

# 原子炉材料中欠陥(き裂)の3次元可視化に 関する調査研究

(財)発電設備技術検査協会 山口 篤憲

溶接部の健全性を評価する手法の一つとして超音波を用いた超音波探傷試験(UT)がある。この UT 検査をより確実にを行い、信頼性向上を目的に、当該探傷部からの欠陥エコー信号の解析や探傷条件の事前検討、さらには UT の教育・訓練を目的として、超音波伝播挙動を取り入れた超音波探傷計算機シミュレーション(以下、UT シミュレーションという)の開発が精力的に行われている。財団法人発電設備技術検査協会(以下、発電技検という)においてもこれまで開発を行っている。この UT シミュレーションに用いられる代表的な超音波の伝播解析法には、有限要素法や差分法による数値解析、レイトレース法のような近似解析をはじめ多くの手法があるが、発電技検では有限要素法による大規模超音波探傷シミュレーションシステムの開発を進めており、これら UT シミュレーションは、実用化段階に入っている。

UT シミュレーションでは、入力データとして当該試験体の物性値をはじめ、欠陥(き裂)形状、特に3次元形状や分布の情報が非常に重要であり、かつ必須でもある。特に原子力発電設備や化学プラントにおける損傷原因の大半を占めると言っても過言でない応力腐食割れ(SCC)に関する情報を得ることは、UT シミュレーションモデルの高精度化や高度化に対し重要である。最近になって、Ni 基合金やオーステナイト系ステンレス鋼に代表されるような実用鋼における SCC き裂に関する3次元形状や分布に関する実観察データが、発電技検によりはじめて報告された。Ni 基合金溶接金属内の SCC き裂は、その発生場所により凝固組織の影響を著しく受け、平滑で、比較的単調な形態を示すき裂や、凝固組織の粒界に沿って複雑に進展するき裂形態等があることが明らかにされた。またオーステナイト系ステンレス鋼の粒界型応力腐食割れ(IGSCC)では、粒界に沿って複雑に屈曲するき裂や、粒内型応力腐食割れ(TGSCC)ではシャープで直線的な割れ形態があることが明らかにされた。発電技検では、これら得られた SCC き裂データを分類化し、直接 UT シミュレーションモデルの入力データとして取り込むべきモデルの高精度化と高度化を図っている。

一方、このような UT シミュレーションモデルの使用に際しては、そのモデルの有効性の評価や検証を行うことが重要であり、必須でもある。構築された UT シミュレーションの検証には、当該試験体について UT 測定を行うとともに、UT シミュレーションによる解析を行い、それら結果と非破壊により測定した当該試験体中の欠陥位置およびサイズの結果とを比較する必要がある。そのために UT 測定が可能な大きい試験体中の非破壊による欠陥観察法が必要である。しかしそのような観察手法はほとんどないのが現状である。

そこで本調査研究では、UT 測定が可能な大きな試験体内の非破壊手法による欠陥観察法、特に SCC き裂のような微細な線状欠陥観察法に限定し、文献調査を中心に調査研究を行なった。

文献調査については、インターネットによる文献調査をはじめ、(独) 科学技術振興機構 (JST) によるキーワード検索および現地への見学調査等を行い、関連文献約 95 編を収集した。得られた文献情報等は、非破壊内部欠陥検査法の具備すべき条件とその手法、観察 (測定) 原理およびそれら使用施設についてまとめ、さらに研究成果について公開された論文を中心に調べた。

一方、これらの方法の中で、発電技検によって行われた予備試験の結果についても得られた成果についてまとめた。またこれら方法に使用される映像の記録方法および得られた画像についての画像処理解析ソフトに関する文献についてもあわせて調査した。

