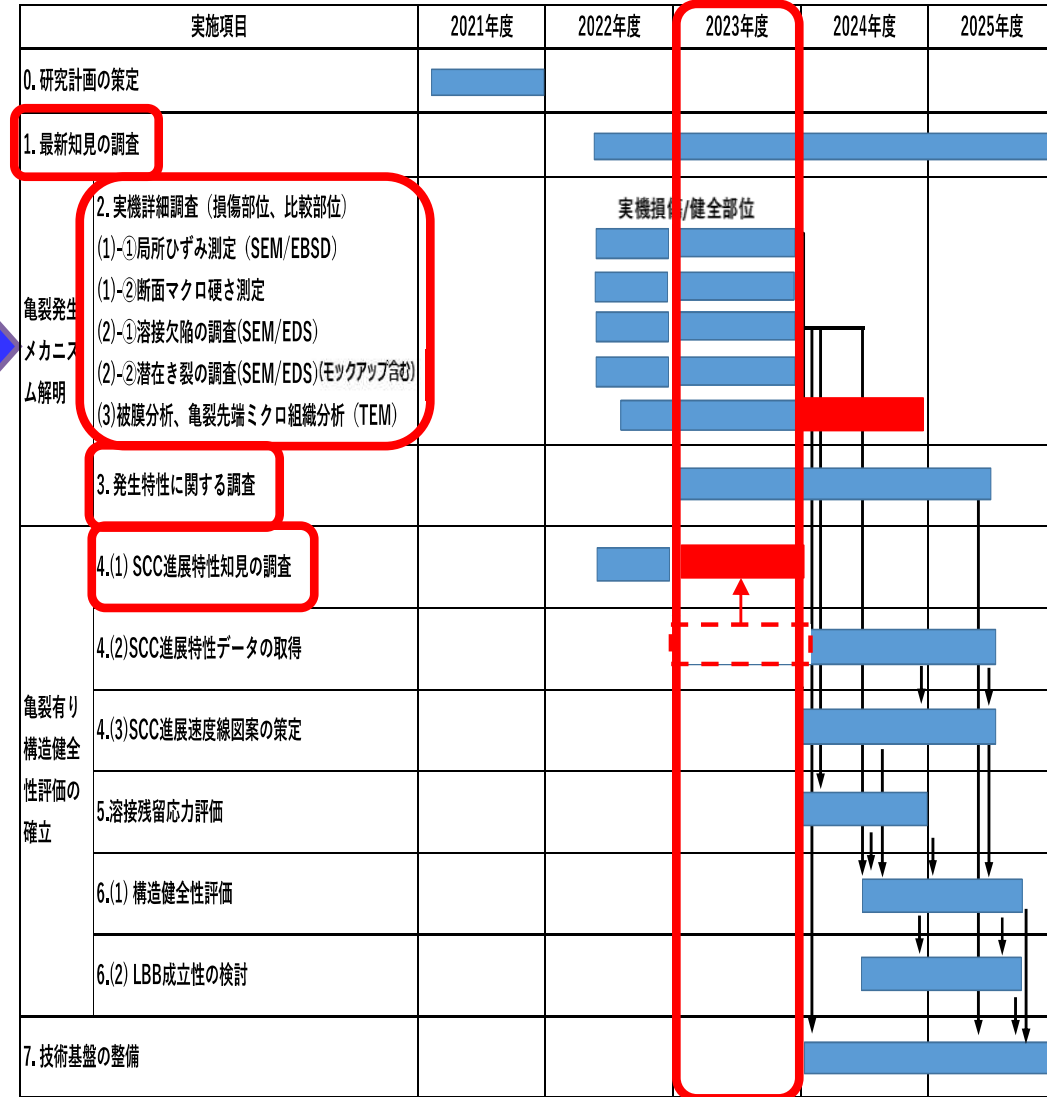
# 2023年度実施計画

## 2021年度策定の全体計画(初年度計画時)



計画見直し

## 2023年度策定の全体計画



# 2023年度実施内容

## 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（**検討継続**）。

## 2. 実機詳細調査（亀裂発生メカニズム解明）（**検討継続, 2022年度でのMSC調査を追加**）

- (1)-①局所ひずみ測定（SEM/EBSD）
- (1)-②断面マクロ硬さ測定（硬さの相関取得）
- (2)-①溶接欠陥の調査(SEM/EDS)
- (2)-②潜在亀裂の調査(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。

## 3. 発生特性に関する調査（亀裂発生メカニズム解明）（**2023年度から実施**）

- 電力共通研究等、SCC発生特性に関する既往知見を調査する。

## 4. 亀裂有り構造健全性評価の確立（**検討継続**）

### (1)SCC進展特性知見の調査

- 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を調査する。



# 2023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)	○SEM/EBSD測定結果の再整理	<ul style="list-style-type: none"> <li>当該管0°(クレタ部)の主亀裂部周辺の断面 (管台側/エルボ側)</li> <li>当該管の320°(クレタ部)、90°、160°、270°の断面</li> <li>比較管も同様位置 (0°(クレタ部)、90°、180°(クレタ部)、225°) の断面</li> </ul>
	②断面マクロ硬さ測定	○MSC近傍の硬さ試験	
(2)	①溶接欠陥の調査 (SEM/EDS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○主亀裂破面近傍の二次亀裂およびMSCに関する調査</li> <li>○主亀裂およびMSCの酸化被膜の調査</li> <li>○配管内表面からのMSCの分布調査</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2022年度での主亀裂、MSC発生に対する進展性の有無を明らかにするために、以下を追加確認。</li> <li>✓ 破面近傍、配管内表面からの拡大SEM観察</li> <li>✓ 2022年度SEM/EBSD測定データのMSC周辺の再整理 (MSC特化の追加測定を含む)</li> <li>✓ 酸化被膜調査</li> <li>✓ 溶接モックアップ調査(断面SEM観察)</li> <li>✓ 粒界酸化条件調査(文献調査)</li> </ul>
	②潜在亀裂の調査 (SEM/EDS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○溶接モックアップ材によるMSCの調査</li> <li>○MSC発生条件に関する文献調査</li> </ul>	
(3)	主亀裂の被膜分析、主亀裂およびMSC先端および表面近傍のミクロ組織観察 (TEM)	○被膜分析、亀裂先端ミクロ組織分析(TEM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>主亀裂の性状把握、曝された環境の推定のために、亀裂先端近傍、配管表面近傍、中間部の被膜を観察し、厚さ、組成、構造を把握。</li> <li>主亀裂およびMSCに関する知見を拡充するために、亀裂先端および亀裂の起点側 (内表面近傍) の観察を行い、亀裂先端近傍の転位の状態 (塑性ひずみの分布) を確認。</li> </ul>

