ATENA23-ME01Rev.0

ＰＷＲ１次系ステンレス鋼配管粒界割れ

超音波探傷試験による
亀裂性状把握手法の向上策について

原子力エネルギー協議会

2023 年 4 月

©Atomic Energy Association 2023

【はじめに】

関西電力株式会社大飯発電所3号機第18回定期検査において，供用期間中検査（ISI）として実施した超音波探傷試験（UT）で，加圧器スプレイライン配管溶接部に亀裂と思われる指示が検出された。検出された指示は，UTによる長さ及び深さ測定が行われ，それらの結果は原子力規制庁に公開会合などを通じて報告されたが，その際に示した亀裂性状は溶接金属を横切って進展しているというものであった。その後，破壊調査で確認された亀裂の長さ及び深さはUTによる測定結果と概ね一致していたものの，亀裂の性状については誤認していたことが判明した。

原子力エネルギー協議会（ATENA）は，粒界割れに関する課題解決を原子力産業界大にて取り組む個別技術課題（テーマ）として選定し，WGを立ち上げ，課題として認識された亀裂の発生メカニズム，亀裂進展の評価及び亀裂性状の検査における誤認について検討を進めてきた。本レポートは，亀裂性状誤認に至る原因及びそれに対する向上策について，現場実態を踏まえ即時適用が可能な知見に基づき取り纏めたものである。

検討にあたっては，日本機械学会 JSME S NA1-2012 発電用原子力設備規格 維持規格やASME BPV Code， Section XI: Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components等にも具体的要領が規定されていなかったこともあり，検査技術に関する外部専門家から，要因分析結果及び向上策の妥当性について技術的な側面からのレビューを受け，透明性及び客観性を高めることとした。外部専門家の皆様にはこの場を借りて御礼申し上げる。

本レポートに示される向上策については，炉型を問わず各事業者が自らの保全に確実に反映するとともに，ATENAは事業者の活動状況について評価を行い，評価結果を各事業者にフィードバックすることで再発防止に繋げていく。

本レポートの情報等の取扱いについては，以下のとおりとする。

（損害賠償責任）

ATENA，ATENA従業員，会員，支援組織等本レポートの作成に関わる関係者（「ATENA関係者」）は，本レポートの内容について，明示黙示を問わず，情報の完全性及び第三者の知的財産権の非侵害を含め，一切保証しない。ATENA関係者は，本レポートの使用により本レポート使用者その他の第三者に生じた一切の損失，損害及び費用についてその責任を負わない。本レポートの使用者は，自己の責任において本レポートを使用するものとする。

©Atomic Energy Association 2023

（権利帰属）

本レポートの著作権その他の知的財産権（「本件知的財産権」）は，ATENA に帰属する。本件知的財産権は，本レポートの使用者に移転せず，また，ATENA の承諾がない限り，本レポートの使用者には本件知的財産権に関する何らの権利も付与されない。

©Atomic Energy Association 2023

改定履歴

改定年月	版	改定内容	備考
2023 年 4 月 28 日	初版	新規制定	

©Atomic Energy Association 2023

目次

1. 序文 ・・・

1.序文

1.1 目的

本レポートは，超音波探傷試験（UT）で亀裂性状を誤認した事象の要因分析を行い，その結果を基に取り組むべき向上策を検討し，事業者の自主的活動に共通対策として取り込まれることを目的として，取り纏めたものである。

1.2 概要

関西電力株式会社大飯発電所 3 号機第 18 回定期検査(2020 年 7 月 20 日開始)において，クラス 1 機器供用期間中検査（ISI）として加圧器スプレイラインの一次冷却材管台と管接手（エルボ部）の溶接部の UT を実施したところ，溶接部近傍に有意な指示が認められた。

検出された指示は，UT による長さ及び深さ測定の結果，長さ 67mm，深さ 4.6 ㎜と推定され，また，その性状については，エルボ側の溶接熱影響部を起点とし，溶接部を横切って反対側の熱影響部まで進展していると推定されていた。

その後の破壊調査で確認された亀裂は，長さ 60 ㎜，最大深さ 4.4 ㎜でありサイジングは適切に行われていたものの，その性状はエルボ側の母材の熱影響部を板厚方向にほぼ垂直に進展していたものであり，亀裂性状を誤認していたことが判明した。

図 1.2-1 に事象の発生箇所，図 1.2-2 に UT による亀裂の推定結果，図 1.2-3 に破壊調査結果概要を示す[参考(1)，(2)，(3)]。

本レポートは，亀裂性状の誤認した事象の要因分析を行い，その結果を基に取り組むべき向上策について報告するものであり，第 2 章では誤認に至った要因分析，第 3 章では要因分析を踏まえた検査技術の向上策を纏めている。

©Atomic Energy Association 2023

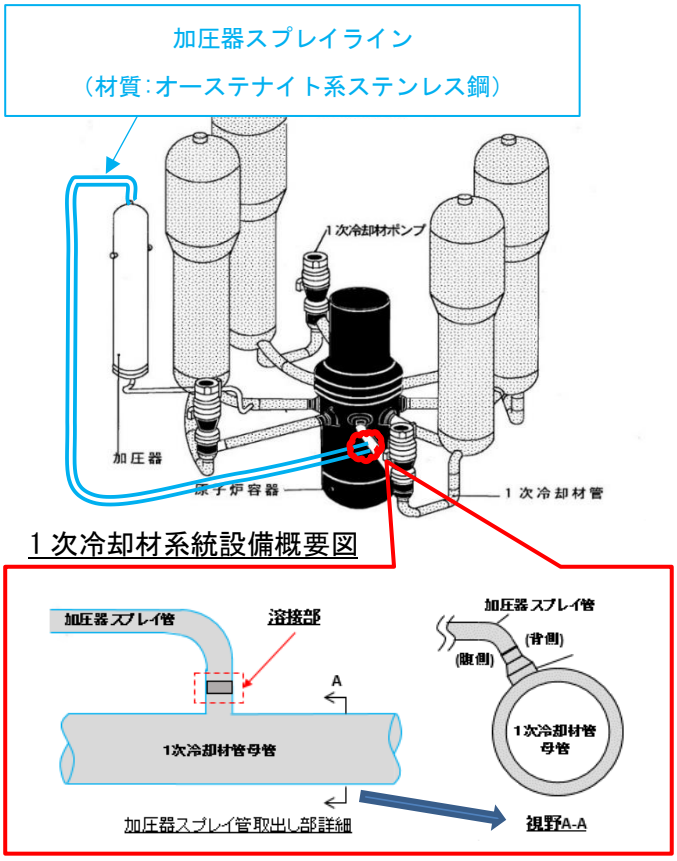


図 1.2-1　発生箇所

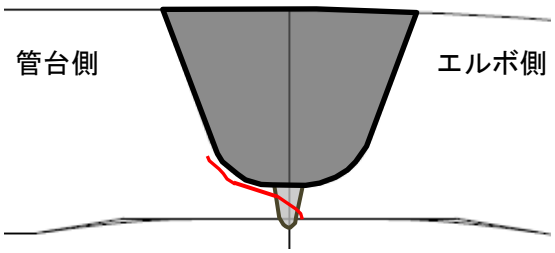


図 1.2-2　UT による亀裂の推定結果
（破壊調査前の推定結果）

©Atomic Energy Association 2023

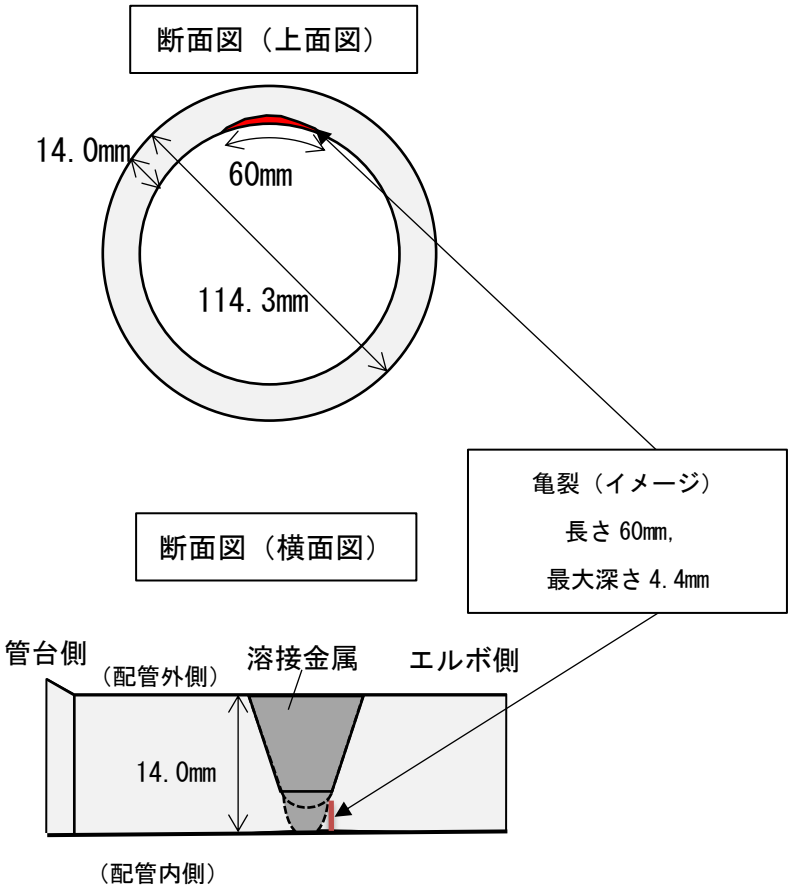


図 1.2-3　実機の破壊調査結果（概形図）

1.3 適用範囲

本レポートは，ISI での溶接部付近の UT 作業において，亀裂の検出，深さ（長さ）測定は別途なされたことを前提とした上で，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に適用する。

1.4 用語の定義

亀裂

破壊力学による評価のため，きずをモデル化したもの。一般に，非破壊検査の結果から判断される不完全部又は意図しない不連続部をきずと称すが，本レポートでは総じて亀裂に統一する。

関係者

亀裂性状把握の UT を実施する試験員と試験評価員

©Atomic Energy Association 2023

Aスコープ，Bスコープ

通常の超音波探傷器では，オシロスコープのように表示器上において水平時間軸に対応する信号の大きさ（振幅）が縦軸に表示される。これを基本表示（Aスコープ）と呼び，試験体の表面上で探触子を走査させて，ある一定のレベルの高さを超える信号データを収集して，断面表示（Bスコープ）によって亀裂の分布状況を調べることが出来る。

