

# 高調波法による超音波探傷試験技術開発への期待と現状

## Prospect of development of ultrasonic testing technology using high harmonic method

石田 仁志 (Hitoshi Ishida) \*1

**要約** 原子力発電所の供用期間中検査の体積試験として超音波探傷試験が行われる。欠陥が見つかった際には、健全性評価のために寸法測定が求められる。現行の測定法は、超音波パルス法を原理とするものであり、寸法測定のために割れがその開口部から先端部まで繋がっていることを確かめることはできない。高調波法は、割れの接触状態の変化が引き起こす波形のひずみにより発生する高調波によって、割れを可視化しようとする手法である。本報では、現行法の限界と高調波法の優位性を示し、これまでの開発状況について述べる。

**キーワード** 超音波探傷試験, 高調波, 超音波パルス法, Ni 基合金溶接部, 応力腐食割れ

**Abstract** Ultrasonic testing is performed as a volumetric test during in-service inspections of nuclear power plants. When defects are detected, dimensional measurements are required for soundness assessment. The current measurement method is based on the ultrasonic pulse technique, it is impossible to confirm that a crack continues from its opening to its tip. The high harmonic waves method is a technique that attempts to visualize cracks by using harmonics generated by waveform distortion caused by changes in the contact condition of the crack. This report presents the limitations of the current method and the advantages of the high harmonic waves method, and describes the development status to date.

**Keywords** ultrasonic testing, high harmonic waves, ultrasonic pulse technique, Ni-based alloy weldment, stress corrosion cracking

### 1. はじめに

原子力発電所の原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する原子炉容器や 1 次冷却材管などの溶接部は、供用期間中検査の対象部位であり、体積試験として超音波探傷試験が行われる。

体積試験範囲に超音波を入射し、割れからの反射波（コーナエコー）をとらえることによって、欠陥の検出がなされる。さらに欠陥が検出された場合には、部材の健全性を評価するために、欠陥寸法測定が要求される。

部材の健全性に影響する板厚方向の欠陥の深さは、割れの先端部からの散乱波（端部エコー）をとらえ、その位置座標を同定して算出する端部エコー法によって測定される。

これまでに、超音波パルス法を原理とする数々の技術、手法の開発、改良、公的機関等による実証もなされ、さらには検査員の技量認証制度も導入されてきた。

著者の研究所においても、これまでに種々の開発に取り組み、実機適用に至ったものもある<sup>(1)</sup>。現在は超音波パルス法とは異なる原理による手法の開発にも取り組み、その一つとして非線形超音波法である高調波法の実機適用に向けた開発に取り組んでいるところである。

本報では、超音波パルス法の課題を示し、高調波法開発のねらいと開発の現状を述べる。

### 2. 現行法の原理と課題

原子力発電所の超音波探傷試験では、超音波パルス法を原理とする装置、手法が用いられる。図 1 に超音波パルス法の原理を示す。割れと垂直な断面を示した図 1(1)のように、超音波を入射し、割れなどの欠陥の開口部における割れ面と材料表面とで構成される角部からのコーナエコーをとらえることによって、割れ面の存在の検知すなわち欠陥の検出がなされる。さら