# 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（当該管、比較管）
  - 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. 2023年度検討方針
4. 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、その式に基づいて大飯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。SCC進展速度線図案の策定を念頭におき、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。

# 参考資料

- 参考1： 検査技術向上検討結果について（1章参考資料）
- 参考2： 断面マクロ観察での溶接ビード形状比較例（当該管0°， 160°）（2.2章参考資料）
- 参考3： 断面ミクロ観察によりMSCが確認された部位（2.2章参考資料）
- 参考4： MSCについての考察（2.2章参考資料）
- 参考5： 粒界割れに関する実機水平展開検査状況（2.2章参考資料）
- 参考6： 略語集

# 参考1 検査技術向上検討結果について（1/3）

溶接金属中への亀裂進展有無等の亀裂性状の把握をUTによって実施する場合を念頭に、外部専門家の御意見も踏まえつつ、現状知見に基づき即時適用が可能な以下の①～③の向上策を検討し、成果をATENAレポートとして取り纏め、2023/4/28に発刊した。\*

そのATENAレポートで纏めた向上策については、各事業者の調達に関する社内ルールに取り込む事を安全対策として要求し、今後その安全対策の実施結果を確認することとしている。

## ①評価体制について

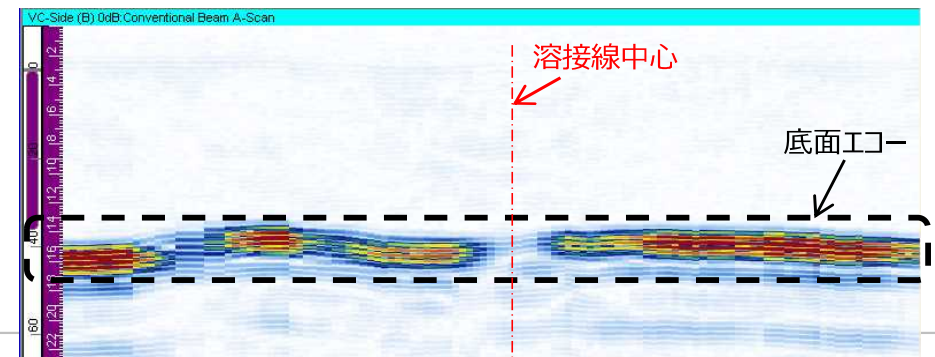
- ・ 本事象のようにBスコープ表示と実際の亀裂性状には乖離があり得ることを認識すること。
- ・ 検査員は、Bスコープ表示と実際の亀裂性状に乖離を生む外表面形状等の因子があることを踏まえて把握すること。

※外表面形状に依存して一部の探触子が浮いた場合、合成された超音波の入射位置が数mm単位でずれる可能性があることに留意すること。

## ②溶接線中心位置把握について

- ・ 溶接中心位置のずれについては、外表面ポンチからのトレースにより溶接線中心位置を把握するため、現場の作業環境、マーキング、開先部の公差等により誤差が生じることを認識すること。

※例えば、JEAC4207に記載されている推奨値(2.5mm)よりも細かいピッチでデータ垂直探傷のBスコープ画像を取得し、総合的に溶接線中心位置の評価を行うこと。



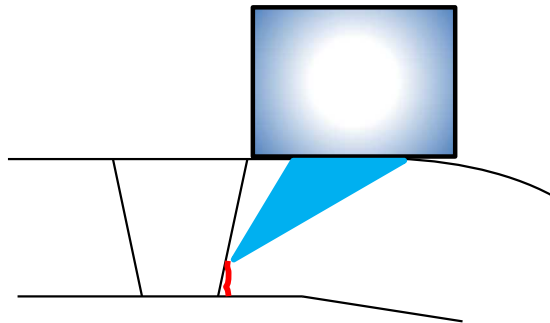
例：垂直探傷のBスコープ画像



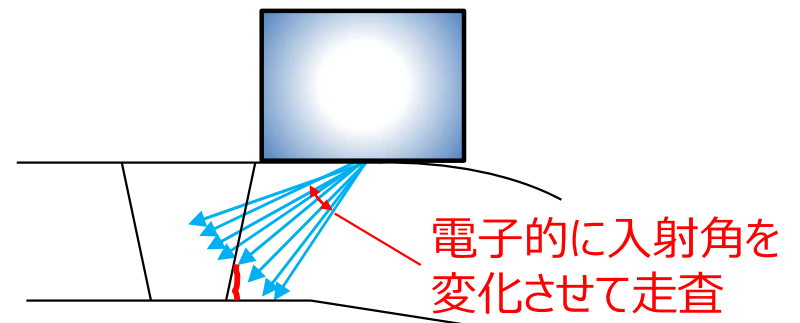
# 参考1 検査技術向上検討結果について (2/3)

## ③UT手法について

- 探触子設置位置を選定し、その位置に応じた入射角および超音波集束条件（管軸方向、板厚方向）を準備し、Bスコープ画像を取得する（図③(1)参照）。
- 電子的に超音波ビームの入射角を変化させるセクタ走査画像を取得する。（図③(2)参照）。



