

# レーザー超音波探傷技術の開発と 原子炉内保全への適用

Laser-Ultrasonic Nondestructive Testing and Its Application to Nuclear Industry

落合 誠 三浦 崇広 山本 智

■ OCHIAI Makoto ■ MIURA Takahiro ■ YAMAMOTO Satoshi

東芝は、遠隔から非接触で超音波信号を送受信することが可能なレーザー超音波法に着目し、それを応用した新しい探傷技術を開発した。この技術によれば、深さ0.1 mmという微小な表面亀裂を検出でき、更に、その亀裂深さが0.5 mm以上の場合、標準偏差±0.2 mm以下という高い精度で深さを測定することができる。

当社は、この技術を適用した原子炉内構造物の探傷システムを開発し、実規模試験でその性能を検証した。この探傷システムは、2004年12月から国内の原子力発電所において、レーザー超音波法の世界初の探傷への応用として実適用を開始した。

Laser-ultrasonics is a novel technology that enables remote and noncontacting generation and detection of ultrasound. Toshiba has developed new nondestructive testing (NDT) techniques based on laser-ultrasonics. One of these techniques allows the detection of surface-breaking microcracks having a depth of 0.1 mm, and the measurement of their depth with an accuracy of 0.2 mm when the depth exceeds 0.5 mm. A laser-ultrasonic NDT system for nuclear reactor internals was developed and its performance was verified through full-scale mock-up experiments. The system has been applied to industrial nuclear power plants since December 2004.

## 1 まえがき

近年、国内外のいくつかの原子力発電プラントにおいて、原子炉内構造物や配管の溶接部周辺に、応力腐食割れ(SCC)という種類の亀裂が発生したとの事例が報告されている。原子力発電の安全・信頼性をよりいっそう向上させていくためには、設備や機器を適切な裕度をもって設計、運用することが基本ではあるが、このSCCへの対策として、次のような技術を準備し、適用していくことも重要である。

- (1) SCC発生を抑制する予防保全技術
- (2) SCC発生状況を把握する検査技術
- (3) SCC発生部位を補修する補修技術

原子炉内の構造物は運転中の中性子照射によってそれ自体から放射線を放出するようになっており、また、点検時も稼働時と同じように原子炉圧力容器の水中に設置されている。したがって、作業員が直接アクセスすることは極めて困難で、予防保全、検査、及び補修はすべて水中での遠隔作業となり、それに対応できる高度な技術が要求される。

レーザー技術は、計測や加工など幅広い産業分野において利用されているが、高出力で高品質なレーザー光をフレキシブルな光ファイバで伝送できることから、遠隔作業にも適している。東芝はこの特長に着目し、表面残留応力の改善(レーザーピーニング)や表面材質の改善(レーザー脱鋭敏化処理)などレーザーによるSCCの予防保全技術の開発に取り組み、既に実プラントへの適用を開始している<sup>(1)</sup>。

当社はこれらの技術に続き、レーザーによるSCCの検査を

実現するレーザー超音波探傷技術を開発してきた。ここでは、レーザー超音波探傷技術の概要と性能、及び原子炉内構造物への適用について述べる。

## 2 レーザー超音波探傷技術

超音波技術は、構造物などの亀裂探傷や厚さ、液位、流量などのプロセス測定手法として幅広く利用されている。通常の超音波技術では、圧電素子と呼ばれる固体素子を用いて超音波信号を送受信する。この際、固体素子は液体媒質を介して適切な条件で検査対象に接触させる必要があり、一般に、曲面部や周辺の空きスペースが狭い場合、及び対象に接液できない場合には、適用に工夫が必要であった。

一方、この送受信の固体素子をレーザー光で置き換えた、レーザー超音波法という送受信技術が提案されている<sup>(2)</sup>。レーザー超音波法によれば、接触が不要なことから複雑な形状の検査対象にも対応でき、しかも細い光ファイバでレーザー光を伝送することで、狭い部位にも適用できる。

