

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

(受託者) 国立大学法人東北大学

(研究代表者) 三原毅 大学院工学研究科

(再委託先) 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応力腐食割れの代表的防止策である残留圧縮応力付加施工時等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。

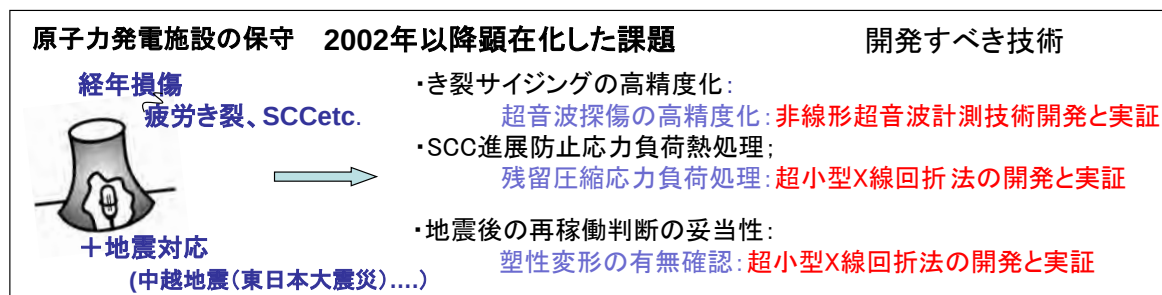


図 1 本研究で開発する計測技術と目的

2. これまでの研究成果

新超音波法の開発については、まず大変位超音波送信技術として、平成 24 年度から開発してきた積層探触子とマルチチャンネルパルサーを組み合わせる計測システムを SPACE (Subharmonic Phased Array for Crack Evaluation: 閉口き裂の映像法) に組み合わせる開発を進め、平成 25 年度に 16 素子積層 8 チャンネルパルサーで当初の大変位化を達成したが、実機適用には積層探触子の構造が複雑で探触子の歩留まりが悪く、さらに 8 台のパルサーが必要だった。そこで平成 26 年度に平成 25 年度の基礎検討を受けて、高能率の PZT-C6 (lead (Pb) Zirconia Titanate: チタン酸ジルコン酸鉛) 圧電素子とこの素子を有効に励振できる大電流対応型の SiC (Silicon Carbide: シリコンカーバイド) トランジスタを用いた超音波パルサーを新たに開発し、4 層積層探触子と 4 チャンネル SiC パルサーを組み合わせる簡易で実用的な計測システムを提案・試作した。さらに平成 27 年度は 4 層積層探触子の作製方法を改良・確立し、耐圧構造を付加することで大変位超音波送信の基盤技術を確立できた。また研究初期には圧

電素子に PZT-M6 を用い、16 層 8 チャンネルの積層素子を用い、最大 500V 励振により鋼中 25 mm 伝搬後のき裂部変位は最大 50 nm 程度(Peak to Peak)だった。本プロジェクトの最終成果として、PZT-C 材を 4 層積層した積層探触子を 4 台の SiC パルサーで駆動する新しい計測システムにより、まず従来の 16 層の積層から 4 層積層に構造を単純化し、実用に向けて積層探触子製造時の歩留まり改善と低コスト化を同時に達成できる見通しを得た。また PZT-C 材の 4 層積層探触子の製造工程を見直し、耐圧性を確保したことにより、現有の SiC パルサーの上限電圧の 1000V まで探触子を壊さず連続励振できることを確認し、前述の 25 mm 伝搬後の鋼き裂において最大約 200 nm の大変位超音波送信が可能になった。これらを既存の SPACE

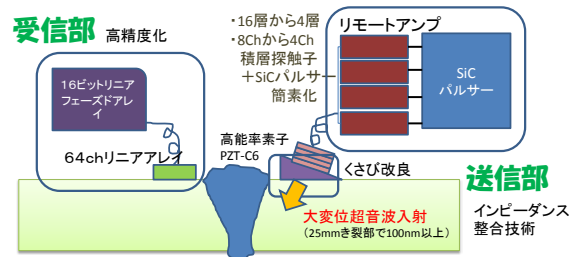


図2 完成した新超音波法システム模式図

と組み合わせて大変位化し、受信部も新しい高性能フェーズドアレイを導入して高精度化し、“新超音波法”を完成した。計測試験体としては、本プロジェクトで作製した実機き裂模擬試験体に加え、破壊力学の知見を利用して疲労き裂を導入し、弾性範囲で僅かに負荷してき裂を僅かに開閉しながら、さらに入射超音波変位も変化させて、き裂でのサブハーモニック波の基本発生挙動を観察した。その結果、本プロジェクトで開発した大変位超音波送信技術と組み合わせた SPACE

