

PWR 1 次系におけるステンレス鋼配管粒界割れに関する 事業者からの意見聴取結果について（案）

令和 4 年 7 月 28 日
技 術 基 盤 課
システム安全研究部門
専 門 検 査 部 門

1. 概要

令和 2 年 8 月 3 1 日、関西電力株式会社（以下「関西電力」という。）大飯発電所 3 号機（以下「大飯 3 号機」という。）において、関西電力が、定期事業者検査として加圧器スプレイライン配管（材質：SUS316、呼び径：150A、板厚：14mm（シンニング部））の溶接部に対する超音波探傷試験（以下「UT」という。）を実施したところ、配管内面に亀裂が存在することを示す有意な試験結果が得られた。翌 9 月 1 日、関西電力が、亀裂高さを評価するためにフェーズドアレイ UT を実施した結果、関西電力は配管溶接部に沿って板厚方向に進展した亀裂状の欠陥があるとし、この亀裂は応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking、以下「SCC」という。）に起因するものと推定した。

令和 3 年 4 月 2 1 日の原子力規制委員会において、関西電力大飯 3 号機加圧器スプレイライン配管における亀裂の調査を踏まえた対策について報告し、今後の対応として、原子力規制庁は、供用期間中検査における UT の妥当性及び原子炉圧力バウンダリに属する配管に対する破断前漏洩（Leak Before Break、以下「LBB」という。）成立性の観点を踏まえ、今後、公開会合等において、これら調査及び研究の計画、進捗状況及び結果について関西電力から説明を受けることとした。

その後、令和 4 年 6 月 2 4 日に事業者意見を聴取する会合¹を開催し、ATENA（原子力エネルギー協議会）から、事業者の取り組みについて説明を受けた（参考 1 参照）ことから、その結果について報告する。

2. ATENA からの説明と聴取の結果

○ 事象の概要

- 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 UT により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約 60 mm、深さ約 4.4 mm の亀裂があることが明らかとなった。
- フェーズドアレイ UT の A スコープ²による検査では、亀裂は板厚方向に進展しているとしていたが、その後、B スコープ³による追加調査で亀裂はエルボ側から溶接金属を横切って管台側の方向に進展していると推定した。

¹ 第 20 回新規規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合

² 表示器上の横軸を時間、縦軸を振幅とする超音波信号の表示方法（JISZ2300 非破壊試験用語）

³ 断面表示：探触子の一方向走査による試験体断面探傷におけるきずの断面位置に対応した表示（試験体の厚さ方向の情報を表す）（JISZ2300 非破壊試験用語）

○ ATENA の取組

- ATENA、電力事業者及び国内メーカーによるワーキンググループ（以下「WG」という。）を立ち上げ、課題検討の取組を実施。技術課題は「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分類に整理。
- 外部専門家と意見交換を実施し、技術課題に対する研究計画を策定。実施状況を踏まえて、計画を見直していく予定。

2. 1 発生メカニズムの解明と亀裂有り健全性評価

2. 1. 1 ATENA による説明の概要

(1) 発生メカニズムの解明

○ 課題

- 過大な溶接入熱と、管台-エルボ部の剛性の影響が重畳し、溶接金属と母材金属との境界部近傍において特異な硬化と応力が影響した可能性
- 溶接により微細な割れが発生していた可能性

○ 実施項目

- 実機詳細調査（損傷部位、比較部位）：2022 及び 2023 年度
- 発生特性に関する調査：2023～2025 年度

(2) 亀裂がある場合の健全性評価

○ 課題

- PWR プラントにおける S C C 進展予測評価式が規格化されていない

○ 実施項目

- S C C 進展特性知見の調査：2022 及び 2023 年度
- S C C 進展特性データの取得：2023～2025 年度
- S C C 進展速度線図案の策定：2024 及び 2025 年度
- 溶接残留応力評価：2024 年度
- 構造健全性評価：2024 及び 2025 年度
- L B B 評価の知見拡充：2024 及び 2025 年度

2. 1. 2 ATENA からの聴取の概要（詳細は参考資料 2 参照）

(1) 検討体制

発生メカニズムの解明と亀裂有り健全性評価に関するWGはPWRプラントの事業者及びメーカーを主体としつつ、炉型を超えた視点からBWRプラントの事業者及びメーカーも体制に入れ、外部専門家からの客観的な意見を得る体制としているとのことであった。

(2) 他プラントへの水平展開

大飯発電所3号機で発生した粒界割れと類似性のある溶接部については、PWR各電力が継続して検査していく方針としているとのことであった。

(3) 粒界割れが発生した配管の調査

実機詳細調査として当該溶接継手の溶接クレータ部、90°、180°、270°及び重要と考えられる箇所断面マクロ硬さ測定による調査を実施していくとのことであった。

(4) 溶接の管理

溶接入熱量の管理として、溶接士に対して教育・訓練を行い、技量のある溶接士が実機の溶接施工を行うとのことであった。

(5) SCC進展速度

PWRの1次冷却材中におけるSCC進展速度線図案を策定するとのことであった。

(6) LBB

LBBの成立性については、今後裕度を明確にするとのことであった。なお、LBBの成立性についてはSCC抑制対策が施されていることを前提条件としており、その観点踏まえた損傷防止対策項目として、日本機械学会発電用原子力設備規格配管破損防護設計規格(JSME S ND1-2002)に挙げられている脱気運転、水質管理を実施しているとのことであった。

2. 2 検査技術の向上

2. 2. 1 ATENAによる説明の概要

○ 課題

溶接金属を横切って進展する亀裂であると誤認した。

- ① 評価体制に関する課題 (Bスコープの結果を過信した)
- ② 溶接線の中心位置を把握する技術に関する課題 (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た)
- ③ UT手法に関する課題 (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発生)

○ 実施項目

① 評価体制への対策

- 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。

② 溶接線中心位置把握技術の高度化

- 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により、UTデータ側で可能な限り詳細な評価を行う。

③ UT手法による亀裂性状把握高度化

- 探触子設置位置に応じた超音波入射条件の設定：超音波集束条件を複数

- 準備することで、外表面形状の影響を受けない位置で探傷可能とする。
- 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。

2. 2. 2 ATENA からの聴取の概要（詳細は参考資料 3 参照）

（1）ATENA レポート

検査技術の向上に関するWGの作業は 2021 年度で完了し、検討結果については ATENA レポートとして公開される予定であるとのことであった。

（2）亀裂形状の誤認の原因

当該配管外表面の幾何学的形状に伴う UT 探触子のがたつきを考慮せずに亀裂形状を評価したことが誤認の主要因であるとのことであったが、検討の詳細については、開示できないものもあるとのこと確認できなかったため、今後、面談において聞き取ることとした。

（3）PD 認証試験

亀裂形状の誤認に至った教訓について、PD（Performance demonstration）認証試験⁴や訓練制度を議論する場に情報共有していくとのことであった。

（4）教育・訓練

亀裂の性状評価を行う際の注意点について検査員に教育を行い、今回の事例を認識させた上で評価していくとのことであった。

3. 今後の対応

今後の ATENA の取組及びこれから発行される ATENA レポートについては、面談、意見聴取等をとおして引き続き聴取する。また、「他プラントへの水平展開」（2. 1. 2（2））、「溶接の管理」（2. 1. 2（4））、「教育・訓練」（2. 2. 2（4））については、今後の原子力規制検査において確認する。

（参考 1）第 20 回新規要件に関する事業者意見の聴取に係る会合 資料 19-1

（参考 2）第 20 回新規要件に関する事業者意見の聴取に係る会合における主な質疑応答（発生メカニズムの解明と亀裂有り健全性評価）

（参考 3）第 20 回新規要件に関する事業者意見の聴取に係る会合における主な質疑応答（検査技術の向上）

⁴ オーステナイト系ステンレス鋼配管の突き合わせ溶接部における SCC の亀裂高さ（深さ）の測定に対する認証試験である。UT 試験員、UT 装置及び手順書を組み合わせた技能に対して資格が付与される。