図③(1) 外表面形状の影響を受けない位置からの探傷



図③(2) セクタ走査による探傷

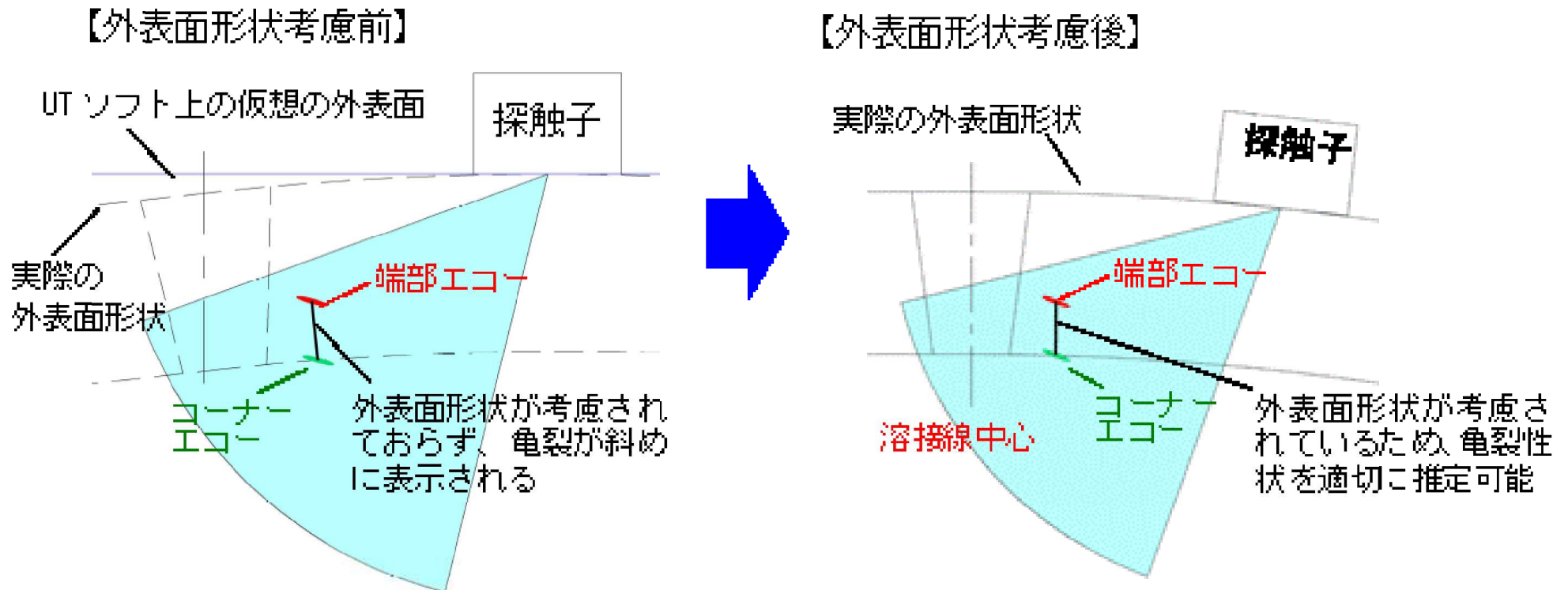
- 上記のBスコープ画像やセクタ走査画像について、探触子が溶接線に対してどの程度傾いているのかを外表面形状から判定し、その傾きによる走査画像への影響を考慮して亀裂の先端位置を推定する。

※溶接金属部の影響による超音波ビームの屈曲の影響を受けないよう、超音波の路程に溶接金属部を含まないように検査することに留意すること。

# 参考1 検査技術向上検討結果について (3/3)

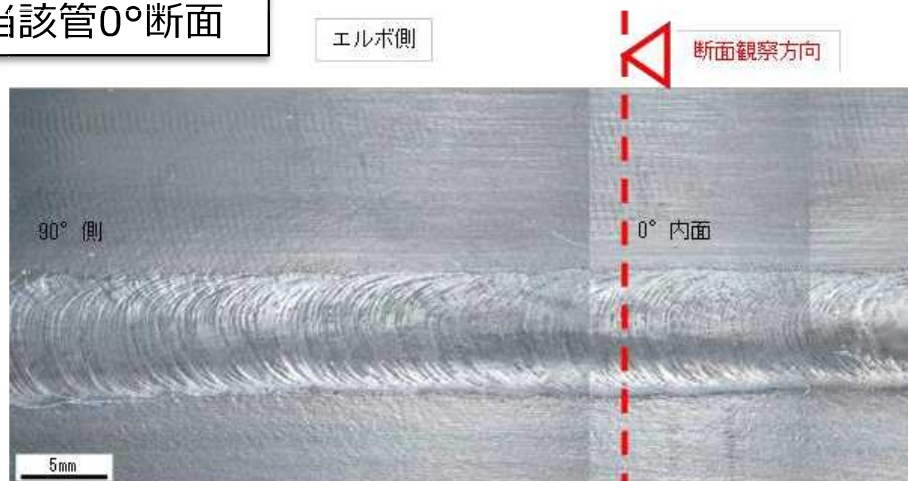
## ③UT手法について (前頁からの続き)

- Bスコープ画像及びセクタ走査画像をもとにコーナーエコー、端部エコーの反射源位置を推定する際には、探触子が溶接線に対してどの程度傾いているのかを外表面形状から判定し、その傾きによる走査画像への影響を考慮すること。

