

PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れの 知見拡充に関する検討状況について

原子力エネルギー協議会
(ATENA)

2022年 6月 24日

本資料には、経済産業省「令和3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。

1. 振り返り

2. 2021年度検討内容

2.1 発生メカニズム・亀裂有り健全性評価

2.2 検査技術の向上

3. まとめ

1. 振り返り

2. 2021年度検討内容

2.1 発生メカニズム・亀裂有り健全性評価

2.2 検査技術の向上

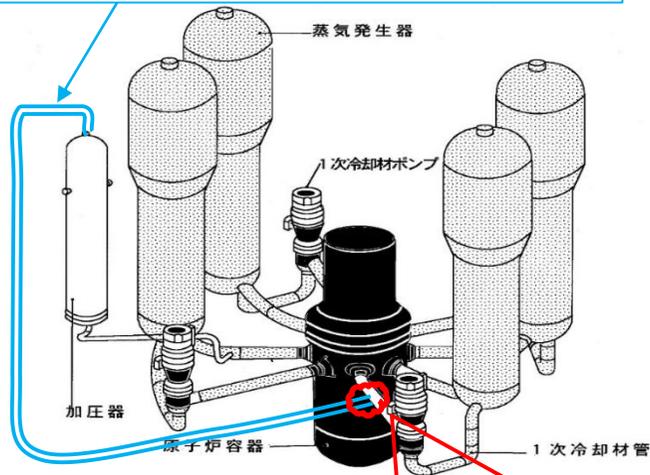
3. まとめ

PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れの概要

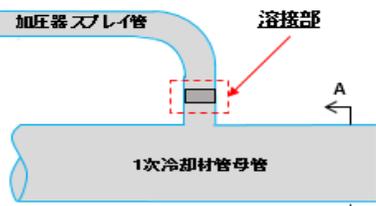
本検討の発端となった大飯発電所3号機加圧器スプレイ配管溶接部での事象の概要を以下に示す。

発生箇所

加圧器スプレイライン
(材質:オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316))



1次冷却材系統設備概要図



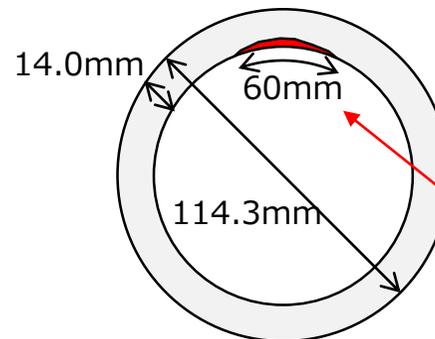
加圧器スプレイ管取出し部詳細



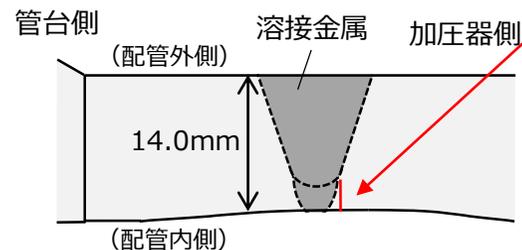
視野A-A

実機の破壊調査結果

断面図 (上面図)



断面図 (横断面図)



傷 (イメージ)
長さ60mm、深さ4.4mm

- 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

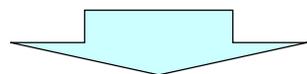
＜亀裂発生及び亀裂進展の状況整理＞

(公開会合における関西電力説明)

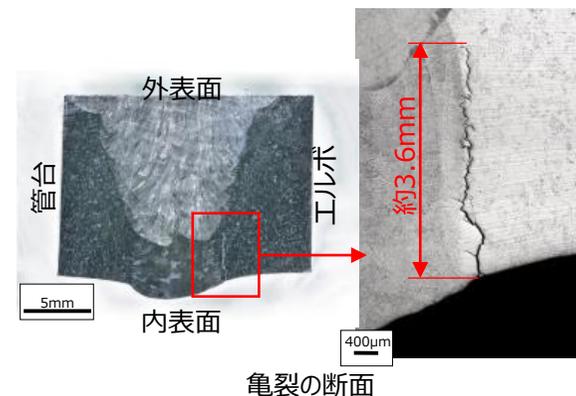
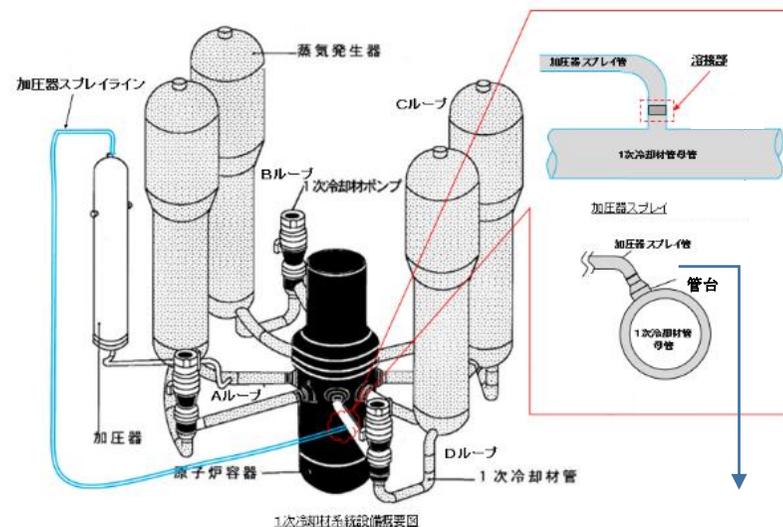
- 過大な溶接入熱と、管台-エルボ部の剛性の影響が重畳し、表層近傍において特異な硬化と応力が影響したことにより割れが発生と推定。

(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

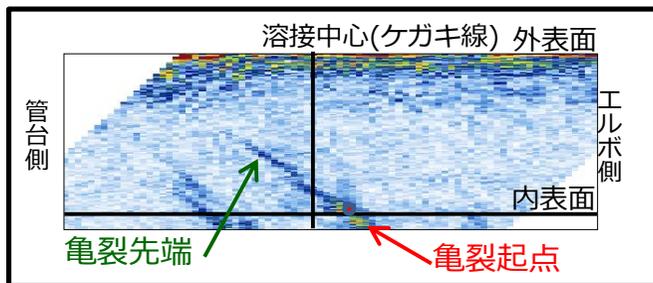
<超音波探傷検査による亀裂性状把握状況> (公開会合における関西電力説明)

- 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

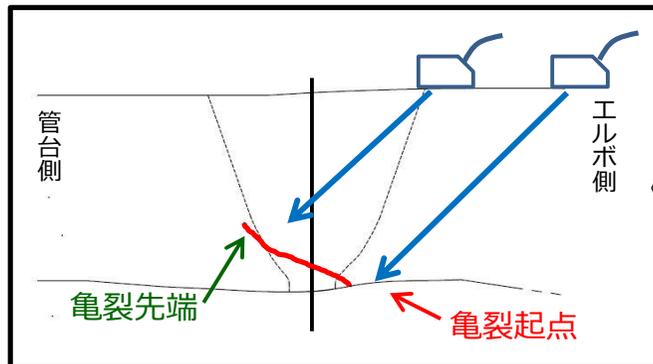
⇒ **ATENAとして、亀裂性状の誤認に対する検討が必要であると認識。**

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



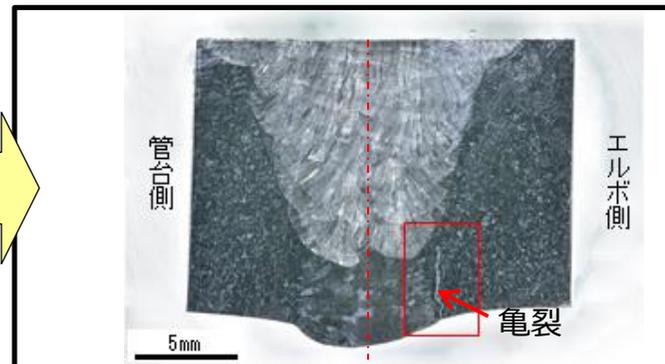
現地フェーズドアレイUT結果より推定した亀裂性状

亀裂の調査結果

亀裂プロフィール	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

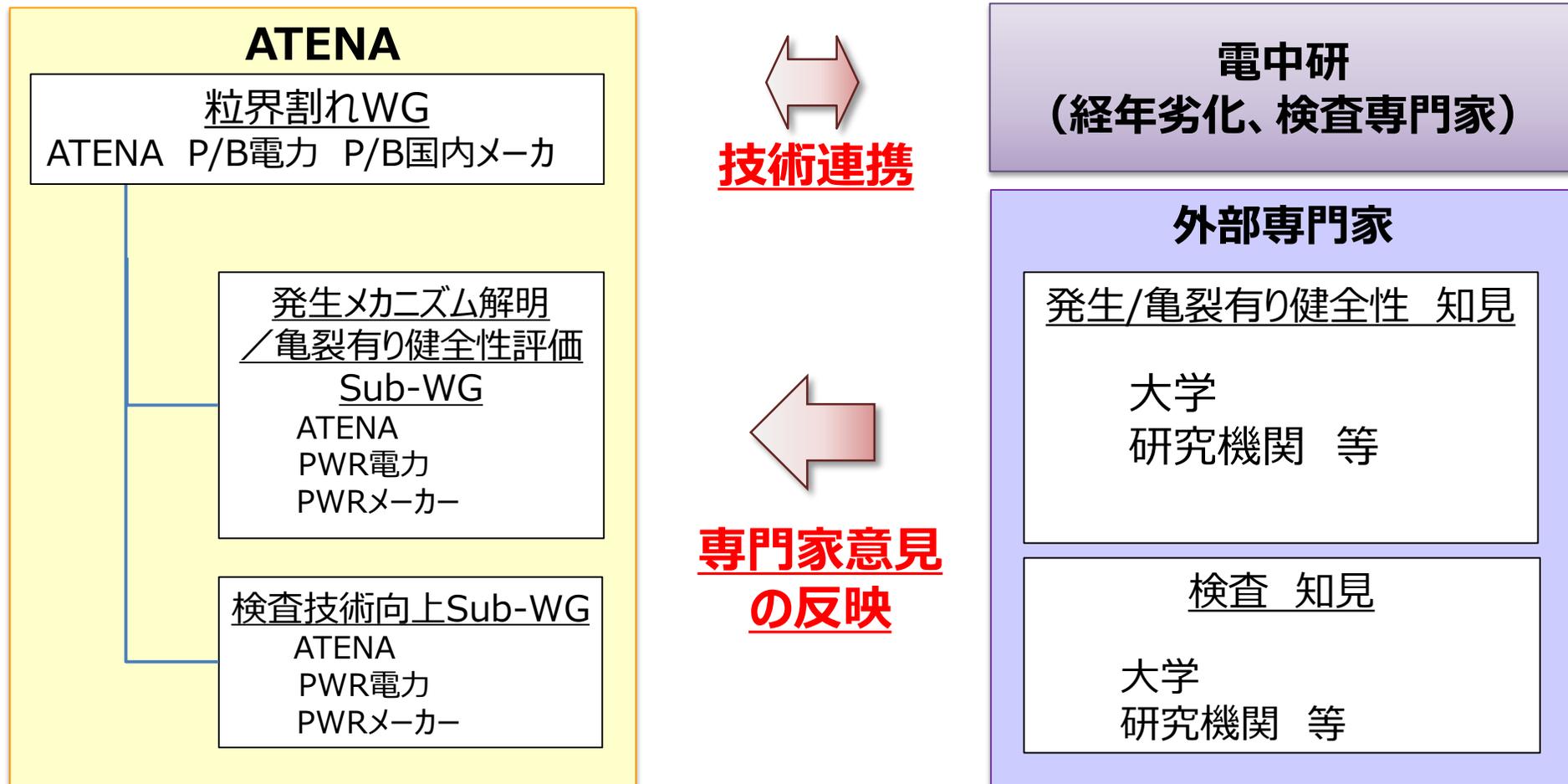
PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れに対するATENAの取り組み