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。

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

1. 振り返り

2. 2021年度検討内容

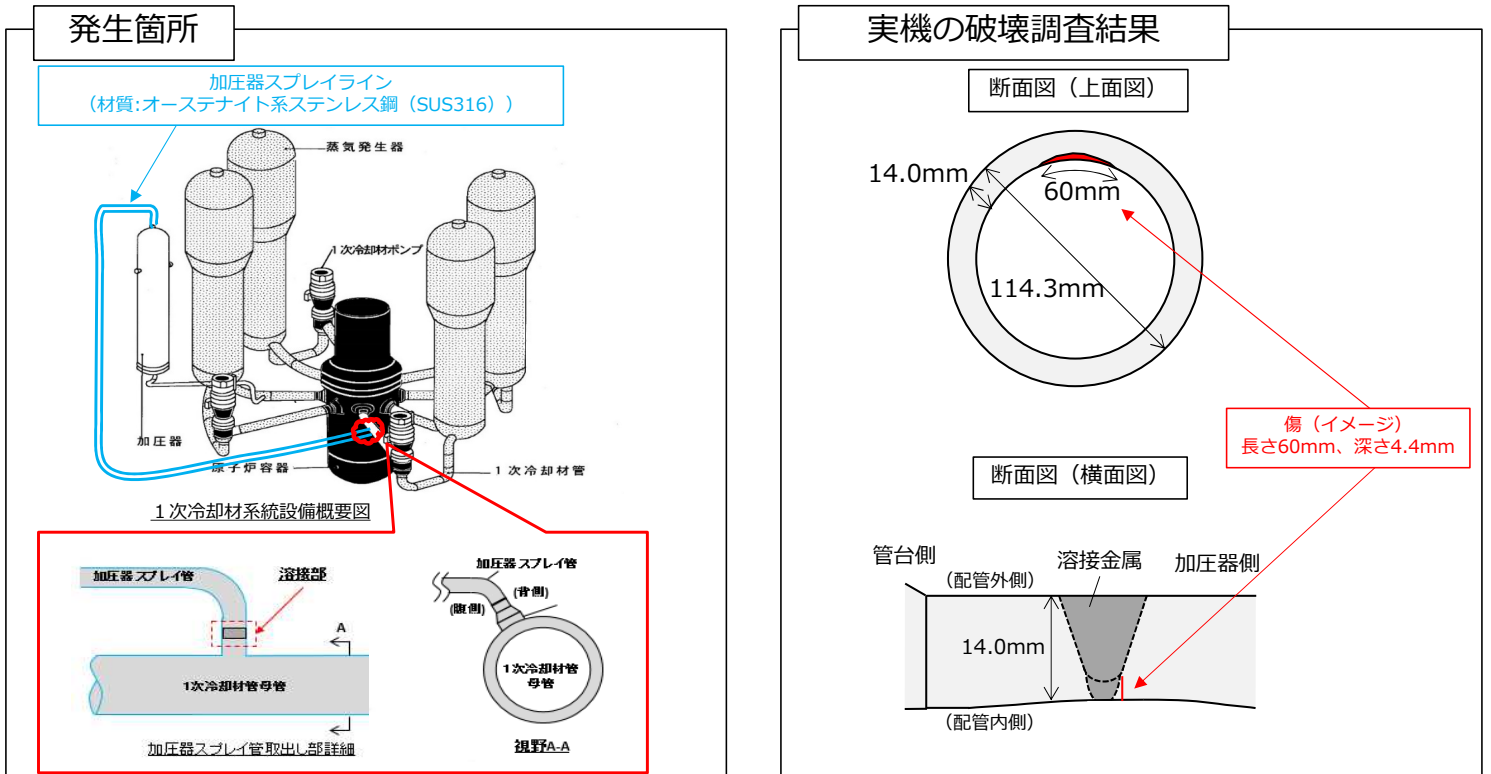
2.1 発生メカニズム・亀裂有り健全性評価

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。



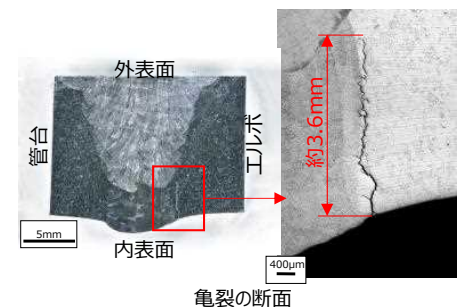
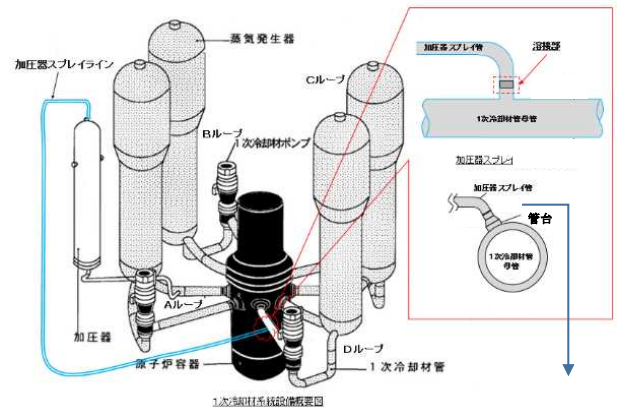
➤ 供用期間中検査 (ISI) にて、加圧器スプレイラインの1次冷却材管台と管継手 (エルボ部) の配管溶接部に有意な指示が認められた。その後の破壊調査により、**溶接熱影響部にて長さ60mm、深さ4.4mmの亀裂**があることが明らかとなった。

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。

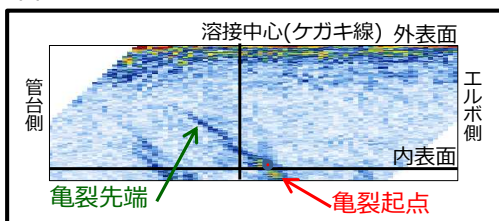
超音波探傷検査の概要

<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)

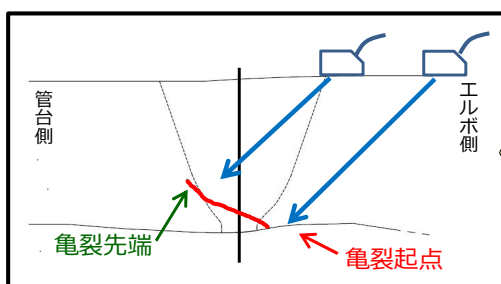
- 超音波探傷検査による非破壊試験で、亀裂の深さについては適切に評価。
 - 亀裂はエルボ側から管台側の方向に溶接部を進展していると推定したが、破壊調査の結果、亀裂はエルボ側母材の溶接部境界で板厚方向に進展していた
- ⇒ **ATENAとして、亀裂性状の誤認に対する検討が必要であると認識。**

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



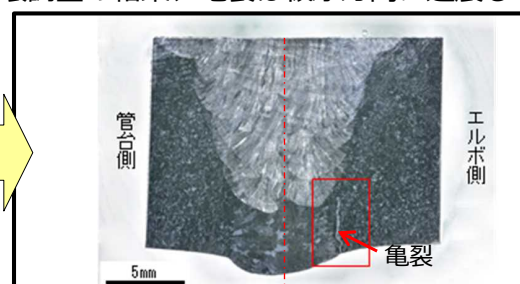
現地フェーズドレイUT結果より推定した亀裂性状

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

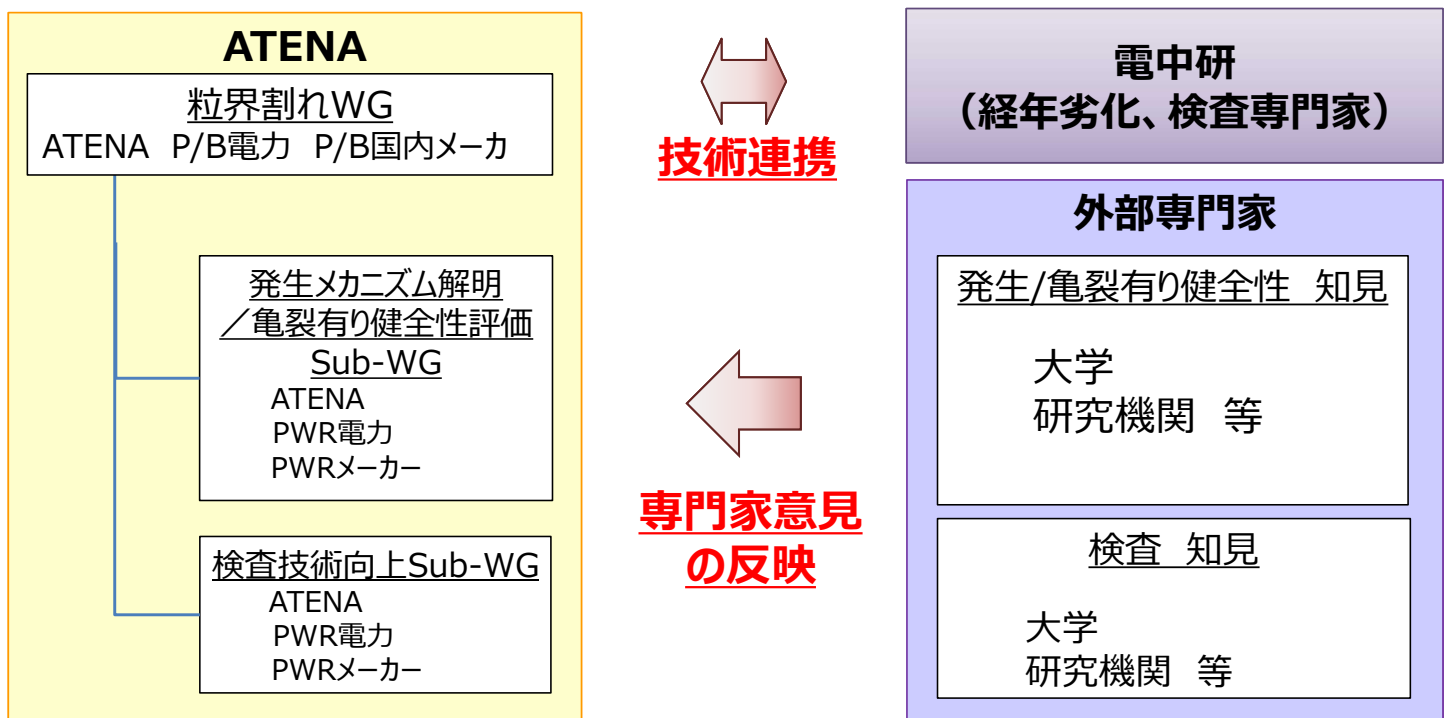
PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れに対するATENAの取り組み