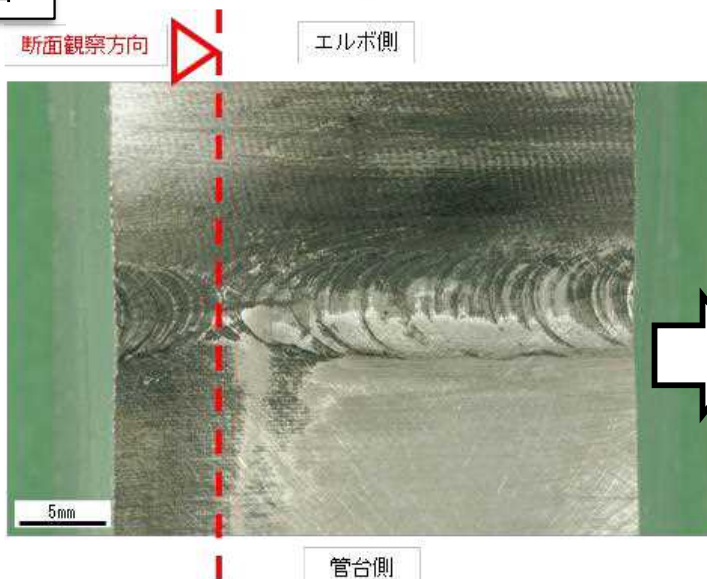


# 参考2 断面マクロ観察での溶接ビード形状比較例（当該管0°，160°）

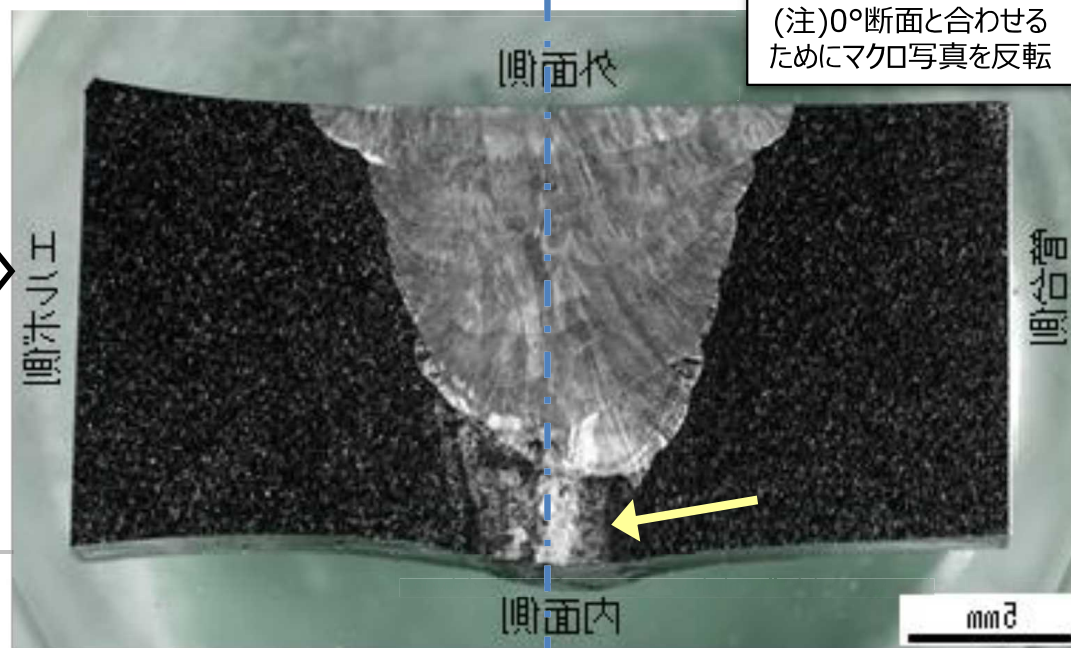
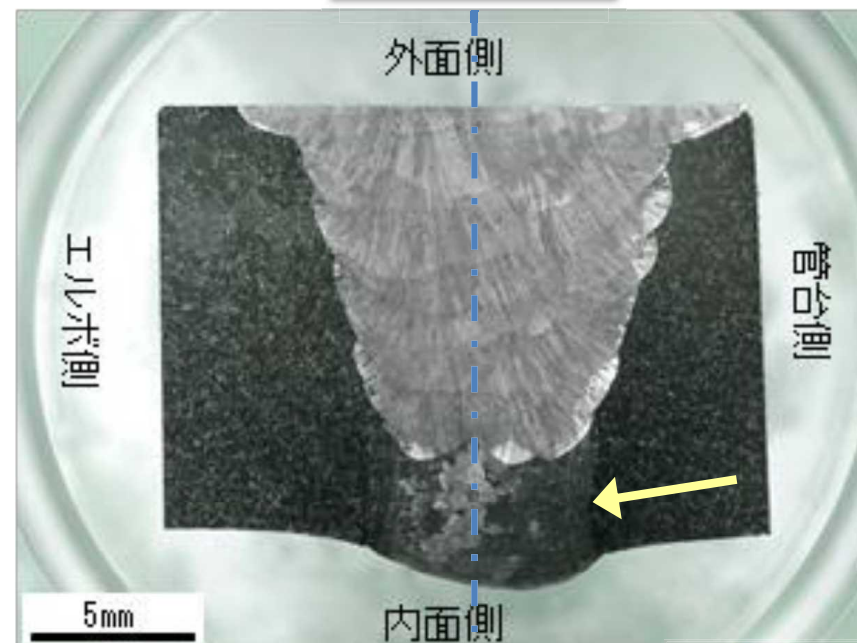
当該管0°断面



当該管160°断面



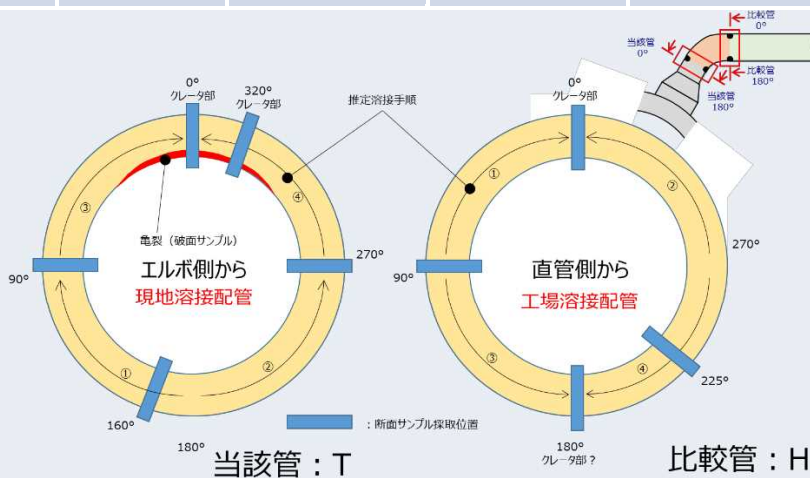
溶接部中央



(注)0°断面と合わせるためにマクロ写真を反転

- ビード外観写真より160°位置は溶接スタート位置と考えられ、0°と比べ入熱が小さかったと推定されるが、0°、160°、いずれも初層溶接による溶け込みは十分である。

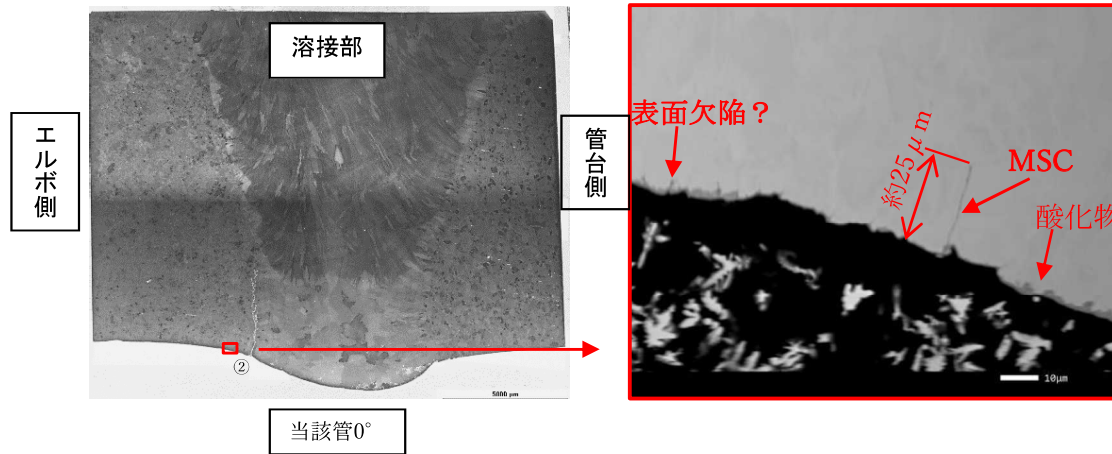
# 参考3 断面マイクロ観察によりMSCが確認された部位

実施項目		当該管/断面					比較管/断面			
		0° (クレータ部)	320° (クレータ部)	90°	160°	270°	0° (クレータ部)	90°	180° (クレータ部)	225°
断面 マイクロ 観察 結果	エルボ側	○ 約50μm MSC	× 無し	○ 約35μm MSC	× 無し	○ 約100μm 約10μm 約30μm MSC	○ 約15μm MSC	× 無し	○ 約50μm MSC	× 無し
	管台側 または 直管側	○ 約110μm 約100μm 約40μm MSC	○ 約 110μm MSC	× 無し	× 無し	○ 約25μm MSC	× 無し	× 無し	○ 約280μm MSC	× 無し
	備考	○ : MSC有り × : MSC無し 								



