

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 国立大学法人富山大学大学院理工学研究部
参画機関 国立大学法人富山大学、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、東日本大震災後、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より信頼性の高い技術確立の要請に応えるべく、革新的原子炉・現行軽水炉に共通した、新しい計測手法の開発を目的とする。まず第1に、経年損傷部材で顕在化しているき裂は、き裂端部からの回折超音波を用いた計測が利用される。しかし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り、き裂端部エコーのSN比が悪化すると、計測の信頼性が低下する可能性がある。本研究では、従来の超音波探傷法で実機き裂端部エコーの評価が困難な事例を改善できる技術として、非線形超音波法に着目し、特にこれまで報告されている非線形超音波計測システムよりも10倍程度大変位の超音波をき裂部に入射できる新しい超音波映像化技術の開発と、実機相当き裂を用いてその有効性を検証することを目的とする。第2には、高経年化プラントで顕在化しているSCCの発生防止対策の一つに残留圧縮応力付加施工手法として、熱処理や各種ピーニングが実用されるものの、導入した残留応力の計測・モニタリング手法が無いため、現在硬さを指標として残留応力を推定している。本研究では、これまでに提案された多くの応力計測法の中で、最も信頼性が高いと考えられるX線回折装置を小型化して実機適用可能な残留応力計測システムを開発することを目的とする。第3に、地震に晒された原発再稼働の条件の一つである、塑性変形が無いことの確認は、塑性変形の有無計測手法が確立されていないため、表面硬さ計測が用いられているに過ぎない。本研究では、従来実績のあるX線解析法に着目し、やはり小型X線回折装置の開発により、実機適用可能な塑性変形計測システムを開発することを目標とする。

以上本研究では、新超音波法の開発によるき裂端部計測の信頼性向上技術を確立し、さらに超小型の新X線回折法を開発して、新しい残留応力計測技術と、塑性変形計測技術を確立する。革新的原子炉・現行軽水炉に適用可能な、これらの基盤技術を原子力発電機器に実用できれば、総合的な原子力システムの保全技術を大きく向上することが期待できる。

2. 研究開発成果

2-1 新超音波法

- a) 新超音波法の開発については、多くの実機き裂でサブハーモニック波を発生することを目標に、昨年度に引き続いて大変位超音波送信技術の基礎的検討を行い、以下の成果を得た。
1. 積層探触子と多チャンネルパルサー方式では、2.5MHzまでの高周波数で探触子表面において900nm程度の大変位超音波送信に成功した。
 2. インピーダンス整合用昇圧コイル方式で1000V励振までバースト波連続励振可能なシステムを開発し、き裂部に5MHzの超音波を150nm程度の大変位で入射できることを確認した。
 3. 大電圧励振についても、2.と共通で耐圧探触子を開発し、1000V励振までバースト波連続励振可能なシステムの見通しを得た。さらに今年度は、3つの超音波パルサーを試作して前年度抽出した検討課題を確認することで、本研究で超音波送

信用に用いるパルサープロトタイプ機を確定する。現在基本設計の打ち合わせを終わり、購入手続きに入っている。今後、市販パルサーで固定される出力電気インピーダンスが広範に可変できる設計の、試作低周波大電圧パルサーにより、パルサーの出力インピーダンスを変えて様々の電気インピーダンスを持つ探触子と組み合わせ、出力振幅、出力波形への影響を検証する。またこの実験と並行して、高周波数パルサーを用いた大電圧励振に対する、出力振幅の効率と出力波形の歪みの検証を行うとともに、大電圧励振を積層探触子で組み合わせた場合の影響についても、試作多チャンネルパルサーを用いて確認を進める予定である。

- b) a) で開発した大変位超音波パルサーを既存の SPACE と組み合わせ、富山大が保有するいくつかのき裂入り試験体を計測し有効性を検証した。富山大学現有のフェーズドアレイは、中心周波数が 4MHz であり、送信超音波（基本波）と半分の周波数のサブハーモニック波による画像の両方を、十分な感度で計測するためには 4~5MHz 程度の超音波送信が必要となる。現在これを満たす、昇圧パルサーと耐圧探触子を送信に使った SPACE 計測を適用した。従来、既存の超音波探傷法で計測の困難な閉口き裂に、SPACE は有効だが、多くの実機き裂は既存の超音波探傷法で計測されており、SPACE の適用範囲は必ずしも広範ではないと考えられた。しかし昨年度から、SPACE の超音波送信変位を大きくした結果、一部の端部エコーの SN 比が悪い開口き裂において、き裂端部でサブハーモニック波が発生することがはっきりと確認できた。以上より、サブハーモニック波計測が対象とするき裂は、閉口き裂と SN 比の悪い開口き裂に拡大することができた。さらに、計測を広げて、計測データを蓄積する予定である。