- 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

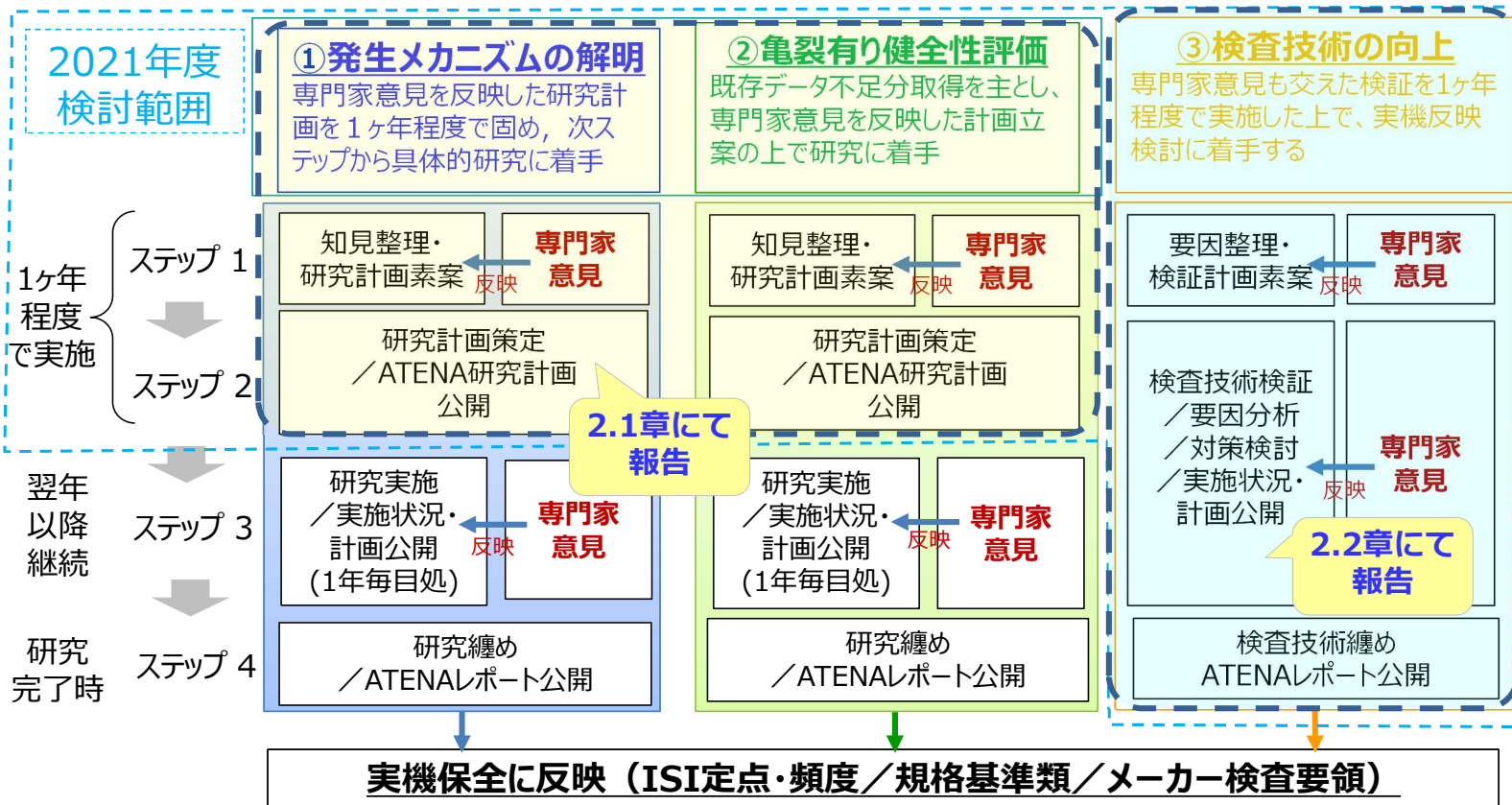
PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れ検討の体制

- 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 → 1
- 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り込みを実施 → 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、研究計画として取りまとめ → 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・マイクロ観察により、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・マイクロ観察により、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	・破面マイクロ観察の結果、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	・破面マイクロ観察の結果、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		

※：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	○実機詳細調査（損傷部位、比較部位） ・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）
	[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	○発生特性に関する調査
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	○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

参考資料：亀裂発生／進展研究計画 必要な対応と実施項目(案) [1/4]

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	・ 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、亀裂先端ミクロ組織分析（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	・ 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	・ 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	・ 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	・ 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)

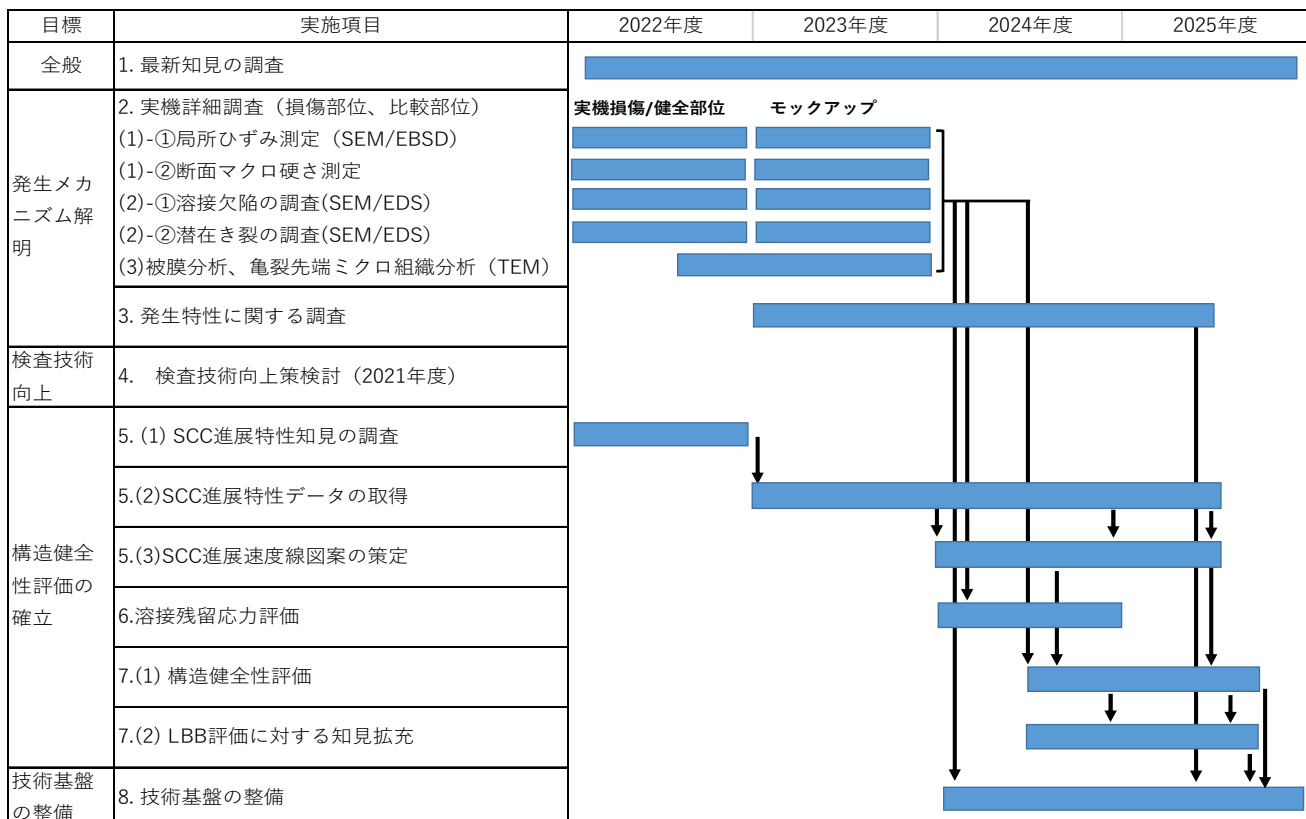
<技術基盤の整備>

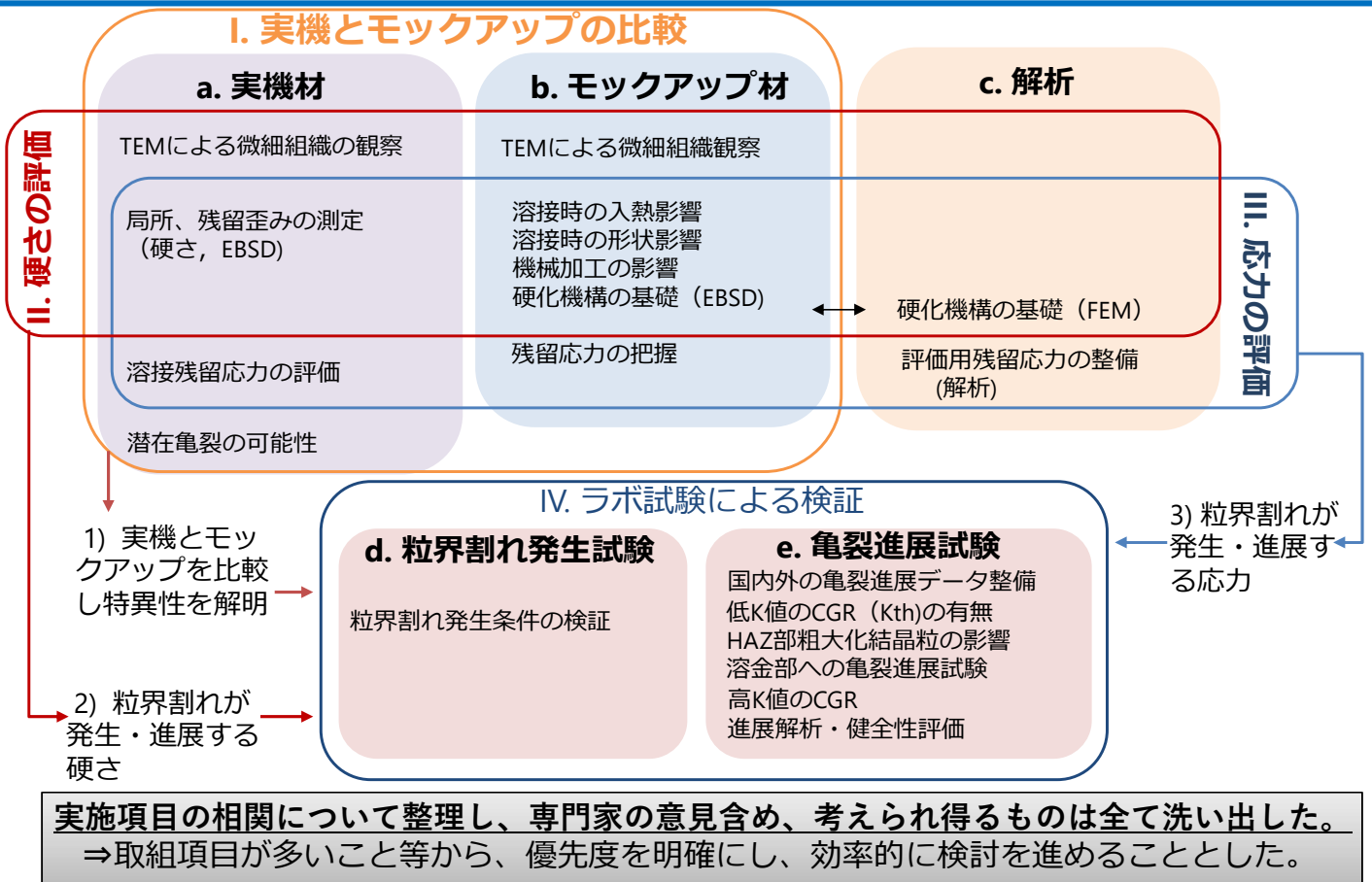
項目	概要
現状認識	・ 粒界割れの水平展開部位に対し、向こう3年間を目途に超音波探傷検査を毎年実施している。 ・ 本検討成果を反映した健全性評価手法を確立する必要がある。
必要な対応	・ 本検討の成果を基に、検査範囲の明確化を図り、検査・健全性評価手法の技術基盤を整備する。
実施項目	8. 技術基盤の整備 (2023年度以降実施)



