

原子力発電機器の強度保証のための高信頼性に関する研究開発

研究代表者 三原 毅 国立大学法人東北大学 大学院工学研究科
 参画機関 国立大学法人東北大学、国立大学法人金沢大学、
 一般財団法人発電設備技術検査協会
 研究開発期間 平成 24 年度～27 年度

1. 研究開発の背景とねらい

本事業では図 1 に示すように、原子力発電機器経年損傷、き裂の予防保全、地震損傷の評価において、革新的原子炉・現行軽水炉に共通した、より信頼性の高い技術確立に必要な新しい計測手法の開発を目的とする。まず第 1 に、溶接応力によるき裂の閉口、き裂の屈曲形状因子、また溶接組織の散乱等による、き裂端部エコーの SN(Signal to Noise)比悪化の改善技術として、これまでの非線形超音波計測より 10 倍程度大変位超音波を入射できる新しいき裂映像化システムを開発し、実機き裂計測における有効性を検証する。第 2 に、高経年化プラントで顕在化する SCC(Stress Corrosion Cracking)の代表的防止策である残留圧縮応力付加施工時の残留応力モニタリング法、さらに第 3 に、地震に晒された原発再稼働条件である塑性変形の計測法について、いずれも信頼性が高い計測法として認知されながら、従来実機適用は不可能と考えられてきた X 線回折装置を超小型化し、実用機として使えるシステムを開発する。

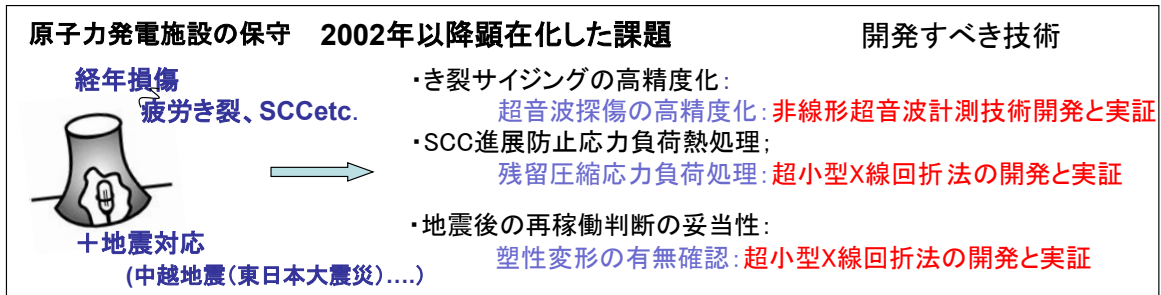


図 1 本研究で開発する計測技術と目的

2. 研究開発成果

2.1 新超音波法

a) 新超音波法については、図 2 に示す SPACE(Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation)システムと大変位超音波送信技術として積層探触子と多チャンネルパルサー技術を中核に、26 年度で実機適用可能な実用機骨子を完成した。

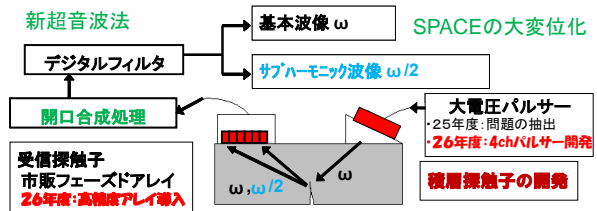


図 2 新超音波法（大振幅 SPACE）の開発

具体的には、4 チャンネル積層素子と新しく開発した、大変位超音波対応型パルサーと、分解能が高い新しいフェーズドアレイを組み合わせ、システムを一新した。

b) a)で開発した大変位超音波パルサーをSPACEと組み合わせ、発電技検で作製した各種き裂入り試験体を計測し、有効性検証を計画している。図3に積層探触子を用いた計測の配置と、送信波形、さらに400V励振の8チャンネルパルサーで、深さ9mmの熱疲労き裂を計測した基本波(ω)画像とサブハーモニック($\omega/2$)画像を示す。基本波画像ではき裂端部エコーが確認できず、