\*1 (株) 原子力安全システム研究所 技術システム研究所

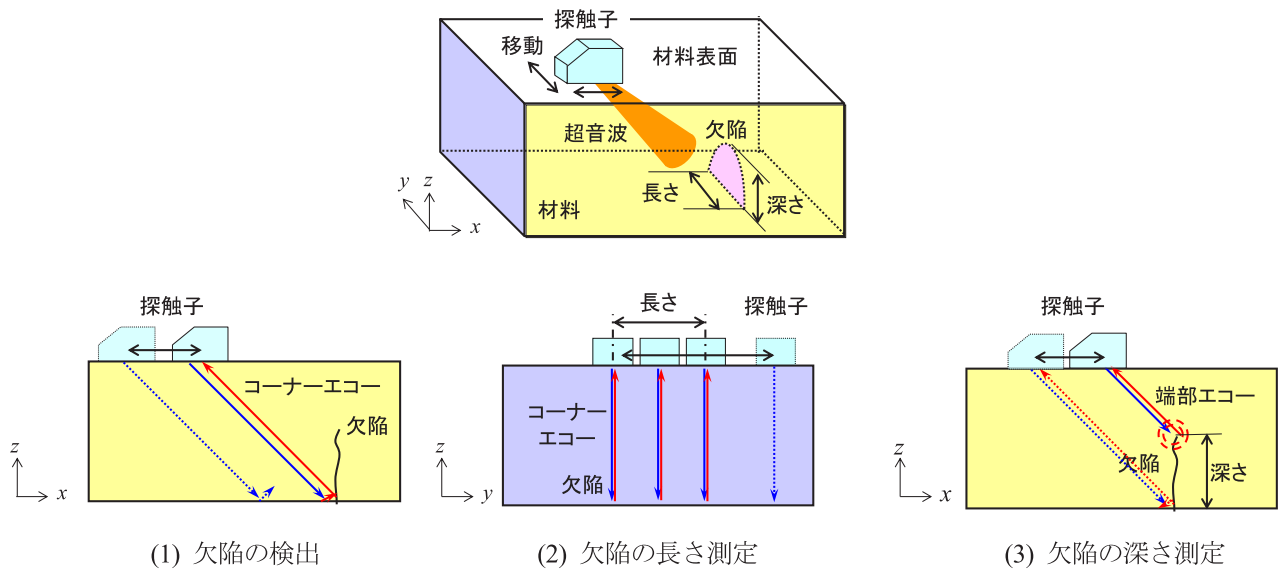


図1 超音波パルス法の原理

に、欠陥が検出された部材の健全性を評価するために欠陥の寸法が測定される。

欠陥寸法のうち割れの開口部の長さは、図 1(2)のように、割れ面と平行方向におけるコーナーエコーが検出される探触子の移動距離によって算出される。部材の厚さ方向における寸法は、割れと垂直な断面を示す図 1(3)のように、割れの先端部からの端部エコーをとらえ、その位置座標を同定し、深さとして算出される。この方法は、端部エコー法と呼ばれる。図 2 に、割れに垂直な断面を表す画像中のコーナーエコーと端部エコーの例を示す。それぞれのエコーの間に割れが存在していることが推定される。

この端部エコーは、入射された超音波の一部が先端部に当たって散乱し、さらにその一部をとらえるものであり、欠陥コーナーエコーに比べて微弱である。

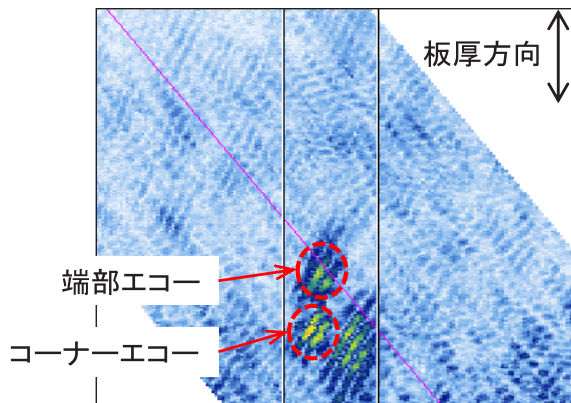


図2 コーナーエコーと端部エコー

端部エコーの強度が低いことに加えて、ステンレス鋼やNi 基合金溶接部等では、材料組織による超音波の著しい散乱減衰と、この散乱波の存在により、端部エコーの識別がより困難になる。割れの端部エコーを正しく識別、特定するためには、相応の装置、手法と試験員の技量が求められる。

原子力発電所に健全性評価のための維持規格<sup>2)</sup>を導入するにあたり、維持規格によって評価されるべき欠陥の検出と寸法測定が可能なが実証されている<sup>3)</sup>。これらの測定試験には、集束型探触子を用いた端部エコー法や TOFD 法が用いられた。実証された結果とデータは、超音波探傷試験に関わる検査員の資格と認証の基準<sup>4)</sup>策定の基となった。その後、フェーズドアレイ技術など、改良された探傷手法も加わり、現在に至っている。

超音波パルス法は、パルス状の超音波を伝搬させ、音響インピーダンス (密度×伝搬速度) が異なる音響的不連続部である媒質の境界において反射、散乱する超音波を受信することによって、割れを検出、測定するものである。送信する超音波がパルス状であることから、送信と受信の時刻を計測することができ、これから算出される伝搬時間を基に、材料における伝搬速度と送信する角度から、反射源の座標を求めることが可能である。