亀裂発生メカニズムの解明／亀裂有り健全性評価 研究実施工程 (案)

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。





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。

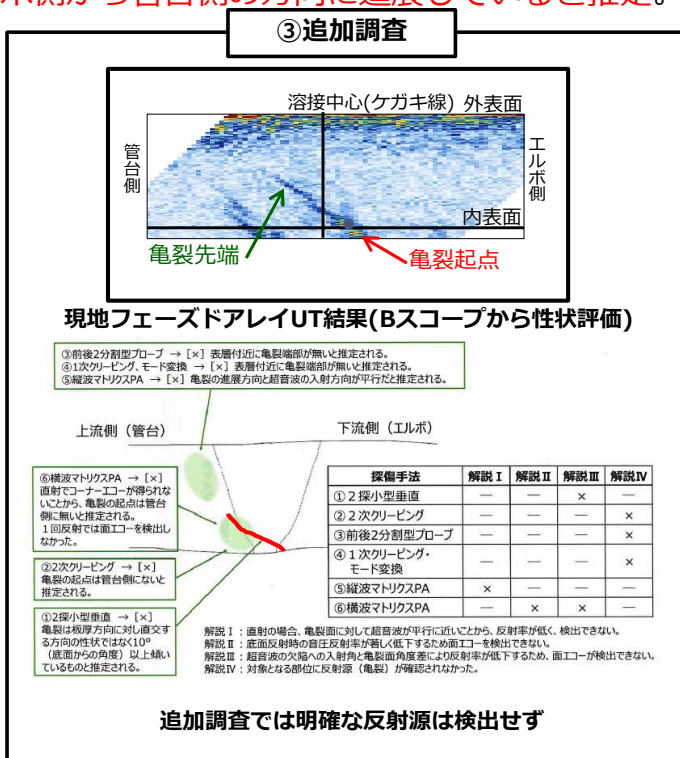
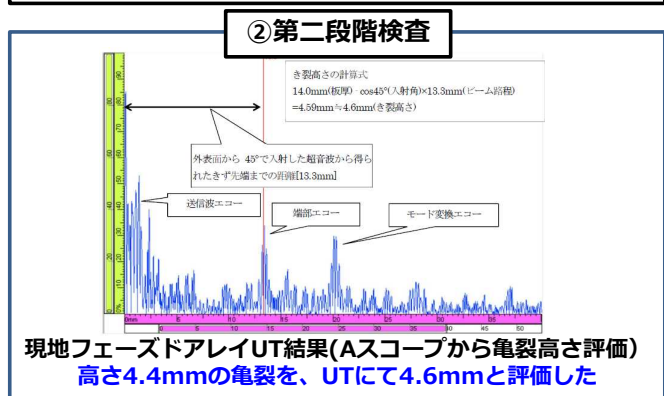
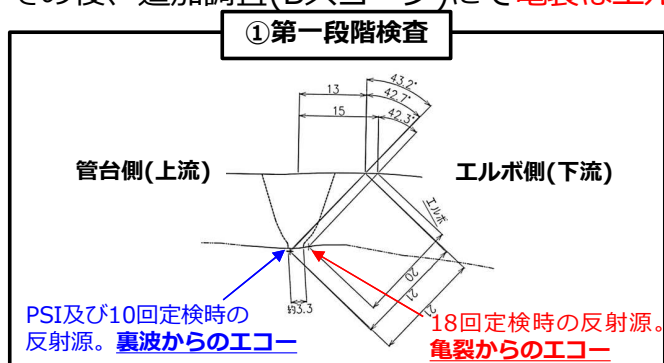
i) 規制委員会との公開会合で議論された点を含め、事象概要を外部専門家に説明 → 5・21

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

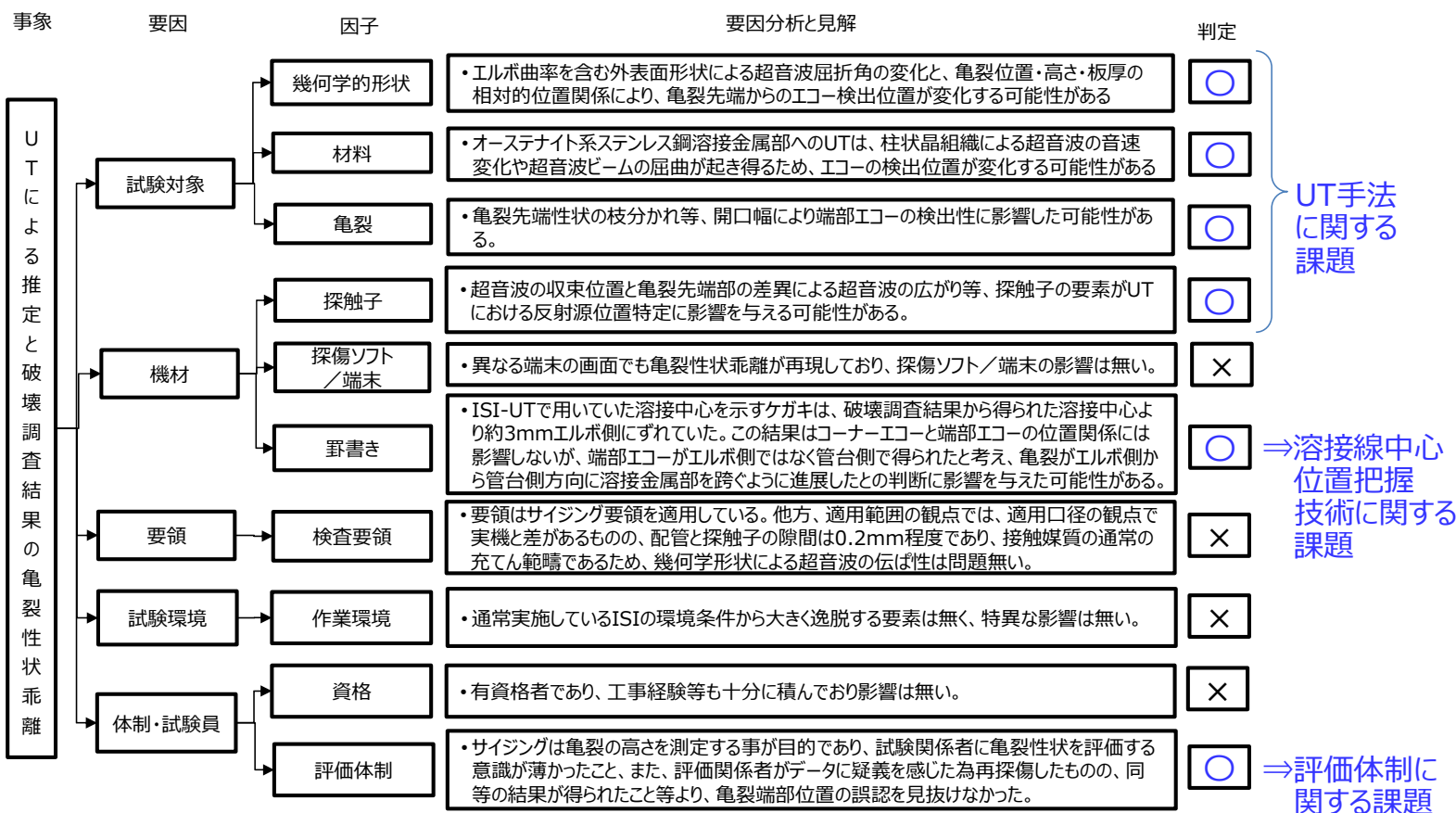
iii) 絞込んだ課題を踏まえ、検査技術の向上策を検討し取りまとめ → 24～27

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。



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



検査技術の向上 課題整理

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。

③ UT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）

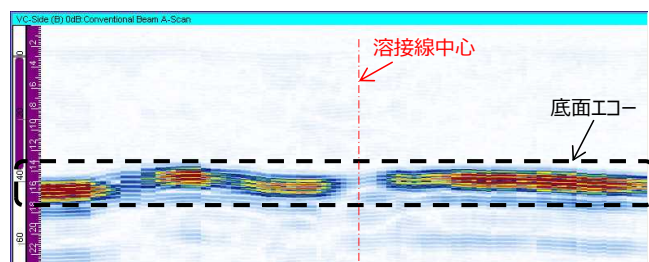
原因調査結果に対する①～③の対策案について、以下に示す。

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

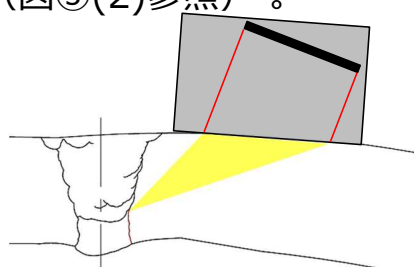
- シミュレーション解析およびモックアップ試験による妥当性検証の結果、以下の対策により亀裂性状を把握できることを確認した。