なお，本レポートで記載するBスコープについては，特に指定しない限り，探触子を物理的に動かす機械的走査により取得したBスコープを指す。

端部エコー，コーナーエコー

超音波探傷法の一つに，端部エコー法がある。この方法は配管内面に開口した亀裂がある場合に，配管外面から斜め方向に超音波を探傷した際に得られる反射波の信号を検出するものであり，亀裂の起点（今回の場合，配管内表面）からのUTの反射波（信号）がコーナーエコーであり，亀裂先端からのUTの反射波（信号）が端部エコーである。

裏波性状把握

本定義における裏波とは，配管と配管を接続する際に，配管表面から溶接を行い，配管内面(裏面)に形成される整った波形の溶接を示す。この裏波の性状（形状，位置など）を確認することで，開先位置を把握することができ，そこから溶接中心位置を推定出来る。

亀裂性状

亀裂先端及び起点の位置（溶接金属中への亀裂進展有無等を含む）のこと

PD認証制度

UT技術者について，UT装置，手順書と一括したUTシステムの性能実証に関する認証制度。国内においては，オーステナイト系ステンレス鋼配管溶接部に対する，亀裂の深さ測定について運用されている。

倣い性

試験体内部へ各素子の超音波を伝ぱさせるための試験面と探触子の接触状況。なお，その接触状況は，外表面形状，シューの形状，接触媒質等の影響を受ける。

©Atomic Energy Association 2023

2. UT 結果の問題点に対する要因分析

2.1 破壊調査結果を踏まえた UT 結果の問題点

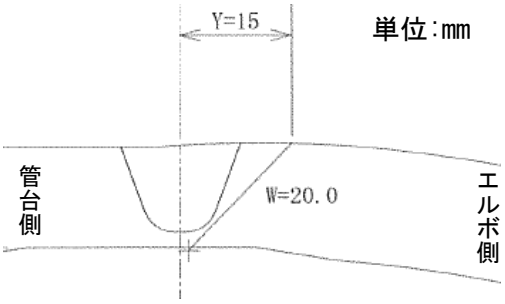
破壊調査で確認された亀裂と，当時，ISI-UT の要領に基づき評価した亀裂について，亀裂の検出，亀裂の長さ測定（第一段階検査）段階における評価を 2.1.1 項に，亀裂の深さ測定（第二段階検査）段階における評価を 2.1.2 項に示す。加えて，追加調査（亀裂性状把握）の位置づけで実施した UT 結果と破壊調査結果を比較・分析した結果を 2.1.3 項に示し，UT 結果が実機破壊調査結果と乖離した問題点について整理した。

2.1.1 UT 指示の検出，長さ測定

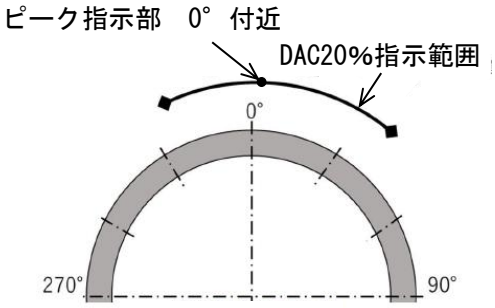
実機において UT を実施した結果，記録レベルである DAC20%を超える指示が認められた。解析の結果，図 2.1-1 に示すとおり，エルボ側の 0 度付近（背側）に UT 指示長さ 67mm の指示が 1 箇所検出された。

現地での UT 結果記録抜粋

指示位置	最大エコー高さ	DAC20%指示範囲
エルボ側(下流側)	DAC176%	67mm



当該指示の解析図



管台側から見た

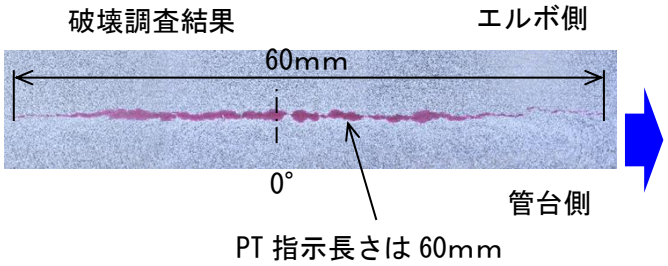
当時の UT 指示の状況
- エルボ側の 0°付近(背側)に指示を検出
- UT 指示長さ(DAC20%指示範囲)は 67mm の指示を検出した

図 2.1-1 UT により検出された指示情報

破壊調査で確認された亀裂は UT で検出された亀裂（ピーク指示部は 0°付近，UT 指示長さが 67 mmの亀裂）であり，それ以外に破壊調査で亀裂は確認できなかった。亀裂長さ測定結果についても，UT による DAC20%指示長さは 67mm であったことに対し，破壊調査で測定した PT 指示長さは 60mm であった。亀裂長さ破壊調査結果を図 2.1-2 に示す。

日本電気協会 JEAC 4207-2016 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程の解説-2720-2 きず長さの測定方法において，「原則として DAC20%指示長さとすることで実際のきず長さに対して保守的に評価することが出来る」と記載されており，当該事象についてもこの傾向に合致しており，亀裂長さ測定は適切に行われたと言える。

©Atomic Energy Association 2023

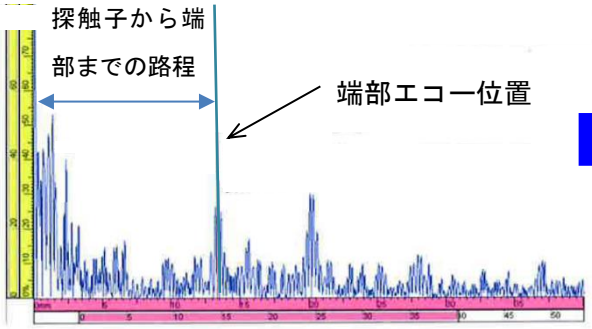


破壊調査結果から判明した事項
・エルボ側の 0° 付近(背側)に亀裂があった。
・内面の PT 指示長さは 60 mmだった。
⇒当時の UT 結果と概ね一致する結果

図 2.1-2 亀裂長さ破壊調査結果（PT 結果）

2.1.2 亀裂の深さ測定

UT による端部エコー位置と亀裂起点近傍の板厚測定結果より，亀裂深さは 4.6mm と判定した。一方，破壊調査から得られた亀裂深さは 4.4mm であった。亀裂深さの UT 結果と破壊調査結果を図 2.1-3，図 2.1-4 に示す。UT による判定値は破壊調査結果から得られた結果と比較しても適切に測定されていた。なお，日本非破壊検査協会 NDIS 0603-2015 超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証 2.6 PD 資格試験結果の評価においては，「UT で測定した SCC 深さと真とする深さの RMSE (Root Mean Square Error) は 3.2mm を超えてはならない」としており，今回の 0.2mm の深さの差についても，PD 認証の合否基準である RMSE 値 3.2mm と比較して精度良く測定できていると評価出来る。



当時の亀裂深さ測定方法
亀裂起点近傍の板厚測定結果から，端部エコー位置に路程と入射角を考慮した端部エコーの深さを差し引き，亀裂深さは 4.6 mmと判定した。

図 2.1-3 亀裂深さ UT 結果（A スコープ）

©Atomic Energy Association 2023

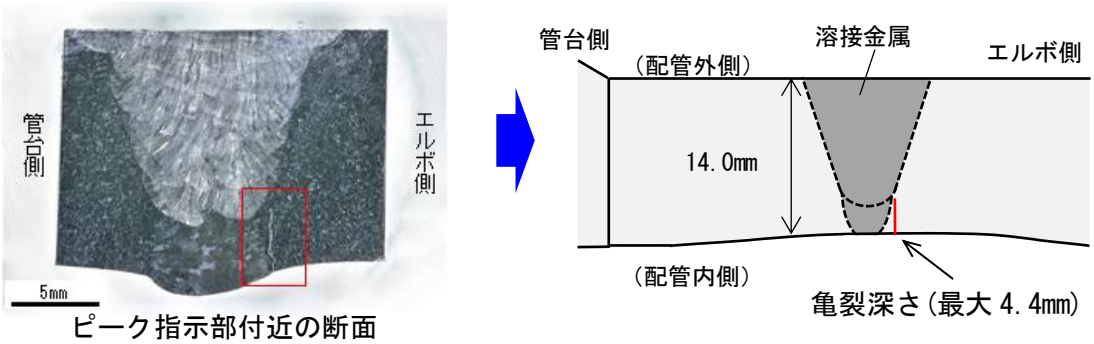


図 2.1-4 亀裂深さ破壊調査結果

2.1.3　亀裂性状の把握

UT 結果では亀裂の先端は溶接部中心より管台側にあるように観測され，亀裂はエルボ側から管台側方向に溶接金属を通過して進展していると推定した。一方で破壊調査の結果，実際の亀裂は溶接金属を通過せず，エルボ側で板厚方向に進展していた。B スコープにおける端部エコー/コーナーエコーの位置関係を図 2.1-5，UT 結果から推定した亀裂性状を図 2.1-6 に示す。なお，維持規格や ASME BPV Code，Section XI においても具体的な亀裂性状評価手法に関する言及はない。

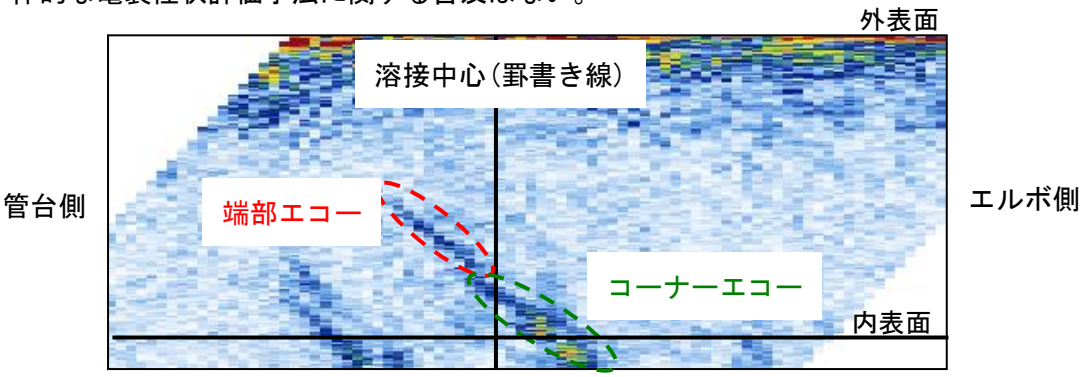


図 2.1-5　実機探傷時の B スコープにおける端部エコー/コーナーエコーの位置関係

©Atomic Energy Association 2023

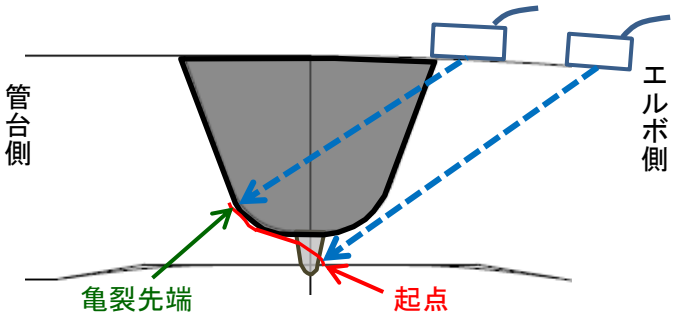


図 2.1-6　UT 結果から推定した亀裂の先端位置及び進展経路
（破壊調査前の超音波の入射イメージを青点線で示す）

亀裂の深さ測定結果と実機探傷時の B スコープを踏まえ，破壊調査前に推定した内容を以下に示す。

・端部エコー指示は，推定した溶接中心位置に対して管台側に表示されていたことから，亀裂先端は管台側にあること
・推定した溶接中心位置と起点の位置関係より，溶接施工断面は図 2.1-6 のような形状になっていること