以下にレーザー光による超音波の送受信技術(レーザー超音波法)、レーザー超音波法を用いた亀裂検査技術(レーザー超音波探傷技術)、及びレーザー超音波探傷技術の炉内構造物検査への適用に関して述べる。

### 2.1 レーザによる超音波の送受信

レーザーによる超音波の送信には、レーザー光が“高出力な光”であるという特長を利用する。

平均出力10 W程度の中規模レーザー光源でも、その発振を

時間的に数nsオーダーのパルス状に時間制御し、更に、その照射スポットを空間的に口径1mmまで絞り込めば、集光点に照射される瞬時最大パワー密度として数GW/cm<sup>2</sup>を実現することができる。このようなレーザー光を材料に照射すると、そもそも入射パワーは10Wでしかないため材料全体を加熱する効果はごく小さいが、材料表面の極微小領域を瞬間的に加熱し、表層の数原子層をプラズマ化することが可能である。発生したプラズマが膨張する際、その反力として材料に圧力が加わり、材料表面を伝播(でんぱ)する振動(表面波)及び内部に伝播する振動(縦波と横波)が同時に発生するが、これらの振動には極めて広帯域な周波数成分が含まれるという特徴がある。このように、レーザーを照射するだけで超音波を発生することができる。

一方、レーザーによる超音波の受信には、レーザー光が“高品質な光”であるという特長を利用する。

材料を伝播した超音波振動が材料表面に到達すると、到達点がnm以下の微小な変位で振動する。ここで、超音波を検出したい位置にレーザー光を照射すると、その反射光には微小な光周波数遷移(ドップラーシフト)が発生する。レーザー光の周波数と位相の安定度が十分高ければ、この微小な光周波数遷移を、光の干渉効果を用いて計測することができる。このようにすれば、レーザーを照射し、その反射成分を干渉計で解析することで、超音波信号を検出することができる。

このレーザーによる超音波の送受信技術を組み合わせて使用することで、従来は固体素子を接触しなければならなかった超音波信号の送受信を、2本のレーザー光を照射するだけで実現することができるようになる。

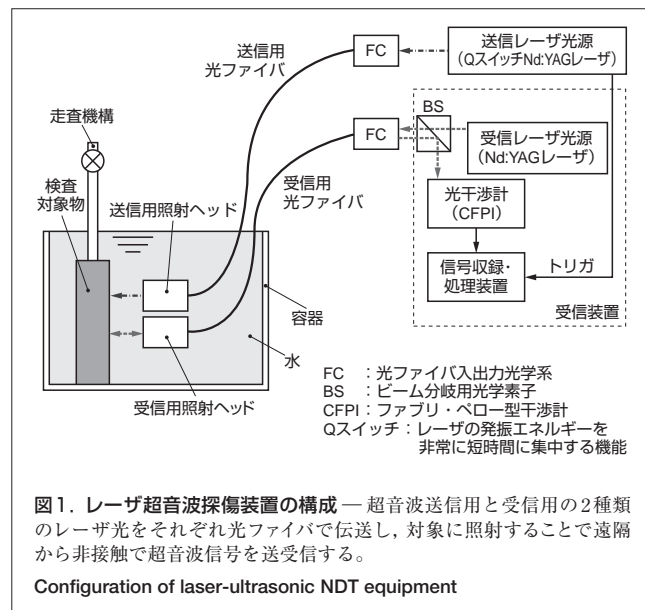
## 2.2 レーザ超音波法を用いた亀裂探傷

レーザー超音波法によれば遠隔から非接触で超音波を送受信することができる。当社は更に、レーザー超音波法で送受信される超音波が広帯域であり、微小な亀裂と相互作用しやすい高周波数成分(短波長成分)を含むことに着目した。この特性を利用すれば、微小亀裂の検出と、その深さの高精度測定ができるようになる。