(1)探触子設置位置に応じた超音波入射条件の設定

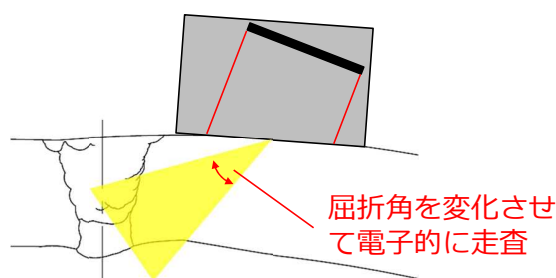
- 超音波集束条件（管軸方向、板厚方向）を複数準備することにより、外表面形状の影響を受けない位置で探傷可能とする（図③(1)参照）。

(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

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)。

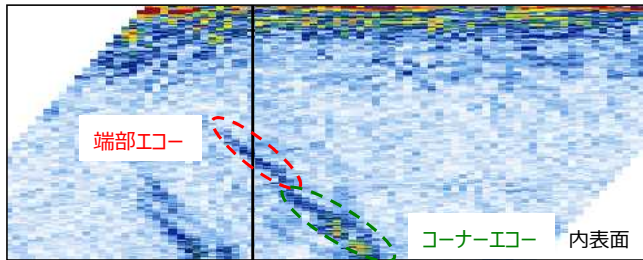


図1：実機SCC検出時の波形(現地波形)

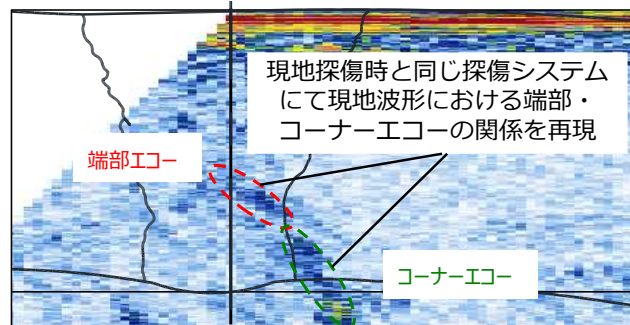


図2：SCC付与モックアップによる現地波形の再現

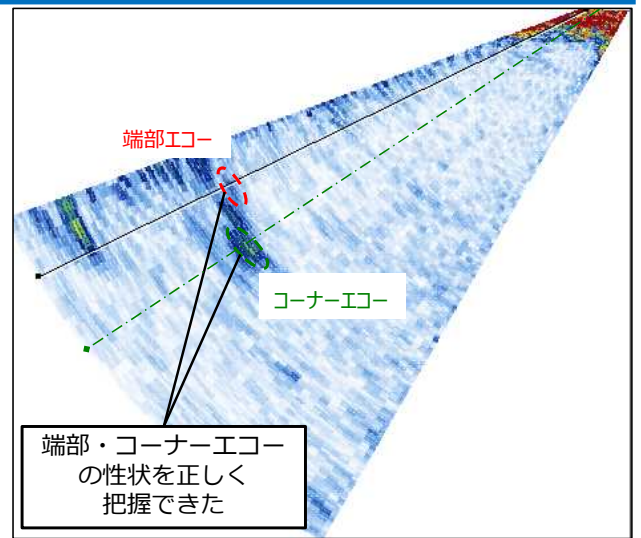
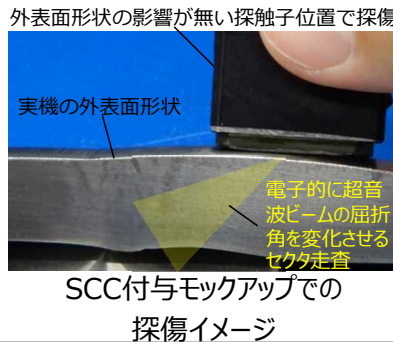


図3：セクタ走査による探傷(SCC付与モックアップ)



SCC付与モックアップでの探傷イメージ

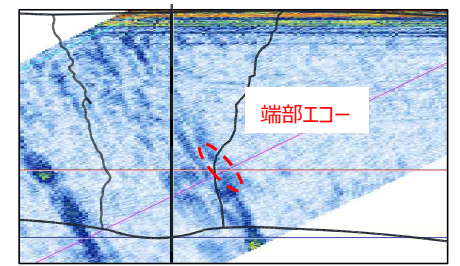


図4：外表面形状の影響を受けない位置からの探傷(SCC付与モックアップ)

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。

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、必要に応じ会合にて説明を行う。

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

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)

第2回 外部専門家会議(1/4) ～技術課題/目的/実施項目の抽出～

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。

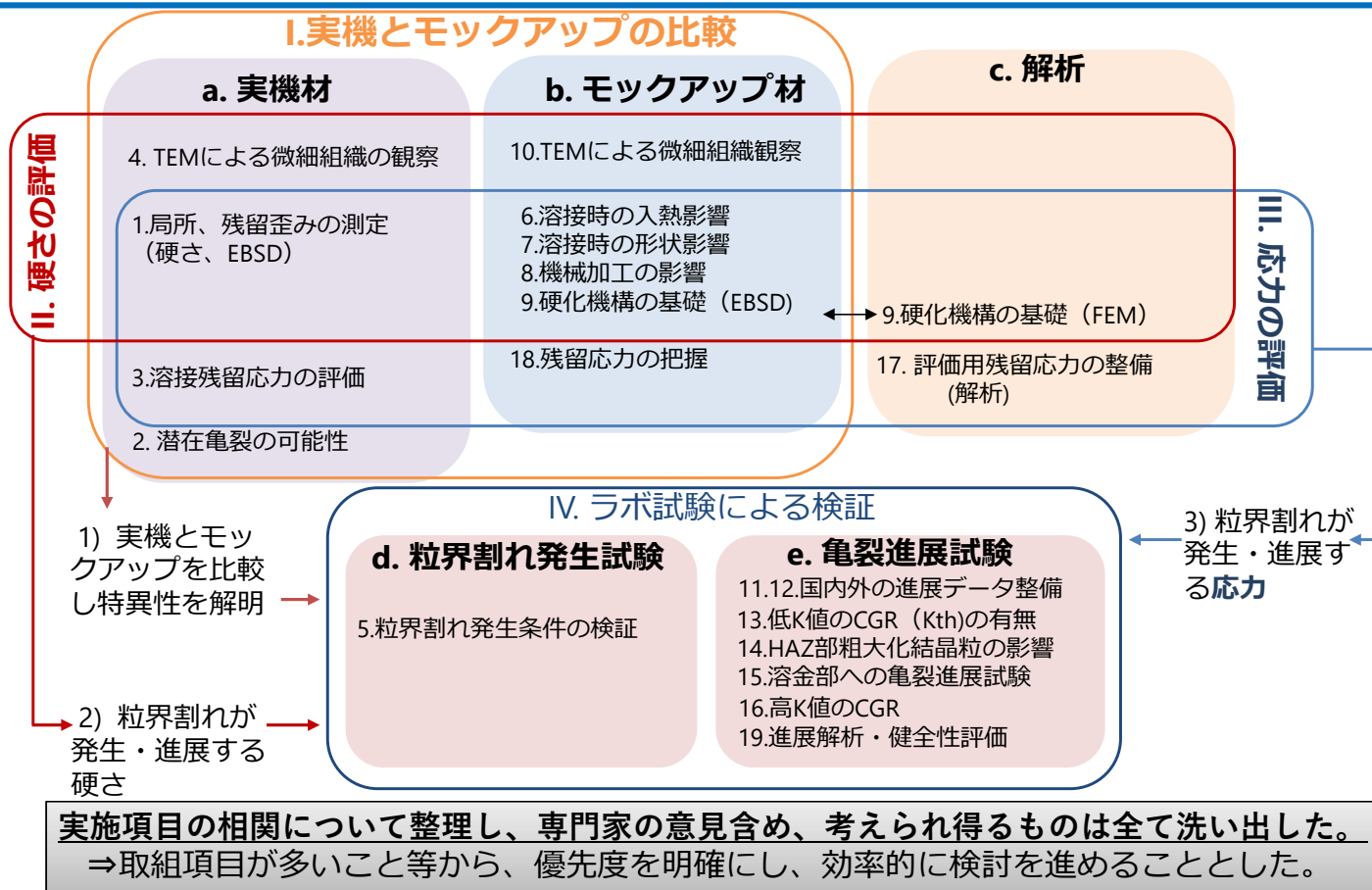
大分類	小分類	技術課題	実施項目
検査対象の明確化	実機調査	「硬化」が粒界割れの主要因と推定されたが、以下の詳細は明確にできていない。 ● 熱影響部の母材側粒界で割れが発生 ● 溶接境界の極近傍で発生 ● 亀裂は単一で扇状の形態	1. 局所、残留歪の評価 2. 潜在亀裂の可能性 3. 溶接残留応力の評価 4. TEMによる微細組織
	発生条件	「硬化」が影響したと判断されたが、粒界割れが生じる条件は明らかになっていない。	5. 硬さと応力で粒界割れが発生する条件の検討

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
	残留応力		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
	評価方法		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

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



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	実機調査	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 硬化要因 (機械加工・溶接入熱・溶接形状)	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)	○	○	△
		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

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	○	○	○

優先度が高い項目

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

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。

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。			
	発生条件	・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。		・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。	3. 発生特性に関する調査
	検査技術	・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。	4. 非破壊検査における対応・改善策の検討
		・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。		

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
技術基盤の整備	破断前漏洩(LBB)評価の知見拡充	・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。	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
		・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	8. 技術基盤の整備