# 参考4 MSCについての考察(1/6)

## -MSCがSCCの起点となった可能性について-

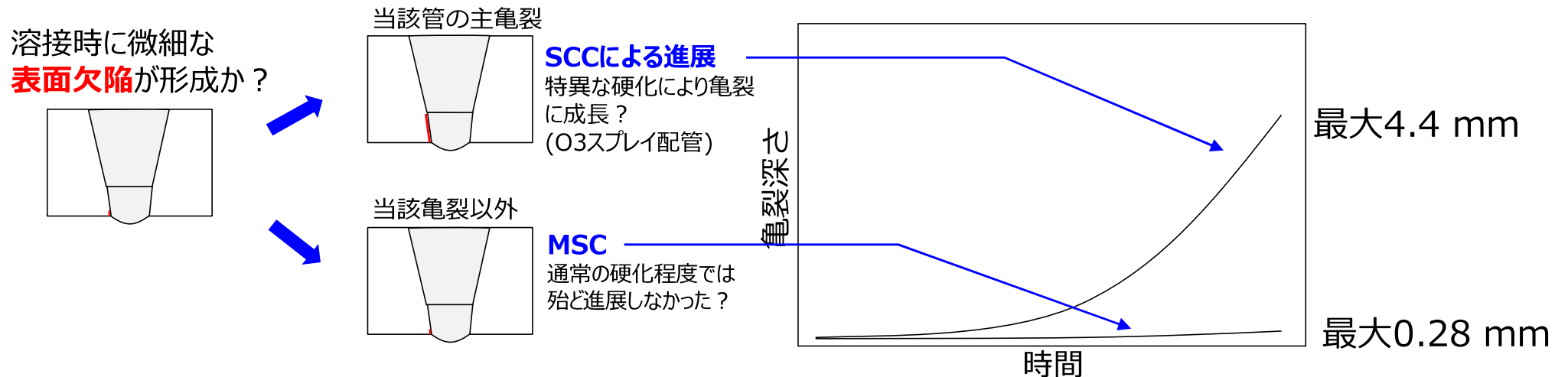


### Microstructurally Small Crack(MSC)

：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。
- 微細な表面欠陥を切っ掛けとして形成？
- 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



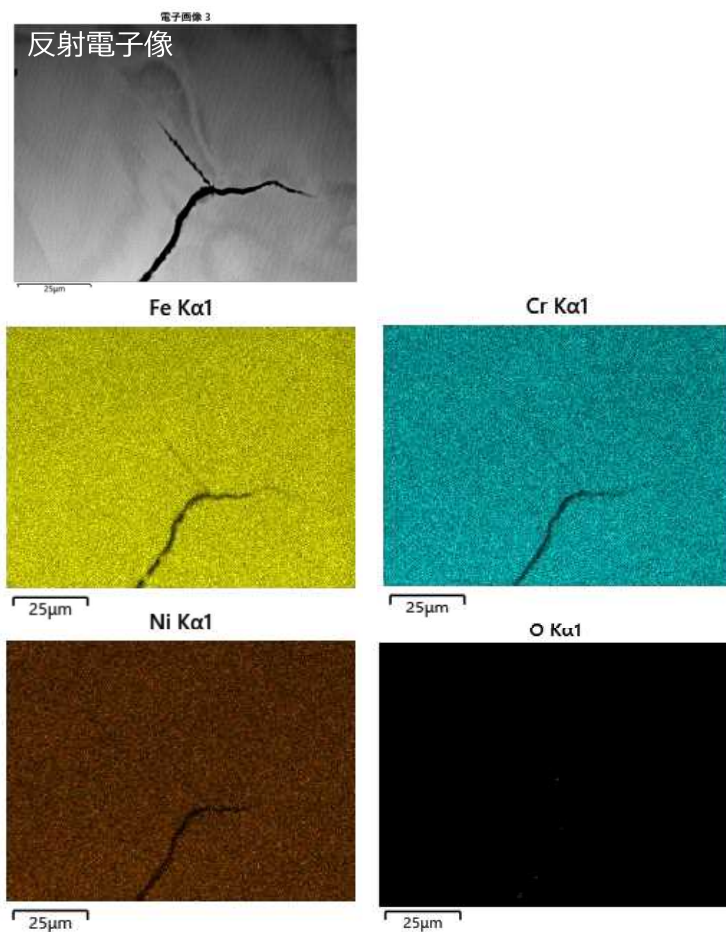
➤ 特異な硬化が生じた領域ではMSCに留まらず、SCCとして進展した可能性が考えられる。