割れの深さは、前述の方法で測定された割れの先端部と開口部の座標から算出される。

図 3 に、散乱の著しい材料としてステンレス鋼溶接部近傍の探傷画像の例を示す。推定される割れに垂直

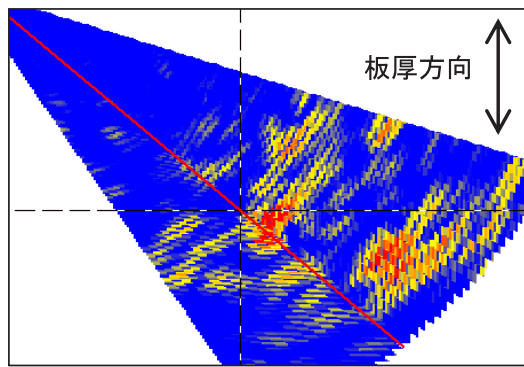


図3 反射源が多数ある探傷画像の例

な断面を示している。多くの散乱源の中から割れの先端の散乱波を識別して特定することは容易ではない。さらには、割れ面の屈曲、分岐など先端でないところからの散乱波もある。このような場合には、割れが進展すると推定されるコーナーエコーの上方の探索や端部エコーの割れの長さ方向への連続性などにより端部エコーの特定がなされる。

物の寸法測定とは、その物の端から端までが繋がっているという測定対象全体の形状等が認識できてはじめて物差しなど寸法測定の道具を当てて測ることが可能となる。しかし、現行の手法では、割れの開口部から先端部まで割れが繋がっていることを確かめる方法もないし、要求されてもいない。

端部エコーの強度を相対的に高めるために、送信する超音波を割れの先端に集める集束型探触子、集束位置を自在に設定し異なる屈折角での探傷が可能なフェーズドアレイ技術などの手法の高度化もなされているが、散乱波の中から端部エコーを識別するという考え方は同じであり、割れの開口部から連続する割れ面の先端として確かめた上で特定するというものではないと言える。

### 3. 高調波法の原理とねらい

超音波パルス法では、割れなどで反射、散乱して捉えた超音波の強度が閾値を超えると、その有意性が判定される。割れ面が接触または密着していると、超音波の一部は割れ面を通過し、割れ面での散乱波の振幅が低下する。コーナーエコーに相当するような反射波が、このような状況にあると欠陥の見逃しなどの可能性がある。また、割れの先端付近で面の接触や密着があると、端部エコーの強度低下を引き起こし、先端が検出できなかったり、その位置の誤認が生じたり、寸法測定に影響することもある。

図4に示すように、接触する割れ面を正弦波の超音波が通過する場合、引張相の波の欠落により元の周波数の整数倍の周波数の高調波成分が発生することになる。割れ面の一部が接触し、そこを部分的に超音波が