- 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

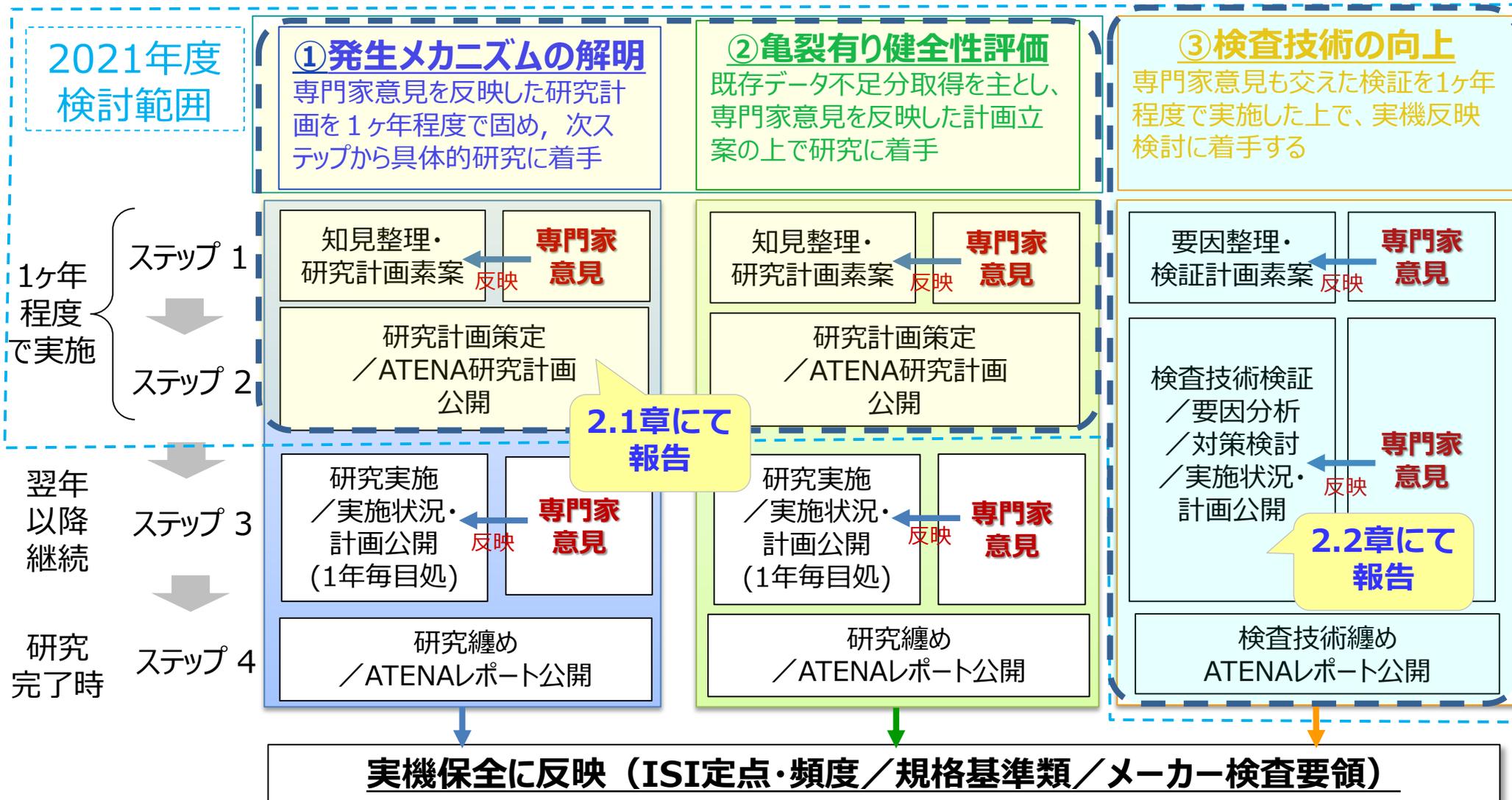
PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れ検討の体制

- 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

- 2021年度は専門家意見を反映した①②の研究計画を策定、③は技術向上策の取りまとめを実施。



目次

1. 振り返り

2. 2021年度検討内容

2.1 発生メカニズム・亀裂有り健全性評価

2.2 検査技術の向上

3. まとめ

2021年度に実施した課題検討プロセスは以下のとおり。

<発生メカニズム>

- i) 規制委員会との公開会合で議論されたFT図を含め、事象概要を外部専門家に説明し、考えられる要因をゼロベースで洗い出し → 11
- ii) 事業者の調査結果等、既知見を踏まえて、原因となり得る要因の絞込みを実施 → 11
- iii) 絞込んだ結果を踏まえて、対応方針を検討 → 12
- iv) 対応方針に基づき、具体的な実施項目を検討し、研究計画として取りまとめ → 13 ~ 17

<亀裂有り健全性評価>

技術課題の整理（亀裂進展速度線図が規格化されていない等）および、技術課題を踏まえた実施項目を検討し、研究計画としてとりまとめ → 12 ~ 17

発生メカニズムに関する要因候補と絞り込み結果

事業者調査時の推定因子			事業者調査時の結果と今回得られた専門家意見	
事象	要因	因子	事業者調査結果と今回得られた専門家意見	判定※
加圧器 スプレイライン 配管溶接部の傷	機械的疲労	振動による疲労	・マクロ・ミクロ観察により、破面からビーチマークやストライエーションは確認されなかった。	×
	熱疲労	高サイクル熱疲労	・マクロ・ミクロ観察により、破面からビーチマークやストライエーションは確認されなかった。 ・単一の亀裂であり、熱疲労のような亀甲状の亀裂は確認されなかった。	×
		熱過渡による疲労		×
	SCC	粒界型SCC	・破面ミクロ観察の結果、粒界割れが主に認められた。 ・硬さ計測の結果、表層で350HV、内部で200HV～240HVが認められた。 <外部専門家意見> 有力な因子と考えらえるが、粒界型SCCによる亀裂発生機構・原因と断定する（他の因子を排除するには、事業者調査では実施していないEBSD等も用いて当該部の特異性を追加調査すべき。	○
		粒内型SCC	・破面ミクロ観察の結果、粒内割れは殆ど認められなかった。 ・付着物EDS分析の結果、塩素等の有害な元素は認められなかった。	×
	溶接欠陥/ 溶接不良	溶接欠陥	・破面観察の結果、ブローホール、スラグ巻き込み、融合不良、高温割れ等は認められなかった。 ・PT及び断面観察の結果、アンダーカットは認められなかった。 ・付着物EDS分析の結果、高温割れの原因となるP(リン)は認められなかった。 ・その他、溶接手順は通常手順で実施されていた。	△
		溶接不良		・破面観察の結果、補修溶接の痕跡は認められなかった。 ・裏波部の外観、周方向断面観察の結果、明瞭な溶接欠陥は確認されず、補修溶接の痕跡も認められなかった <外部専門家意見> 明確な溶接欠陥／溶接不良が存在した可能性は低いものの、微細な欠陥／特異な溶接箇所が存在した可能性を完全に否定はできず、破面SEMでの拡大観察や、EDS分析での元素同定他により確認すべき。

※：局所的な特異性による粒界型SCCや、微細な溶接欠陥／溶接不良等を念頭に置いた詳細調査の結果により、他の因子の判定に影響無きかも併せて検討

亀裂発生メカニズムの解明／亀裂有り健全性評価 対応概要

	得られた課題	対応方針	実施項目
亀裂発生メカニズム	[粒界型SCC] 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可能性	特異な硬化、応力により割れが発生するメカニズムについて深掘りが必要	<ul style="list-style-type: none"> ○実機詳細調査（損傷部位、比較部位） <ul style="list-style-type: none"> ・局所ひずみ測定（SEM/EBSD） ・断面マクロ硬さ測定（裏波幅と硬さの相関取得） ・溶接欠陥の調査(SEM/EDS) ・潜在き裂の調査(SEM/EDS) ・被膜分析、亀裂先端ミクロ組織分析（TEM） ○発生特性に関する調査
	[溶接欠陥/不良] 溶接により微細な割れが発生していた可能性	高倍率の観察など詳細調査が必要	
亀裂有り健全性	進展予測評価式について、規格化されていない（検証が不十分）	進展予測評価に関する知見の拡充が必要	<ul style="list-style-type: none"> ○SCC進展特性知見の調査 ○SCC進展特性データの取得 ○SCC進展速度線図案の策定 ○溶接残留応力評価 ○構造健全性評価 ○LBB評価の知見拡充

外部専門家コメントを踏まえつつ、現状認識に対し必要な対応と実施項目を検討した。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年度より着手し、その結果に応じて適宜計画を見直していくこととした。

<最新知見の調査>

項目	概要
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 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

<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） (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）

<亀裂発生条件>

項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂発生機構が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）

<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年度以降実施）

<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	5.(1)SCC進展特性知見の調査 5.(2)SCC進展特性データの取得（2023年度以降実施）

<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	5.(3)SCC進展速度線図案の策定 (2023年度以降実施)

<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	6.溶接残留応力評価 (2023年度以降実施)

<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	7.(1)構造健全性評価 (2023年度以降実施)

<破断前漏えい (LBB) の評価に対する知見拡充>

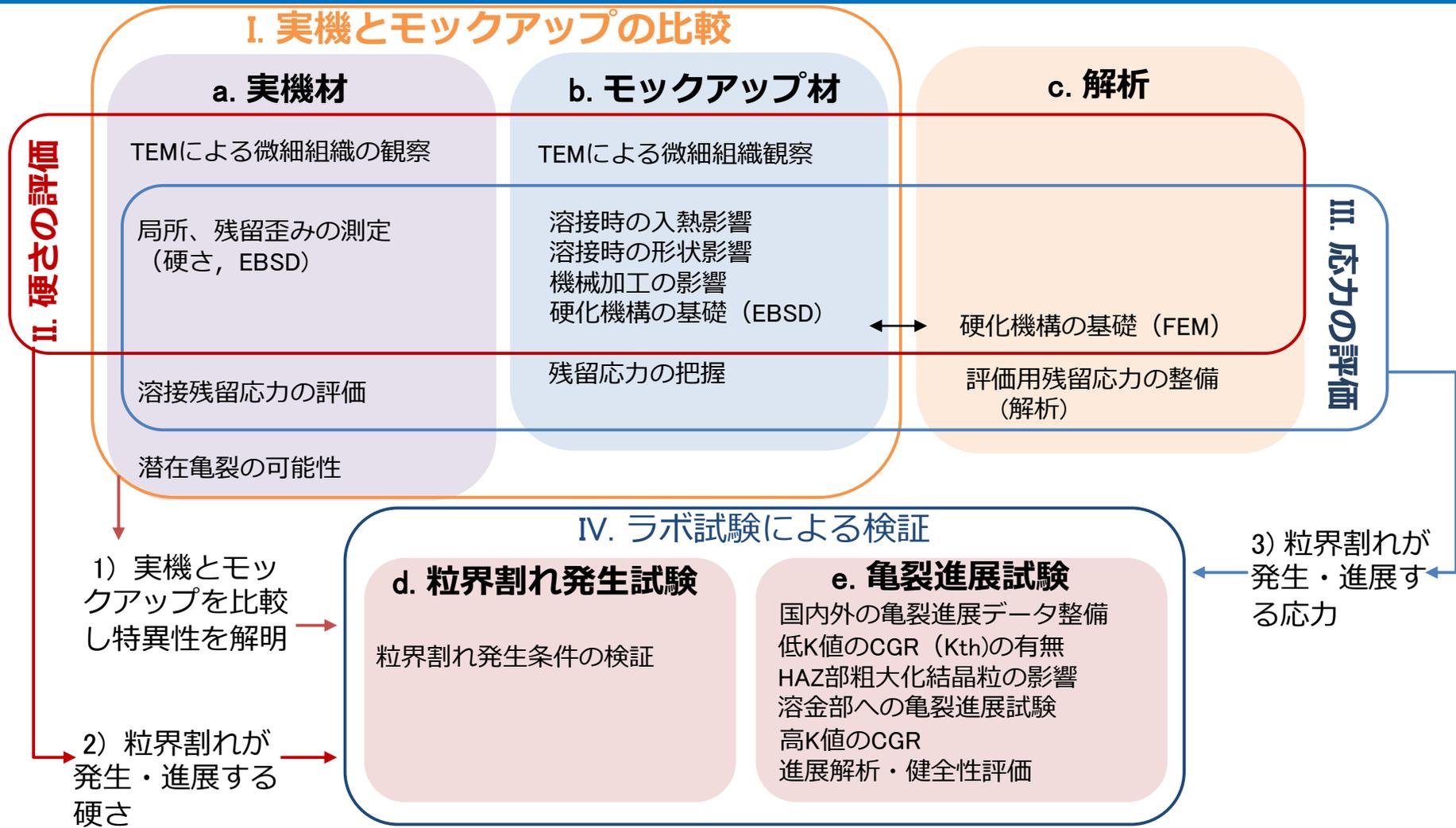
項目	概要
現状認識	<ul style="list-style-type: none"> 今後、仮に亀裂が存在した場合のLBBに対する裕度に関し更なる知見拡充を進める必要がある。
必要な対応	<ul style="list-style-type: none"> 今後、仮に亀裂が存在したとしても、その亀裂が破損に繋がらないよう管理することが重要である。そこで、SCC進展、破壊評価を高度化しLBBに対する裕度を明確にする。
実施項目	7.(2)LBB評価に対する知見拡充 (2023年度以降実施)

<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	8. 技術基盤の整備 (2023年度以降実施)