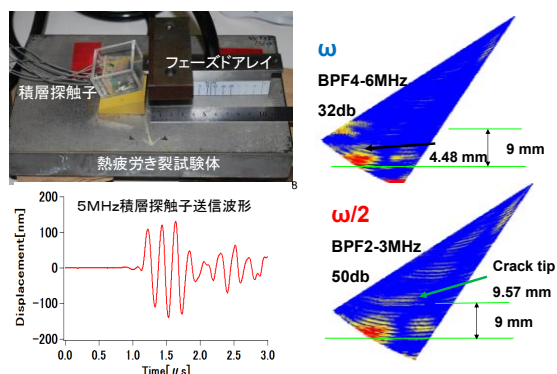


図3 積層探触子とSPACEによる計測例

き裂を4.48mmと過小評価するが、 $\omega/2$ 画像では9.57mmと正確にき裂端部が計測でき、積層探触子とSPACE計測を組み合わせた初めての成果である。またき裂での $\omega/2$ 波発生機構については、疲労き裂開口と入射波振幅を制御した実験と、新たに提案した単純なき裂凹凸モデルを用いたFEM(Finite Element Method)により $\omega/2$ 波発生を初めて模擬できた。

2.2 新X線計測技術法

a) 新X線計測技術については、図4に示す二次元X線検出器方式におけるX線発生部及びX線検出部の小型化検討を行った。従来の二次元X線検出器方式の測定は、フェライト系鋼材への適用を想定し、Cr管球(CrK α 線)を利用してきた。一方、原子力発電機器では、オーステナイト相を有し、従来のCr管球では、著しく低強度となるCrK β 線を利用する必要があり、測定精度が低下する。この



図4 試作した小型X線回折装置

Cr管球の欠点解消のため、本研究では十分な強度のK α 線が使用できるMn管球を検討した。その結果、従来のCr管球に対し、測定時間を従来技術の数10分の1に短縮でき、8~28%の小型化も可能になった。装置の小型化検討として、

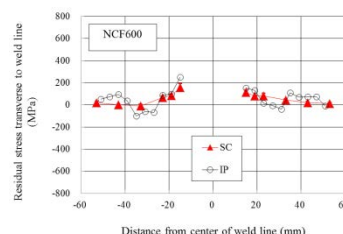
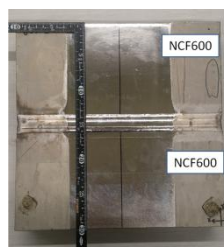


図5 溶接試験体とその残留応力測定結果例

て、別途X線検出器の小型化も検討した。種々の形状のIP(Imaging Plate)やCCD(Charge-Coupled Device)センサーを検討し、回折X線イメージ画像の分解能を総合的に検討した結果、原子力機器用では ϕ 60mmのIPが最善と判断した。以上実機計測用Mn管球搭載X線回折装置が試作できた。

b) 新X線計測技術法による技術の検証のため、ステンレス鋼およびニッケル基合金(インコネル)の溶接試験片で、残留応力を計測した結果を図5に示す。従来技術(X線 $\sin^2\phi$ 法及びCr管球を使用)による残留応力値は新X線計測による結果と良い相関を示した。特に新X線計測では測定時間が1min前後と、従来技術の約60minと比較し、大幅に短縮でき、実用的であることを確認した。なお新X線法は既存の装置に比べ、X線照射面積が1/20

程度と小さいため、局所的な応力変動が再現性良く計測できる反面、従来計測の巨視的な計測値と差異も観察される場合があり、応力の計測目的に応じた検討も必要になる。現在、X線照射面積を増やした巨視的応力計測装置を開発中である。一方、塑性ひずみ計測に関しては、デバイリング全体の半価幅（平均値）を利用して検証を行った。その結果、X線半価幅と塑性ひずみの相関関係が明らかにでき、焼鈍処理した試験片に対しては塑性ひずみの評価が可能である見通しを得ることができた。受入材では、表面の加工層の影響から、両者に明確な相関は得られなかった。改善策として、表面の加工層を電解研磨除去（ $150\mu\text{m}$ 程度）後、X線評価する検討を現在進めており、有効性が確認されつつある。

2-3 新超音波法と新X線計測技術の適用性検証

a) 模擬試験体の作製は、新超音波法および新X線計測技術の原子力発電機器への適用性検証のため、図6に示す円筒状や平板状の溶接模擬試験体及び異材継手模擬試験体を作製した。異材継手模擬試験体の材質は母材がフェライト系鋼とオーステナイト系ステンレス鋼、溶接金属はニッケル基合金とし、母材の周囲を拘束して実機相当の溶接残留応力を付与し、下向きのTIG(Tungsten Inert Gas)溶接で作製した。またオーステナイト系ステンレス鋼溶接部に、長さ



20mm程度×深さ8mm程度の疲労き裂付与模擬試験体も作製した。

図6 円筒状の溶接模擬試験体

b) 新超音波法と新X線計測技術の適用性評価では、従来型の超音波計測法を用いて平板状及び円筒状の溶接及び異材継手模擬試験体とき裂付与模擬試験体の溶接部やき裂部を計測し、超音波の反射信号やき裂寸法のデータを取得した。従来型の超音波計測法はフェーズドアレイ法を用いた縦波斜