# 参考4 MSCについての考察 (2/6)

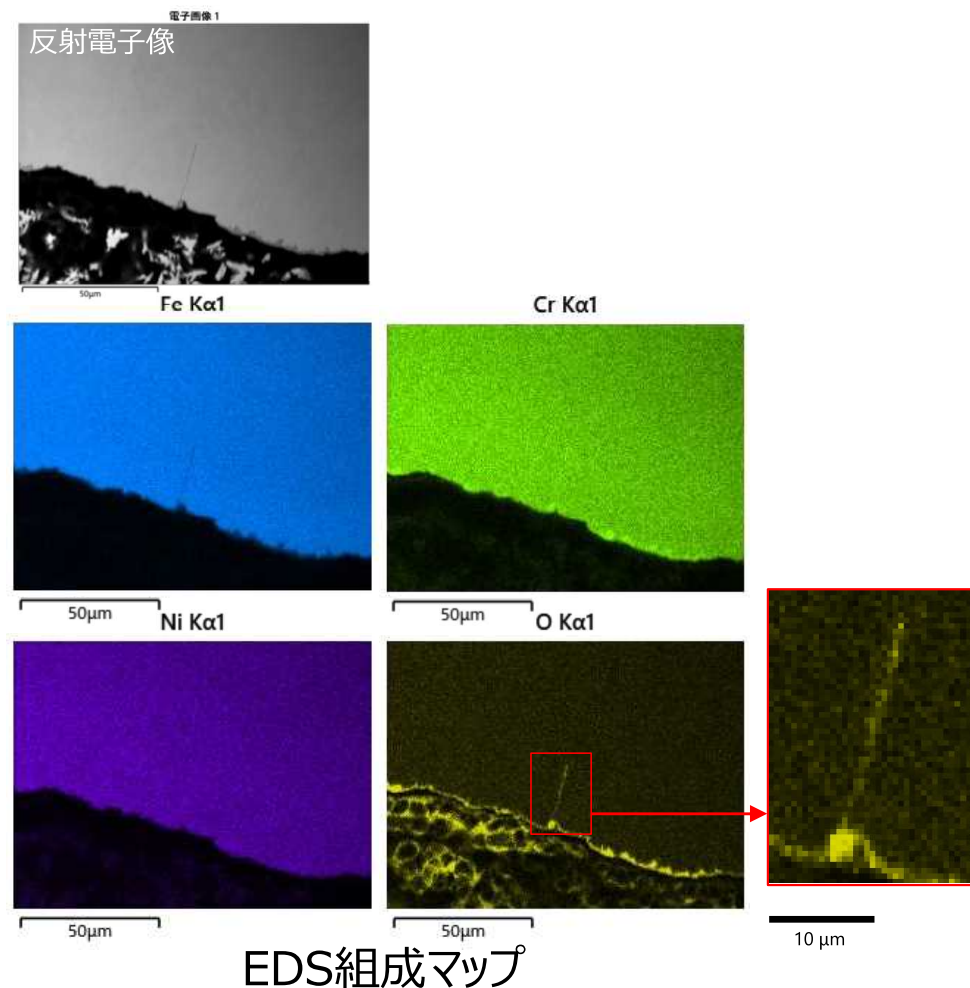
## -酸化の状況について-

### 主亀裂先端の断面



- 主亀裂の先端では酸素が検出されていない。  
➤ 進展性を示唆

### MSC断面



- MSCには先端まで酸素が検出されている。  
➤ 長時間の停留を示唆

# 参考4 MSCについての考察(3/6)

## -亀裂進展性について-

### <観察結果>

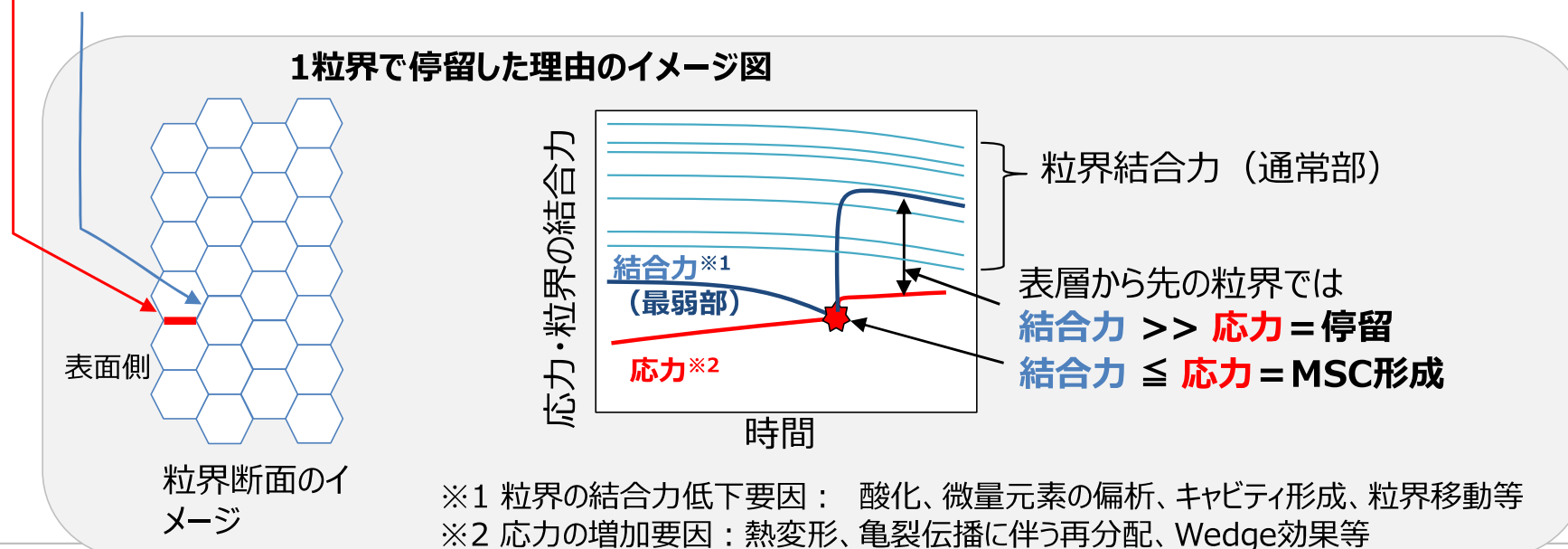
- MSC内には**酸化物**が形成。(進展性の亀裂先端は酸化物が少ない。)
- 主亀裂以外は、**1 粒界程度の深さ**。

### <推論>

- 当該管以外に形成されたMSCに**進展性は無く、停留**しているとの認識 (酸化挙動より推定)。

### <停留の理由として考えられる事象>

- **特異な硬化**が生じていない領域では進展性が低い可能性 (EPRI式より、硬さの寄与が大きいと推定)。
- 多数の粒界のうち、**最も結合力が弱い粒界**にMSCが形成の可能性。  
その先にある粒界は最弱部ではないために、応力が結合力を上回らなかったと推定。