検討時期について、後戻りが発生しないよう、以下にて実施することとした。

目標	実施項目	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度
全般	1. 最新知見の調査	[Blue bar spanning 2022 to 2025]			
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）	[Blue bar]	[Blue bar]		
	(1)-②断面マクロ硬さ測定	[Blue bar]	[Blue bar]		
	(2)-①溶接欠陥の調査（SEM/EDS）	[Blue bar]	[Blue bar]		
	(2)-②潜在き裂の調査（SEM/EDS）	[Blue bar]	[Blue bar]		
	(3)被膜分析、亀裂先端マイクロ組織分析（TEM）	[Blue bar]			
	3. 発生特性に関する調査		[Blue bar]	[Blue bar]	[Blue bar]
検査技術向上	4. 検査技術向上策検討（2021年度）				
構造健全性評価の確立	5. (1) SCC進展特性知見の調査	[Blue bar]			
	5.(2)SCC進展特性データの取得		[Blue bar]	[Blue bar]	[Blue bar]
	5.(3)SCC進展速度線図案の策定			[Blue bar]	[Blue bar]
	6.溶接残留応力評価			[Blue bar]	[Blue bar]
	7.(1) 構造健全性評価			[Blue bar]	[Blue bar]
	7.(2) LBB評価に対する知見拡充			[Blue bar]	[Blue bar]
技術基盤の整備	8. 技術基盤の整備			[Blue bar]	[Blue bar]



実施項目の相関について整理し、専門家の意見含め、考えられ得るものは全て洗い出した。
 ⇒取組項目が多いこと等から、優先度を明確にし、効率的に検討を進めることとした。

1. 振り返り

2. 2021年度検討内容

2.1 発生メカニズム・亀裂有り健全性評価

2.2 検査技術の向上

3. まとめ

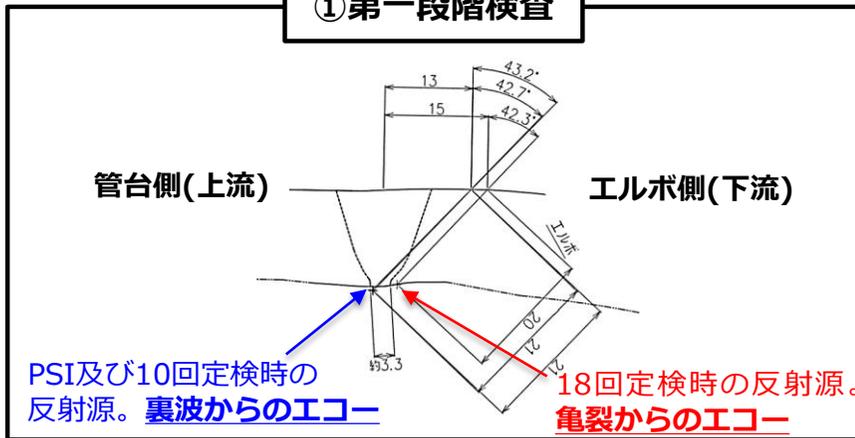
2021年度に実施した課題検討プロセスは以下のとおり。

- i) 規制委員会との公開会合で議論された点を含め、事象概要を外部専門家に説明 → 5 ・ 21
- ii) FT図を用いて考えられる要因をゼロベースで洗い出しの上で、事業者の調査結果等の既知見を踏まえ、原因となり得る課題を絞込み・整理 → 22 ~ 23
- iii) 絞込んだ課題を踏まえ、検査技術の向上策を検討し取りまとめ → 24 ~ 27

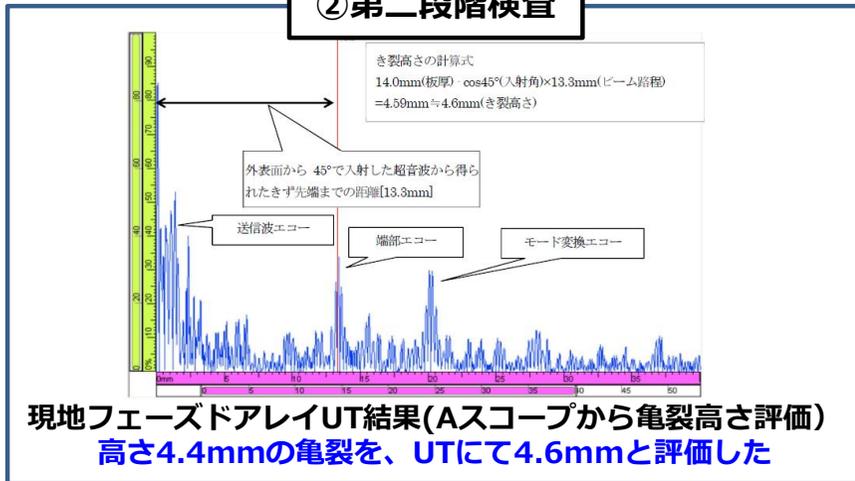
検査技術の向上 課題認識

- 第一段階検査にて、亀裂からのエコーを検出。
- 第二段階検査（現地フェーズドアレイUT）にて、亀裂高さ4.6mmと評価。なおこの段階ではAスコープによる亀裂高さのみ報告し、亀裂は板厚方向に進展しているとしていた。
- その後、追加調査(Bスコープ)にて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。

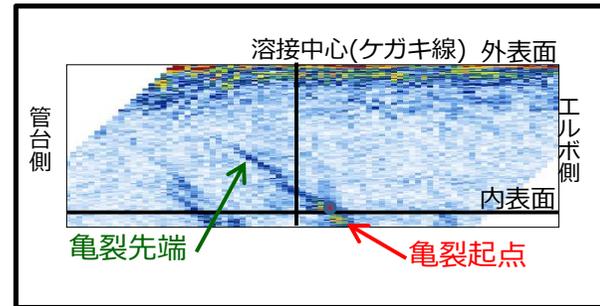
① 第一段階検査



② 第二段階検査



③ 追加調査



現地フェーズドアレイUT結果(Bスコープから性状評価)

- ①前後2分割型プローブ → [×] 表層付近に亀裂端部が無いと推定される。
- ④1次クレーピング、モード変換 → [×] 表層付近に亀裂端部が無いと推定される。
- ⑤縦波マトリクスPA → [×] 亀裂の進展方向と超音波の入射方向が平行だと推定される。

探傷手法	解説Ⅰ	解説Ⅱ	解説Ⅲ	解説Ⅳ
① 2探小型垂直	—	—	×	—
② 2次クレーピング	—	—	—	×
③ 前後2分割型プローブ	—	—	—	×
④ 1次クレーピング・モード変換	—	—	—	×
⑤ 縦波マトリクスPA	×	—	—	—
⑥ 横波マトリクスPA	—	×	×	—

⑥横波マトリクスPA → [×] 直射でコーナーエコーが得られないことから、亀裂の起点は管台側になり、亀裂の進展方向は管台側になり、亀裂の進展方向と超音波の入射方向が平行だと推定される。

②2次クレーピング → [×] 亀裂の起点は管台側になり、亀裂の進展方向は管台側になり、亀裂の進展方向と超音波の入射方向が平行だと推定される。

①2探小型垂直 → [×] 亀裂は板厚方向に対し直交する方向の性状ではなく10°(底面からの角度)以上傾いているものと推定される。

解説Ⅰ：直射の場合、亀裂面に対して超音波が平行に近いことから、反射率が低く、検出できない。
 解説Ⅱ：底面反射時の音圧反射率が著しく低下するため面エコーを検出できない。
 解説Ⅲ：超音波の欠陥への入射角と亀裂面角度差により反射率が低下するため、面エコーが検出できない。
 解説Ⅳ：対象となる部位に反射源(亀裂)が確認されなかった。

追加調査では明確な反射源は検出せず

UTによる推定と破壊調査結果の亀裂性状乖離に関する要因分析

事象	要因	因子	要因分析と見解	判定	
UTによる推定と破壊調査結果の亀裂性状乖離	試験対象	幾何学的形状	・エルボ曲率を含む外表面形状による超音波屈折角の変化と、亀裂位置・高さ・板厚の相対的位置関係により、亀裂先端からのエコー検出位置が変化する可能性がある	○	UT手法に関する課題
		材料	・オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属部へのUTは、柱状晶組織による超音波の音速変化や超音波ビームの屈曲が起き得るため、エコーの検出位置が変化する可能性がある	○	
		亀裂	・亀裂先端性状の枝分かれ等、開口幅により端部エコーの検出性に影響した可能性がある。	○	
	機材	探触子	・超音波の収束位置と亀裂先端部の差異による超音波の広がり等、探触子の要素がUTにおける反射源位置特定に影響を与える可能性がある。	○	
		探傷ソフト／端末	・異なる端末の画面でも亀裂性状乖離が再現しており、探傷ソフト／端末の影響は無い。	×	
		野書き	・ISI-UTで用いていた溶接中心を示すケガキは、破壊調査結果から得られた溶接中心より約3mmエルボ側にずれていた。この結果はコーナーエコーと端部エコーの位置関係には影響しないが、端部エコーがエルボ側ではなく管台側で得られたと考え、亀裂がエルボ側から管台側方向に溶接金属部を跨ぐように進展したとの判断に影響を与えた可能性がある。	○	⇒溶接線中心位置把握技術に関する課題
	要領	検査要領	・要領はサイジング要領を適用している。他方、適用範囲の観点では、適用口径の観点で実機と差があるものの、配管と探触子の隙間は0.2mm程度であり、接触媒質の通常の充てん範疇であるため、幾何学形状による超音波の伝ば性は問題無い。	×	
	試験環境	作業環境	・通常実施しているISIの環境条件から大きく逸脱する要素は無く、特異な影響は無い。	×	
	体制・試験員	資格	・有資格者であり、工事経験等も十分に積んでおり影響は無い。	×	
		評価体制	・サイジングは亀裂の高さを測定する事が目的であり、試験関係者に亀裂性状を評価する意識が薄かったこと、また、評価関係者がデータに疑義を感じた為再探傷したものの、同等の結果が得られたこと等より、亀裂端部位置の誤認を見抜けなかった。	○	⇒評価体制に関する課題

検討の結果、本事象の主たる要因は、以下の3点と整理した。

①評価体制に関する課題

亀裂のサイジングに傾注していてBスコープの結果を過信し、溶接金属を横切って進展する亀裂であるという判断をしてしまった。

②溶接線中心位置把握技術に関する課題

溶接中心位置の想定が実機とずれていたことにより、亀裂の位置にずれが生じ、溶接金属部を跨ぐように進展した亀裂であると判断してしまった。

③UT手法に関する課題

Bスコープ上で亀裂が管台方向に進展しているように端部エコーが表示された事象は、配管外表面の幾何学的形状の影響、超音波の拡がりの影響、溶接金属部による超音波の屈曲の影響などが複合したことにより発生した。

この課題を解決するために必要な向上策について整理した結果を次頁に示す。

検査技術の向上策（案）（1/4）

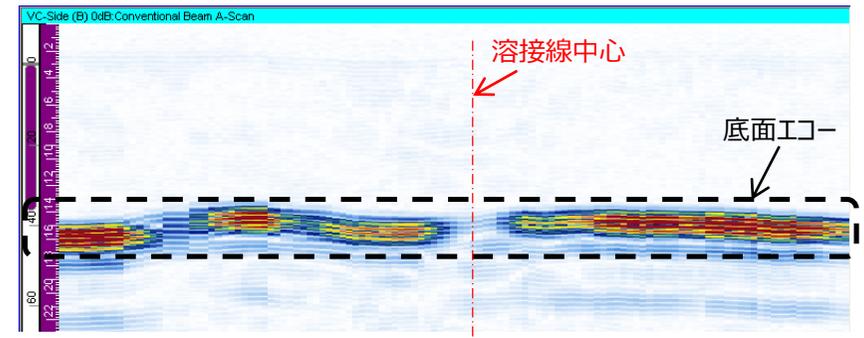
原因調査結果に対する①～③の対策案について、以下に示す。

①評価体制への対策

- 関係者に対し、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できるように教育する。
- さらに検査員に対しては、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について理解させる。

②溶接線中心位置把握技術の高度化

- 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場合、現場の作業環境、マーキング、開先部の公差等により2mm程度の誤差発生は回避できない。
- このため、亀裂性状を評価する際には、前述の誤差の影響を受けないようなデータ採取（例：垂直探傷のBスコープ画像）により、UTデータ側で可能な限り詳細な、溶接線中心位置の評価を行う。



例：垂直探傷のBスコープ画像

検査技術の向上策（案）（2/4）

③UT手法による対策

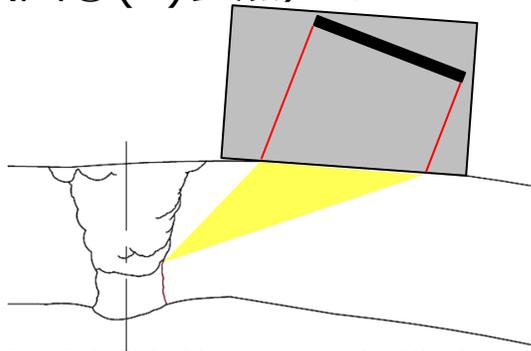
- シミュレーション解析およびモックアップ試験による妥当性検証の結果、以下の対策により亀裂性状を把握できることを確認した。

