

# 先端技術による原子炉保全の展開

State of the Art of Toshiba Maintenance Techniques for Reactor Internals

前川 治 服部 靖弘 須藤 亮

MAEKAWA Osamu

HATTORI Yasuhiro

SUDO Akira

原子力発電所の高経年化が進むなか、原子炉保全は、原子力発電の経済性向上に必要な運転プラントの安定運転の維持と稼働率向上を達成していくうえで重要なテーマである。原子炉保全の中心は応力腐食割れ(SCC: Stress Corrosion Cracking)対策である。当社では、多くの優れた特性を備えているレーザ応用技術を用いた原子炉保全技術を開発し、実機適用を図っている。また、高経年化プラントにおいては、機器の健全性確認のための検査が重要な役割を果たすが、それに必要な検査技術の高度化、検査装置の開発、更には遠隔操作技術についても開発並びに実機適用を進めている。

As the number of aged plants increases, maintaining the integrity of the reactor pressure vessel and reactor internals in aged plants has become an essential issue to ensure continued stable operation and achieve higher plant operability. A major issue with regard to reactor internals is stress corrosion cracks (SCCs). Laser-applying techniques have many features suitable for preventive maintenance work on reactor internals.

Toshiba has developed various laser-applying preventive maintenance techniques and accumulated considerable field experience utilizing these techniques in various aged plants. Moreover, in view of the importance of confirming the soundness of reactor internals in aged plants, Toshiba has developed and applied sophisticated nondestructive testing techniques for this purpose.

## 1 まえがき

原子力発電がよりいっそう経済性に優れた電源となるためには、生涯発電量の増加や運転コストの低減が重要であり、そのためには、運転プラントの安定運転が重要となる。高経年化プラントが増加しつつあるなかで、プラントの安定運転を継続するうえで、確実な原子炉保全の実施がいっそう重要となってきた。また、機器の健全性確認のための検査技術の役割が、欠陥を管理するという考え方の面からも一段と重要性を増している。

ここでは、沸騰水型原子炉(BWR: Boiling Water Reactor)の原子炉保全にかかわる最新技術として、レーザ応用保全技術、非破壊検査技術、遠隔操作技術及び水化学技術について述べる。

## 2 レーザ応用原子炉保全技術

BWRプラントの原子炉保全で、主たる対象となる損傷事象はSCCである。初期のBWRで使われている材料の一部では、炉内環境下で、溶接部及びその近傍にSCCが発生する可能性があるため、これまでに、材料、応力、環境の各発生要因に対する予防保全技術が種々開発され、実機適用が図られているが、依然として健全性維持の観点から重要なテーマとなっている。

当社では近年、原子炉保全技術としてレーザ応用技術に注力し、技術開発と実機適用を進めている。レーザ応用技術は、原子炉保全に対する種々の制約条件に対応できる以下の特長を持っている。

- (1) 施工時の反力がないため装置を小型・軽量化することができ、複雑形状や狭隘(きょうあい)部に適用できる。
- (2) 低入熱での溶接が可能であり、炉内照射材への適用に最適である。
- (3) 検査、補修、予防保全各分野のレーザ技術があり、施工システムとして合理的な計画ができる。

特に最近では、光ファイバにより、高エネルギーレベルのレーザを伝送する技術を開発し、施工ヘッドを大幅に小型化することにより、適用範囲が大きく広がっている。

レーザ応用原子炉保全技術としては、レーザピーニング法による応力改善と、材料表面の鋭敏化した組織を改質する脱鋭敏化処理が代表的な手法である。更に、事後保全技術として、水中レーザ補修溶接についても、実機適用技術として確立している。

### 2.1 レーザピーニング

レーザピーニングは、水中でパルスレーザを材料表面に照射し、発生したプラズマを封じ込める際の衝撃力により、材料表面に圧縮の残留応力層を形成させるものである。応力改善効果の例を図1に示す。レーザピーニングは材料に対する熱影響がほとんどなく、中性子照射量の高い部位への適