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	[Gantt bar]			
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）	[Gantt bar]	[Gantt bar]		
	(1)-②断面マクロ硬さ測定	[Gantt bar]	[Gantt bar]		
	(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）	[Gantt bar]	[Gantt bar]	[Gantt bar]	[Gantt bar]
	3. 発生特性に関する調査		[Gantt bar]	[Gantt bar]	[Gantt bar]
検査技術向上	4. 検査技術向上策検討（2021年度）			[Gantt bar]	[Gantt bar]
構造健全性評価の確立	5. (1) SCC進展特性知見の調査	[Gantt bar]			
	5. (2) SCC進展特性データの取得		[Gantt bar]	[Gantt bar]	[Gantt bar]
	5. (3) SCC進展速度線図案の策定			[Gantt bar]	[Gantt bar]
	6. 溶接残留応力評価			[Gantt bar]	[Gantt bar]
	7. (1) 構造健全性評価 7. (2) LBB評価の知見拡充			[Gantt bar]	[Gantt bar]
技術基盤の整備	8. 技術基盤の整備			[Gantt bar]	[Gantt 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、亀裂先端マイクロ組織分析（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。

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°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)での断面マイ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(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。

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。

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。

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

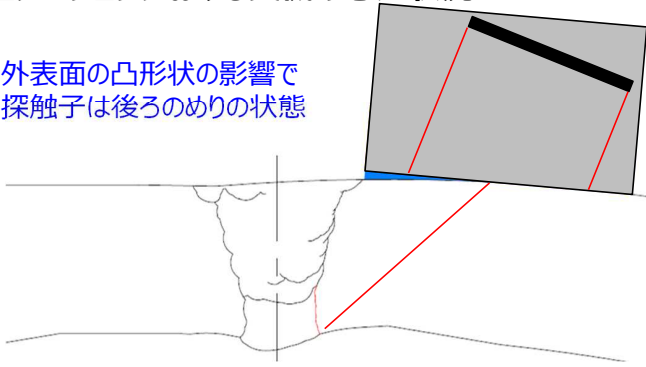
実機断面を基に
形状を模擬



シミュレーションにて模擬した形状

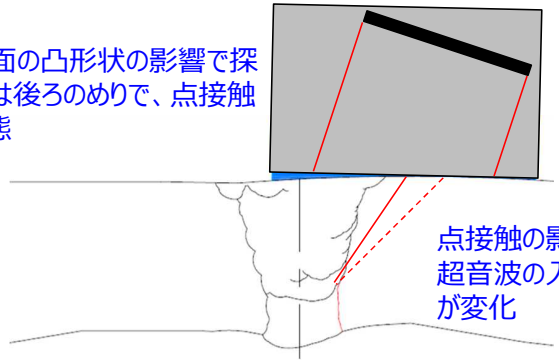
シミュレーションにおける実機の想定状況

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

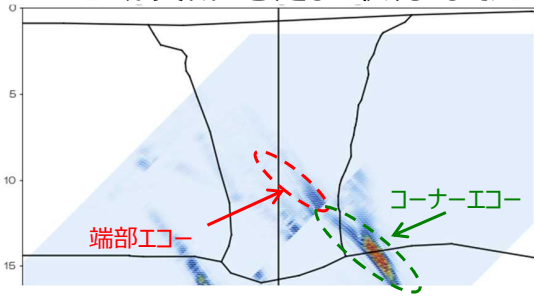


点接触の影響により超音波の入射位置が変化

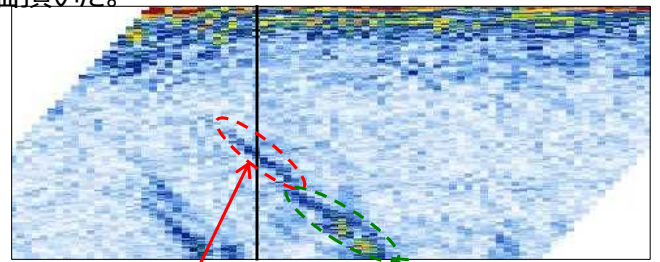
端部エコー検出時の想定状況

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

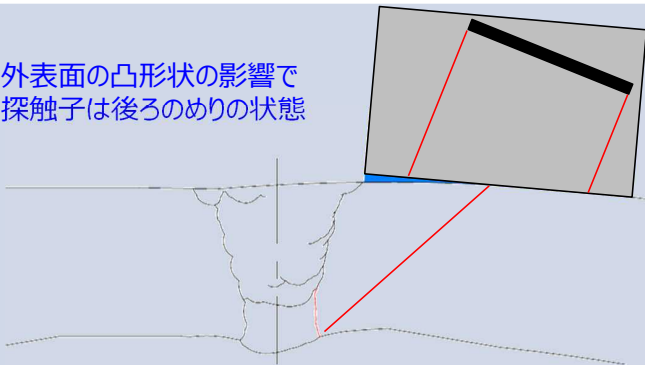


当該亀裂に対するフェーズドアレイUT結果

実機の想定状況

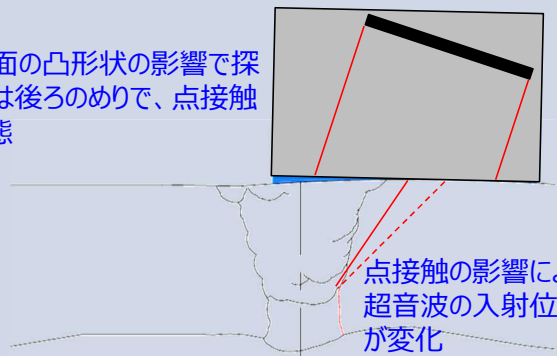
コーナーエコー検出時の想定状況

外表面の凸形状の影響で探触子は後ろのめりの状態



端部エコー検出時の想定状況

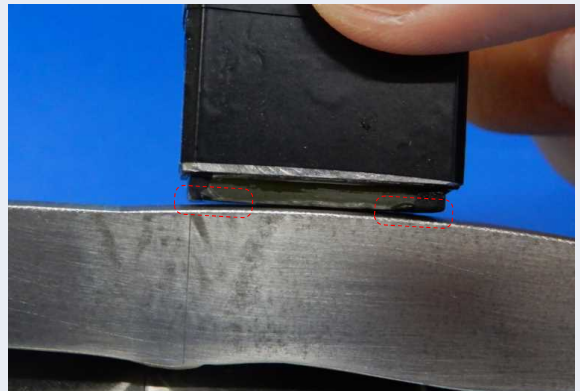
外表面の凸形状の影響で探触子は後ろのめりで、点接触の状態



点接触の影響により超音波の入射位置が変化

シミュレーション

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。

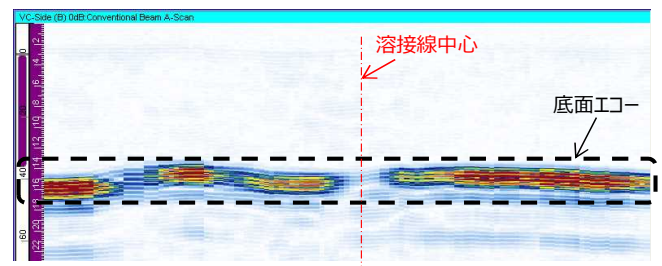
① 評価体制への対策

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。



Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

第3回 外部専門家会議 (2/4)

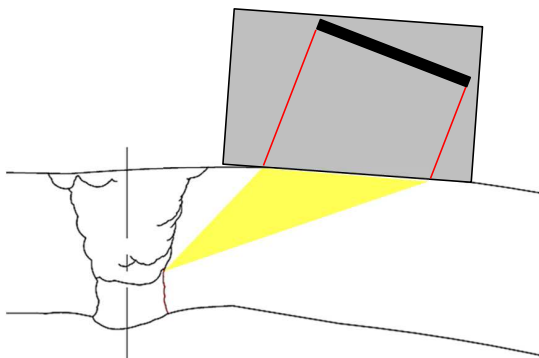
③ UT手法による対策

(1) 探触子設置位置に応じた超音波入射条件の設定

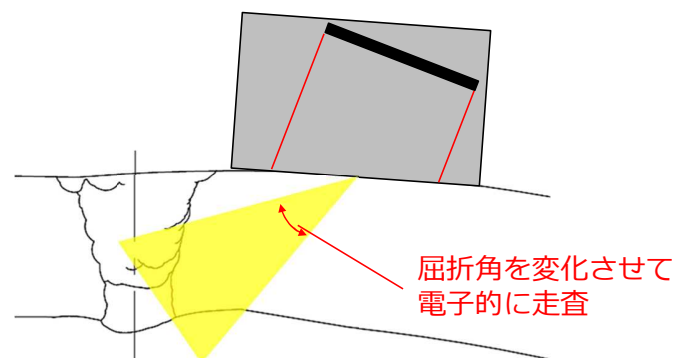
超音波集束条件(管軸方向、板厚方向)を複数準備することにより、外表面形状の影響を受けない位置で探傷可能とする。

(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

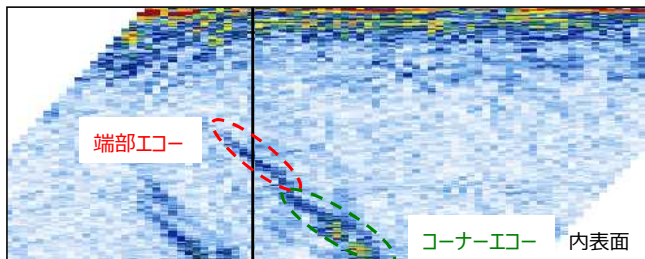


3 (2) セクタ走査による探傷

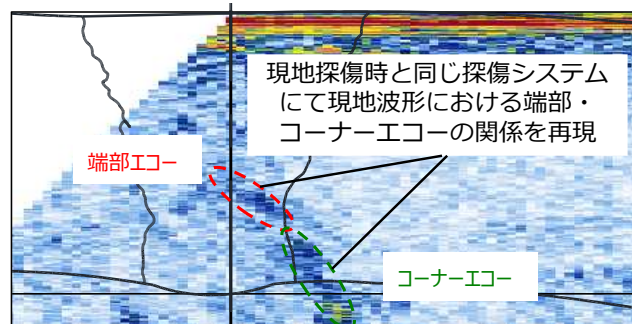
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