(1)探触子設置位置に応じた超音波入射条件の設定

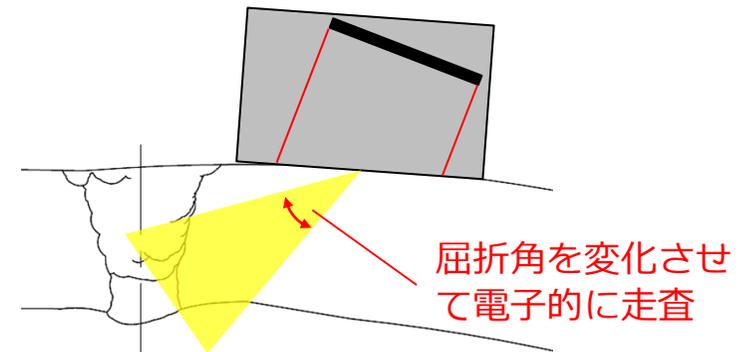
- 超音波集束条件（管軸方向、板厚方向）を複数準備することにより、外表面形状の影響を受けない位置で探傷可能とする（図③(1)参照）。

(2) セクタ走査による探傷

- 外表面形状の影響を受けない位置で、電子的に超音波ビームの屈折角を変化させるセクタ走査を利用し、任意の屈折角でのBスコープ画像とセクタ画像を組み合わせ、総合的に亀裂性状の評価を行う（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

検査技術の向上策（案）（3/4） ～UT手法による対策の有効性確認結果～

SCCを付与したモックアップによる対策の有効性確認結果

SCC付与モックアップにて、今回の事象の現地波形を再現（図1,2）。その上で、超音波入射条件の見直しを行い、外表面形状の影響が無い探触子位置でセクタ走査によりデータを採取。端部・コーナーエコーの性状を正しく把握できた(図3,4)。

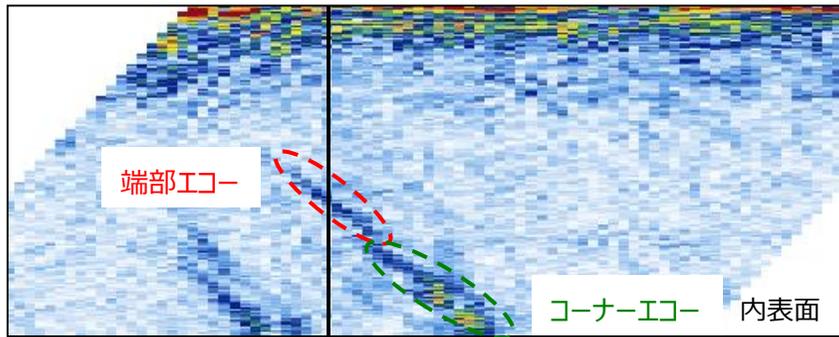


図1：実機SCC検出時の波形(現地波形)

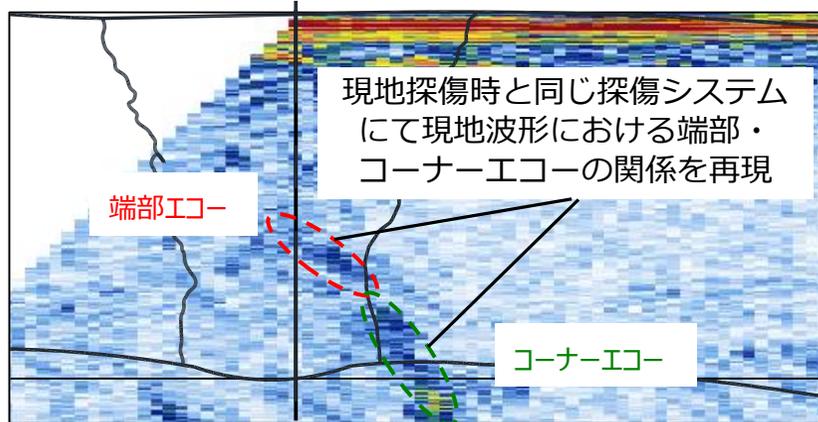


図2：SCC付与モックアップによる現地波形の再現

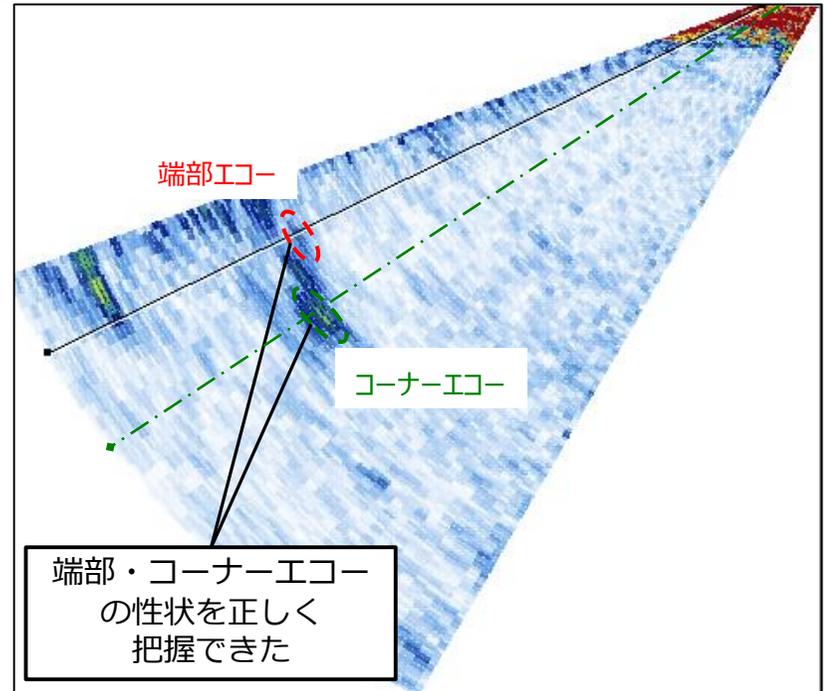
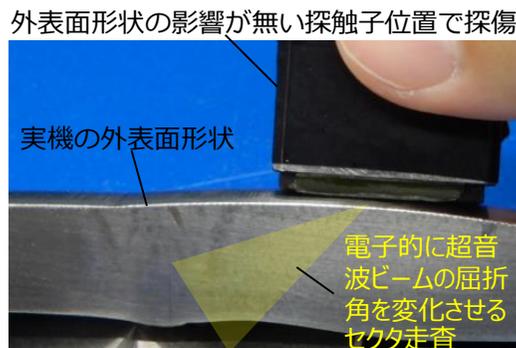


図3：セクタ走査による探傷(SCC付与モックアップ)



SCC付与モックアップでの探傷イメージ

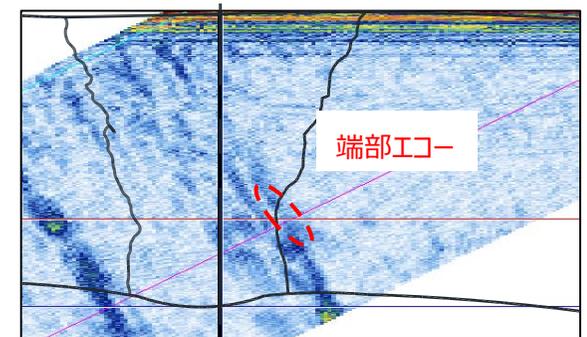


図4：外表面形状の影響を受けない位置からの探傷(SCC付与モックアップ)

検査技術の向上策（案）（4/4）

亀裂性状把握に関する改善方針

向上策①：UT結果の評価者に対する教育

- 検査員に対し、外表面形状等Bスコープ表示と実際の亀裂性状に乖離を生む因子について理解させる。

向上策②：裏波性状把握による溶接線中心位置推測の高度化

- 亀裂性状を評価する際には、開先部の形状公差や、溶接中心を公差等の積み上げによる誤差の影響を受けないようなデータ採取(例えば垂直探傷のBスコープ画像)により、UTデータ側で可能な限り詳細な評価を行う。

向上策③：UT手法による亀裂性状把握高度化

(1) 探触子設置位置に応じた超音波入射条件の設定

- 超音波集束条件（管軸方向、板厚方向）を複数準備することにより、外表面形状の影響を受けない位置で探傷可能とする。

(2) セクタ走査による探傷

- 外表面形状の影響を受けない位置で、電子的に超音波ビームの屈折角を変化させるセクタ走査を利用し、任意の屈折角でのBスコープ画像とセクタ画像を組み合わせ、総合的に亀裂性状の評価を行う。

目次

1. 振り返り

2. 2021年度検討内容

2.1 発生メカニズム・亀裂有り健全性評価

2.2 検査技術の向上

3. まとめ

まとめ

○発生メカニズム解明／亀裂有り健全性評価

- 詳細調査／技術検討が必要な項目について、外部専門家の意見を基に研究計画を策定した。
- 本計画に基づき、2022年度以降も継続して知見拡充を進める。

○検査技術の向上

- UTによる推定と破壊調査後の亀裂性状に関する差異について検討した結果、①：評価体制への対策、②：溶接線中心位置把握技術の高度化、③：UT手法による対策により、亀裂性状を正しく評価可能となることが、外部専門家に了解された。
- 実機保全に反映するアクションとしては、以下の通り。
 - 今回検討した対策について、実際の検査業務における亀裂検出時の対応へ反映が行われるよう、ATENAから事業者へ要求事項を提示する（ATENAステアリング会議の決議を経て進める予定）。
 - 規格・基準を扱う学協会へ、情報を提供する。

なお、上記の進捗については、従前同様、規制当局と定例面談等で適宜情報共有し、必要に応じ機会にて説明を行う。

参考資料

発生／亀裂有り健全性 外部専門家会議概要
(2021年度 第1回～第4回)

検査技術向上 外部専門家会議概要
(2021年度 第1回～第4回)

外部専門家会議 メンバーリスト

略語集

第1回 外部専門家会議(1/2)

2021/10/1 発生／亀裂有り健全性に関する第1回外部専門家会議を開催

事象の概要、および関西電力・三菱重工業による従来の調査結果について、ATENAから外部専門家に説明した。

外部専門家より今後取り組むべき課題について御意見を頂いた。第2回以降の外部専門家会議で、実施項目(案)を提示するよう、コメントを頂いた。

No.	事象に対する#1外部専門家コメント	(参考) 候補となる実施項目
1	溶接境界近傍の軟化の状況	1.局所、残留歪の評価 9.溶接による硬化機構の基礎検討
2	スローライジングロード(変動荷重)の影響	5.硬さと応力で粒界割れが発生する条件の検討
3	歪みとマイクロビッカースの関係。FEMの精緻化	3.溶接残留応力の評価 9.溶接による硬化機構の基礎検討
4	腐食生成物の分析	4.TEMによる微細組織
5	ビード形状の特徴	6.溶接時の入熱影響
6	始末端での溶接残留応力分布、クレータの影響	1.局所、残留歪の評価 3.溶接残留応力の評価

第1回 外部専門家会議(2/2)

No.	事象に対する#1外部専門家コメント	(参考) 候補となる実施項目
7	初層TIGの低フェライト部での亀裂	15.HAZ部からの溶接金属への伝播
8	入熱量と硬さの関係	6.溶接時の入熱影響
9	入熱と拘束の関係	7.溶接時の形状影響 8.機械加工の影響
10	亀裂発生部位の特定	9.溶接による硬化機構の基礎検討
11	実機亀裂の詳細観察	1.局所、残留歪の評価
12	モックアップ作成時の拘束の効果	4.TEMによる微細組織
13	溶接欠陥の可能性	5.硬さと応力で粒界割れが発生する条件の検討
14	想定される溶接欠陥と破面の特徴	6.溶接時の入熱影響
15	発生進展解析の妥当性は慎重に実施	2.潜在亀裂の可能性
		1.局所、残留歪の評価 2.潜在亀裂の可能性 4.TEMによる微細組織 5.硬さと応力で粒界割れが発生する条件の検討 14.HAZ部粗大化結晶粒

第1回会合で多数の専門的な意見が得られた

専門家意見に該当する実施項目
(第2回会議の整理結果より本表へ参考記載)

2021/11/8 発生／亀裂あり健全性に関する第2回外部専門家会議を開催

第1回外部専門家会議の御意見を受け、実施項目(案)について、ATENAから外部専門家に説明。実施項目に対して、取り組み内容等についてコメントを頂いた。

実施項目について、すべて実施計画に含めるのか、最初にどの実施項目に着手するべきかについて判断するために、重要度・有効性の考え方を整理し、次回会合で提示するようコメントを頂いた。