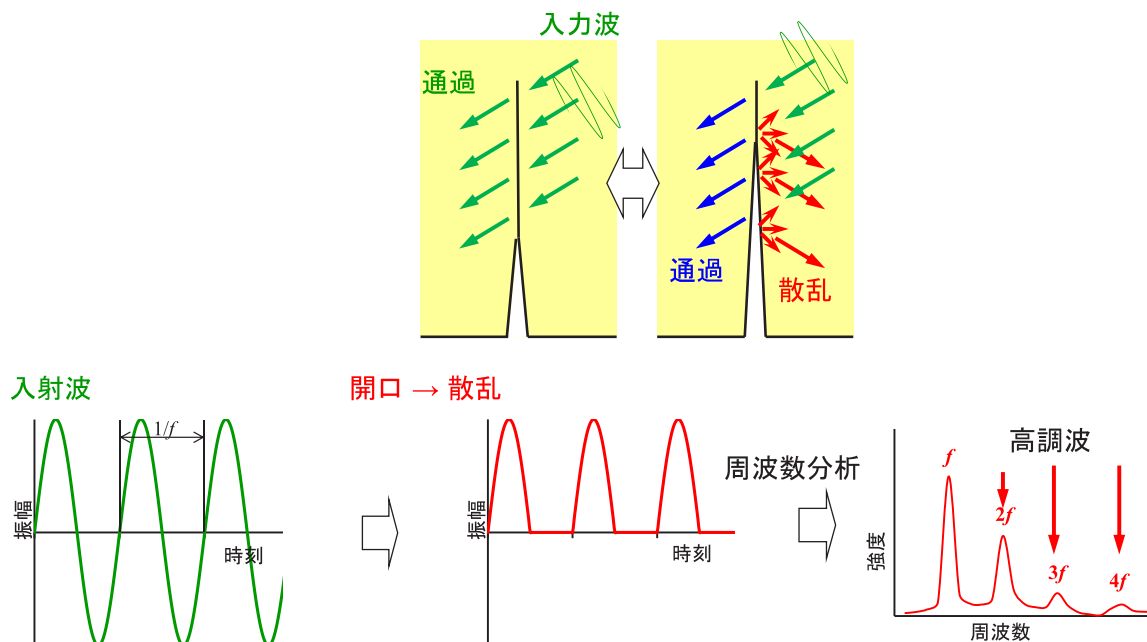
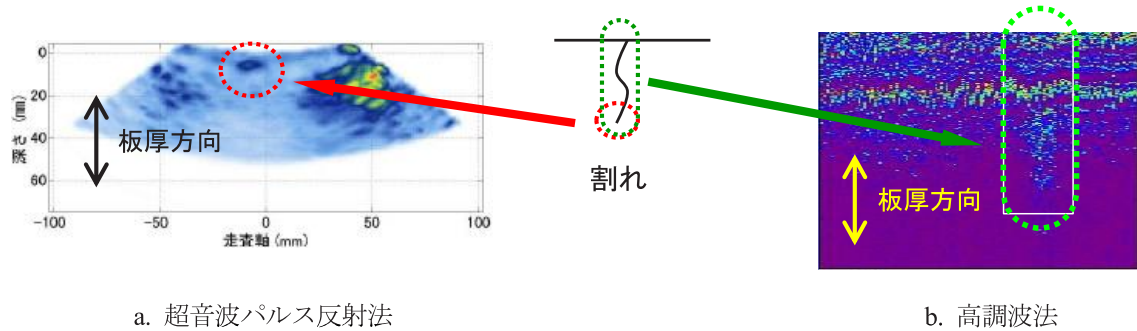
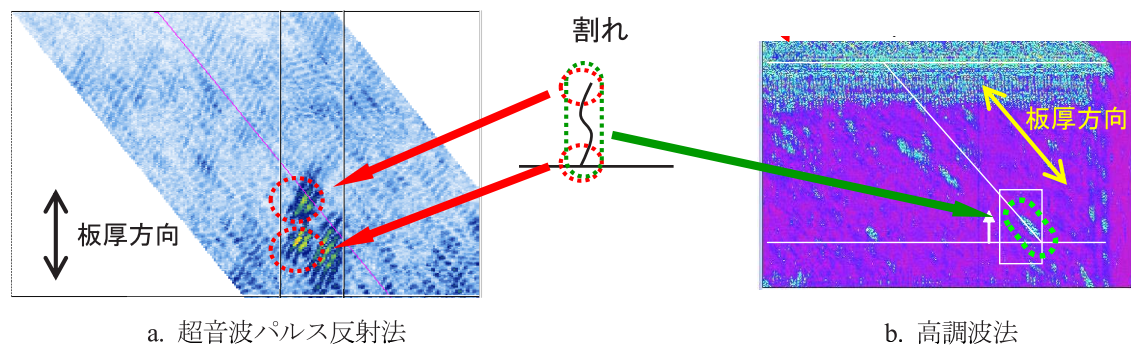


図4 接触する割れ面での高調波発生



(1) Ni 基合金溶接部 SCC (割れの開口面側からの測定)



(2) ステンレス鋳鋼疲労き裂 (割れの開口面と反対側からの測定)

図 5 割れの可視化の例

通過する場合でも、散乱波の波形にひずみが生じ高調波が発生すると考えられる。高調波法は、このような高調波を抽出し、超音波パルス法では検出できない閉口き裂部からの散乱波を検出できる。

超音波パルス法では、材料中における減衰などを考慮し送信超音波の周波数が選定されるが、受信波の周波数や波形の歪みについては考慮されず、受信信号波形に対して何らかの処理がなされることはない。