上記及び亀裂は母材の熱影響部に沿って進展する傾向が高い等の知見及び経験に基づき，亀裂の先端位置と亀裂の進展経路を推定した。（詳細については，2.2.1 項で後述。）

次に，破壊調査結果を図 2.1-7 に示す。破壊調査の結果から，亀裂は溶接金属部には進展しておらず，端部エコーはエルボ側にあること及び溶接金属部の特に初層の形状（母材の溶け込み範囲）が推定と異なっていることがわかった。

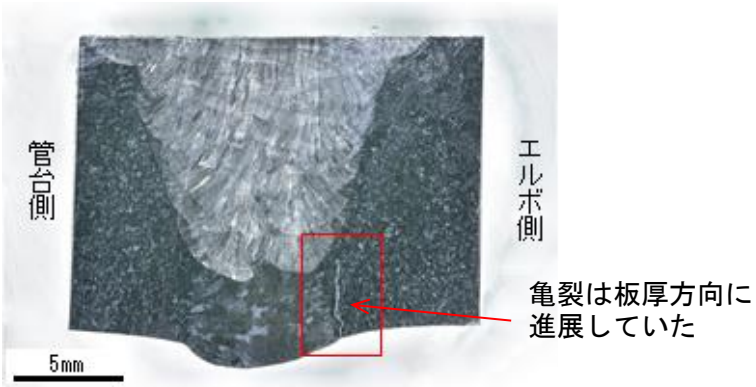


図 2.1-7　破壊調査結果（ピーク指示部付近）の断面

©Atomic Energy Association 2023

2.2 要因分析

2.1 項に記載のとおり，亀裂の検出，長さの測定及び深さ測定については適切に測定されている一方で，亀裂性状については事前の想定と破壊調査結果に相違があった。本件に関する要因分析として，FT 図を用いて大分類として要因，さらに各要因を細分化した因子に展開して分析した。そして，各因子が UT による亀裂性状把握に影響する可能性を考察し，関連するか否かについて判定した。その FT 図を，図 2.2-1 に示す。

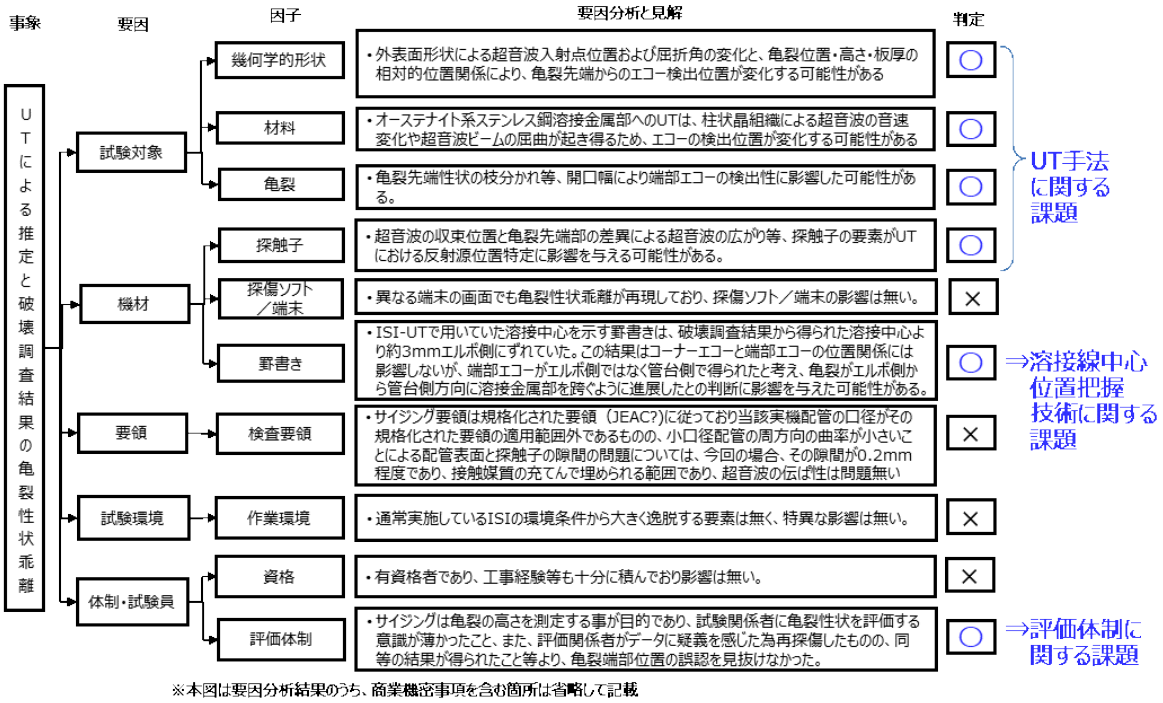


図 2.2-1　UT 結果に影響する主要な要因・因子・要因分析と見解

2.2.1　技術的要因に関する分析

大分類である要因として，試験対象，機材，要領，試験環境，体制・試験員に分類した。さらに各要因を UT による亀裂性状把握に影響する可能性が考えられる因子に細分化し，個々について要因分析と見解を整理した。その上で，本事象に関連するか否かについて判定した。関連する項目について以下説明する。

（1）試験対象について

①幾何学的形状については，外表面の傾きや凸凹の存在により探触子が水平から傾くことによる超音波入射角の変化と，外表面の影響を受け探触子が浮くことで合成波の入射位置が変化する等，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ことから，関連する因子と判定した。

特に，探触子の一部が浮き上がった場合については，複数の素子から構成されるフェ

©Atomic Energy Association 2023

ーズドアレイ探触子の全素子が検査対象物に接触している場合と外表面の傾きや凸凹の存在により前方の一部の素子が浮いた場合とでは，管軸方向に数mm単位で端部エコーの位置がずれる可能性がある。その結果，B スコープでは図 2.2-2 に示す理想的な合成波の入射位置から超音波が入射し，端部エコーが管軸方向にずれたように表示された可能性がある。

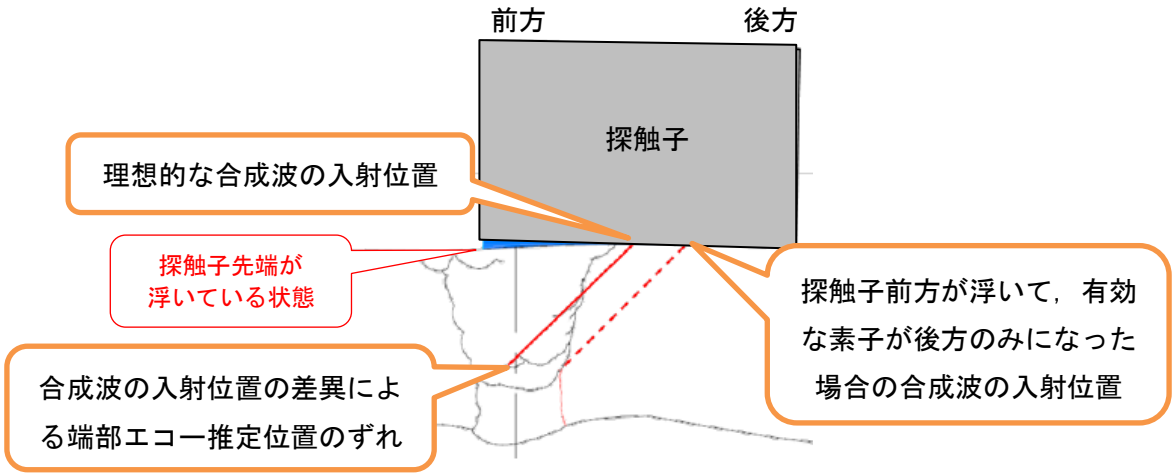


図 2.2-2　幾何学的形状による合成波の入射位置と路程の影響（イメージ）
（実線：理想的な合成波の入射位置と路程，
破線：探触子の前方が浮いた場合の合成波の入射位置と路程）

②材料については，オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属部への UT は，図 2.2-3 に示すとおり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ことから，関連する因子と判定した。

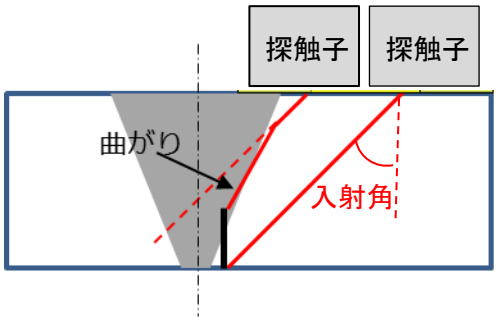


図 2.2-3　溶接金属部の影響による超音波ビームの屈曲（イメージ）

③亀裂については，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ことから，関連する因子と判定した。

©Atomic Energy Association 2023

（2）機材について

①探触子については，図 2.2-4 に示す超音波の集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ことから，関連する因子と判定した。