以下に、当社が開発したレーザー超音波法による亀裂探傷技術(レーザー超音波探傷技術)の概要を述べる。

### 2.2.1 レーザ超音波探傷装置の構成

レーザー超音波探傷を実現する装置構成を図1に示す。超音波送信用のレーザー光源としては、発振エネルギーが約30mJ、パルス幅が6~10nsのNd:YAGレーザー<sup>(注1)</sup>を用いる。レーザー波長は、対象が炉内の金属構造物である場合、水中で透過性の高い532nmを用いることを標準としているが、対象により変更する場合もある。このレーザー光は光ファイバで送信用照射ヘッド



まで導かれ、スポット径が約φ1mmになるよう集光されて検査対象物に照射される。一方、超音波受信用のレーザー光源は波長1,064nmのNd:YAGレーザーであり、同様に光ファイバで伝送され、受信用照射ヘッドで対象に照射される。対象面で反射した光成分は同じ経路を經由して光干渉計に導かれる。光干渉計で検出した超音波信号を信号収録・処理装置で解析し、亀裂の有無と、亀裂があった場合にはその深さを測定する。なお図1では、対象は水中に設置されているが、これは炉内環境を模擬するためであり、レーザー超音波探傷技術は気中、水中いずれの環境に設置されている対象にも適用することができる。

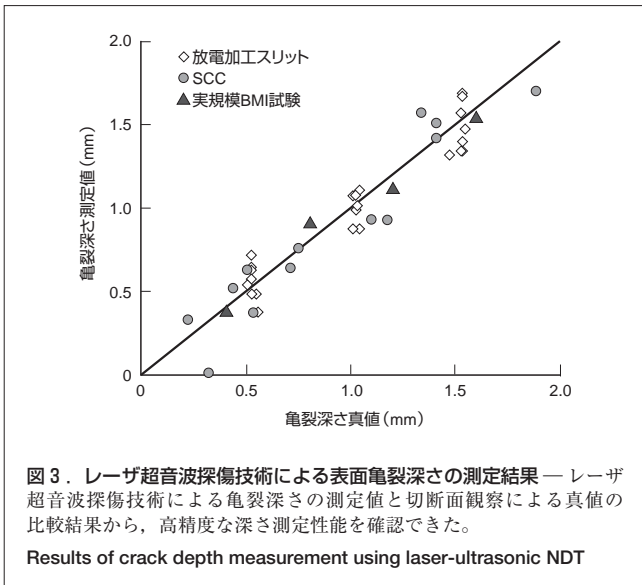
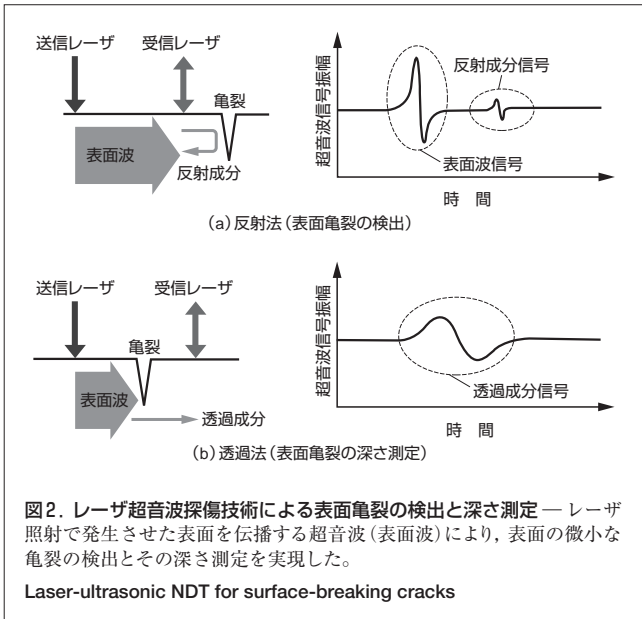
2.2.2 レーザ超音波探傷技術による表面検査