調査研究の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 一般的に知られている非破壊内部欠陥観察法としては、放射線を用いた透過法がもっともポピュラーであるが、この中でもこれまで原理的な事象はわかっていたが使用できる施設、装置等が開発されていなかったため、ほとんど研究が進んでいない特殊な手法で発生させたガンマ線 ( $\gamma$  線) 源やエックス線 (X 線) を線源として用いたイメージング法があることがわかった
- (2) その一つは、高エネルギーの  $\gamma$  線を用いたイメージング法で、この方法は光速近く (約 1 GeV) に加速された電子に  $\text{CO}_2$  レーザまたは Nd : YAG レーザを照射し、コンプトン散乱によって発生させた  $\gamma$  線を用いるイメージング法である。このコンプトン散乱によって発生する  $\gamma$  線は、照射するレーザの波長に依存し、 $\text{CO}_2$  レーザ (波長 10.54  $\mu\text{m}$ ) の場合は 1.76MeV の  $\gamma$  線が、Nd : YAG レーザ (波長 10 nm) の場合は 16.7MeV の  $\gamma$  線がそれぞれ発生する。この  $\gamma$  線によるイメージング研究が可能な施設は、わが国では兵庫県立大学 高度産業技術研究所 放射光施設 New SUBARU と (独) 産業技術総合研究所の 2 箇所である
- (3) 他の一つは、高速の電子にレーザを照射して発生させた X 線を用いたイメージングと、高速に加速した電子を金属ターゲットに照射し発生させた X 線を用いるイメージング法がある。電子にレーザを照射して得られる高エネルギーコンプトン散乱 X 線イメージングは、(独) 産業総合技術研究所で研究が行われており、シンクロトロン加速器により 6MeV まで電子を加速し、電子周回軌道にある金属ターゲットに照射し発生させる制動放射の X 線発生装置 “みらくる”<sup>TM</sup> を用いた X 線イメージング法の研究は、立命館大学で装置開発を含め研究が行われている。特にこの “みらくる” は卓上型の小型 X 線発生装置で、可搬可能である
- (4) 兵庫県立大学 New SUBARU の  $\gamma$  線イメージング装置を用いた発電技検の実験では、 $\text{CO}_2$  レーザを照射して得られる 1.76MeV のコンプトン散乱  $\gamma$  線によりステンレス鋼板厚が 10mm までの SCC き裂を観察することが確認された
- (5) 立命館大学の “みらくる” を用いた発電技検の X 線イメージング実験では、6MeV の X 線を発生する “みらくる 6X” を用いて行った。その結果、ステンレス鋼の板厚が 30mm までの SCC き裂を数 10 分間の照射で観察できることを確認した。この装置の

特徴は、発生する X 線が 6MeV の連続 X 線（白色 X 線）であり、金属ターゲットサイズが  $10\mu\text{m}$  と非常に小さいため点線源として扱うことができ、撮影倍率を自由に変化させることができる。また得られる透過像は位相差によるコントラストであるため画質は鮮明である

- (6) 発電技検が実施した 1.76MeV の  $\gamma$  線イメージングと、“みらくる 6X” による 6MeV の X 線イメージングについて、イメージングプレートによって得られたステンレス鋼中 SCC き裂の透過像を比較すると、実験した範囲内では観察可能な板厚、き裂像の鮮明度、画質ともに X 線イメージングの方が優れていることがわかった
- (7) 透過像の記録に用いるイメージングプレートは、分解能、すなわち反応層を特定のレーザー照射（波長）により励起させ、読取るため、決められた波長を発振する読取装置（アナライザー）が必要となる。またイメージングプレートには、照射後の経過時間や使用環境温度によって反応度が退化するフェーディングと呼ばれる効果があり、この効果は、経過時間が長いほど、また使用環境温度が高いほど退化速度は速い
- (8) イメージングのコントラストは、用いる放射線等によって異なり、New SUBARU による  $\gamma$  線イメージングではコントラストは吸収効果によって生じる。しかし立命館大学の“みらくる”による X 線イメージングでは、位相差コントラストと屈折によるエッジ強調コントラストとが併用して生じるため、SCC き裂のような微細なヘアークラックのような線状き裂では鮮明なコントラストが得られる

以上、調査研究の結果、UT シミュレーションの検証のために超音波探傷測定が可能な大きさの試験体内の線状欠陥検出法としては、電子をシンクロトロンのような加速器にて高速に加速し、 $10\mu\text{m}$  サイズの金属ターゲットに照射し、発生する連続 X 線（白色 X 線）を用いた X 線イメージング法が最も有効、かつ得られる画質も鮮明であることが明らかになった。

またこれら放射線源を用いたイメージングに関する技術は、従来のプラント設備の機器・配管溶接継手部等の検査に用いられるだけではなく、空港等の手荷物検査やコンテナ内の積載物の検査、爆弾や核物質など危険物の不法持込検査、テロ対策検査装置として今後ますますその需要と重要性が増すと考えられる。