事象に対する専門家意見を踏まえ、「検査対象の明確化」「亀裂残存運転の確立」「検査頻度の明確化」に分類を分けて**技術課題**を整理。対応する**実施項目**を抽出した。

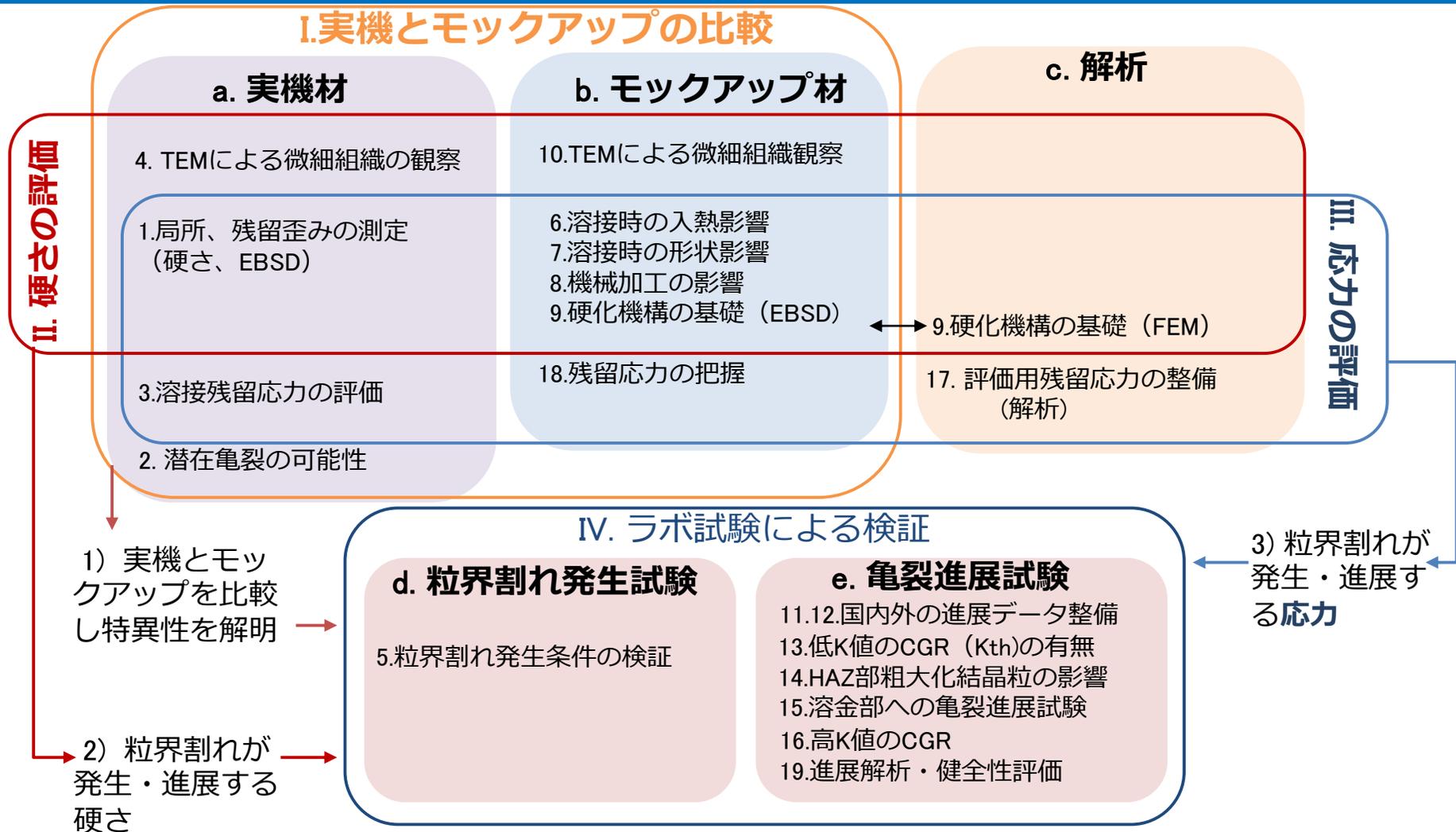
大分類	小分類	技術課題	実施項目
検査対象の明確化	実機調査	「硬化」が粒界割れの主要因と推定されたが、以下の詳細は明確にできていない。 <ul style="list-style-type: none"> ● 熱影響部の母材側粒界で割れが発生 ● 溶接境界の極近傍で発生 ● 亀裂は単一で扇状の形態 	1. 局所、残留歪の評価 2. 潜在亀裂の可能性 3. 溶接残留応力の評価 4. TEMによる微細組織
	発生条件	「硬化」が影響したと判断されたが、粒界割れが生じる条件は明らかになっていない。	5. 硬さと応力で粒界割れが発生する条件の検討

大分類	小分類	技術課題	実施項目
検査対象の明確化 (続き)	硬化要因 (機械加工)	シンニング加工（機械加工）による微細化層の影響有無が明確ではない。	6. 溶接時の入熱影響 7. 溶接時の形状影響 8. 機械加工の影響 9. 溶接による硬化機構の基礎検討 10. 硬化していると粒界割れが発生するメカニズムの解明
	硬化要因 (溶接入熱)	亀裂発生個所において、「過大な溶接入熱」が確認された。「過大な溶接入熱」となった要因、硬化への影響が明確ではない。	
	硬化要因 (溶接形状)	溶接部の形状（管台とエルボ）が硬さに及ぼす影響が定量的に評価できていない。	

大分類	小分類	技術課題	実施項目
検査頻度の明確化 亀裂残存運転の確立	進展速度	亀裂進展評価の詳細（PWR条件下のステンレス鋼の速度線図、残留応力評価等）が、規格化されていない。 LBB評価に関して更なる知見拡充を進める必要がある。	11. 進展に関する国内現状知見を整理、既存データの公知化 12. 国内データに海外データも含めた亀裂進展データの整備 亀裂進展速度のデータ拡充 13. 低K値のKth 14. HAZ部粗大化結晶粒 15. HAZ部から溶接金属への伝播 16. 高K値 17. 進展評価に用いる残留応力の整備（解析） 18. 溶接方法、配管径、溶接部位などによる残留応力を把握 19. 粒界割れの進展速度・応力を用いた亀裂進展評価や亀裂進展後の健全性に関する評価手法の検討
	残留応力		
	評価方法		

実施項目が多岐に亘ることから、取り組みの関係を再整理し、漏れなく議論できているか確認した

各項目の詳細を議論



実施項目の相関について整理し、専門家の意見含め、考えられ得るものは全て洗い出した。
 ⇒取組項目が多いこと等から、優先度を明確にし、効率的に検討を進めることとした。

第3回 外部専門家会議(1/4)

2021/12/13 発生／亀裂あり健全性に関する第3回外部専門家会議を開催

「実施項目の重要度・有効性整理(案)」をATENAから外部専門家に説明し、後続検討に影響を与える亀裂の発生メカニズム・原因をまず優先する、等の考え方について合意が得られた。

外部専門家会議において頂いたコメントを基に、研究計画案を第4回有識者会議に向けて作成することとした。

第3回 外部専門家会議(2/4) ～実施項目に対する専門家コメント(第2回会合)と優先度～

研究項目に対して再度外部専門家と議論し、コメントを踏まえ優先度を選定した。

優先度が高い項目

大分類	小分類	No.	項目	優先度の考え方		
				実機保全への有益度	後段研究への必要性・研究の重要性	技術成立性・実現性
①検査対象の明確化		1-①	SEM/EBSD歪計測	○	○	○
		1-②	断面ミクロ、ビッカース硬さ計測	○	○	○
		2-①	破面SEM/EDS観察での潜在亀裂確認	○	○	○
		2-②	断面ミクロ潜在亀裂確認	○	○	○
		3	溶接残留応力の評価	○	○	△
		4-①	TEM/EDS金属組織観察、粒界偏析分析	○	○	○
		4-②	TEM/EDS酸化被膜分析	○	○	○
		4-③	亀裂先端部の断面ミクロ、SEM/EDS/EBSD分析	○	○	○
	4-④	水素分析	○	△	△	
		実機調査				

実機調査の項目は、いずれも優先度が高いと判断された

第3回 外部専門家会議(3/4) ～実施項目に対する専門家コメント(第2回会合)と優先度～

大分類	小分類	No.	項目	優先度の考え方		
				実機保全への有益度	後段研究への必要性・研究の重要性	技術成立性・実現性
①検査対象の明確化	発生条件	5	硬さと応力で粒界割れが発生する条件の検討 (発生する場合には、硬さと応力に関する閾値を確認する 取り組み手法を検討)	○	○	△
	硬化要因 (機械加工・溶接入熱・溶接形状)	6	溶接時の入熱影響 (モックアップ試験, 解析等)	○	△	○
		7	溶接時の形状影響評価 (モックアップ試験、解析等)	○	△	○
		8	機械加工の影響評価 (モックアップ試験, 解析等)	×	△	○
		9	溶接による硬化機構の基礎検討 (EBSDによる局所塑性の評価やFEM解析等)	○	△	○
		10	硬化していると粒界割れが発生するメカニズムの解明 (TEMによる微細組織観察等)	○	△	△

発生条件、硬化要因については、実機調査の状況を受けて研究内容を判断する必要がある

第3回 外部専門家会議(4/4) ～実施項目に対する専門家コメント(第2回会合)と優先度～

優先度が高い項目

大分類	小分類	No.	項目	優先度の考え方		
				実機保全への有益度	後段研究への必要性・研究の重要性	技術成立性・実現性
②検査頻度の明確化 ・ ③亀裂残存運転の確立		1 1	進展に関する国内現状知見を整理, 既存データの公知化	○	○	○
		1 2	国内データに海外データも含めた亀裂進展データの整備	○	○	○
	進展速度	1 3	低K値の K_{th} に対する亀裂進展速度のデータ拡充	△	△	△
		1 4	HAZ部粗大化結晶粒に対する亀裂進展速度のデータ拡充	○	○	△
		1 5	HAZ部から溶接金属への伝播に対する亀裂進展速度のデータ拡充	○	△	△
		1 6	高K値の亀裂進展速度のデータ拡充	△	△	△
	残留応力	1 7	進展評価に用いる残留応力の整備 (解析)	○	△	○
		1 8	溶接方法, 配管径, 溶接部位 (機器等の溶接部含む) などによる残留応力の把握 (モックアップ試験)	○	△	△
	評価方法	1 9	粒界割れの進展速度・応力を用いた亀裂進展評価や亀裂進展後の健全性に関する評価手法の検討	○	○	○

亀裂進展データの整備と評価方法の確立は重要な項目と判断された

第4回 外部専門家会議(1/6)

2022/2/10 発生／亀裂あり健全性に関する第4回外部専門家会議を開催。

第1～3回会議を踏まえた研究計画(案)の策定および纏めについて、ATENAから外部専門家に説明し、研究計画(案)について同意頂いた。

第4回 外部専門家会議(2/6) ～優先度を踏まえた研究項目の再整理(検査の重点化)～

優先度と外部専門家コメントを踏まえ、再度実施項目を整理した。

目標	項目	現状認識	必要な対応	実施項目
全般	最新知見の整理	・フランスのPWRプラントの安全注入系配管溶接部におけるSCCと推測される割れを筆頭に、最新知見は更新されている。	左記の損傷事例を含む最新知見を継続的に把握し、本検討の実施計画に反映。	1. 最新知見の調査
検査の重点化	発生機構・原因	・原因としてSCCが有力との認識もあるが、微小な潜在亀裂が存在した可能性を否定できていない。	実機損傷部位や健全部（含むモックアップ）に対する詳細調査を行い、既往知見の調査結果と併せて発生機構・発生原因、発生条件の明確化を行う。	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（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、亀裂先端ミクロ組織分析（TEM）
		・溶接熱収縮による硬化がSCC発生の原因と考えられている。		
	・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している。			
	・発生条件	・実機損傷部位および健全部位のミクロ組織、局所ひずみなどの状態が十分に把握できておらず、発生条件の明確化に至っていない。		
		・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。	電力共通研究等の知見に関する調査を行い、成果を検査方針の設定に反映する。	3. 発生特性に関する調査
	検査技術	・損傷部位に対する超音波による非破壊検査で割れを検出できた。 ・割れの先端位置を正しく評価できなかった。 ・割れ深さについては正しく評価できていた。	検査に関する外部専門家委員会で、割れ先端位置の誤判定の原因、対応策等を検討する。	4. 非破壊検査における対応・改善策の検討