レーザー超音波探傷技術によれば、対象表面、内部、裏面のいずれに存在する欠陥も検査することができる。内部、裏面の欠陥検査技術については既に報告している<sup>(3)</sup>ので、ここでは特に、表面亀裂の検査技術について述べる。

対象表面に存在する亀裂を検査する場合は、レーザー照射で発生した表面波を用いる。模式的に図2に示すように、対象表面に亀裂がある場合、表面を伝播する表面波はその開口部で反射され、受信レーザーにより検出される。したがって、表面波反射成分のありなしにより亀裂の有無を知ることができる。

一方、表面波信号の一部は亀裂を透過する。当社はこの透過成分信号の周波数に着目した独自の亀裂深さ測定技術を開発した<sup>(4)</sup>。開発した技術の性能の一例を図3に示す。ここで、放電加工スリットは人為的に形成した矩形(くけい)状の溝であり、また、SCCは応力を与えた試験片を腐食性薬品中に浸せきして発生させた実物に近い亀裂である。縦軸はこの手法で測定した亀裂深さ(測定値)であり、横軸は、試験後に亀裂部分を切断し、顕微鏡で測定した亀裂深さ(真値)で

(注1) ネオジウム(Nd)を含むイットリウム(Y)-アルミニウム(AI)-ガーネット結晶を用いたレーザー。

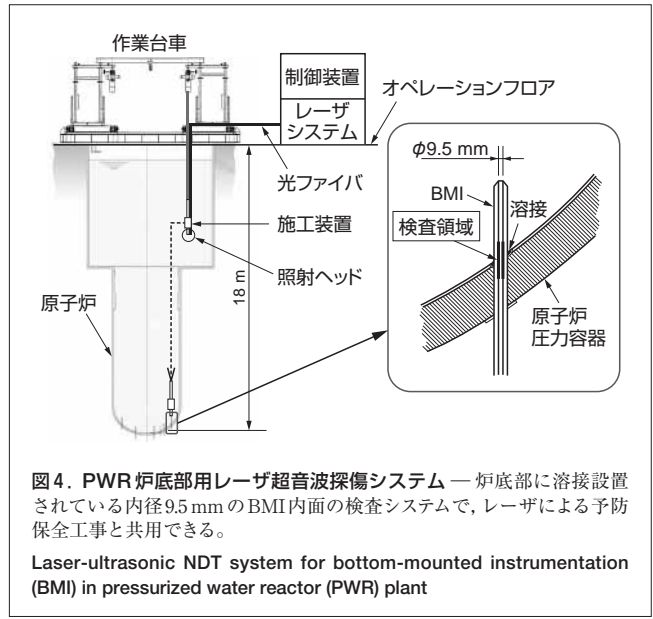


ある。図から明らかなように、この手法によれば、SCC (開口幅約 20  $\mu\text{m}$ , 代表深さ約 1 mm) を含む微小亀裂の深さを、標準偏差  $\pm 0.2$  mm 以下という高い精度で測定することができる。

### 3 レーザ超音波探傷技術の炉内構造物検査への適用

前述のようなレーザ超音波探傷技術の開発は既に完了しており、個々のアプリケーションに応じた適用の段階にある。ここでは一例として、加圧水型原子炉 (PWR) の炉内構造物へ適用した例につき説明する。

PWR 炉底部には炉内計装筒 (BMI) という炉内の計測器案内管が溶接設置されている。近年、海外の PWR プラント



において、この細管部位に SCC と推定される亀裂が発生し、炉水が炉外に漏れるという事象が発生した。この事象を受け、PWR 原子力発電所を持つ国内の各電力各社は、この部位の検査と予防保全に大きな関心を寄せている。そこで当社は、レーザ超音波探傷技術をこの部位に適用すべく、探傷システムを開発した。このシステムは、次の六つの部分から構成される (図 4)。