2-2 新 X 線計測技術法

- a) 新 X 線計測技術の開発については、実機適用の目的に必要な装置の小型化に有利となる二次元 X 線検出器方式による X 線応力測定法について検討を行い、以下の成果を得た。
1. 二次元 X 線検出器方式の X 線応力測定法については、これまで鋼材への適用を中心に行ってきたため、その目的に最適な条件であるフェライト相 (α 相) の 211 回折 (α Fe-211) を、Cr ターゲットを有する X 線管球 (以下、Cr 管球) を使用して特性 X 線 (CrK α 線) を利用する方法に関する知見が金沢大学の佐々木を中心に進められてきた。これに対し、原子力発電機器ではステンレス鋼やニッケル基合金 (インコネル) が主材料であり、これらはオーステナイト相 (γ 相) を有するため、鋼材測定の場合とは X 線条件が大幅に異なる。 γ 相材料に対して Cr 管球を使用すると、CrK α 線と同時に発生する CrK β 特性 X 線から発生する γ 相の 311 回折が応力測定用に利用できる。しかし、CrK β 特性 X 線の発生強度が比較的弱く、CrK α 線の 1/5 程度に過ぎない。その結果、バックグラウンド (BG) が相対的に高くなり応力測定精度の低下の原因になる。このため、X 線照射時間を増やして回折 X 線強度を上げる対策が必要となる [4-5]。このような Cr 管球の欠点を解消する方法として、本研究では強度の高い K α 特性 X 線が使用可能な Mn または V ターゲットを有する X 線管球 (Mn 管球) について検討した。その結果、SUS304 材料の場合において X 線応力測定に有効な回折ピークは、Mn 管球では γ 311 回折 ($2\theta = 152^\circ$)、V 管球では γ 220 回折 ($2\theta = 161^\circ$) であり、それぞれのピーク強度比はほぼ 3 : 2、BG 強度比はほぼ 1 : 1 であり、Mn 管球の使用がより有効であることが判明した。
 2. Mn 管球について、3 種類の市販品について検討した結果、小型化に関しては鋼材用に使用してきた R 社の Cr 管球と比べて 8~28% に小型化できることが判明した。なお、小型化によって利用できる出力が減少する傾向があることや、水冷や空冷機構の相違に伴う周辺装置の相

違なども生じるため、これらの要素を総合的に考慮して使い分けていくことが必要であることが判明した。

3. X線管球の交換に伴う装置全体の統一的な制御方法について改善して行く予定である。また、装置全体の小型化のため、え管球以外にX線検出部の小型化についても検討する予定である。

b) 二次元検出器方式のX線応力測定により、残留応力および塑性ひずみの計測技術の開発を行うため、原子力発電機器で用いるステンレス鋼およびニッケル基合金（インコネル）に関する検討を行い以下の成果を得た。

1. 二次元検出器方式のX線応力測定により応力を測定し、これと試料に貼ったひずみゲージから求めたひずみと比較した。試料を四点曲げで負荷して異なるひずみ状態に対して両者の比較を行った。その結果、二種類の測定値は良好な相関関係を示すことが判明した。

2. 上記のデータに対してX線的弾性定数の決定を行った。

3. 塑性ひずみの推定を行うため、二次元X線応力測定によって求められるデバイ環に対して、その全周からの半価幅を求めて平均値を割出して塑性ひずみの評価に利用する方法を検討した。塑性ひずみと同様な挙動を示すと考えられる硬さ試験片について、デバイ環からの半価幅との相関性を調べた結果、両者により相関性があることが判明した。

3. ステンレス鋼およびニッケル基合金（インコネル）は、鋼材に比べてデバイリングが不均一化しやすい傾向があり、圧延、熱処理、溶接などの処理により複雑に変化する傾向が見られる。これらによるX線応力測定への影響および信頼性の高い応力測定にするための対応方法について、今後、検討する予定である。