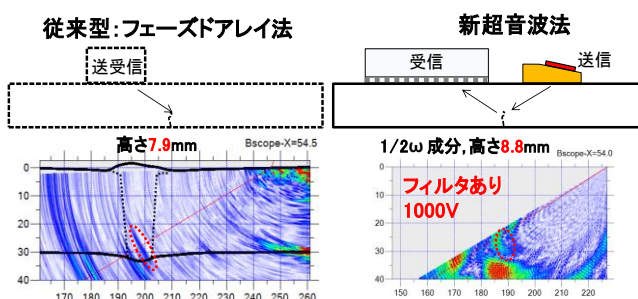


図7 従来型超音波法と新超音波法の比較例

角法および横波斜角法で、溶接部あるいはき裂面に対して垂直に超音波が入射されるように探触子を配置し、探触子と溶接部あるいはき裂との距離を一定に保ちながら探触子を走査してデータを取得した。取得したデータを分析評価し、溶接部やき裂部からの信号の振幅レベルとき裂寸法も計測できた。新超音波法でも、溶接模擬試験体及びき裂模擬試験体の溶接部やき裂部からの信号の振幅レベルとき裂寸法が計測できた。図7に両測定結果の例として、円筒状のき裂付与模擬試験体のき裂寸法（高さ）を測定した結果を示す。従来型の超音波法では高さ計測値が7.9mmに対し、新超音波法のサブハーモニック画像ではより深い8.8mmと計測された。今後、き裂を切断調査して高さを実測した後、新超音波法の計測精度と有効性を改めて評価する予定である。X線計測では、 $2\theta\text{-sin}2\psi$ 法の原理用いた

従来型の X 線計測法と新 X 線計測技術を用いて平板状及び配管の溶接模擬試験体の残留応力データの取得と、塑性ひずみ付与模擬試験体の半価幅を計測し付与したひずみとの相関を評価した。双方の計測結果は概ね同程度であることが確認でき、口径 300mm の配管に対して曲率の測定値に及ぼす影響も小さいことも確認した。また、図 8 に塑性ひずみ付与模擬試験体の半価幅の計測結果の例を示す。機械加工面では加工ひずみにより付与した塑性ひずみと半価幅に相関性はなかったが、電解研磨後は絶対値は異なるものの、いずれの手法も半価幅が対応して増加し、塑性ひずみ計測の可能性を確認できた。

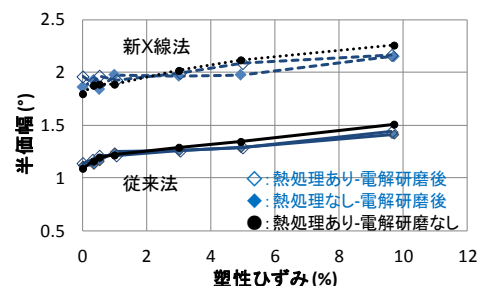


図 8 SUS316L 塑性ひずみ付与模擬試験体の計測結果の比較

3. 今後の展開：

新超音波法、新 X 線計測技術それぞれの基盤技術の開発について、ほぼ計画通り進行し、26 年度中に実機計測機骨子を完成した。これまでに開発した試作機でのモデル試験体計測でも、ほぼ計画通りに進捗している。特に新超音波法では、大変位送信技術の知見蓄積により、従来法では端部エコーの SN 比が悪い開口き裂の一部についても、き裂端部画像がサブハーモニック像で出現した。現在さらに送信波の大振幅化と、受信画像の高精度化を進めており、さらに SPACE の汎用性を広げ、実機適用に近づく成果が得られたと考えている。また新 X 線計測技術では、計画通り実機適用のための X 回折システムの小型化に成功し、従来の Cr 管球で計測時の SN 比に課題のあったオーステナイト系鋼について、新しく導入した Mn 管球を用いて 3~4 倍の SN 比改善と、計測時間短縮が実証できた。また残留応力の計測では、フェライト系鋼で二次元検出器方式および従来技術と同程度の応力測定が可能な見通しを得た。これら開発手法の実機適用性を、共同実験で実証する予定である。