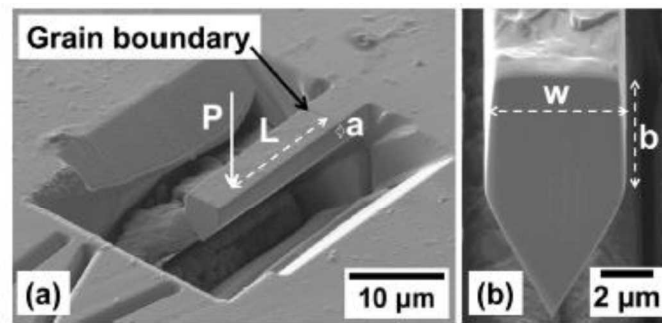


# 参考4 MSCについての考察(4/6)

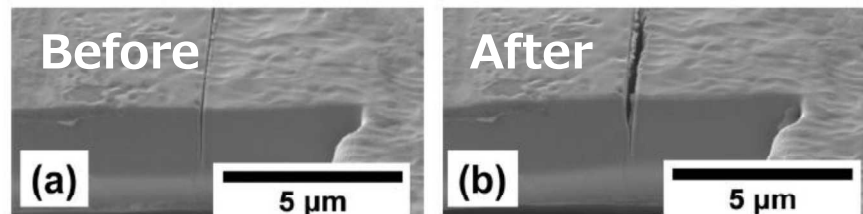
## -粒界結合力のばらつきについて-

### A. Stratulatらによる600合金の粒界結合力の評価に関する研究成果

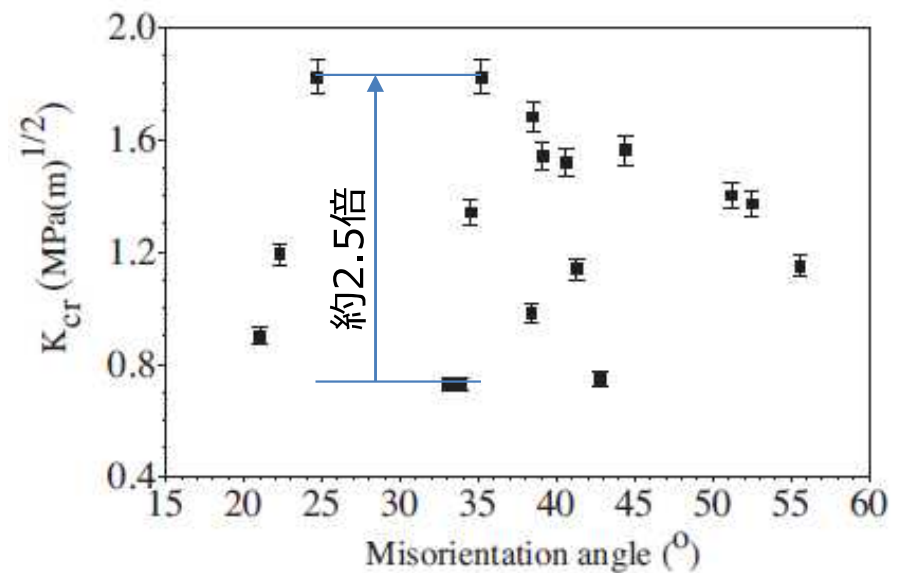
PWR模擬環境で4500hの予備酸化後に微小梁試験片を用い粒界強度を測定。



微小梁試験片の形状



粒界結合力の評価時の亀裂発生状況



- 23個の粒界を評価し、最大と最小で約2.5倍の粒界結合力の差が認められている。

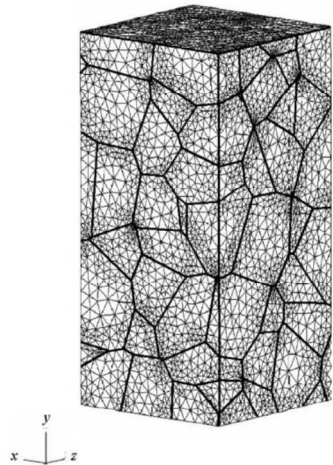
➤ 粒界結合力(粒界破壊に要する力)は、結晶粒界ごとに大きく異なる。

# 参考4 MSCについての考察(5/6)

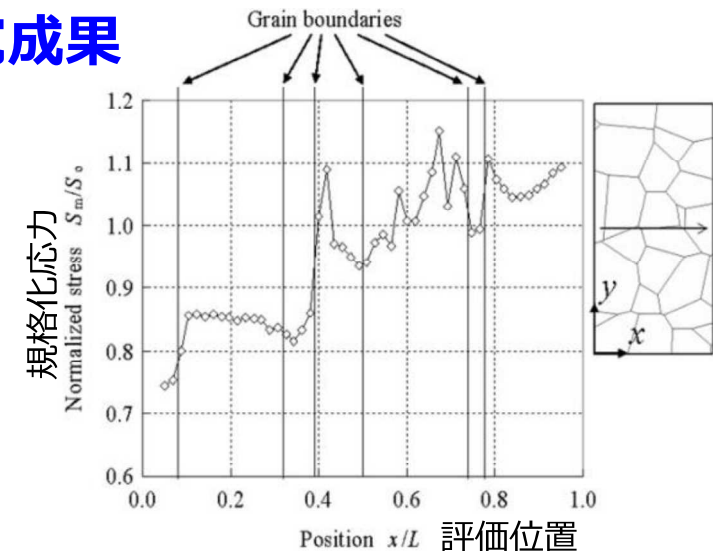
## -結晶粒界の局所応力のばらつきについて-

### M.Kamayaらによる粒界近傍の応力に関する研究成果

- 100個の結晶粒で構成された多結晶体モデルを用いて、有限要素法(FEM)により応力を計算



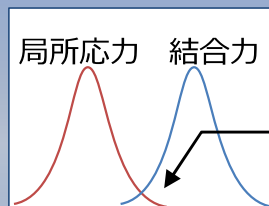
FEM解析での多結晶体モデル



(b) Along the x-axis,  $y=L, z=L/50$

### 局所応力の評価結果

- ✓ 応力は結晶粒界毎に大きく変化することが示されている。
- ✓ SCC発生部は表層と内部での結晶粒径のミスマッチ有  
→更なるひずみ（応力）集中の可能性



### 観察されたMSCが1結晶粒界程度で停止していた理由(仮説)

- ✓ 結晶粒界部の局所応力と結合力の双方にばらつきがある。
- ✓ 亀裂が進展するには、局所応力 > 結合力の条件が連続する必要がある。複数のMSCが確認されているものの、稀な現象となっていた当該管エルボ側のみでSCCとして亀裂進展した可能性有。