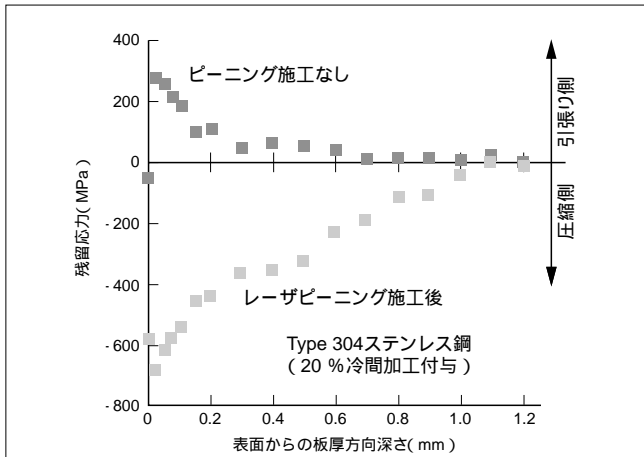


図1．レーザーピーニングによる残留応力の改善効果 - レーザーピーニング施工により，引張りの残留応力が板厚の深くまで圧縮に改善される。  
Residual stress improvement by laser peening

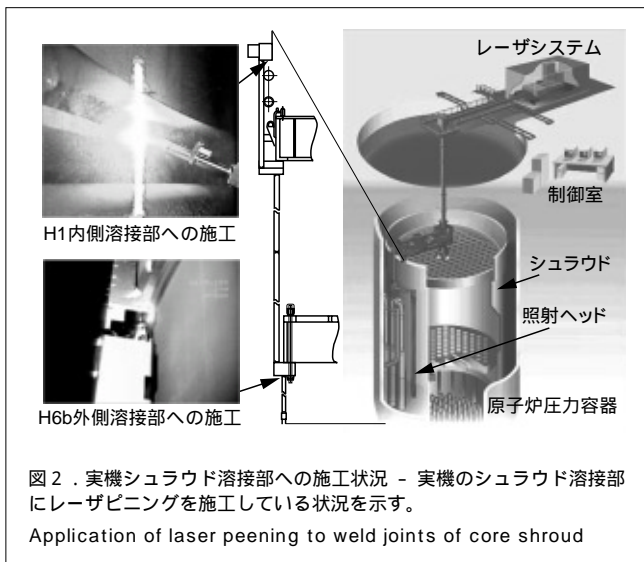


図2．実機シュラウド溶接部への施工状況 - 実機のシュラウド溶接部にレーザーピーニングを施工している状況を示す。  
Application of laser peening to weld joints of core shroud

用が可能なことも大きな特長である。実機シュラウドへの施工状況を図2に示す。これまでは導光管と鏡を用いてレーザーを伝送していたが，更に狭隘な部位へ適用するため，光ファイバ伝送によるレーザーピーニング技術を開発した<sup>(1)</sup>。超小型施工ヘッドの例を図3に示す。

### 2.2 レーザ脱鋭敏化処理

レーザー脱鋭敏化処理(LDT : Laser De-sensitization Treatment)は，気中もしくは水中でレーザー照射を行い，材料表面を再溶融又は固溶化させて，SCCを起こさない組織に改質する方法である。ジェットポンプライザ管の溶接部へ適用する場合には，例えば図4に示すように，管内面へ施工することで，内面の鋭敏化組織を改質するとともに，外面の残留応力の改善を図ることが可能となる。

### 2.3 レーザ補修溶接

中性子照射材へ適用することを考慮し，低入熱で補修溶

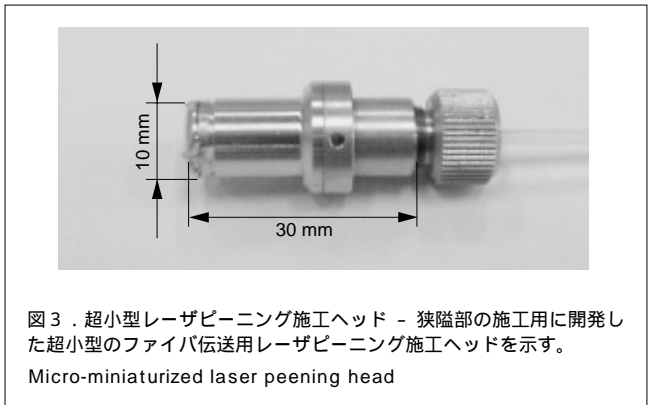


図3．超小型レーザーピーニング施工ヘッド - 狭隘部の施工用に開発した超小型のファイバ伝送用レーザーピーニング施工ヘッドを示す。  
Micro-miniaturized laser peening head