#### 4. 高調波法開発の取り組み

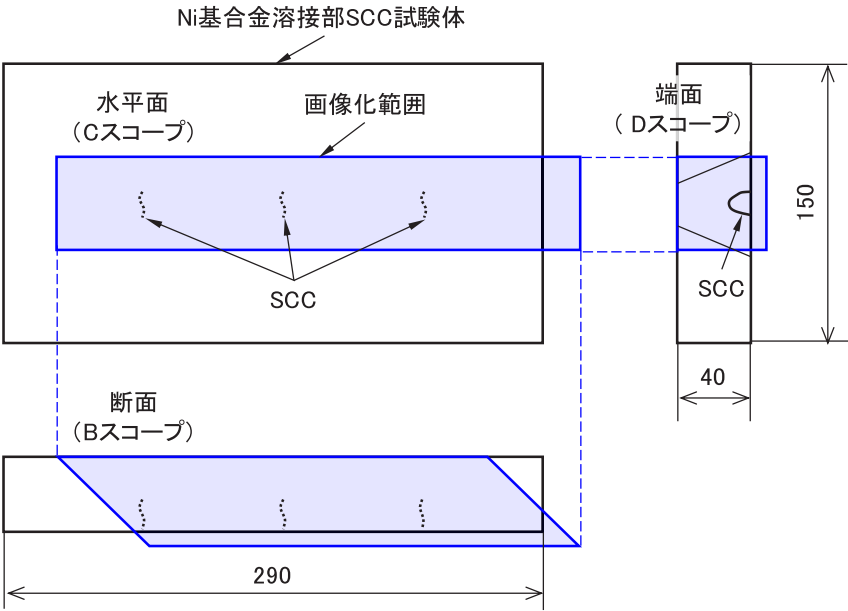
このような問題に対処するため、著者らは高調波法の実用化のため、その有用性と可能性を確かめることから検討を始めた。図 5 に、Ni 基合金溶接部の応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking, SCC)、鋳造ステンレス鋼の疲労き裂の高調波法による可視化結果の例を示す。割れに直交する断面を可視化したものである。高調波法では、割れが開口部から先端と推定される位置まで、割れ面からの散乱波が連続して観察され、割れ面の存在とその位置を明確に認識することができる。このことから、超音波パルス法では困難な割れ面の可

視化という優位性を見出し、高調波法の実用化の検討を進めることとした。

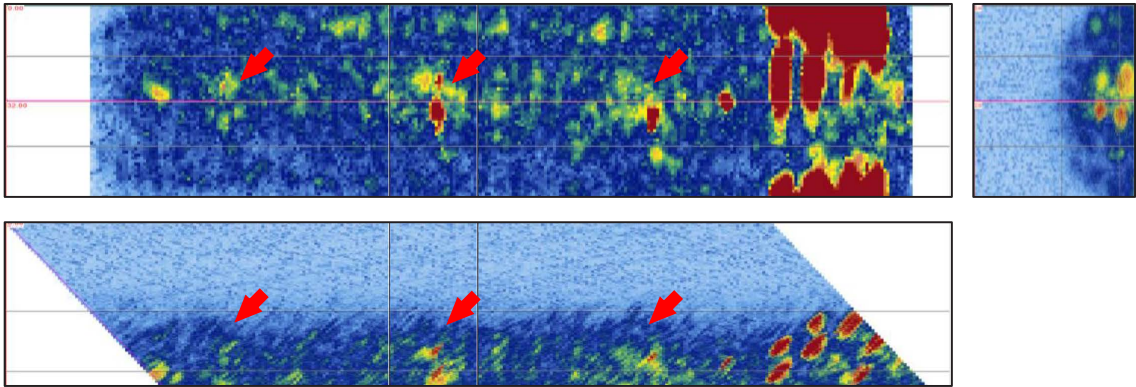
前述の高調波法の結果は、試験体を水中に浸して測定する水浸法によるものであり、高調波法を実機で適用するためには、水に浸すことができない検査対象である構造物の表面に探触子を直接接触させる探傷が不可欠である。そこで、著者らは、この直接接触法による高調波法の測定手法を開発することに取り組むこととした。原子炉容器などの管台とセーフエンドの接続部にある Ni 基合金溶接部の SCC を対象に検討を進めてきているところである<sup>(5)</sup>。

図 6 に、高調波法による SCC の可視化結果の例を示す。図 6(1)に示した Ni 基合金溶接部 SCC 試験体のうち図中に示した範囲を画像化したものである。図 6(2)に 2MHz1 振動子探触子に 1.3MHz の連続波を入力し、遮断周波数 3MHz のハイパスフィルタにより受信波から抽出された高調波による画像を示す。図 6(3)に比較のために、超音波パルス法に相当するものとして高調波を抽出するためのハイパスフィルタを通さない場合の可視化結果も示した。それぞれの図中に赤い矢印で示した位置に SCC 割れ面からの散乱波が得られた。割れに対して垂直な断面画像に相当する B スコープおよ