（新超音波法）を用いれば、既存の超音波探傷法でき裂端部エコーの SN 比が悪く、既存の SPACE ではサブハーモニック波が発生しなかったき

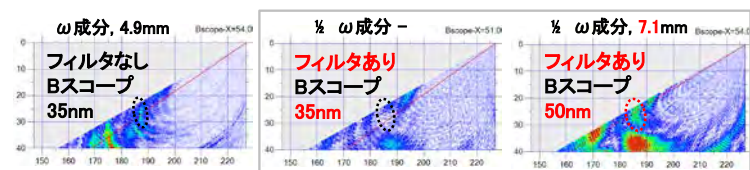


図3 端部エコーの SN 比が悪いき裂の新超音波法計測き裂が叩きあい、一定の条件でサブハーモニック波も発生した（図3）。これより SPACE をベースにした入射超音波の大変位化が、サブハーモニック波計測技術を探傷適用する汎用性を広げることが実証できた。さらにき裂におけるサブハーモニック波発生機構の検討において、解析モデルとして、破面観察からき裂の凹凸が μm 程度あることに着目し、き裂の凹凸を考慮できるき裂モデルを初めて提案し、解析した結果、き裂部に粘性因子を考慮しないモデルとして始めて、サブハーモニック波を出現できた。このことから、本き裂凹凸モデルはサブハーモニック波のき裂における発生機構解明のための基盤モデルとなり得ると考えられる。実機計測を考慮した場合、既存技術のフェーズドアレイ法が 1 探触子法であり、溶接 HAZ 部に発生したき裂を溶接部を介さずにき裂側から計測できるのに対し、新超音波法が 2 探触子法で減衰・産卵の大きい溶接部を跨ぐため不利なこともあり、模擬き裂試験体でもなお新超音波法の適用が困難な事例が顕在化しており、今後の検討条件である。

新 X 線法の開発については、実機適用可能な残留応力及び塑性ひずみ評価を実現するため、測定のために必要な性能として、①小型軽量性、②測定時間の高速性、③測定精度の向上、の 3 点を目標として進めた。まず、①の小型軽量性に関しては、新しい X 線計測技術である二次元 X 線検出器を X 線応力測定法として世界で初めて採用して実現した。具体的には、1980 年代にフジフィルム社が医療用として開発したイメージングプレート (Imaging Plate:IP) を X 線応力測定用に世界に先駆けて導入した。その基礎的知見のベースには金沢大学の佐々木らによる 1990 年

代以降の基礎研究の蓄積を活用して進めた。この結果、従来技術では不可欠となる大型で精密な回転機構からなるゴニオメータ部を不要にすることができた。これにより、装置全体が大幅にシンプルになり、しかも、小型で軽量の装置が実現した。従来技術と比較すると、本プロジェクトの開発機は装置占有スペースにおいて約 1/20、装置総重量において約 1/15 という超小型軽量化が実現できた。次に、②の測定時間の高速性に関しては、①の二次元 X 線検出器の導入による回折環画像データの一括計測かつ高速計測が可能となったことにより、従来技術(測定時間:10 分～20 分以上)に比べて約 10 倍高速な測定時間 1 分～2 分程度を実現した(なお、測定時間の幅は測定試料の結晶状態に依存して変わる)。なお、本プロジェクトの方式で測定される回折環画像データの有効活用のため、従来技術で用いられてきた、いわゆる、「 $\sin^2\psi$ 法」ではなく、新しい応力解析理論である「 $\cos\alpha$ 法」を採用して応力解析を行った。この $\cos\alpha$ 法による X 線応力測定の装置化は世界初の実現である。なお、 $\cos\alpha$ 法は平面応力測定用であるが、本プロジェクトでは金沢大の佐々木が開発した三軸応力状態にも適用可能な応力解析理論「一般化 $\cos\alpha$ 法」も適用可能にした。さらに、本プロジェクトでは角部や溝部の測定などのように回折ビームの一部分が遮断されることで、回折環の一部が欠ける場合にも有効に X 線応力解析可能な新解析理論「フーリエ解析法」も新開発した。このような二次元 X 線計測及び新データ解析理論により従来技術と比べて大幅な測定時間の短縮と適用範囲の拡大が実現した。さらに③の測定精度の向上に関しては、まず、上記でも述べた「一般化 $\cos\alpha$ 法」による三軸応力成分の影響を正確に考慮できるようにした。また、「フーリエ解析法」の新開発により、回折環が不完全となる場合、たとえば、前述の角部や溝部などの他に結晶粒が粗大な場合や X 線照射面積が小さい場合に問題となる斑点状(スポッティ状、図 6 参照)の回折環に対しても精度よく応力測定ができるようになった。また、フーリエ解析法でも対応が難しくなるような極端な斑点状の回折環が得られる場合に対しては、機械的に回折環を滑らかにすることが可能な新機構である「試料平面揺動法」を開発した(図 6)。こうして、測定精度を確保するとともに、従来技術より微小部の測定から広い部分の測定までを測定精度及び高速性を維持したまま実現可能とした(図 7)。なお、前者の微小部はコリメーターの調整で対応し、後者の広い部分は試料平面揺動法で対応可能である。一方、応力測定精度に関しては、従来技術における ± 30 MPa から本プロジェクト