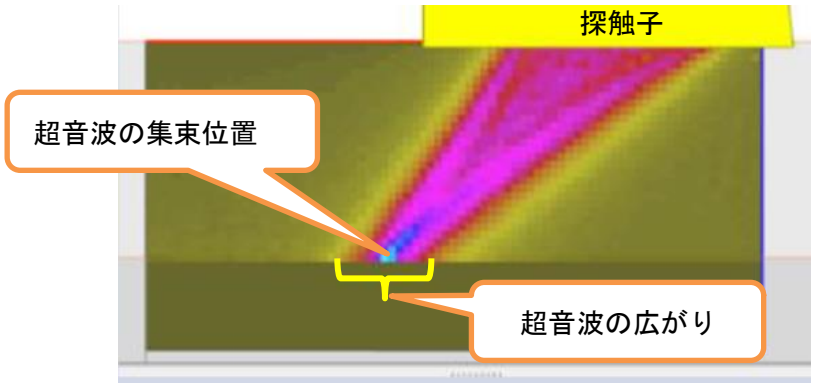


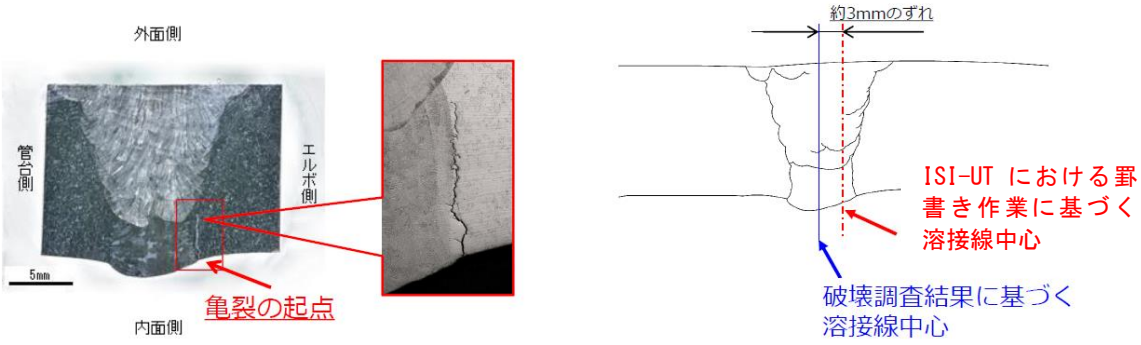
図 2.2-4　超音波の広がり（シミュレーション画像）

②探傷ソフトは，PD 認証時に使用したものと同じバージョンであることを確認した。端末については，使用した端末とは異なる端末においても亀裂性状乖離が再現しており，端末の影響はないことを確認したことから，関連する因子ではないと判定した。

③ISI-UT で用いていた溶接中心を示す罫書きは，破壊調査結果から得られた溶接線中心位置より約 3mm エルボ側にずれていた。この溶接線中心位置のずれについて，図 2.2-5 に示す。今回の場合，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したが，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た可能性がある。このずれは，コーナーエコーと端部エコーの相対位置関係には影響しないが，以下の判断に影響を与えた可能性があると考え，関連する因子と判定した。

・端部エコーがエルボ側ではなく管台側にあると考え，亀裂がエルボ側から管台側方向に溶接金属部を横切って進展した判断

©Atomic Energy Association 2023



破壊調査による当該部断面写真　　ISI-UT における罫書きと破壊調査結果の比較

図 2.2-5　溶接線中心位置のずれ

(3) 要領について

検査要領について，亀裂性状把握にも PD 認証に用いたサイジング要領を適用し，端部及びコーナーエコー自体はいずれも明確に検出されていることもあり，要領自体は関連する因子ではないと判定した。なお，配管と探触子の周方向の隙間は 0.2mm 程度であったが，モックアップ試験により超音波の伝ぱ性は問題ないことを確認している。(なお，管軸方向の亀裂先端位置も推定する必要がある亀裂性状把握に，亀裂の高さ測定を目的としたサイジング要領をそのまま適用することと判断した人的要因に関しては 2.2.2 項の対象とした。)

(4) 試験環境について

作業環境については，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なく，特異な影響はないことから，関連する因子ではないと判定した。

2.2.2　人的要因に関する分析

要因として，体制・試験員に分類される因子を展開し，個々について要因分析と見解を示し，本事象に関連するか否かについて判定した。

(1) 体制・試験員について

①試験員の資格については，UT の有資格者であり，亀裂高さの把握はできており，工事経験等も十分積んでいることから，関連する因子ではないと判定した。なお，性状把握に関する力量については 2.2.2 章(1)②の対象とした)。

②評価体制については，サイジングは亀裂の深さを測定することが目的であったため，関係者に亀裂性状を把握する意識が薄く，亀裂性状把握をする際に亀裂端部の管軸方向の

©Atomic Energy Association 2023

位置把握が特に重要になるとの認識や，その位置把握に影響を及ぼす要因等の知見が十分でなかったことなどから，関連する因子と判断した。

2.3 UT による亀裂性状把握の課題抽出結果

要因分析の結果から抽出された課題を，以下の３つに整理した。参考(4)，(5)，(6)，添付(1)

(1) 評価体制に関する課題（知識・教育・訓練の観点）（2.2.2（1）②）

2.2.2（1）②項に記載のとおり，主要課題のひとつと整理した。

(2) 溶接線中心位置把握技術に関する課題（検査対象の観点）（2.2.1（2）②）

2.2.1（2）②項に記載のとおり，主要課題のひとつと整理した。

(3) UT 手法に関する課題（試験実施・要領の観点）（2.2.1(1)①②③，2.2.1(2) ①）

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，外表面形状による超音波入射角の変化と探触子の超音波入射点の位置の変化等の幾何学的形状の影響や，溶接金属部による超音波の屈曲の影響，亀裂先端形状による端部エコーの検出性への影響，超音波の拡がりの影響を含む要因による影響を受けて発生したと考え，UT 手法に関する課題として整理した。

2.2.1(1)項で述べたとおり，幾何学的形状に起因する管軸方向のずれについては，mm単位での影響が考えられることから，外表面形状による探触子の超音波入射点の位置の変化，及び超音波入射角の変化について，幾何学的にずれる量を評価した。

はじめに，外表面形状による探触子の超音波入射点の位置の変化について評価する。合成波の入射位置とそれに伴う路程の変化に関するイメージ図を図 2.3-1 に示す。図 2.3-1 に示すとおり，探触子は外表面の形状にあわせて前方が浮いた状態となっていた。探触子前方が浮くことにより，理想的な合成波の入射位置と探触子前方が浮いた場合の合成波の入射位置は管軸方向にずれることとなる。そのずれる量は，全素子のうち後方側の約半分の素子のみ配管と接触している形状であったことから，管軸方向に約 3 mmずれると推定された。

次に，超音波入射角の変化について評価する。図 2.3-1 に示すとおり，外表面は水平に対して約 3°傾いており，この状態で探触子を当てた場合，超音波入射角も約 3°程度ずれることとなる。これにより，管軸方向には幾何学上の簡易計算から約 0.5mm 程度ずれる。

©Atomic Energy Association 2023

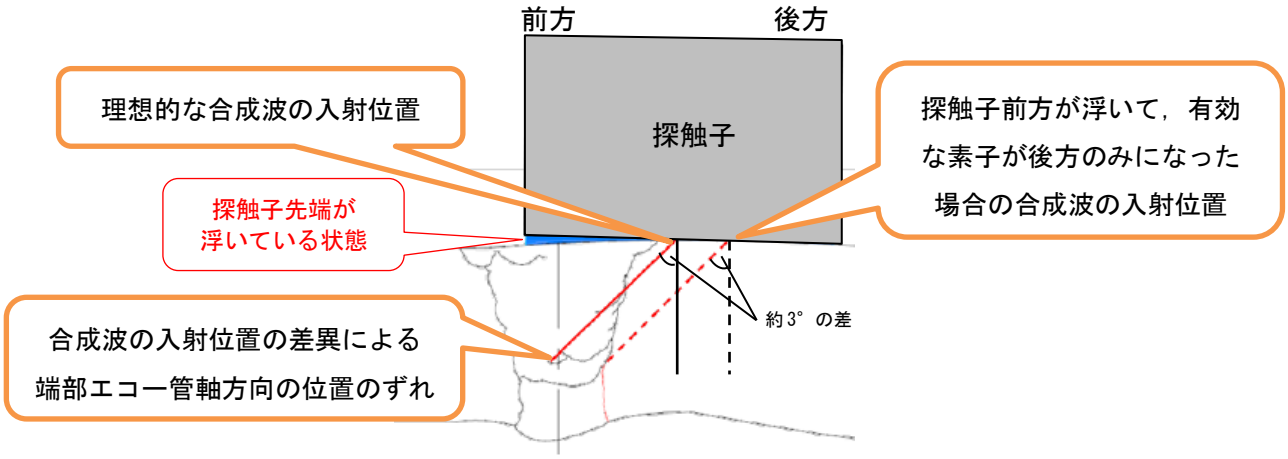


図 2.3-1　幾何学的形状の影響を受けた合成波の入射位置と路程の影響（イメージ）
（実線:理想的な合成波の入射位置と路程，
破線: 探触子の前方が浮いた場合の合成波の入射位置と路程）

幾何学的形状以外の要因に関して，まず，溶接金属部による超音波の屈曲の影響が考えられる。路程に溶接金属部がある場合には，超音波の音速が溶接金属部で変化するなどの影響があるが，破壊調査の結果，路程は母材に限られ，溶接金属部の透過は殆どないことから，管軸方向の位置ずれに与える影響はほぼないと考えられる。

次に，亀裂先端形状による端部エコーの検出性への影響，及び超音波の拡がりの影響によるずれについては，端部エコーが不鮮明になるものの，これらの要因が管軸方向の位置ずれに与える影響はほぼないと考えられる。

以上を踏まえ，本事象における管軸方向の端部エコーのずれる量について，要因ごとに整理した結果を表 2.3-1 に示す。ここで，実際の管軸方向のずれ約 4mm に対して，幾何学的形状に起因する管軸方向のずれが約 3.5mm であり，その中でも理想的な合成波の入射位置と探触子前方が浮いた場合の合成波の入射位置の管軸方向のずれが約 3mm あることから，本事象の支配的要因であると考える。

©Atomic Energy Association 2023

表 2.3-1　本事象における管軸方向の端部エコーのずれ要因とずれる量

<table>
<tr><th colspan="2">要因</th><th>本事象における管軸方向の端部エコーのずれる量</th><th>実際の管軸方向のずれ</th></tr>
<tr><td rowspan="2">幾何学的形状に起因するずれ</td><td>探触子前方が浮いた場合の合成波の入射位置の管軸方向のずれ</td><td>約 3 ㎜</td><td rowspan="5">約 4㎜</td></tr>
<tr><td>外表面形状による超音波入射角の変化によるずれ</td><td>約 0.5 ㎜</td></tr>
<tr><td colspan="2">溶接金属部による超音波の屈曲の影響によるずれ※</td><td>破壊調査の結果，路程は母材に限られ，溶接金属部の透過は殆どないことから，管軸方向位置ずれへの影響はほぼない</td></tr>
<tr><td colspan="2">亀裂先端形状による端部エコーの検出性への影響によるずれ※</td><td>端部エコーが不鮮明になるものの，管軸方向の位置ずれへの影響はほぼない</td></tr>
<tr><td colspan="2">超音波の拡がりの影響によるずれ※</td><td>端部エコーが不鮮明になるものの，管軸方向の位置ずれへの影響はほぼない</td></tr>
</table>