第4回 外部専門家会議(3/6) ～優先度を踏まえた研究項目の再整理(健全性評価の確立)～

目標	項目	現状認識	必要な対応	実施項目
構造健全性評価の確立	粒界割れ進展機構	・割れ進展機構はSCCであることについて合意が得られている。	現時点では無し。実機調査であたらな知見で得られた場合には再度検討する。	-
	SCC進展特性	・SCCの進展特性に関する知見はある程度得られている。	得られている知見が本事象の条件を十分に網羅できているか確認する必要がある。 必要に応じて本事象の条件に合致するSCC進展特性（進展速度・進展経路）の追加調査を行う。	5.(1) SCC進展特性知見の調査 5.(2)SCC進展特性データの取得
	SCC進展評価	・SCCに対する基本的な進展評価手法は確立されている。 ・維持規格にPWR1次系環境中のSCC進展速度線図は整備されていない。	SCC進展速度線図案を策定する。	5.(3)SCC進展速度線図案の策定
	残留応力評価	・溶接残留応力の基本的なFEM解析手法はIAFプロジェクトで整備されている。 ・当該部位の溶接残留応力分布は整備されていない。	当該部位の溶接残留応力分布を解析的に得る。	6.溶接残留応力評価
	破壊評価	・ステンレス鋼配管の破壊評価手法は維持規格に規定されている。	無し	-
	健全性評価	・当該部位に関する暫定的な健全性評価は実施されている。	本検討で得た知見を基に亀裂進展評価と破壊評価を実施する。	7.(1) 構造健全性評価
	破断前漏洩(LBB)評価の知見拡充	・LBB評価に関して更なる知見拡充を進める必要がある。	今後、仮に亀裂が存在したとしても、その亀裂が配管破損に繋がらないよう、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。	7.(2) LBB評価の知見拡充
	技術基盤の整備	検査・評価手法の整備	・当該部位に対する検査は3年を目途に1年毎に実施している。 ・健全性評価手法は確立していない。	本検討の成果を基に検査範囲の明確化と図り、検査・評価手法の技術基盤を整備する

検討時期について、後戻りが発生しないよう、以下にて実施することとした。

目標	実施項目	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度
全般	1. 最新知見の調査	[Blue bar spanning 2022 to 2025]			
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)	[Blue bar]	[Blue bar]		
	(1)-②断面マクロ硬さ測定	[Blue bar]	[Blue bar]		
	(2)-①溶接欠陥の調査(SEM/EDS)	[Blue bar]	[Blue bar]		
	(2)-②潜在き裂の調査(SEM/EDS)	[Blue bar]	[Blue bar]		
	(3)被膜分析、亀裂先端マイクロ組織分析 (TEM)	[Blue bar]			
	3. 発生特性に関する調査		[Blue bar]	[Blue bar]	
検査技術向上	4. 検査技術向上策検討 (2021年度)				
構造健全性評価の確立	5. (1) SCC進展特性知見の調査	[Blue bar]			
	5.(2)SCC進展特性データの取得		[Blue bar]	[Blue bar]	[Blue bar]
	5.(3)SCC進展速度線図案の策定			[Blue bar]	[Blue bar]
	6.溶接残留応力評価			[Blue bar]	[Blue bar]
	7.(1) 構造健全性評価			[Blue bar]	[Blue bar]
	7.(2) LBB評価の知見拡充			[Blue bar]	[Blue bar]
技術基盤の整備	8. 技術基盤の整備			[Blue bar]	[Blue bar]

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、亀裂先端ミクロ組織分析 (TEM)

次ページに示す。

5. (1) SCC進展特性知見の調査

- 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。

第4回 外部専門家会議(6/6) ～2022年度実機詳細調査(案)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ミ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增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°の亀裂部周辺の断面(管台側/エルボ側) 当該管のクレータ部, 90°, 180°, 270°の断面 比較管も同様位置(0°(クレータ部), 90°, 180°, 270°)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°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, Mg, 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)での断面ミクロ観察での存在亀裂の形態(IG/TG, 長さ, 幅)や方向性の確認。 比較管でも同様な断面ミ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(5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を踏まえて実施していく。

第1回 外部専門家会議

2021/10/11、第1回 検査技術に関する外部専門家会議を開催。

- 事象の概要(前ページ参照)及び当時検討していた原因究明状況について、ATENAから外部専門家に説明。
- 亀裂の検出性及びサイジング精度については気づき事項なく、**今回の論点は亀裂性状の誤認であると外部専門家も認識。**
- 外部専門家より頂いたコメントに基づき、本会議の進め方として、UTによる推定と実際の亀裂性状との乖離について原因と考えられる要因・因子は、探傷状況やヒューマンエラー等、直接関係無いと考えるものも含めて詳細に洗い出し、その内容確認と解釈を説明することとした。
- なお、原因究明にあたってはシミュレーションの適用が骨子となるため、シミュレーションのインプットを明確化し、結果の正当性を示すこととした。

第2回 外部専門家会議 (1/4)

2021/11/22、第2回 検査技術に関する外部専門家会議を開催。

➤ 第1回会議にて定めた方針に基づいた対応内容と結果について、ATENAから外部専門家へ説明し、本事象の原因と考えられる主たる要因・因子が以下の3点である旨合意し、そのうち、③のシミュレーション結果の正当性について合意した。

- ① 亀裂のサイジングに傾注していてBスコープの結果を過信し、溶接金属を横切って進展する亀裂であるという判断をしてしまった。
- ② 溶接中心位置の想定が実機とずれていたことにより、亀裂の位置にずれが生じ、溶接金属部を跨ぐように進展した亀裂であると判断してしまった。
- ③ Bスコープ上で亀裂が管台方向に進展しているように端部エコーが表示された事象は、配管外表面の幾何学的形状の影響、超音波の拡がりの影響、溶接金属部による超音波の屈曲の影響などが複合したことにより発生した。

第2回 外部専門家会議 (2/4) ～シミュレーションと実機の比較 -インプット情報～

前頁③について、抽出した要因・因子を基に、シミュレーションへのインプット項目を決定。
シミュレーションの結果と実機UT時に得られた波形の端部・コーナーエコー反射源位置を比較することで、シミュレーションが実機を想定した状況として適切であるか評価することとした。

シミュレーションにて実機を模擬した要素

インプット情報
試験対象の材料 (母材・溶接)
外表面の形状・亀裂の性状
探触子の仕様(実機と同仕様)
探触子の走査状況(次ページ参照)