- (1) レーザシステム
- (2) 制御装置
- (3) 光ファイバ (レーザ伝送システム)
- (4) 施工装置 (照射ヘッドを含む)
- (5) 作業台車
- (6) 照射ヘッド

レーザシステムと制御装置はオペレーションフロアと呼ばれる上層部に設置され、レーザシステムから発振した送信・受信レーザ光は、長さ約 40 m の光ファイバで炉底部の検査部位まで伝送される。施工装置は作業台車から炉底部に向けてつり下げられ、BMI の頂部に設置・固定される。施工装置には光ファイバで導かれた送信、受信の 2 本のレーザビームを対象面に照射する照射ヘッドが搭載されており、この照射ヘッドが BMI 内面に挿入されて内面を検査するシステムとなっている。

この BMI は内径 9.5 mm という細管であるため、新たに小型照射ヘッドを開発して適用した。開発した小型照射ヘッドの外観を図 5 に示す。このシステムにおいては、省スペースの観点から、レーザ超音波探傷の標準構成である送信・受信レーザを個別伝送するファイバ 2 本構成 (図 1) ではなく、同一の光ファイバで伝送するファイバ 1 本構成を採用している。同一の光ファイバで伝送された送信・受信レーザは、小型

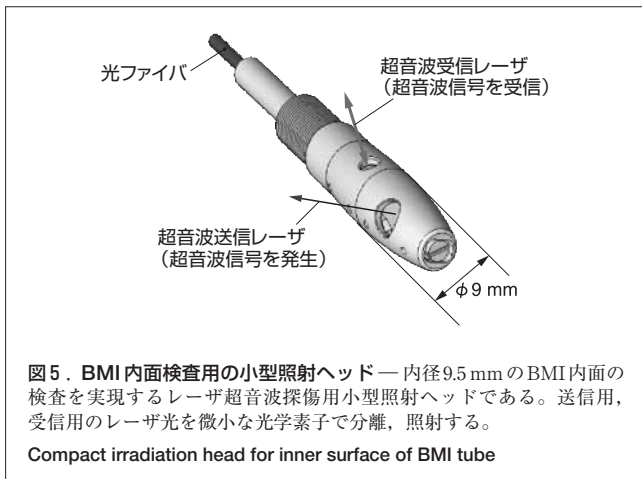


図5. BMI内面検査用の小型照射ヘッド—内径9.5mmのBMI内面の検査を実現するレーザー超音波探傷用小型照射ヘッドである。送信用、受信用のレーザー光を微小な光学素子で分離、照射する。  
Compact irradiation head for inner surface of BMI tube

照射ヘッド内部に設置された波長選択型ミラーで分岐され、それぞれ検査対象表面に照射される。小型照射ヘッドは施工装置に備えられた軸・周方向走査機構によりらせん状に走査し、BMI内面をもれなく検査する構成となっている。これら一連の動作と、探傷信号の収録や処理は制御装置で行う。

このシステムのプロトタイプを試作し、実規模BMI試験設備で検証試験を実施した(図6)。実規模BMI試験は、水深約20mの位置に実物大のBMI試験体を設置して実施した。その内面には深さ0.4mm, 0.8mm, 1.2mm, 及び1.6mmの四つの亀裂を加工してあり、それらの亀裂深さの測定結果を図3に▲で示す。これら測定値は真値とよく一致しており、このシステムがBMI内面検査装置として十分な性能を備えていることを確認した。