※「影響はほぼない」と評価した 3 要因について，合計しても 0.5 ㎜程度と評価

©Atomic Energy Association 2023

3. 課題への対応案

2.3 章で整理した UT による３項目の亀裂性状把握の課題抽出結果それぞれに対して本章で対応案を検討した。

（1）評価体制への対応案

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ため，亀裂性状把握をする際に亀裂端部の管軸方向の位置把握が特に重要になることを認識出来るよう教育する。さらに試験評価員に対しては，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及び向上策について理解させる。

例えば，探触子の倣い性悪化によって B スコープ表示上のエコー位置と実亀裂の位置に乖離が生じることから，倣い性を把握し，適切な位置からの超音波入射を行う重要性を理解させる。特に，フェーズドアレイ探触子のすべてが倣い性良く検査対象物に接触している場合と，外表面形状に依存して前方の一部の探触子が浮いた場合とでは，合成された超音波の入射位置の変化として数mm単位でずれる可能性があり，その結果，B スコープで表示した際に管軸方向の位置ずれを生じる主要因の可能性があることを理解させる。

（2）溶接線中心位置把握に関する対応案

溶接中心位置のずれについて，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 3 mm程度の誤差が生じる可能性がある。このため，亀裂性状を把握する際に上記の誤差を回避可能なデータ採取方法で，詳細な溶接線中心位置の把握を行う。一例として，垂直探傷の B スコープ画像を用いて溶接線中心位置を把握する手法がある。その際，JEAC4207 に記載されている推奨値 2.5mm のピッチで行った場合，今回発生した 3mm 程度の誤差が発生する可能性があるため，より細かいピッチでデータを取得する。疑義が生じる場合には，図面情報から開先形状の公差を確認したり，斜角探傷をしたりするなど，判断に寄与すると考えられる情報を必要に応じて取得した上で，総合的に亀裂性状を把握する。

垂直探傷の B スコープ画像から溶接線中心位置を把握する例を図 3.1-1 に示す。

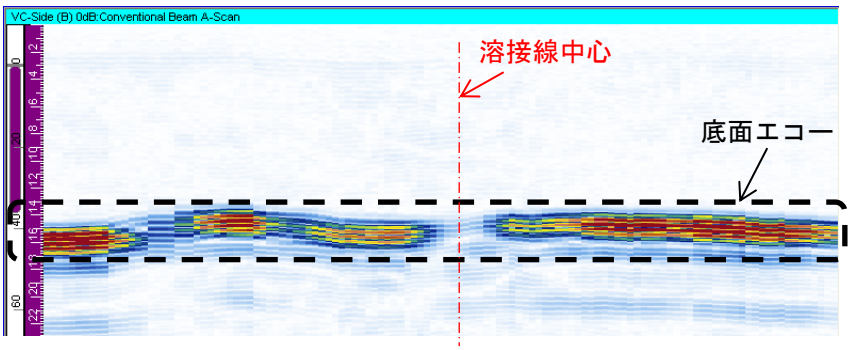


図 3.1-1 垂直探傷の B スコープ画像から溶接線中心位置を把握する例

©Atomic Energy Association 2023

(3) UT 手法に関する対応案

今回の亀裂性状誤認を引き起こした管軸方向の端部エコーのずれに対しては，2.3 項で整理したとおり，主要因である外表面形状による探触子の浮きや傾きを回避することが望まれる。

探触子の浮きの対策として，倣い性の良い探触子設置位置から探傷し，探触子設置位置に応じた超音波入射条件を設定した B スコープを取得し(①)，あわせて，セクタ走査による探傷結果を取得する(②)。また，探触子の傾きの対策として，外表面形状をもとに判定した探触子の傾きを考慮して(③)，取得した B スコープ画像やセクタ走査画像の亀裂の起点及び先端の位置を比較して亀裂性状が同等であることを確認し，総合的に亀裂性状を把握する。

① 探触子設置位置に応じた超音波入射条件の設定

倣い性の良い探触子設置位置を選定し，その位置と想定した亀裂の起点及び先端位置に応じた入射角及び超音波集束条件（管軸方向，板厚方向）を準備し，B スコープ画像を取得する。倣い性の良い探触子設置位置からの探傷イメージを図 3.1-2，倣い性の良い探触子設置位置（改善後の位置）からの探傷結果を図 3.1-3 に示す。

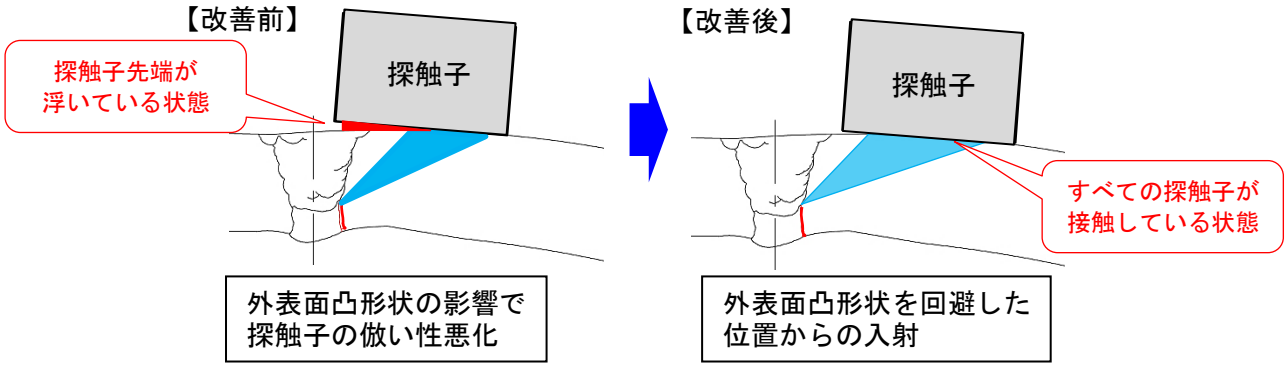


図 3.1-2 倣い性の良い探触子設置位置からの探傷イメージ

©Atomic Energy Association 2023

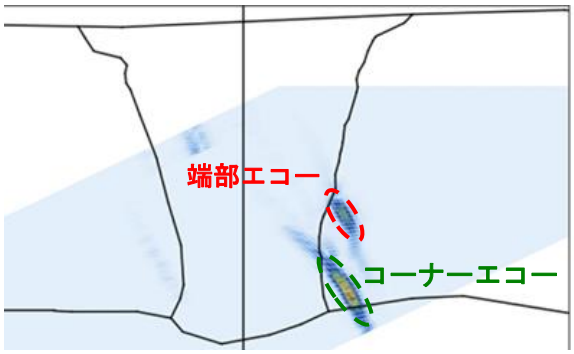


図 3.1-3　倣い性の良い探触子設置位置（改善後の位置）からの探傷結果
（EDM スリットを模擬したシミュレーション）

② セクタ走査による探傷

倣い性の良い探触子設置位置で，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を利用し，亀裂性状の把握を行う。セクタ走査による探傷イメージを図 3.1-4 に示す。

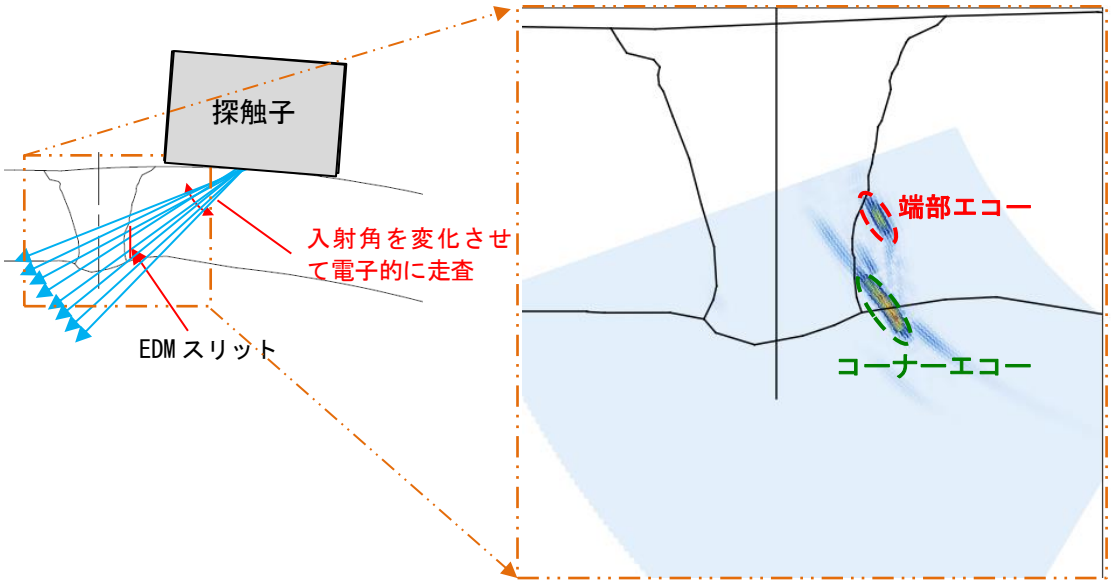


図 3.1-4 セクタ走査による探傷イメージ
（EDM スリットを模擬したシミュレーション結果）

©Atomic Energy Association 2023

③ 外表面形状を考慮した反射源位置の推定

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。その考慮前後のイメージ図を図3.1-5に示す。

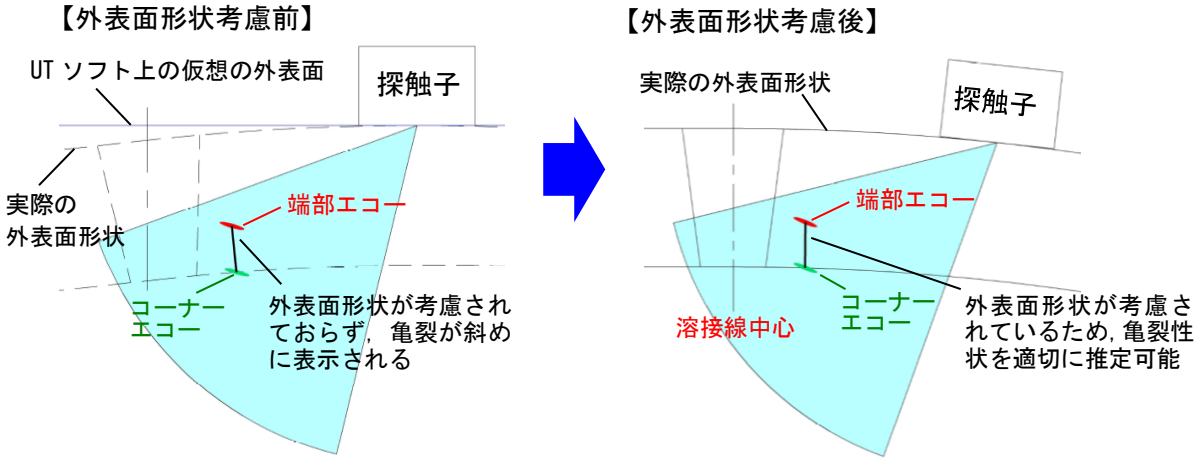


図3.1-5 セクタ走査結果に外表面形状を考慮した探傷イメージ

©Atomic Energy Association 2023

4. まとめ

UT による推定と，破壊調査により得られた亀裂性状に差異が生じた原因を抽出し，対応案を検討した結果，評価体制への向上策，溶接線中心位置把握技術に関する向上策，UT 手法による向上策を抽出した。