実機断面写真

実機断面を基に
形状を模擬

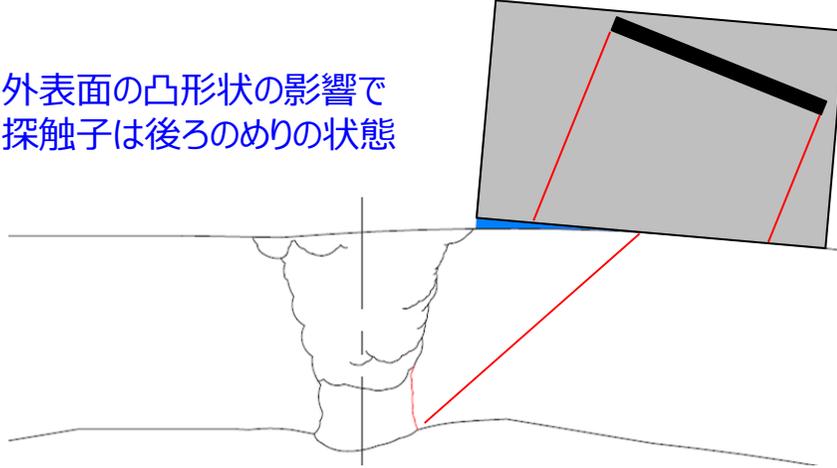


シミュレーションにて模擬した形状

第2回 外部専門家会議 (3/4)～シミュレーションと実機の比較 -シミュレーションでの想定～

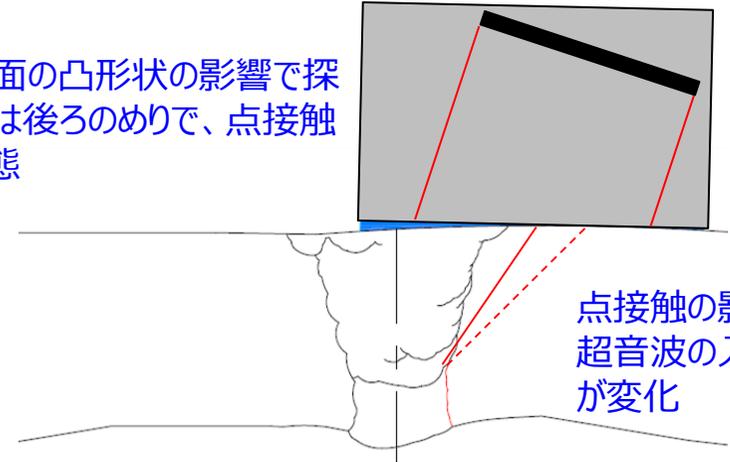
シミュレーションにおける実機の想定状況

外表面の凸形状の影響で探触子は後ろのめりの状態



コーナーエコー検出時の想定状況

外表面の凸形状の影響で探触子は後ろのめりで、点接触の状態

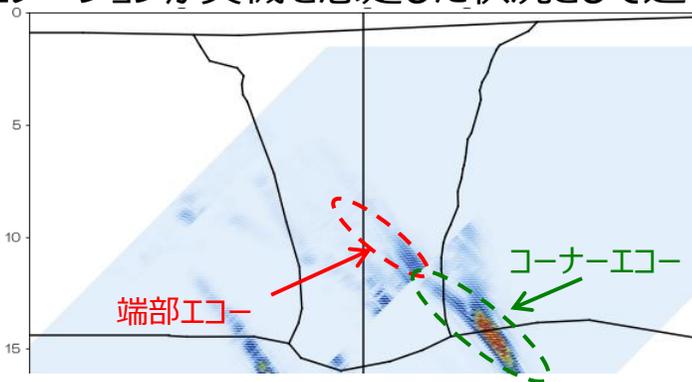


点接触の影響により超音波の入射位置が変化

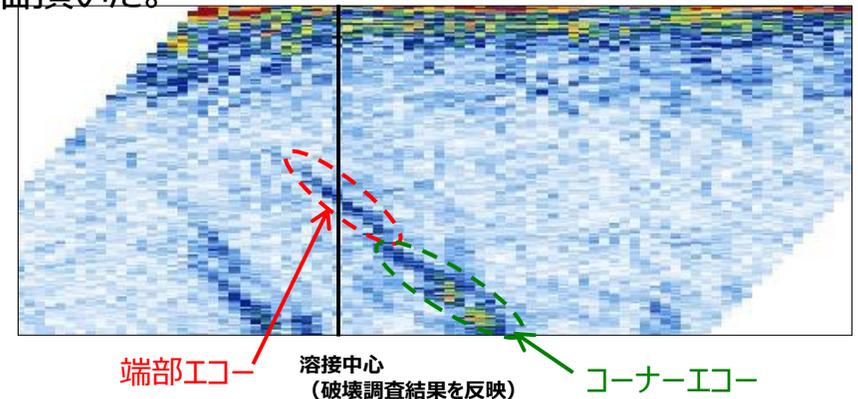
端部エコー検出時の想定状況

シミュレーションと実機の比較結果

シミュレーションの結果と実機波形の端部・コーナーエコー反射源位置を比較した結果、シミュレーションが実機を想定した状況として適切であると評価頂いた。

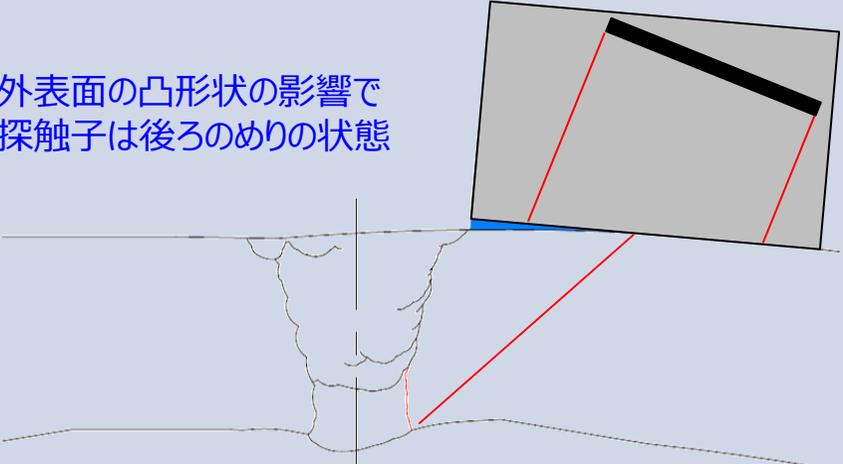
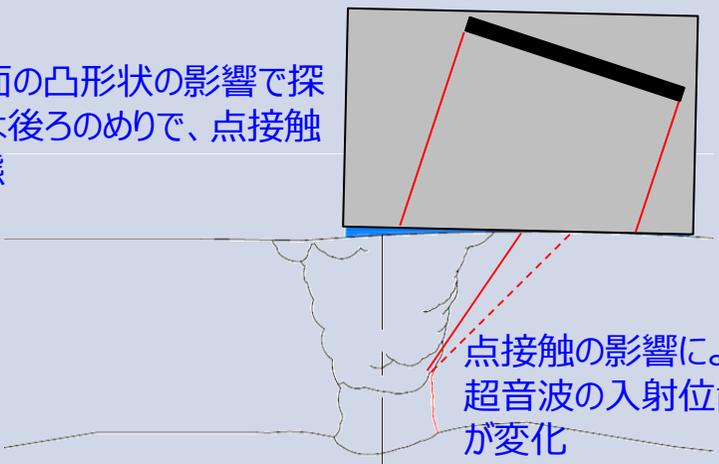
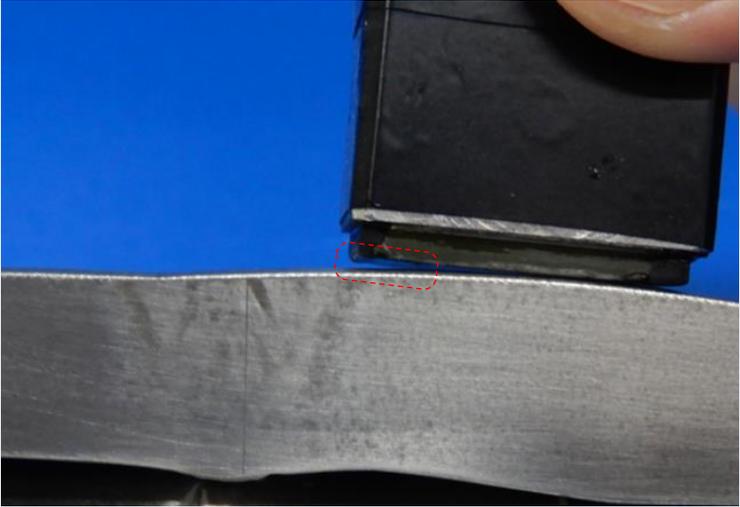
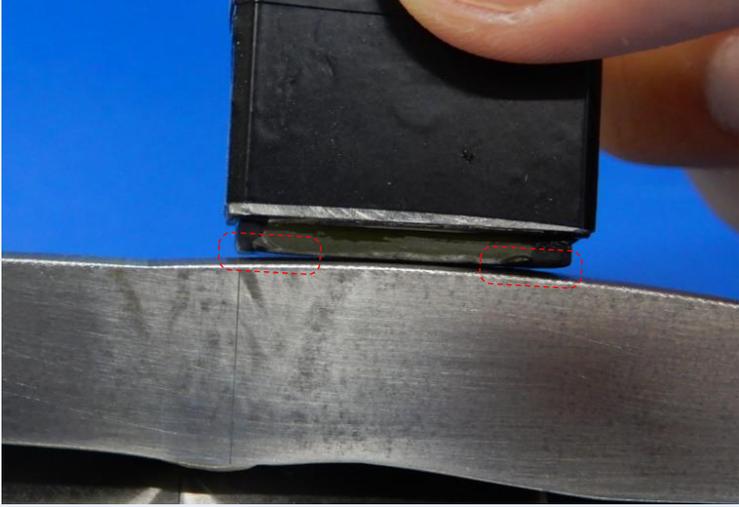


シミュレーション結果



当該亀裂に対するフェーズドアレイUT結果

実機の想定状況

	コーナーエコー検出時の想定状況	端部エコー検出時の想定状況
シミュレーション	<p>外表面の凸形状の影響で探触子は後ろのめりの状態</p> 	<p>外表面の凸形状の影響で探触子は後ろのめりで、点接触の状態</p>  <p>点接触の影響により超音波の入射位置が変化</p>
モックアップ		

 : 顕著な浮き

第3回 外部専門家会議 (1/4)

2021/12/23、第3回 検査技術に関する外部専門家会議を開催。

第2回会議にて合意した原因調査結果に対する①～③の対策案について、ATENAから外部専門家へ説明。対策案について合意した。

① 評価体制への対策

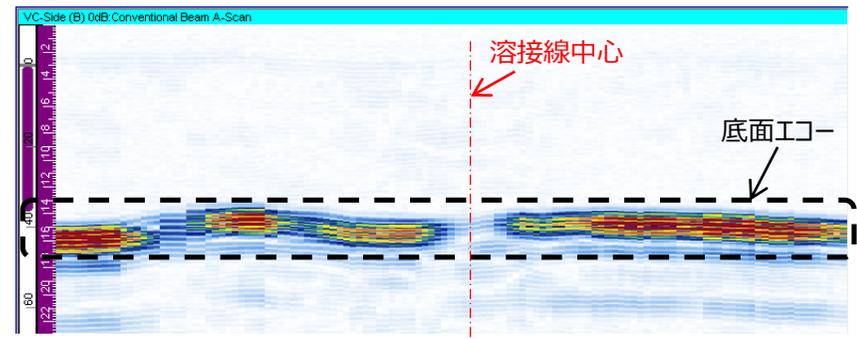
関係者に対し、本事象のようにBスコープ表示と実際の亀裂性状には乖離があり得ることを認識できるように教育を行う。

さらに検査員に対しては、外表面形状等Bスコープ表示と実際の亀裂性状に乖離を生む因子について理解させる。

② 溶接線中心位置把握技術の高度化

原因として考えられる要因のうち溶接中心位置のずれ(詳細は第3回会議参考資料参照)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場合、現場の作業環境、マーキング、開先部の公差等により2 mm程度の誤差は回避できない。このため、亀裂性状を評価する際には、前述の誤差の影響を受けないようなデータ採取

(例：垂直探傷のBスコープ画像)により、UTデータ側で可能な限り詳細な、溶接線中心位置の評価を行う。



第3回 外部専門家会議 (2/4)

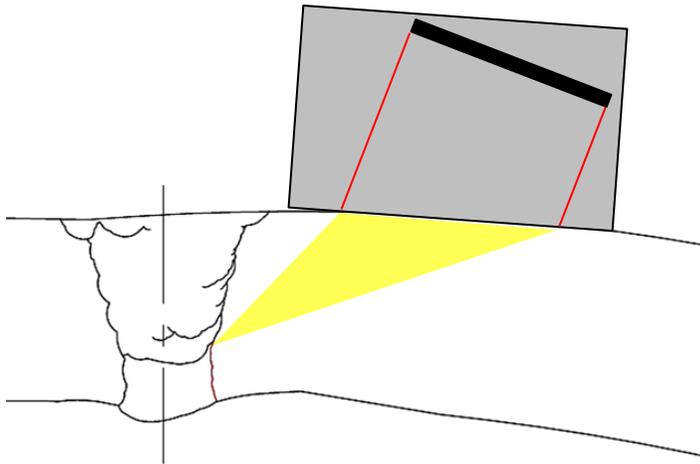
③ UT手法による対策

(1) 探触子設置位置に応じた超音波入射条件の設定

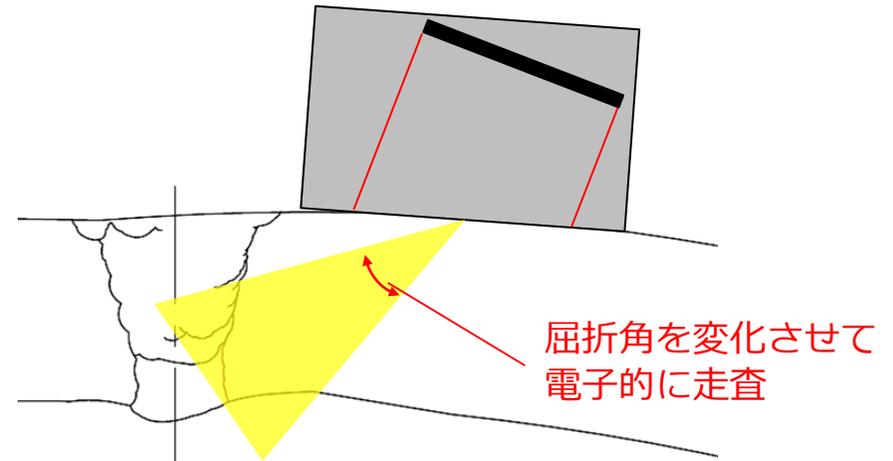
超音波集束条件（管軸方向、板厚方向）を複数準備することにより、外表面形状の影響を受けない位置で探傷可能とする。

(2) セクタ走査による探傷

外表面形状の影響を受けない位置で、電子的に超音波ビームの屈折角を変化させるセクタ走査を利用し、任意の屈折角でのBスコープ画像とセクタ画像を組み合わせ、総合的に亀裂性状の評価を行う。



3 (1) 外表面形状の影響を受けない位置からの探傷

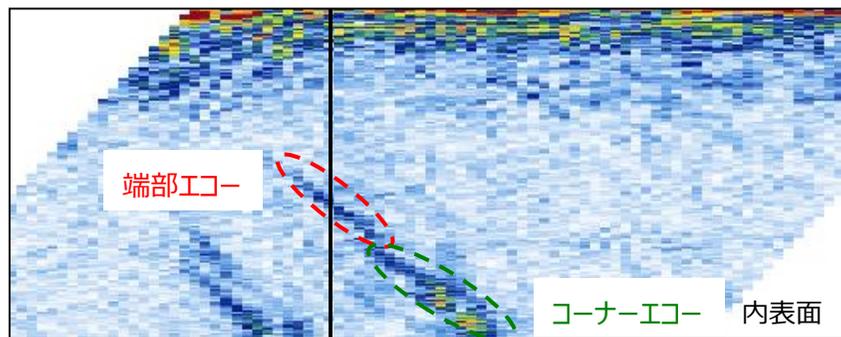


3 (2) セクタ走査による探傷

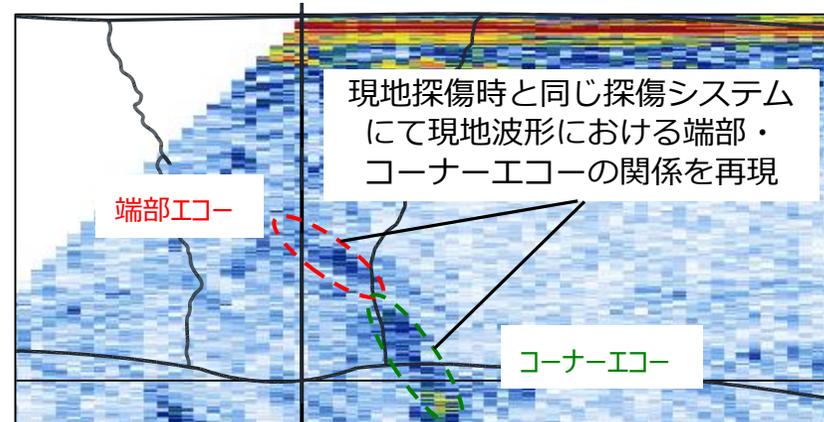
第3回 外部専門家会議 (3/4)

SCCを付与したモックアップによる対策の有効性確認

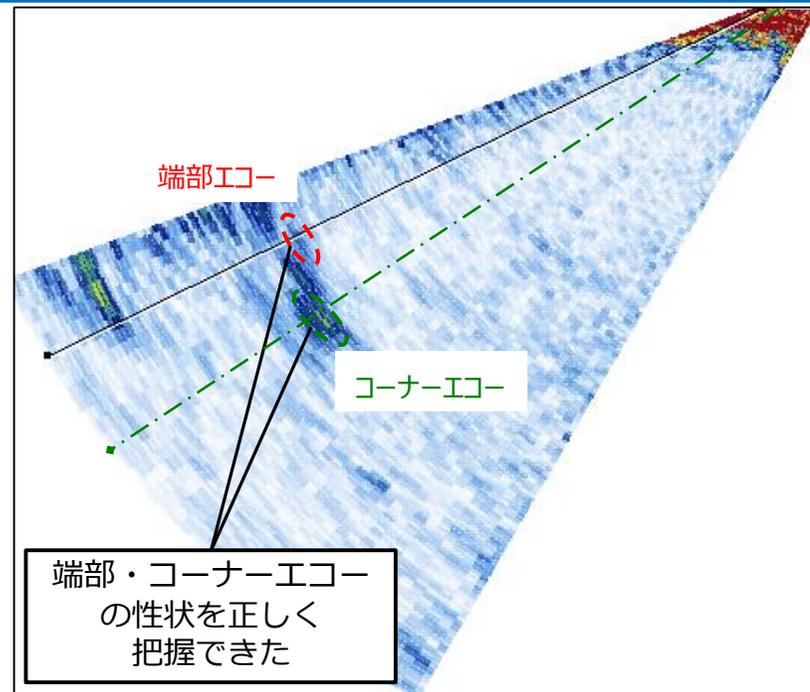
超音波入射条件の見直しを行い、外表面形状の影響が無い探触子位置でセクタ走査によりデータを採取。端部・コーナーエコーの性状を正しく把握できた。