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を検証するため、原子力発電機器の容器や配管の材料、使用環境を考慮して形状、寸法等を代表する複数種類の模擬試験体の仕様を決め、平板状の試験体を作製した。模擬試験体の材質はフェライト系鋼、オーステナイト系ステンレス鋼およびニッケル基合金を選定し、塑性ひずみ付与試験体は3種類の母材（鋼種は4種類：SUS304、SUS316L、NCF600、SS400）、溶接模擬試験体はオーステナイト系ステンレス鋼（SUS316L）、き裂付与試験体はオーステナイト系ステンレス鋼母材（SUS304）とした。塑性ひずみ付与試験体の仕様は角材質に最大10%の塑性ひずみを引張試験で付与した。溶接模擬試験体は、板厚35mmの316Lオーステナイト系ステンレス鋼板の周囲を拘束して実機相当の溶接残留応力を付与する狙いで、下向きTIG溶接で作製した。き裂付与模擬試験体は、長さ20mm程度×深さ8mm程度の熱疲労き裂を意図的に付与した。

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の溶接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するとともに、従来型のX線計測法を用いて平板状の溶接模擬試験体および塑性ひずみ付与模擬試験体を計測し残留応力のデータを取得した。従来型の超音波計測法によるデータ取得では、フェーズドアレイ法を用いた縦波斜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アレイ探触子を配置し、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1mm刻みでデータを取得した。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を測定した。また、き裂寸法の

計測値も取得した。これらの取得したデータは、今後新超音波法の適用性評価における比較データとして活用する。従来型のX線計測法では、 $2\theta - \sin^2\phi$ 法の原理を用いて残留応力の計測を行い、溶接模擬試験体および塑性ひずみ付与模擬試験体の残留応力データを取得した。計測条件は、日本材料学会「X線応力測定法標準（2002年版）—鉄鋼編—」を参考にして決め、溶接模擬試験体は母材部および溶接金属部ともにSUS316Lの条件とした。溶接模擬試験体3体および塑性ひずみ付与試験体を計測して取得した残留応力のデータは、今後新X線計測技術の適用性評価における比較データとして活用する。

3. 今後の展開：

これまでのところ、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ており、25年度中のプロトタイプ機を完成できる見通しである。これまでに開発した試作機を用いて、モデル試験体への計測では、これもほぼ計画通りの成果を得られる見通しを得ている。特に新超音波法では、従来の非線形SPACE画像計測の有効き裂は主に、既存の超音波探傷法で計測が困難な閉口き裂のみだったが、本研究で開発した大振幅超音波送信システムを組み合わせると、端部エコーSN比の悪い開口き裂の一部でもSPACE画像計測でき裂端部画像が得られることを確認した。今後さらにき裂入射波の大振幅化を予定しており、さらにSPACEの汎用性を広げる成果が期待できると考えている。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するとともに、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で、新しく導入したMn管球を用いることで3～4倍のN比改善が実証できた。また残留応力の計測についてMn管球を用いることによって、フェライト系鋼に対する二次元検出器方式および従来技術と同程度の応力測定と、実機適用への見通しが得られた。

これらの有効性について、既に超音波法、X線法共、既存の計測法を用いた系統的データ取得を終えており、今後き裂付与模擬試験体（新超音波法用）、溶接模擬試験体、塑性ひずみ付与模擬試験体（新X線法用）について、共同実験を行い、開発した手法の有用性を実証していく。

4. 参考文献

- (1) I. 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, AIP, (2013)印刷中.
- (2) I. T. Mihara and H. Ishida, Improvement of identification of a crack tip echo in ultrasonic inspection using large displacement ultrasound transmission, J. of Physics(2013)投稿中
- (3) T. Sasaki, S. Ejiri, Y. Fujimoto, T. uzuki, Y. Kobayashi, X-ray Residual Stress Analysis of Stainless Steel Using $\cos\alpha$ Method, Proc. of the 8th international conference on processing and manufacturing of advanced materials (THERMEC2013), Las Vegas, December 2-7, 2013 投稿中.
- (4) T. Sasaki, K. Kohda, H. Ito, X-ray Residual Stress Analysis of Nickel Base Alloys, Proc. of the 8th international conference on processing and manufacturing of advanced materials (THERMEC2013), Las Vegas, December 2-7, 2013 投稿中.