今回，特に倣い性の影響により管軸方向の端部エコーにずれが生じたことを踏まえ，溶接部近傍で UT による亀裂性状把握を実施する際には，以下の向上策について実施する必要があると考える。

あわせて，今回の事象に関連する規格・基準を扱う学協会へ，情報を提供する。

向上策（1）：関係者に対する今回の UT 結果に関する教育（評価体制への対応）

亀裂性状把握作業が必要となった際において，試験員と試験評価員は，倣い性等，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，教育資料等[添付(2)]にて起因となった事象，要因，向上策を理解した上で，UT 作業に従事する。

向上策（2）：溶接線中心位置推測の高度化

あらかじめ溶接前に施工されたポンチ等により溶接中心位置を推測する手法では，開先部の形状寸法公差や，罫書き加工のばらつき等の積み上げによる誤差があり得る。そのため，それら誤差の影響を受け難いデータ採取手法との併用等により，総合的に溶接中心位置を推測する。

（例）垂直探傷の B スコープ画像により裏波性状把握を行い，そのデータを参考にしながら，総合的に溶接線中心位置を判断する，等。（留意点は 3 章(2)項参照）

向上策（3）：UT 手法による亀裂性状把握の高度化

B スコープ画像により亀裂性状把握を行う場合は，亀裂の起点及び先端を UT で捉え，適切に位置関係を表せるように以下の項目を実施することとする。

a) 倣い性の良い探触子設置位置を選定し，その位置と想定した亀裂の起点及び先端位置に応じた入射角及び超音波集束条件（管軸方向，板厚方向）を準備し，B スコープ画像を取得する。

b) 上記とは別の倣い性が良い探触子設置位置からセクタ走査画像を取得する。
なお，探触子設置位置が限られる場合には，上記の B スコープ画像を取得した位置からセクタ走査画像を取得しても良い。

c) a)及び b)で取得した 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起点及び先端の位置を推定する。

d) c)において，亀裂の起点及び先端の位置を比較して亀裂性状が同等であることを確認し，総合的に亀裂性状を把握する。

©Atomic Energy Association 2023

e)亀裂性状が同等でない場合には，別の倣い性が良い探触子設置位置から上記 a)，b)を実施し，複数で同じ位置が示されるなどの判断により，総合的に亀裂性状を把握する。

向上策（3）の中で，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が望ましい。

なお，B スコープ画像やセクタ走査画像の代替となる検査方法や検査要領が今後考案された場合は，その適切性を事業者にて十分確認した上で ATENA に報告することとし，ATENA は必要に応じてその内容をレポートに反映する。

これら向上策(1)～(3)の適用により得られた結果を総合的に判断することで，亀裂性状把握のさらなる信頼性向上が期待出来る。

©Atomic Energy Association 2023

5. あとがき

大飯3号機で確認された粒界割れのうち，亀裂性状把握に関する課題解決を原子力産業界大にて取り組む個別技術課題（テーマ）として検討した結果，原因及びそれに対する向上策について，現状知見に基づき取り纏めた。

本レポートの向上策としては考慮していないものの，今回の課題の解決に関連する技術，具体的には表面形状を把握する技術として，例えば型取り材を用いたレプリカ作成による方法やレーザスキャン等がある。これらを活用することにより表面形状の把握は可能となるが，今回の事象の主要因と考えた探触子の浮きの状態がないことを直接的に判断するには更なる技術向上が求められる。

また，より高度な非破壊検査技術としてはFull Matrix Capture / Total Focusing Method（FMC/TFM）等の先進技術もあるが，フェーズドアレイによる探傷技術と同様，探触子の倣い性が良い場所から探傷することを前提とした技術であり，また，実機への適用には規格整備やオーステナイト系ステンレス鋼が難透過材であることによる厚板への超音波透過性といった課題が残っている。

本レポートでは，現場実態を踏まえて，現状知見に基づいた即時適用が可能な向上策について整理したが，記載した向上策を行ったとしても，UT誤差要因を含みながら評価する必要がある。そのため，上記のような検査技術の開発・進歩は日々行われるべきものであり，それらの開発状況や実機適用等について注視していく。

©Atomic Energy Association 2023

6. 添付資料

(1) 原子力エネルギー協議会，検査技術に関する外部専門家会議
開催実績及び主な議論（第 1 回～第 4 回）

(2) 原子力エネルギー協議会，UT 関係者向け　周知教育テキスト（2023 年 4 月）

7. 参考資料

(1) 原子力規制庁　公開会合資料（2020 年 9 月 11 日）
「大飯発電所 3 号機加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示について」
関西電力株式会社，資料 1-2，p1～p.23
https://www.nra.go.jp/data/000326951.pdf

(2) 原子力規制庁　公開会合資料（2020 年 9 月 18 日）
「大飯発電所 3 号機加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示について」
(9 月 11 日公開会合における指摘事項の回答)，関西電力株式会社，資料 1-1，p1～p.22
https://www.nra.go.jp/data/000327918.pdf

(3) 原子力規制庁　公開会合資料（2020 年 12 月 4 日）
「大飯発電所 3 号機加圧器スプレイライン配管溶接部の超音波探傷試験による亀裂の形状想定と実機調査結果に関する考察について」，関西電力株式会社，資料 1-2
https://www.nra.go.jp/data/000336282.pdf

(4) 原子力規制庁　公開会合資料（2022 年 6 月 24 日）
「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
https://www.atena-j.jp/dialogue/docs/e8f853c766be5a0f179abbffe388fc14cc2faba7.pdf

(5) 原子力規制庁　面談資料（2022 年 8 月 18 日）
原子力エネルギー協議会，資料 1～4
https://www.da.nra.go.jp/view/NR100085525

(6) 原子力規制庁　面談資料（2022 年 10 月 7 日）
原子力エネルギー協議会，資料 1～2
https://www.da.nra.go.jp/view/NR100088681

©Atomic Energy Association 2023

略語集

略語	和名	名称
DAC	距離振幅補正	Distance Amplitude Correction
DAC%	DACに対するエコー高さのパーセント値	Distance Amplitude Curve %
EDM	放電加工	Electrical Discharge Machining
FMC/TFM	フルマトリックス取得とトータルフォーカス方式（アレイプローブによる開口合成法）	Full Matrix Capture and Total Focusing Method
FT	フォルトツリー	Fault Tree
ISI	供用期間中検査	In-Service Inspection
PD	性能実証	Performance demonstration
PT	浸透探傷試験	Liquid Penetrant Testing
RMSE	二乗平均平方根誤差	Root Mean Square Error
SCC	応力腐食割れ	Stress Corrosion Cracking
UT	超音波探傷試験	Ultrasonic Testing
WG	ワーキンググループ	Working Group

©Atomic Energy Association 2023

添付資料１

©Atomic Energy Association 2023

検査技術に関する外部専門家会議

1. 概要及び構成

検査技術に関する外部専門家会議を設置し，会議の構成は以下に示す委員及びオブザーバ，事務局から構成した。外部専門家委員の名簿を表1に示す。なお，主査については第１回会議の冒頭で互選にて，東北大学三原毅教授が選出された。

・ 委員 ：外部専門家（大学，試験・研究機関）
・ オブザーバ：電気事業者，ATENA，プラントメーカー（三菱重工）
・ 事務局 ：電力中央研究所

表 1 検査技術に関する外部専門家会議名簿

	所属	役職等	氏名
主査	東北大学　大学院工学研究科 及び高等研究機構新領域創成部	教授	三原 毅
委員	（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 及び高等研究機構新領域創成部	准教授	小原 良和
	日本原子力研究開発機構（JAEA） 安全研究センター 材料・構造安全研究ディビジョン	ディビジョン長	李 銀生

2. 開催実績

会議の開催実績と主な議論は以下のとおりである。

(1) 第1 回検査技術に関する外部専門家会議

開催日時：令和3 年10 月11 日 10:00～12:15
開催形式：Webex によるオンライン
主な議事；本会議の趣旨説明
委員の確認，主査選出
大飯 3 号機の事例についての紹介
今後の方針について

(2) 第2 回検査技術に関する外部専門家会議

開催日時：令和3 年11 月22 日 13:30～16:30
開催場所：会議室 及びWebex によるオンライン
主な議事；前回議事録確認

©Atomic Energy Association 2023

第 1 回会議でのコメントへの対応について
今後の方針について

(3) 第3 回検査技術に関する外部専門家会議
開催日時：令和3年12月23日 13:30～15:00
開催形式：Webexによるオンライン
主な議事；前回議事録確認
対策の方針について
今後の予定

(4) 第4 回検査技術に関する外部専門家会議
開催日時：令和4 年1月26日 13:30～15:15
開催場所： Webexによるオンライン
主な議事；前回議事録確認
報告書案の審議

3. 主な議論

外部専門家会議において議論された主な事項を以下にまとめる。

3.1 論点について

本事象は何が問題であるのか，何が解決すべき課題であるのかといった論点に関する議論は，第1回から第3回までの議論でたびたび話題となった。本会議での結論は以下のとおりである。