実機SCC検出時の波形(現地波形)

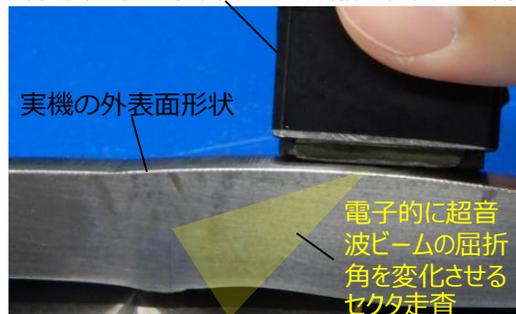


SCC付与モックアップによる現地波形の再現

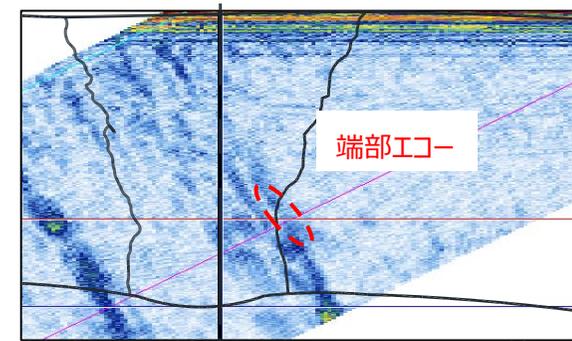


セクタ走査による探傷(SCC付与モックアップ)

外表面形状の影響が無い探触子位置で探傷



SCC付与モックアップでの探傷イメージ



外表面形状の影響を受けない位置からの探傷(SCC付与モックアップ)

第3回 外部専門家会議 (4/4)

亀裂性状把握に関する改善方針

向上策①：UT結果の評価者に対する教育

- 検査員に対し、外表面形状等Bスコープ表示と実際の亀裂性状に乖離を生む因子について理解させる。

向上策②：裏波性状把握による溶接線中心位置推測の高度化

- 亀裂性状を評価する際には、開先部の形状公差や、溶接中心を公差等の積み上げによる誤差の影響を受けないようなデータ採取(例えば垂直探傷のBスコープ画像)により、UTデータ側で可能な限り詳細な評価を行う。

向上策③：UT手法による亀裂性状把握高度化

(1)探触子設置位置に応じた超音波入射条件の設定

- 超音波集束条件（管軸方向、板厚方向）を複数準備することにより、外表面形状の影響を受けない位置で探傷可能とする。

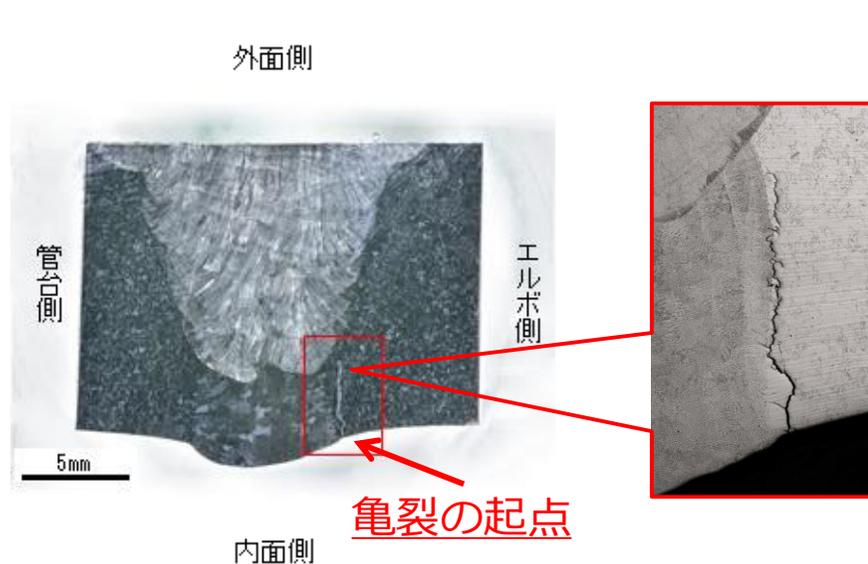
(2) セクタ走査による探傷

- 外表面形状の影響を受けない位置で、電子的に超音波ビームの屈折角を変化させるセクタ走査を利用し、任意の屈折角でのBスコープ画像とセクタ画像を組み合わせ、総合的に亀裂性状の評価を行う。

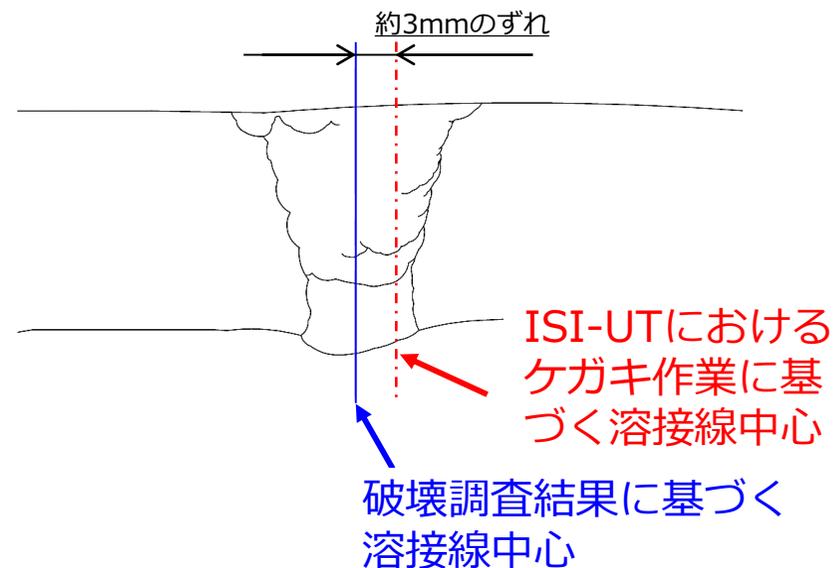
(参考) ISI-UTと破壊調査結果との溶接中心のずれ (1/2)

<概要>

破壊調査による断面形状とISI-UTの亀裂起点位置を重ね合わせた結果、ISI-UTで用いていた溶接中心を示すケガキは、破壊調査結果から得られた溶接中心より約3mmエルボ側にずれていた。



破壊調査による当該部断面写真



ISI-UTにおけるケガキと破壊調査結果の比較

(参考) ISI-UTと破壊調査結果との溶接中心のずれ (2/2)

ISI-UTのケガキ方法

溶接施工前に施工されたポンチの中心にケガキを行い、ISI-UTにおける溶接中心としている(図1-2)。
 ※探触子を走査可能とするためにグラインダ等により配管の余盛を除去しており、目視による溶接中心の識別は困難である(図2参照)。

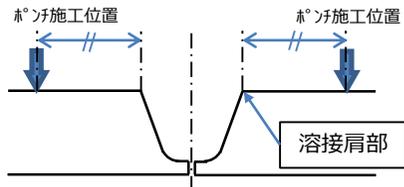


図1-1 ポンチ施工のイメージ

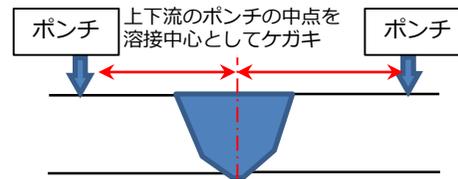


図1-2 ISI-UTにおけるポンチからの溶接中心ケガキのイメージ

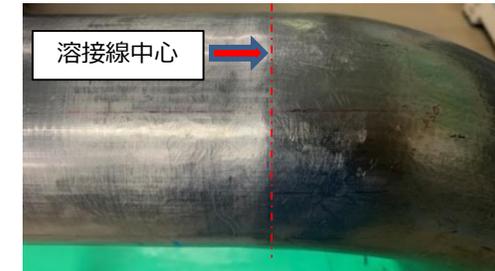


図2 実機配管外表面のイメージ
(写真はモックアップ)

溶接中心がずれた要因

今回生じた溶接中心のずれの要因は、開先形状の寸法公差内でのバラツキ、ポンチ加工のずれに加え、当該箇所はエルボ-管台の接合部であり、拘束条件が均等ではないことから溶接による不均一な収縮によるものと想定される。更にケガキ線(マジックペンによる描線)の幅などを考慮すればあり得ないずれ量ではないが、悪条件が重なった結果であると考えられる。

溶接中心がずれたことによる影響評価

PSIから現在のISI-UTに至るまで、UT指示の解析は何れもポンチを起点に描線した溶接線中心にて評価しているため、溶接線中心のずれが生じていても、亀裂等の有無の確認及び過去の記録との経年変化比較に影響は無い。なお、探傷においては要求される試験範囲を十分満足するよう広く探触子を走査しているため、溶接線中心のずれが生じていても試験範囲が不十分となることは無い。

第4回 外部専門家会議（1/1） ～原因究明結果と対策案～

2022/1/26、第4回 検査技術に関する外部専門家会議を開催。

専門家会議の報告書案の審議を行い、出席者間で記載内容の合意を得た。

以下に合計4回の外部専門家会議を通して論点となった事象や、原因究明及び対策について外部専門家に評価頂いた内容を纏める。

きず深さ測定:適切かつPD 認証の合否基準と比較しても精度良く測定できていた。

(高さ4.4mmの亀裂を4.6mmと評価)

亀裂性状評価:UTによる推定と切断調査結果に相違があり、その原因と対策が外部専門家会議での主な論点となった。

亀裂性状の誤認に至った原因究明結果

- ・ 超音波探傷試験で亀裂が管台方向に進展しているように端部エコーが表示された事象は、管外表面の幾何学的形状の影響、超音波の拡がりの影響、溶接金属部による超音波の屈曲の影響などが複合して発生したものと報告。外部専門家より、妥当な原因であると評価された。⇒**対策③**へ
- ・ また、亀裂が管台方向に進展していると誤認したのは、亀裂性状の評価が重要な事項であるとの認識不足、溶接金属部を跨ぐように進展した亀裂であると判断したのは、ケガキ作業に基づく溶接中心位置のずれ等によるものと報告。外部専門家より、当時そのように判断したことは理解できると評価された。⇒**対策①,②**へ

原因を受けた対策

- ・ 議論の結果、**下記の対策①～③により、上記原因究明で特定された要因を抑えられ、かつ亀裂性状をUTにて正しく評価可能となることが外部専門家に了解された。**
- ・ 対策①：評価体制への対策 [関係者・検査員への教育]
- ・ 対策②：溶接線中心位置把握技術の高度化
- ・ 対策③：UT手法による対策 [(1)探触子設置位置に応じた超音波入射条件の設定 (2)セクタ走査による探傷]

外部専門家会議 メンバリスト

発生メカニズムおよび亀裂有り健全性評価に関する外部専門家（敬称略）

組織名	所属	役職	氏名
東北大学	大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻	教授	渡邊 豊
東京大学	大学院工学系研究科附属 総合研究機構	特任教授	鈴木 俊一
大阪大学	工学研究科 マテリアル生産科学専攻	教授	望月 正人
東北大学	大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻	准教授	阿部 博志
日本製鉄(株)	技術開発本部 関西技術研究部	主幹研究員	竹田 貴代子
日本核燃料開発(株)	研究部 材料グループ	研究参与	越石 正人
(株)IHI	技術開発本部 技術基盤センター	主査	榊原 洋平
(株)原子力安全システム研究所	技術システム研究所 熱流動・構造グループ	熱流動・構造グループリーダー	釜谷 昌幸
(株)原子力安全システム研究所	技術システム研究所 高経年化研究センター 材料グループ	主任研究員	山田 卓陽
(国研)日本原子力研究開発機構	原子力基礎工学研究センター	副センター長	加治 芳行
(国研)日本原子力研究開発機構	安全研究センター 材料・構造ディビジョン 兼 構造健全性評価研究グループ	材料・構造ディビジョン長 兼 構造健全性評価研究グループリーダー	李 銀生

検査技術向上に関する外部専門家（敬称略）

組織名	所属	役職	氏名
東北大学	大学院工学研究科および高等研究機構新領域創成部	教授	三原 毅
(一財)発電設備技術検査協会	溶接・非破壊検査技術センター	所長	古川 敬
愛媛大学	大学院理工学研究科生産環境工学専攻	教授	中畑 和之
東北大学	大学院工学研究科および高等研究機構新領域創成部	准教授	小原 良和
(国研)日本原子力研究開発機構	安全研究センター 材料・構造ディビジョン 兼 構造健全性評価研究グループ	材料・構造ディビジョン長 兼 構造健全性評価研究グループリーダー	李 銀生

略語	和名	名称
CGR	亀裂進展速度	Crack Growth Rate
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
FEM	有限要素法	Finite Element Method
HAZ	熱影響部	Heat-Affected Zone
IG/TG	粒内／粒外	Intergranular／Transgranular
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
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