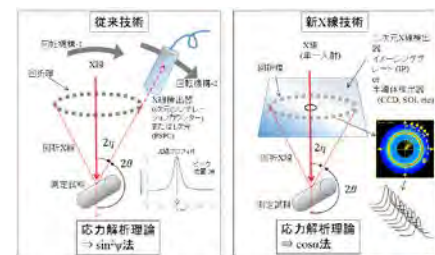


図 4 新 X 線法と従来法の比較

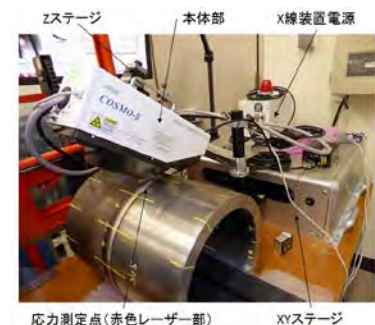


図 5 開発した新 X 線法装置

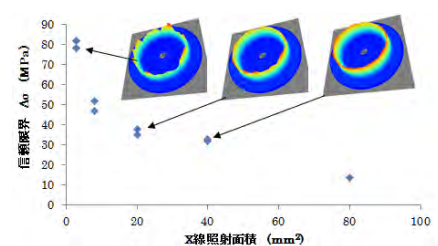


図 6 X 線照射面積と信頼性

では結晶状態の良好な試料に対して $\pm 1.2 \sim 5.8$ MPa となり、約 5 倍以上の繰り返し精度を確保

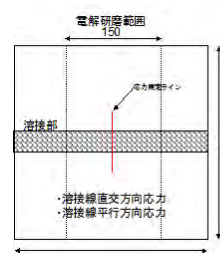
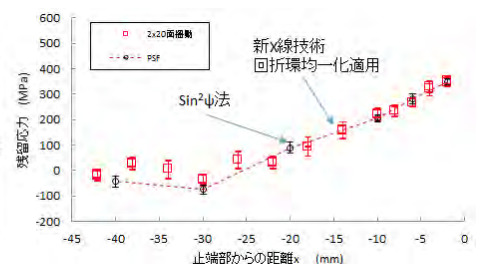


図 7 溶接試験体の残留応力計測の有効性実証



では結晶状態の良好な試料に対して $\pm 1.2 \sim 5.8$ MPa となり、約 5 倍以上の繰り返し精度を確保

できることを実証した。塑性ひずみ評価に関しては、回折環全体から 1 度の X 線測定で 500 個の半価幅データを使用できる利点を活用し、さらに前記の試料平面揺動法（マッピング測定）も適用することで安定した評価を実現できることが実証できた。また、現場適用においては、機器製作時の表面加工層の影響や材質の影響が避け難い事が課題だったが、電解研磨で測定表面の加工層を除去することと、塑性変形を受けていない箇所と塑性ひずみが懸念される箇所との相対的な評価を行うこと等により現場適用の可能性があることを確認した。

3. 今後の展望（24年度採択課題の場合）

新型炉では定期点検時も 200℃程度で計測する必要があるため、新超音波法では超音波探触子とアレイを上記に合わせた耐熱構造にする必要があり、圧電素子が PZT のままなら 100℃程度冷却するか、キュリー点の高い圧電素子への変更が必要になる。サブハーモニック超音波映像化技術は、既存の超音波探傷と全く異なる新しい技術だが、本プロジェクトで開発した大変位超音波送信技術は、現行炉構造部材に適用可能と研究推進委員会でも一定の評価を頂いたが、なお計測の高速化やき裂のスクリーニング利用等の現場のニーズを満たすには、フェーズドアレイの大変位化技術の開発やサブハーモニック波の発生機構の定量解明が必要と考えている。

新X線法については、X線回折法としては十分な小型化と、Mn 管球の開発でステンレス鋼にも適用できる装置が開発できたこと、X線照射面積の狭さも揺動により対応できることを実証したこと等から、残留応力計測に関しては十分実機で利用できる測定精度を確保した。今後は、様々の分野の残留応力計測の実績を増やして認知される必要があると考えている。塑性変形計測については、大きな塑性変形の計測については、本研究で新X線法を用いた計測にめどが立ったが、評価ニーズの高い小さな塑性変形の定量評価については、さらに計測精度を確保すると共に、計測実績を積んで実証を進める必要があると考えている。

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 , Coference Series 520 , 012010 (2014)
- (3) Improvement in X-ray stress measurement using Debye-Scherrer ring by in-plane averaging, T. Miyazaki, Y. Fujimoto, T. Sasaki, Journal of Applied Crystallography, 49, (2016), pp. 241-249.
- (4) X-ray residual stress measurement of austenitic stainless steel based on Fourier analysis, T. Miyazaki, T. Sasaki, Nuclear Technology, vol.194, No.1, (2016) pp.111-116.