SCCを付与したモックアップによる対策の有効性確認

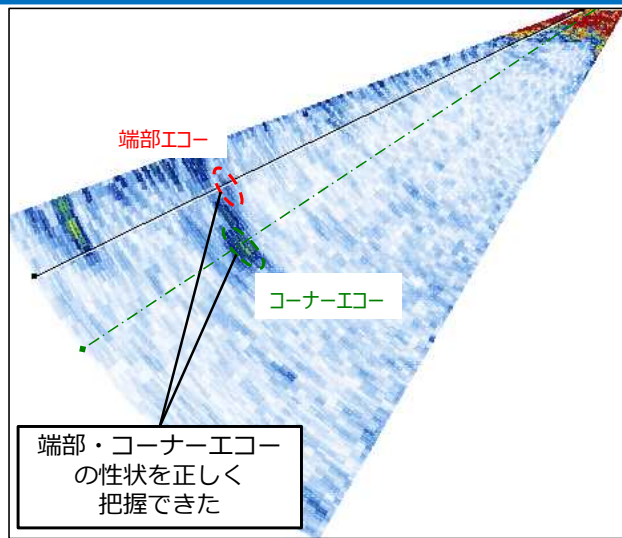
超音波入射条件の見直しを行い、外表面形状の影響が無い探触子位置でセクタ走査によりデータを採取。端部・コーナーエコーの性状を正しく把握できた。



実機SCC検出時の波形(現地波形)

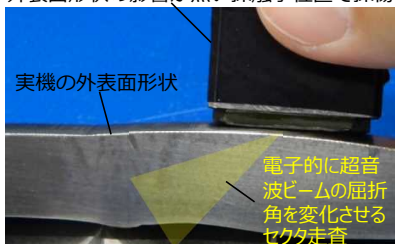


SCC付与モックアップによる現地波形の再現

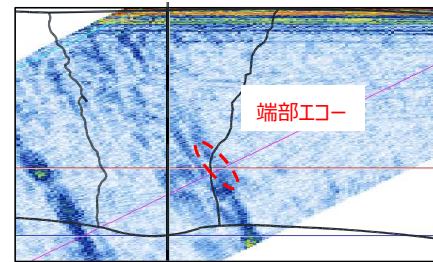


セクタ走査による探傷(SCC付与モックアップ)

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)

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。

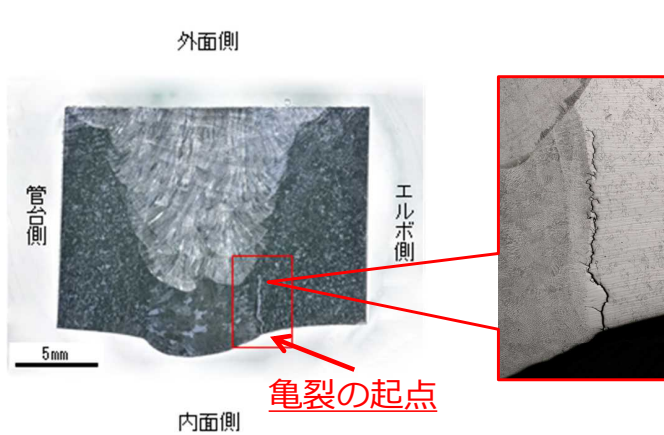
向上策③：UT手法による亀裂性状把握高度化

- 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。
- 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。

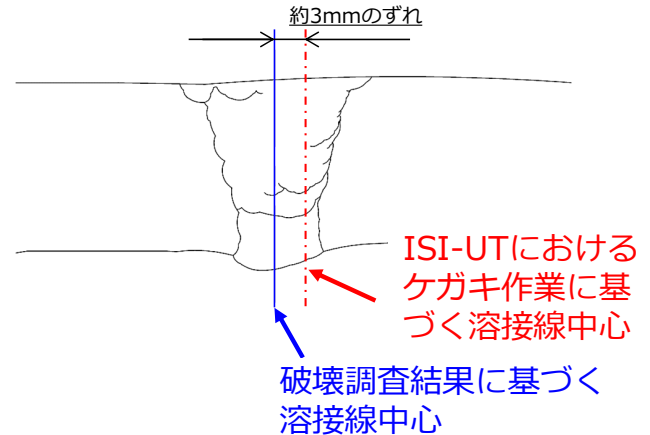
(参考) ISI-UTと破壊調査結果との溶接中心のずれ (1/2)

<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)。

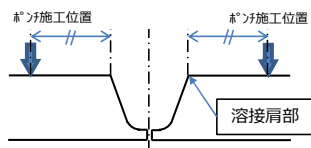


図1-1 ポンチ施工のイメージ

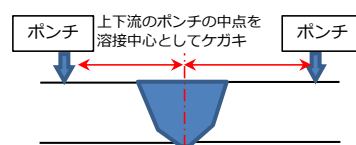


図1-2 ISI-UTにおけるポンチからの溶接中心ケガキのイメージ

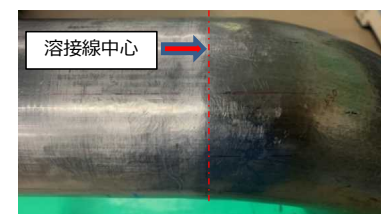


図2 実機配管外表面のイメージ (写真はモックアップ)

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㈱	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㈱	研究部 材料グループ	研究参与	越石 正人
㈱IHI	技術開発本部 技術基盤センター	主査	榊原 洋平
㈱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
㈱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
EBS	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

第20回新規要件に関する事業者意見の聴取に係る会合における主な質疑応答
(発生メカニズムの解明と亀裂有り健全性評価)

(1) 検討体制

- **NRA** : ATENA の中に粒界割れワーキングを作り、その下にサブワーキングを二つ設けたということだが、粒界割れワーキングには、BWR 電力・メーカーも入っている。彼らの位置づけは何か。粒界割れワーキングメンバーは、どのように選ばれたのか。また、電中研¹の役割・位置、外部専門家は、どのような観点から選んだのか。(技術基盤課 佐々木企画調整官)
- **ATENA** : 炉型を超えた視点も取り入れることができるよう、BWR 事業者、メーカーからもメンバーを選定している。サブワーキングは、粒界割れに関する知見のある者を PWR 事業者、メーカーを主体に選定している。電中研は、情報交換等で連携している。外部専門家は、客観的な意見が得られるよう大学、研究機関、素材メーカーから、幅広く選定している。(ATENA 露木)

(2) 他プラントへの水平展開

- **NRA** : 大飯発電所 3 号機で発生した粒界割れと同様の溶接継手形状を持つ部位で、粒界割れの抑制対策が未完了のプラントや機器が残っているのか。(システム安全研究部門 小嶋上席技術研究調査官)
- **ATENA** : 大飯 3 号機のトラブル後に、類似性ありと判断された溶接部に関しては 3 定検の間、毎回検査をすることとしている。LBB の観点からの損傷防止対策としては、PWR の 1 次系は脱気され、溶存水素を加えた環境になっており、SCC を抑制する環境条件になっていた。各電力も類似性のあるところに関しては、検査するという方針で動いている。(ATENA 寺地)

(3) 粒界割れが発生した配管の調査

- **NRA** : 断面マクロ硬さ測定で、裏波幅と硬さの相関を取得するということが、断面数としてどのくらいの数を想定しているのか。(基盤課 藤澤技術参与)
- **ATENA** : 溶接のクレータ部と残り 90°、180°、270° 予定しているが、あくまでも一例で、重要なところはしっかりと対応したい。(ATENA 菊池)
- **JAEA** : PWR の環境中におけるステンレス鋼の粒界割れ事例は非常に少ない。できる限り当該溶接継手を調べたほうが、原因究明には効果的である。(JAEA 李材料・構造安全研究ディビジョン長)

¹ 一般財団法人 電力中央研究所

- **NRA**：断面マクロの硬さは、SCC の板厚方向に向かったの進展速度評価に用いる因子となるのか。(システム安全研究部門 河野主任技術研究調査官)
- **ATENA**：亀裂進展速度線図に関しては、議論が始まっていないレベルだが、EPRI²の有識者と議論をしている範囲では、硬さは進展速度に明確に効いてくるので、硬さのような材料パラメータは外せないものと認識している。配管径と硬さ分布の関係は、過去の研究等で評価できる状況になっている。また、FEM³解析で溶接周辺のひずみ状態が評価できるので、ひずみ量を計算で求めるといことも考えている。(ATENA 寺地)
- **NRA**：表層で 350Hv、内部で 200～240Hv の硬さが確認できたということだが、モックアップ等では再現できなかったという記憶がある。今後、再現実験等の予定はあるのか。(システム安全研究部門 小嶋上席技術研究調査官)
- **ATENA**：モックアップ試験では、確かに 350Hv まではいかなかったが、一部 300Hv を超えており、条件さえそろえば再現できると考える。追加でモックアップ試験を行うことは考えておらず、まずは、今あるものを分析し、理解した上でその次のステップとして必要であれば実施する。(ATENA 佐藤)

(4) 溶接の管理

- **NRA**：過大な溶接入熱の影響について記載されているが、溶接入熱量の定量的な管理について、今後、検討する予定はあるか。(システム安全研究部門 小嶋上席技術研究調査官)
- **ATENA**：正しく溶接できれば過大な入熱にはならないが、当時、溶接士が、丁寧かつ慎重に溶接し、通常よりも多く入熱したという、非常にイレギュラーな事情があった。溶接士に対し、教育、トレーニングを行い、技量のある者だけが実機の溶接を行うよう管理している。(ATENA 佐藤)
- **NRA**：溶接入熱の管理を教育するとあるが、溶接規格の溶接士の資格に取り込まれる等の形で、外から確認できるような形にすることを考えているのか、それともメーカーの社内規定等に展開するような形になるのか、その場合どのように教育していくのか。(技術基盤課 佐々木企画調整官)
- **ATENA**：溶接の技量、入熱管理は、メーカーの技量による。技量を各メーカー身につけて、資格を与え、その溶接士が実機で施工するという流れになる。(ATENA 佐藤)

(5) SCC 進展速度

- **JAEA**：応力腐食割れの進展速度線図の策定を予定しているということだが、平成 16 年の健全性評価等委員会⁴で、BWR の再循環系配管に存在する亀裂につい

² Electric Power Research Institute, Inc

³ Finite Element Method (有限要素法)

⁴ 原子力安全・保安院, “炉心シュラウド及び原子炉再循環系配管の健全性評価について ー検討結果の整理ー”, 経済産業省 (2004).