## 参考4 MSCについての考察(6/6)

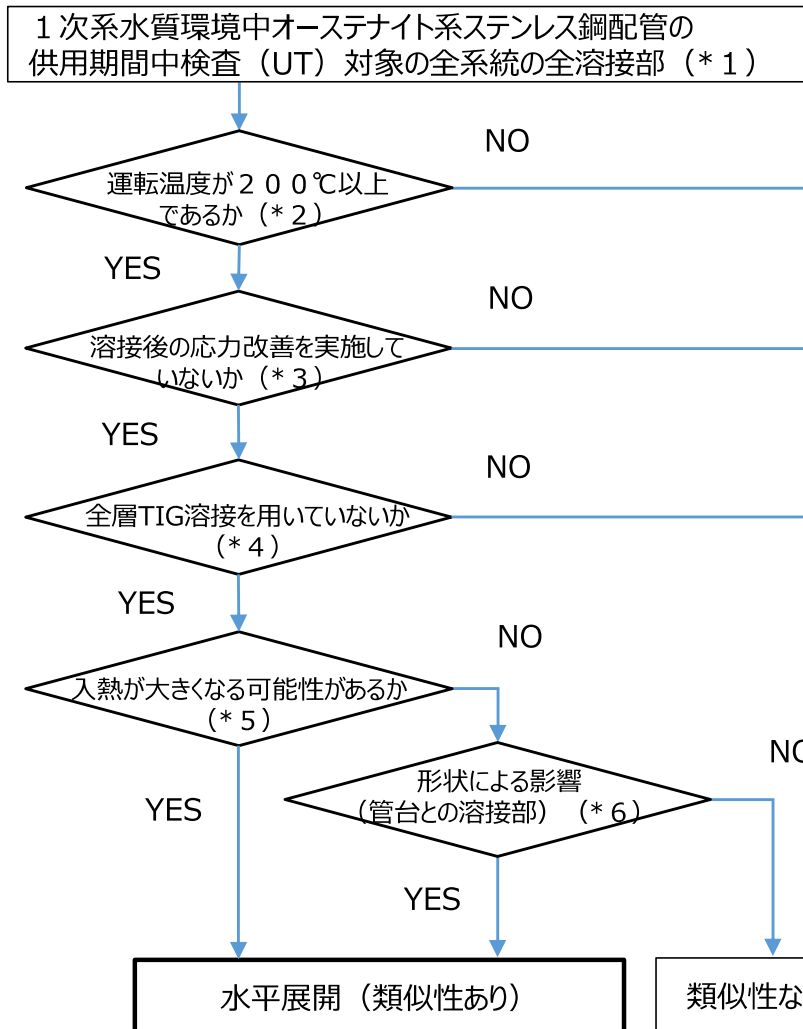
### -まとめ-

- 想定されるメカニズム的な観点から、実機詳細調査により認められたMSCと、進展した主亀裂の粒界割れについて考察した。
- 硬化部以外では1結晶粒界程度の深さで停留しており、特異な硬さの領域以外では、粒界結合力と応力の大小関係から、それ以上の進展が生じなかった可能性があるかと推定。
- SCCの起点として役割を果たす可能性や、進展する／しないの差別化、唯一進展性のある亀裂となった要因分析などのためにも、今後はMSCを含む亀裂発生過程（メカニズム）にも着目した検討を進める必要がある。



## 参考5 粒界割れに関する実機水平展開検査状況（1/2）

- 大飯3号の事象以後，PWR各プラントで大飯3号当該箇所と類似性があると考えられる溶接部を抽出し、至近3定検\*に亘り超音波探傷試験を実施中。



- (\*1) PWR環境中のSCCの進展が認められていないステンレス鋼、初層溶接部が接液しないセットイン管台、及び初層溶接部が除去されているセットオン管台は含まれていない。
- (\*2) PWR環境中のSCCの進展への温度の影響を考慮し、運転温度200℃以上の溶接部は抽出対象とする。
- (\*3) 残留応力の影響を考慮し、溶接後の応力改善（バフ研磨やピーニング）を実施していない溶接部は抽出対象とする。
- (\*4) 全層TIG溶接は硬化が小さいことを確認していること及び、初層入熱量が小さくできることで、応力についても小さくできることから、全層TIG溶接を用いていない溶接部は抽出対象とする。
- (\*5) 経験年数が少ない溶接士が施工した場合、丁寧かつ慎重に作業することにより入熱が大きくなる可能性があることから、実務経験が3年未満の溶接士が施工した溶接部（入熱の安定する工場溶接を除く）は抽出対象とする。または、補修溶接を実施した場合は、追加で溶接をするため、入熱が大きくなる可能性があることから、補修溶接を実施した溶接部を抽出対象とする。
- (\*6) 管台は他の形状と比較して溶接による硬化が生じやすく、モックアップにおいても管台を含む形状で300HVを超える硬さを確認したことから、形状の影響の大きい「管台－エルボ」及び「管台－直管」の溶接部を抽出対象とする。

\*：初回検査では念の為，水平展開箇所に加え「類似性なし」とした箇所も含め検査し，大飯3号の事象と同様な事象が生じていないことを確認する。その上で，水平展開箇所について，各プラント3定検連続で検査を行う。

## 参考5 粒界割れに関する実機水平展開検査状況 (2/2)

➤ 2023年7月末時点で延べ800箇所以上に対し検査を実施し、有意な指示は検出されていない。

プラント	初回検査箇所*1,2		継続検査1回目*1	継続検査2回目*1	継続検査3回目*1
	「類似性なし」の箇所	水平展開箇所	水平展開箇所	水平展開箇所	水平展開箇所
美浜3	0 / 77	0 / 21	0 / 21	- / 21	- / 21
高浜1	0 / 70	0 / 24	- / 24	- / 24	- / 24
高浜2	0 / 115	0 / 17	- / 17	- / 17	- / 17
高浜3	0 / 40	0 / 14	0 / 14	- / 14	- / 14
高浜4	0 / 26	0 / 18	0 / 18	- / 18	- / 18
大飯3	0 / 23	0 / 13	0 / 13	- / 13	- / 13
大飯4	0 / 34	0 / 9	0 / 7*3	- / 7*3	- / 7*3
伊方3	0 / 23	0 / 9	0 / 9	- / 9	- / 9
玄海3	0 / 25	0 / 6	- / 6	- / 6	- / 6
玄海4	0 / 22	0 / 11	0 / 11	0 / 11	- / 11
川内1	0 / 27	0 / 15	0 / 15	- / 15	- / 15
川内2	0 / 20	0 / 14	0 / 14	- / 14	- / 14
泊1	- / 23	- / 8	- / 8	- / 8	- / 8
泊2	- / 8	- / 9	- / 9	- / 9	- / 9
泊3	対象無し	対象無し	対象無し	対象無し	対象無し
敦賀2	- / 23	- / 18	- / 18	- / 18	- / 18

\*1：各欄の数値は左側：検査結果の有意な指示の数(-は今後実施)，右側：検査箇所数を表す

\*2：初回検査では念の為，前頁のフローの水平展開箇所に加え，「類似性なし」とした箇所も含め検査している

\*3：配管取替により水平展開対象外となったため，初回検査箇所と継続検査箇所に差異がある

## 参考6 略語集

略語	和名	名称
ASME	米国機械学会	American Society of Mechanical Engineers
CGR	亀裂進展速度	Crack Growth Rate
CW	冷間加工	Cold Work
EBSD	電子線後方散乱回折	Electron Back Scattered Diffraction
EDS	エネルギー分散型X線分光法	Energy dispersive X-ray spectroscopy
EPRI	米国の電力研究所	Electric Power Research Institute
FEM	有限要素法	Finite Element Method
HAZ	熱影響部	Heat-Affected Zone
IG/TG	粒界／粒内	Intergranular／Transgranular
INES	国際原子力・放射線事象評価尺度	International Nuclear Event Scale
IPF	逆極点図方位	Inverse Pole Figure
ISI	供用期間中検査	In Service Inspection
KAM	カーネル平均方位差	Kernel Average Misorientation
LBB	破断前漏洩	Leak-Before-Break
NRC	米国原子力規制委員会	Nuclear Regulatory Commission
SCC	応力腐食割れ	Stress Corrosion Cracking
SEM	走査型電子顕微鏡	Scanning Electron Microscope
TEM	透過型電子顕微鏡	Transmission Electron Microscopy
TIG	タングステン不活性ガス	Tungsten Inert Gas