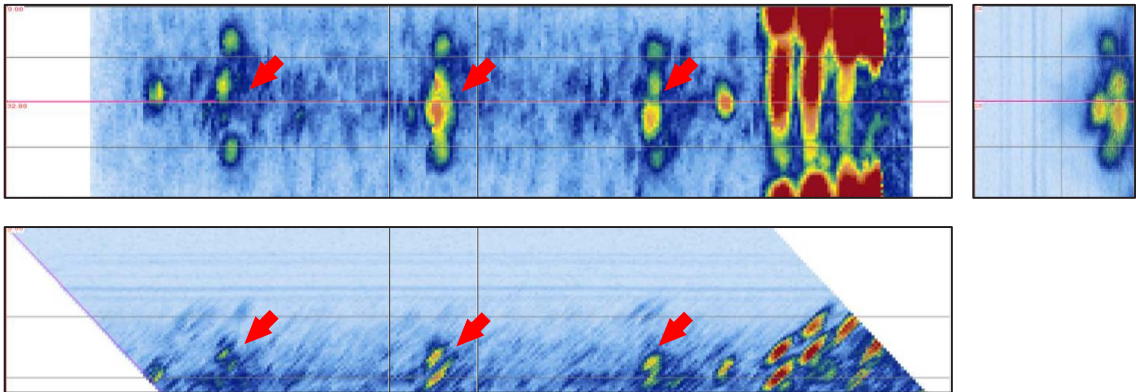




(1) Ni 合金溶接部 SCC 試験体の画像化範囲



(2) 高調波 (ハイパスフィルタ遮断周波数 3MHz)



(3) ハイパスフィルタを通さない場合

図 6 SCC の可視化の例

(2MHz 1 振動子探触子送信／5MHz 1 振動子探触子受信／屈折角 45 度／1.3MHz 入力)

び平行な断面に相当する D スコープにおいて、いずれか一方の手法が優位であるとは言い難い。

前述のように、超音波パルス法では得られないような割れ面が連続して可視化できるような高調波法の入力する周波数、電圧、波数などの条件をさらに探求しているところである。

## 5. おわりに

現行法である超音波パルス法の限界、これに応えるものとして期待される高調波法の開発の現状を述べた。超音波パルス法を原理とする手法は相応の技術レベルに至っていると考えられ、さらに新たな手法の開発、改良による測定結果の格段の向上は望むことはできないかもしれない。昨今の実機で発生した事例から示された課題とこれに対する向上策は、新たな技術開発が必要とするような超音波探傷技術の本質に関わるものでないと考えられる。

これまでに超音波探傷技術に係る多種多様な実証試験が行われ、実機で行われる超音波探傷試験の技術レベルが確かめられ、さらにはこれに係る検査員の技量認定制度も導入された。

今後これまで経験のない原子力プラントの高経年化を迎える過程において、これまでに経験されなかったり、想定されなかったりする事態に遭遇することが考えられる。実証試験で想定したような欠陥や条件を超えるような状況に遭遇した場合に、現在保有する技術、

知見によって、的確な判断と対応を行うことが求められる。合理的で信頼できる情報を提供できる超音波探傷試験技術であることとこれを基に技術に真摯で誠実な判断をできる体制が必要であると考えられる。

そのためには、多様な原理、手法による測定結果が提供され、これらの情報を組み合わせ、互いに矛盾のない確からしい判断がされることが望ましい。そういう観点から、高調波法の開発、実用化は意義深く継続して進められるべきであると考えられる。

## 参考文献

- (1) 石田仁志, “ステンレス鋼超音波探傷試験システムの開発と実機適用,” INSS Journal, Vol.25, p.209, (2018).
- (2) 発電用原子力設備規格 維持規格 (2020 年版) (JSME S NA1 : 2020), 日本機械学会, (2022).
- (3) 原子力発電施設検査技術 JNES-SS レポート, 独立行政法人 原子力安全基盤機構, (2005).
- (4) 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 (NDIS 0603 : 2005), 団法人 日本非破壊検査協会, (2005).
- (5) 石田仁志, 川嶋紘一郎, “直接接触高調波法による応力腐食割れの可視化,” INSS Journal, Vol.25, p.130, (2022).