4. 参考文献

- (1) T. Mihara, G. Konishi, Y. Miura and H. Ishida, Accurate sizing of closed crack using nonlinear ultrasound of SPACE with high voltage transformer pulser technique, Review of Progress of QNDE, Vol.33, AIP, 727-732 (2014)
- (2) T. Mihara and H. Ishida, Improvement of identification of a crack tip echo in ultrasonic inspection using large displacement ultrasound transmission, Journal of Physics , Conference Series 520 , 012010 (2014)
- (3) T. Miyazaki and T. Sasaki, Linearized analysis of X-ray stress measurement using the Debye-Scherrer ring, Int. J. Mater. Res. (formerly Z. Metallkd.), 106, 1002-1004 (2015)
- (4) T. Miyazaki and T. Sasaki, X-ray stress measurement with two-dimensional detector based on Fourier analysis, Int. J. Mater. Res. (formerly Z. Metallkd.), 105, 922-927, (2014)

5) 研究のキーとなる概念及び関連する用語の説明

SCC

応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking) のこと。腐食環境、引張り応力、SCC に弱い材料の3つの因子が揃ったとき、それぞれの因子だけでは発生しない割れ (SCC) が発生する。実機原子力部材では経年損傷により各部で顕在化しているが、実験室で再現することは容易でなく、加速試験や他の手法により各国で模擬 SCC 試験体の作製手法が研究されている。

SiC トランジスタ

耐圧性能や高速性を求める用途で、従来のシリコン基板に代わって SiC を用いるトランジスタが開発され、一部市販が始まっている。本研究では大電圧・大電流の励振に耐える大変送信パルサー開発のため、超音波パルサーとして初めて SiC トランジスタを用いた。

SPACE

サブハーモニック波による計測を実用するため、2007年に東北大学で開発された Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation システムの略。大電圧送信パルサーと市販フェーズドアレイ装置を組み合わせで開発したもので、研究代表の三原も開発に参加した。

サブハーモニック波

き裂に大振幅の超音波を入射した際に、入射波周波数 (基本波) の整数分の一の低周波超音波 (サブハーモニック波) が発生することが1990年~2000年に報告された現象。発生のメカニズムについては、なお不明な点が多く、各国で研究が続いている。

積層探触子

圧電効果では1枚の圧電素子の変形が nm レベルと小さいため、大変形を得るためには複数の圧電素子を積層構造にする。ロボット分野等では、大きな変位を得るため単純に数百の素子を積層するが、ここで用いる MHz 域の計測に用いるためには、マルチパルサーで各素子を励振し、かつ遅延励振制御が必要。富山大の特許技術。

cos α 法 (→ IP 法)

X線回折を使ってサンプルの応力を測定する新しい測定原理の一つ。回折環全体を活用する点特徴。元々、平面応力測定用の理論であったが、佐々木敏彦により、三軸応力測定が可能になる新理論が開発された。中性子応力測定にも応用可能。

IP 法 (アイピー法、→ $\cos \alpha$ 法)

本研究の X 線応力方式。

X 線検出にイメージングプレート (IP) を用い、デバイ環全体の画像から応力を求める。 $\cos \alpha$ 法とも呼ぶ。平面応力状態の測定では X 線管と IP のどちらも固定したままで測定できるため、PC 法と比較して装置が小型化でき、測定時間も短縮できる。

Mn 管球

ターゲットに Mn (マンガン) を用いた X 線管。

製作が困難なため、製品としてはあまり出回っていない。

SC 法 (シンチレーションカウンター法、 $\sin^2 \psi$ 法)

従来型の X 線応力測定方式で、プロポーショナルカウンターなどの 0 次元の X 線検出器を用いる。X 線管と検出器を、試料を中心に回転させながら測定するため、装置が大掛かりになり測定時間が比較的長い。長く標準的に使われてきたため、測定結果への信頼性は高い。

半価幅 (FWHM)

あるピーク形状の分布がある時、その最大値の半分に相当する値での分布の幅のことを半価幅と呼ぶ。X 線回折環の断面を取るとピーク形状を形成しており、そこから半価幅を計算することができる。一般に X 線回折環の半価幅は試料の結晶粒子の大きさ、ひずみなどによって決まる。

B, C, D スコープ

超音波探傷の結果を映像化する方法の一種で、B スコープと D スコープは断面を表示する方法、C スコープは平面を表示する方法。

フェーズドアレイ法

複数個の振動子で構成されたフェーズドアレイ探触子を用いて、個々の振動子に異なった振幅又は位相を独立して与え、個々の振動子の振幅を独立して受信することで、種々の角度や集束の条件で探傷する超音波探傷方法。

RT

放射線透過試験の略。

SN 比

信号 (Signal) と雑音 (Noise) の比。

アレイ探触子

複数個の振動子で構成され、それらは異なった振幅又は位相で独立して作動し、その結果、種々のビームの角度及び集束範囲を制御できる探触子。

電解研磨

陽極の溶解反応を利用して金属表面を研磨する方法。