・きず検出：切断調査で確認されたきずはUT で検出されたきずであり，それ以外に切断調査できずは確認できなかったことから，本調査の範囲では適切に検出できていたと言える。

・きず長さ測定：一般的に言われている，UT によるDAC20%指示長さは，実際のきず長さを概ね過大評価となることに合致しており，きず長さ測定は適切に行われたと言える。一方で亀裂進展評価にはきず長さも重要な情報であることも指摘された。

・きず深さ測定：きず深さは概ね適切に測定されており，PD 認証[5]の合否基準と比較しても精度良く測定できている。

・亀裂性状：亀裂性状は，事前の想定と切断調査結果に相違があり，亀裂性状の誤認が主な論点である。亀裂性状を誤認したという事実に加えて，従来知見にはない溶接金属を"横切って"進展するきずであるという誤認した情報が外部にそのまま報告されたという事実も主な論点である。

3.2 原因分析について

亀裂性状誤認につながった要因について，要因分析図（Fault Tree Diagram，以下FT図）による分析結果が第１回会議で提示されたが，そのFT 図では影響の有無に関する評

©Atomic Energy Association 2023

価に向けた説明が不足しているものや分析が不十分と考えられる項目が散見された。特に初層の溶接金属の特異性，UT 実施時のケガキ線のずれ，シミュレーションの妥当性とシミュレーションで模擬できていない部分の明確化，外面形状の影響の出来るだけ定量的な評価が挙げられた。これらに対して，第2 回会議において，主に「原子力規制庁大飯３号機加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示に係る公開会合」の資料を参照する形で内容を確認するとともに，FT 図の拡充を行った。

3.2.1 溶接中心位置のずれについて

原因分析において，特に議論されたものが溶接中心位置のずれである。UT 実施時の溶接中心位置と，切断調査後に確認された溶接中心位置は概ね3mm 程度のずれがあり，これが亀裂性状の誤認につながった可能性を指摘した。

UT 実施時の溶接中心位置のケガキ線は，溶接施工前に打った外面のポンチマークを基準としている。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，当該箇所はエルボー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ずれが想定される。更にケガキ線（マジックペンで描いている）の幅などを考慮すればあり得ないずれではないが，悪条件が重なった結果であると言える。

3.2.2 シミュレーションの模擬性について

第1 回会議において，シミュレーションの結果がきず先端のエコー（信号）がずれた位置にB スコープ（管軸方向を横軸，板厚方向を縦軸にして，UT 結果を画像表示したもの）上に表示されることを示すことを説明しているが，そのシミュレーションの入力条件や想定条件が明確ではなかった。またシミュレーションで模擬できていない部分を明確化することと，シミュレーションで何を説明したいのかを明確にするよう要望した。

第 2 回会議で，シミュレーションの入力条件などを整理した上で提示され，またシミュレーションでは材料ノイズなどが模擬できていないこと，接触媒質の薄い非均一な層については音速で補正していることなどが説明された。加えてシミュレーションは事象の再現（どのような事象が起こっていたかの考察）に用いたもので，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推定していることなどが示された。これらのことや追加の説明について概ね妥当であると考えられ，シミュレーションの妥当性について，概ね了解した。

3.3 性状誤認識結果がそのまま報告された原因

本事象の要因は3.2 で概ね了解したが，UT で推定した亀裂性状が従来知見にはない特異な性状であったものが，そのまま外部に報告されたという事実についての言及がないことを，第1 回会議で指摘した。これに対して第2 回会議において，「なぜなぜ分析」として性状誤認識した結果がそのまま報告された要因の分析結果が提示された。

©Atomic Energy Association 2023

主な要因として，亀裂性状が重要な事項であるとの認識に弱かったこと，B スコープの結果が先行して修正するに足る他の大きな根拠が得られなかったこと，きずが溶接熱影響部から進展し溶接金属内に達した過去の損傷事例を踏まえて溶接金属を横切るという可能性を否定できなかったこと，検査結果に対して疑いをもつ姿勢が十分でなかったこと（特に溶接中心位置のずれについては，検査・設計共に認識が浅かった）が挙げられた。これらの事実関係の説明を受け，各々の当事者がそのように判断したことは理解出来るものであった。

3.4 対策の妥当性

上記3.3 までの議論の結果から，第3 回会議において対策案が提示された。主な対策は以下のとおりである。

(1) 情報共有 ：
Bスコープ表示と実際の亀裂性状とは乖離があること，特に外面形状の凹凸が大きい場合には影響が大きいことなどを周知する。

(2) 溶接中心位置把握技術の高度化 ：
外面ポンチマークから得られた溶接中心位置はずれがある可能性があることを認識し，亀裂性状などが従来知見と異なるように認識される場合には，垂直探傷で溶接中心を推定する方法を加えるなどを行う。

(3) UT 手法による対策

(a) 亀裂性状を推定する場合には，超音波の集束条件を複数準備し，外表面形状及び溶接金属部による超音波の屈曲の影響を受けにくい探触子位置から探傷する。

(b) 探触子が外面形状の影響を受けない位置で固定し，セクタ走査(フェーズドアレイ法で超音波ビームの屈折角を変化させる走査)で得られる画像を用いて性状評価を行う。

これらの対策について議論した。どのような場合にこれらの対策を実施するのか，必要が無い場合に無用な作業を現場に押し付けるようなことがないように十分注意することなどを指摘した。また(3)についてはきず深さ測定とは別に性状把握のために行う作業であることを確認した。

議論の結果，これらの対策は要因分析や"なぜなぜ分析"で特定された要因を抑えられるものとして了解した。なお，本対策は当事者に限定したものとするか，公知化し規格化を目指すのかなどの今後の活動については，本会議体で議論すべきものではなく，産業界の判断に委ねるものとした。

3.5 報告書

上記3.4 までの議論の結果をまとめた報告書（本書）の内容について，第4 回会議で議

©Atomic Energy Association 2023

論し，これまでに議論した結果を概ね反映しているものとして了承した。その上で，今後の検査信頼性向上に向けて以下を期待する旨の意見が出された。

(1) UT による亀裂性状推定が構造健全性評価（亀裂進展評価）に有益な情報かを，構造健全性評価技術者とよく議論し，仮に重要な情報となるのであれば，亀裂性状の推定方法の公知化・規格化を期待する。これは，構造健全性評価の更なる高度化に向けた取組みとなる。

(2) 今回の検討では，超音波探傷シミュレーションが大きな役割を果たした。シミュレーション技術の更なる活用に向けて，その模擬範囲，入力条件，想定条件などに関するガイダンスなどで共通認識が得られれば，他分野を含めたシミュレーションの活用，拡大につながる。

(3) プラントの稼働が限定的である現状から，検査技術者の継続的な技量の維持及び向上と，検査技術の向上に向けた方策を期待する。これは検査に限らず，設計，評価に関係する技術者の情報共有や安全文化の醸成など継続的な取り組みも含めた取り組みである。

(4) リスク情報の活用を含めた検査の最適化（リソースの最適配分）など，限られたリソースの有効活用について，規制側も含めた幅広い視点での議論を期待する。

4. 結言

「加圧水型軽水炉一次系ステンレス鋼配管における溶接硬化部の粒界割れに関する調査，検討及び研究開発計画の立案」の一部として，関西電力大飯発電所3 号機で確認された亀裂性状誤認について，「検査技術に関する外部専門家会議」を設置し，検査技術に関して見識の深い専門家によるレビューを行った。合計4 回の会議を実施し，当該事象に至った要因分析及びその対策について議論し，提示された要因分析，″なぜなぜ分析″，対策案について概ね妥当であることを確認した。

今後，これらの分析結果及び対策について，どのように水平展開していくかについては産業界の責任で実施していくことを要望する。

©Atomic Energy Association 2023

添付資料 2

©Atomic Energy Association 2023

UT関係者向け　周知教育テキスト

PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れを踏まえた溶接部近傍でUTによる亀裂性状把握をする時の留意事項について

原子力エネルギー協議会
（ATENA）

2023年　4月

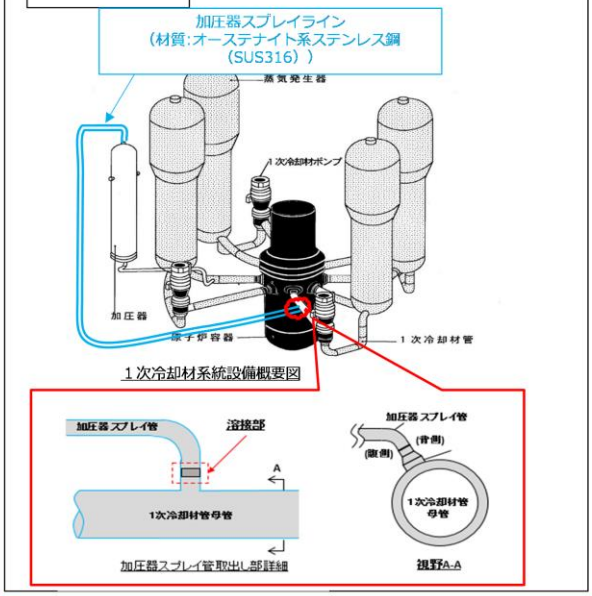
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

1

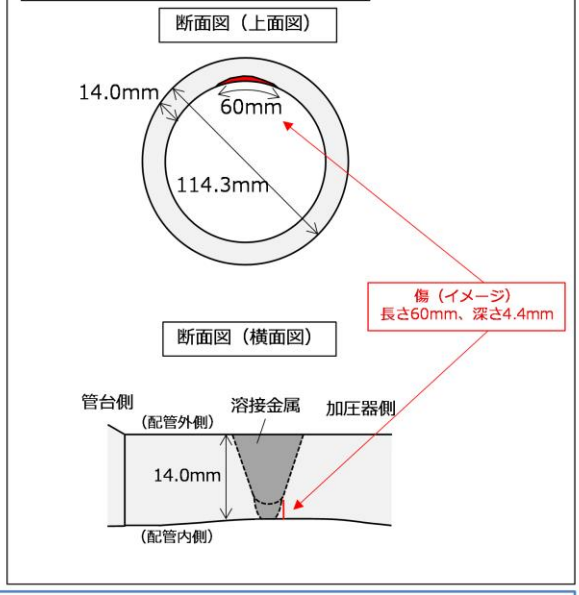
PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れの概要

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



実機の破壊調査結果



➢ 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60㎜、深さ4.4㎜の亀裂**があることが明らかとなった。