なおこのシステムは、送信レーザー光の照射条件を変更するだけで、検査から予防保全(レーザーピーニング)へとその機能を容易に変更することができる構成となっている。

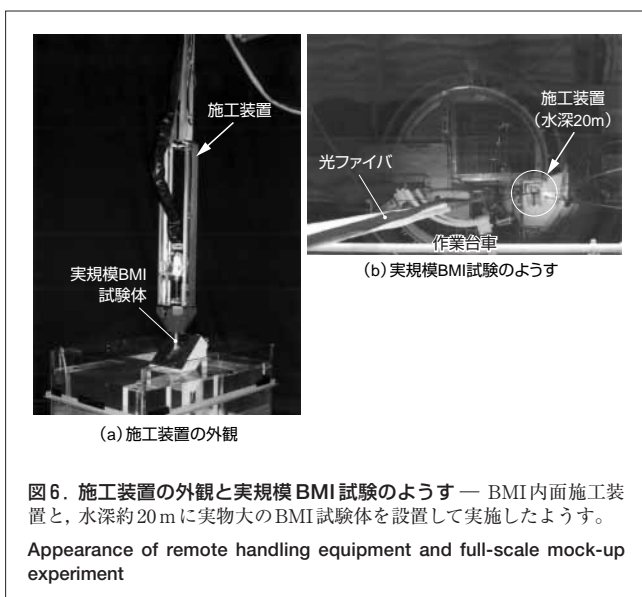


図6. 施工装置の外観と実規模BMI試験の様子— BMI内面施工装置と、水深約20mに実物大のBMI試験体を設置して実施した様子。

Appearance of remote handling equipment and full-scale mock-up experiment

## 4 あとがき

従来、対象物に液体媒質を介して固体素子を接触させ送受信していた超音波信号を、遠隔で非接触、かつ、液体媒質なしで送受信できるレーザー超音波法に着目し、その亀裂探傷への応用技術を開発した。

開発した技術によれば、表面亀裂の場合、深さ0.1mmの微小亀裂から検出が可能であり、更に、深さが0.5mm以上の場合、標準偏差±0.2mm以下という高い精度で深さを測定することができる。この検査技術を適用したPWR内構造物用の探傷システムを構築し、実規模試験を通じてその性能を検証した。この探傷システムは、2004年12月に、国内PWRプラントにおいて、世界初のレーザー超音波法の探傷応用として実適用を開始した。

なお、ここでは、PWR炉内構造物検査へのレーザー超音波法の適用を中心に述べたが、レーザー超音波法はそのほかにも、移動物体及び高温物体など液体媒質の塗布や固体素子の接触が困難な対象の非破壊検査、板厚測定、温度測定や、材料の弾性、組織、粒径など材料特性の測定などへの展開も期待できる。

今後、原子力プラントにおける非破壊検査技術としての実績の拡大を図るとともに、一般プラントや、更には鉄鋼、自動車、航空機などの他産業分野においても特長ある検査・計測技術として適用が進むように、更なる技術改良と実用化に取り組んでいく。

## 文献

- (1) 前川 治, ほか. 先端技術による原子炉保全の展開. 東芝レビュー. 57, 4, 2002, p.15-18.
- (2) Scruby, C.B., et al. Laser-ultrasonics: techniques and applications. Bristol, Adam Hilger, 1990, 447p.
- (3) Ochiai, M., et al. Detection and characterization of discontinuities in stainless steel by the laser ultrasonic synthetic aperture focusing technique. Materials Evaluation. 62, 4, 2004, p.450-459.
- (4) 落合 誠, ほか. レーザ励起広帯域表面波を用いた微小き裂サイジング手法. 日本原子力学会誌. 43, 3, 2001, p.275-281.



落合 誠 OCHIAI Makoto

電力・社会システム社 電力・社会システム技術開発センター 計測・検査技術開発部主務。光と超音波を応用した検査・計測技術の開発に従事。日本原子力学会, 非破壊検査協会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



三浦 崇広 MIURA Takahiro

電力・社会システム社 電力・社会システム技術開発センター 計測・検査技術開発部。光と超音波を応用した検査・計測技術の開発に従事。日本原子力学会, 非破壊検査協会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



山本 智 YAMAMOTO Satoshi

電力・社会システム社 磯子エンジニアリングセンター 原子力機器設計部主務。原子力発電所設備の点検・検査技術の開発, 装置設計, 施工業務に従事。日本機械学会会員。Isogo Nuclear Engineering Center