て熱影響部と溶接金属の2種類の亀裂進展速度を定めた。今回の粒界割れ事象についてはどのような計画か。(JAEA 李材料・構造安全研究ディビジョン長)

- **ATENA:** 溶接部の亀裂進展に関しては、今あるデータを一通り精査した結果、足りない部分が出てきたら、検討をする。(ATENA 寺地)
- **NRA:** SCC 進展特性データの取得とあるが、日本の PWR 環境で実験を実施するのか。(システム安全研究部門 河野主任技術研究調査官)
- **ATENA:** 国内の PWR 条件で不足しているデータがあれば、再度、亀裂進展試験をする認識である。(ATENA 寺地)

(6) 破断前漏洩 (LBB)

- **NRA:** LBB の評価に対する知見拡充で、裕度を明確にするとある。どのようなパラメータの裕度を明確にするのか。(システム安全研究部門 小嶋上席技術研究調査官)
- **ATENA:** 配管が破損しないよう管理するためには、こういったパラメータが必要かを明確にしながらか、亀裂進展や亀裂発生を定量化する。亀裂が進展しても、xLPR⁵に関する議論等によれば、発生した亀裂は必ずしもリスクではないという議論もありうる。全てのパラメータにこういった現象が進行するのかを整理し、その後に裕度を議論するものと認識している。(ATENA 寺地)
- **NRA:** LBB の考え方⁶が適用できるとした上で検討を進めているようにみえるが、粒界割れ事象に対して LBB を適用できるのか。(森下審議官)
- **ATENA:** 配管破損防護設計規格⁷には、損傷防止対策の一つとして脱気が規定されている。酸素条件では SCC が起きやすいが、水素条件では起きにくいという共通認識は PWR でも同様である。今後、フランスでの事例も含め SCC が多く起き得るということであれば、同規格の内容に関する議論が必要と考える。(ATENA 寺地)
- **NRA:** 今の説明ような考え方で良いのか整理していく。(森下審議官)

(7) その他

- **JAEA:** SCC は、環境、材料、応力の三つの因子が重畳して起こる。これらの因子も実機の調査の中で丁寧に調べてほしい。被膜の分析が項目としてあるが、PWR の 1 次冷却材の管理について検討するのか。(JAEA 端副主任研究員)
- **ATENA:** 被膜分析は、透過電子顕微鏡を用いた組織分析を念頭に置いており、

⁵ NRC と EPRI により開発された配管のニッケル合金溶接部等を対象とした確率論的破壊力学解析コード

⁶ 「配管の破断に伴う「内部発生飛来物に対する設計上の考慮」について」(平成4年3月26日 原子力安全委員会了承)には、LBB の前提条件の一つとして、「配管の損傷防止対策として、応力腐食割れ対策及び熱成層の変動現象防止対策が実施されていること。」をあげており、LBB の成立性評価においては「前提条件が満足されていれば、運転中における配管損傷の原因は、疲労によると考えてよい。」としている。

⁷ 日本機械学会 発電用原子力設備規格 S ND1-2002

水化学的な観点というより、亀裂の中の腐食状況を、明らかにする取組である。水の影響の評価までは行わないが、腐食の影響に関しては、細かなデータを取っていけると思う。(ATENA 寺地)

- **NRA:** 初期欠陥は最初の溶接で生じるが、実際に発電所は運転しており初期欠陥の考察を得るのは難しいと思う。見通しを教えてほしい。(森下審議官)
- **ATENA:** 現時点では、より分解能の高い装置で再度確認することを考えている。(ATENA 寺地)

第20回新規要件に関する事業者意見の聴取に係る会合における主な質疑応答
(検査技術の向上)

(1) ATENA レポート

- **NRA** : 検討した内容、特に外部有識者からの意見、ATENAの捉え方、反映し状況に関心があるが、ATENA レポートに記載されるのか。(技術基盤課 佐々木 企画調整官)
- **ATENA** : 外部有識者からの意見やその反映については、過程を残すことを考えている。規制庁とATENAは定例で面談しているので、進捗状況については報告し、必要に応じて、公開会合で意見交換をさせてほしい。(ATENA 露木)

(2) 検査体制

- **NRA** : 第二段階検査として、試験関係者、評価関係者、検査員といった表現があるが、役割と分担を教えてほしい。(システム安全研究部門 河野主任技術 研究調整官)
- **ATENA** : サイジングは、PD 認証⁸を受けた有資格者が行っている。亀裂の性状評価は、検査員が行っており、画像の解釈を誤った。本当に斜めに亀裂が進展するのかの評価は、メーカーと事業者が別の段階で行った。(ATENA 井原)

(3) 亀裂形状の誤認の原因

- **NRA** : B スコープ⁹画像の欠陥先端部の入射点は、溶接中心部に近いところになると思う。欠陥の開口部が分かっている場合、手動で端部エコー法を行うのではないか。画像に引かれたことに対する検証は議論されたのか。(システム安全研究部門 河野主任技術 研究調整官)
- **ATENA** : B スコープ上はコーナーエコーと端部エコーが板厚方向に鉛直に表れるべきところが、探触子のがたつきにより端部エコーの位置が左側にずれ、亀裂が斜めに走ったような表示になり、それを信じたということを、委員にも議論いただいた。(ATENA 井原)
- **NRA** : 幾何学的形状による探触子のがたつきで検出位置が変化する可能性があるという要因は挙げられているが、どこまで細かく検討したのか。(森下審議 官)
- **ATENA** : FT 図¹⁰を作っているが、ノウハウが含まれており、抜粋して示してい

⁸ Performance Demonstration (深さ測定 of 認証制度)

⁹ B スコープ表示、断面表示 : 探触子の一方方向走査による試験体断面探傷におけるきずの断面位置に対応した表示 (試験体の) 厚さ方向の情報を表す (JISZ2300 非破壊試験用語)

¹⁰ Fault Tree Diagram

る。(ATENA 井原)

- **NRA** : ATENA レポートを今後公表するとのことだが、詳細は記載されないということか。(森下審議官)
- **ATENA** : 商業機密に係ることは掲載できない。(ATENA 露木)
- **NRA** : 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の課題として、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」が複合したことで発生したとされている。挙げられている「など」も含めた課題がどこまで整理・分析され、どのように対策されるのか。(専門検査部門 森田上席原子力専門検査官)
- **ATENA** : 外表面の幾何学的形状の影響については、説明したとおりである。超音波の拡がりの影響については、ビームの拡がりがあるため B スコープ上だとピンポイントに表示されないということを述べている。溶接金属部における屈曲の影響は、プローブが端部エコーに近接する際に、溶接金属部に乗るため、溶接の中心より曲がりの影響を受けたのではないかと考える。主因は、外表面の幾何学的形状の影響と理解している。(ATENA 井原)
- **NRA** : 大飯 3 号の亀裂は薄い板厚の 3 分の 1 まで達しており、亀裂の先端から外表面までの距離があまりない。もし、厚い板の部品で小さい欠陥があった場合、屈折角の変化が小さくても距離が延びるので、誤差が大きくなるのではないか。(専門検査部門 森田上席原子力専門検査官)
- **ATENA** : 亀裂が浅く板厚が厚い、起点が溶接部の中心から離れたところに発生した亀裂の場合は、探触子が外表面に密着し、亀裂の進展方向を誤ることはないかと考える。(ATENA 井原)
- **NRA** : がたつきは配管の径方向だけでなく周方向にもあり、実際の接触面積はさらに小さいのではないか。また、探触子を使う場合は、対比試験片を用いて感度校正をするが、対比試験片は通常直管である。エルボのように三次元構造の場合は接触面積が変わってくるので、感度校正と探傷とで反射波の強さが異なると思うが、どのように評価したのか。(技術基盤課 藤澤技術参与)
- **ATENA** : 当時の探触子は、接触面を軸方向にアール加工したもので、配管の周方向への接触は難しかった。接触面を周方向にアール加工して接触するように努めているので、対比試験片はエルボを模擬したものではないが、問題なく検出可能である。(ATENA 井原)

(4) PDF 認証

- **NRA** : 今回の教訓を PD 認証の試験や教育訓練等に取り込んでいくことは考えているのか。深さが測定できているからよいということではなく、検査の精度の向上や様々な形状に対応できるようにするといったことを考えるのは、ATENA ワーキングの役割なのではないか。(技術基盤課 佐々木企画調整官)

- ATENA：検出とサイジングについては適切にできていたが、亀裂性状が誤っていたので、PD 認証や訓練制度に直ちに影響するものではないと思っているが、事象を分析し、まとめたので、PD 認証や訓練制度を議論する場に情報共有したい。(ATENA 木村)

(5) 教育・訓練

- NRA：教育用に、ガイドや要領書を作成するのか。(システム安全研究部門 小嶋上席技術研究調査官)
- ATENA：亀裂の性状評価を行う際の注意点について検査員を含めて教育することを計画している。(ATENA 井原)

(6) 事業者への要求

- NRA：短期的には ATENA から要求事項を出し、長期的には学協会でも必要な規格に反映させるということだが、規制庁は現場の検査等で ATENA の要求文書を見ることになる。要求文書には、位置づけ、内容、適用範囲といったことを記載することが大事と思う。(森下審議官)
- NRA：今日説明を受けて、納得のいかない部分もあった。これから発行される ATENA レポートを読んで結論を出すということになると思う。(技術基盤課 佐々木企画調整官)
- NRA：技術的に確認したい点があるので、面談で説明を受ける必要があると思う。その上で、同じ質疑を現場で繰り返さないように、これから発行される ATENA レポートと、ATENA の要求文書をベースに、規制庁の中で共有するというのが効率的かと思う。(森下審議官)