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

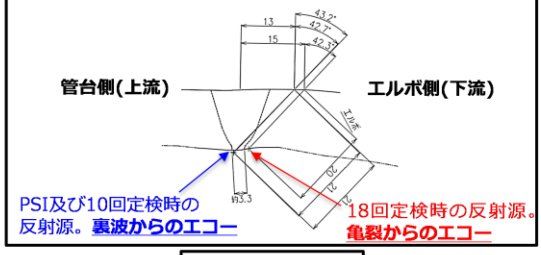
©Atomic Energy Association 2023

2

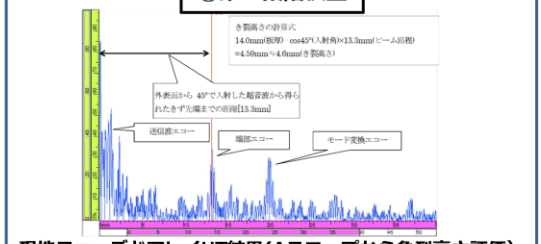
超音波探傷検査（亀裂性状把握）時のUT検査結果

- 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

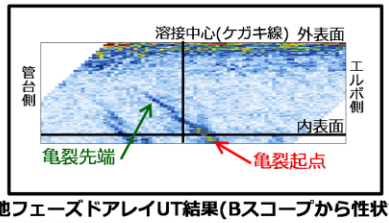


②第二段階検査

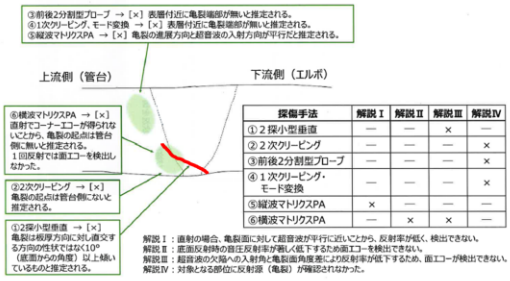


現地フェーズドアレイUT結果(Aスコープから亀裂高さ評価)
高さ4.4mmの亀裂を、UTにて4.6mmと評価した

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)



追加調査では明確な反射源は検出せず

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

3

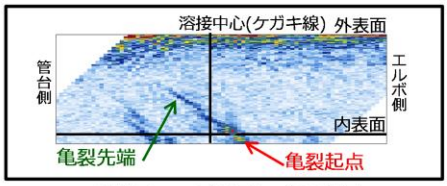
超音波探傷検査と破壊調査結果の比較

<超音波探傷検査による亀裂性状把握状況>

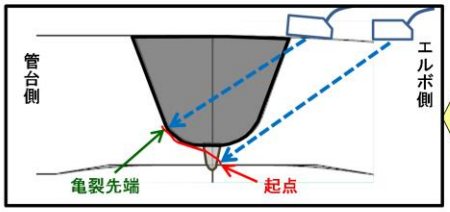
- 超音波探傷検査による非破壊試験で、亀裂の深さについては適切に評価。
- 亀裂はエルボ側から管台側の方向に溶接部を進展していると推定したが、破壊調査の結果、亀裂はエルボ側母材の溶接部境界で板厚方向に進展していた

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

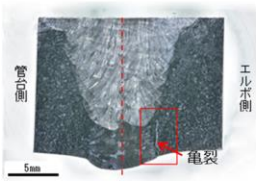
亀裂性状の差異

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

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

©Atomic Energy Association 2023

4

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入射点位置および屈折角の変化と、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。	×	
		罫書き	・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ぱ性は問題無い。	×	
	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

※本図は要因分析結果のうち、商業機密事項を含む箇所は省略して記載

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

5

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。

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。

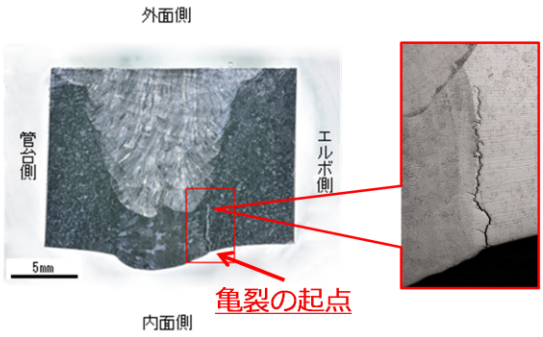
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

©Atomic Energy Association 2023

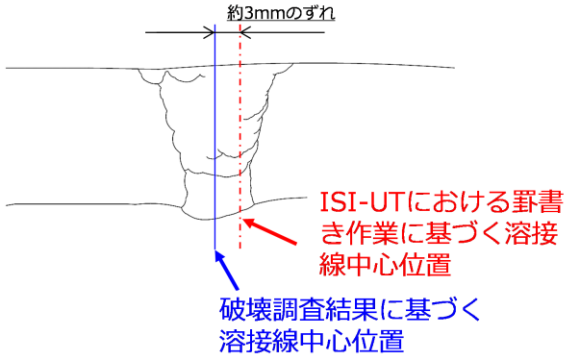
6

（補足）ISI-UTと破壊調査結果との溶接線中心位置のずれ

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罫書きは、現場の作業環境、マーキング、開先部の公差等により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における罫書きと破壊調査結果の比較

ATENA Atomic Energy Association
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

7

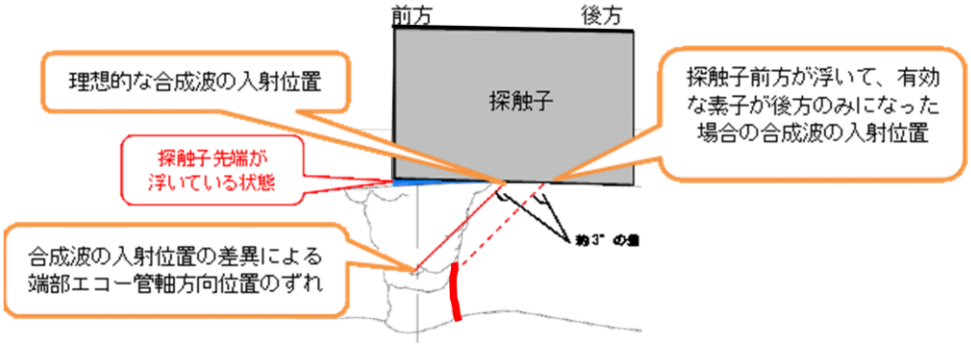
（補足）幾何学的形状による合成波の入射位置と路程の管軸方向のズレ

①エルボ曲率を含む外表面形状による超音波入射角の変化

実機の外表面形状により、約3°程度、探触子前方が浮く可能性があることがわかっており、これより 外表面形状による超音波入射角の変化についても、約3°程度ずれる。これにより、管軸方向には幾何学上の簡易計算から約0.5mm程度ずれる。

②探触子の超音波入射点の位置の変化

約3°程度、探触子前方が浮くことにより入射位置も変化し、理想的な入射位置と探触子前方が浮いた場合の入射位置の管軸方向のずれ量は、探触子のうち後方側の素子のみ倣っていることとなるため、管軸方向に約3mmずれると考えられる。



ATENA Atomic Energy Association
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

©Atomic Energy Association 2023

8

溶接部近傍でUTによる亀裂性状把握をする時の注意点(1/3)

超音波探傷検査による亀裂性状把握をする際には、①～③について注意すること。

①評価体制について

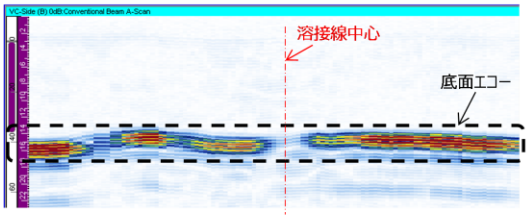
- 本事象のようにBスコープ表示と実際の亀裂性状には乖離があり得ることを認識すること。
- 検査員は、Bスコープ表示と実際の亀裂性状に乖離を生む外表面形状等の因子があることを踏まえて把握すること。

※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

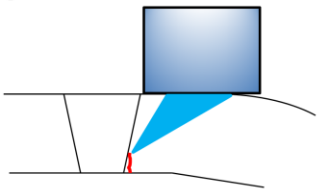
ATENA Atomic Energy Association
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

9

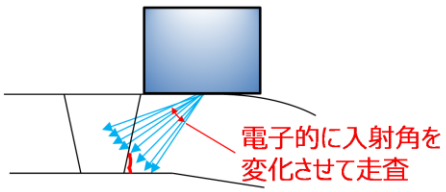
溶接部近傍でUTによる亀裂性状把握をする時の注意点(2/3)

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。

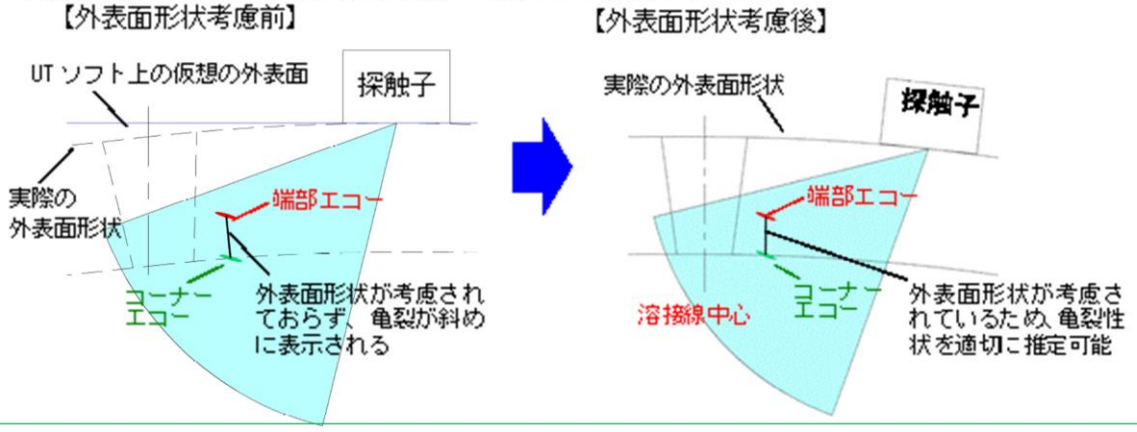
ATENA Atomic Energy Association
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

©Atomic Energy Association 2023

溶接部近傍でUTによる亀裂性状把握をする時の注意点(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。



（注記）
本安全対策は亀裂性状把握をする際の向上策であり、上記①～③に記載した事項を行ったとしても、誤差要因を含みながら評価することに変わりはない。

ATENA Atomic Energy Association
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

©Atomic Energy Association 2023

発行者：原子力エネルギー協議会

問合せ先：contact@atena-j.jp

©Atomic Energy Association 2023