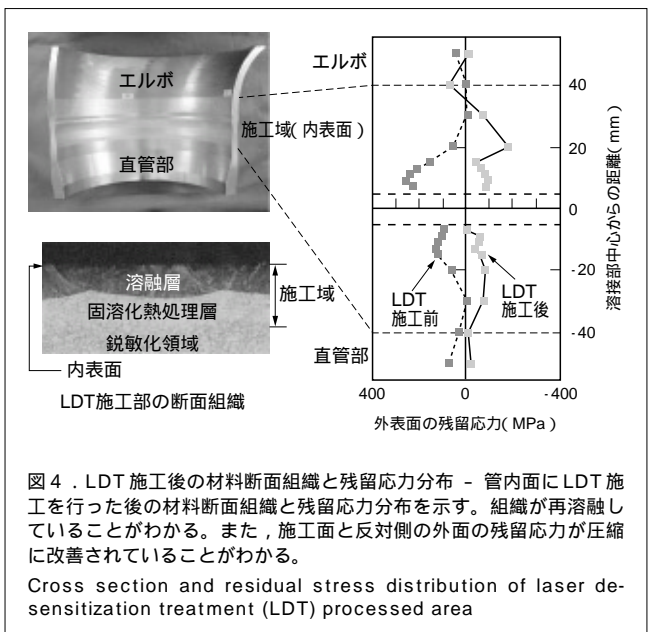


図4．LDT施工後の材料断面組織と残留応力分布 - 管内面にLDT施工を行った後の材料断面組織と残留応力分布を示す。組織が再溶融していることがわかる。また，施工面と反対側の外面の残留応力が圧縮に改善されていることがわかる。  
Cross section and residual stress distribution of laser de-sensitization treatment (LDT) processed area

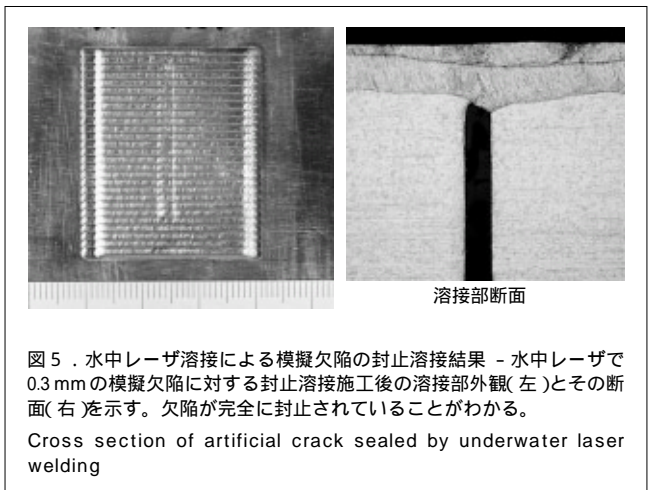


図5．水中レーザー溶接による模擬欠陥の封止溶接結果 - 水中レーザーで0.3 mmの模擬欠陥に対する封止溶接施工後の溶接部外観(左)とその断面(右)を示す。欠陥が完全に封止されていることがわかる。  
Cross section of artificial crack sealed by underwater laser welding

接が可能な水中溶接である。欠陥開口部を封止し，欠陥を炉水から隔離することにより進展を止める欠陥シール溶接にも適用可能である。図5に示すように，開口幅0.3 mmの模擬亀裂を封止できることを確認している。

### 3 検査技術及び遠隔操作技術

原子炉機器の高経年化を踏まえ、保全技術の一環として高度な検査技術が必要となっている。検査技術の高度化においては、目視検査、表面検査、超音波検査といった非破壊検査技術の高精度化とともに、汎用性の高い炉内遠隔操作装置の開発が重要となる。

#### 3.1 非破壊検査技術

3.1.1 三次元目視検査 従来の炉内目視検査は間接目視で行われているが、テレビ(TV)カメラの映像では深さ情報があいまいで、欠陥と表面の凹凸を識別することが困難であった。これを解消するために、二つの異なる視点からの画像を一つの画像に重ねて表示・観察する、立体映像観察法を応用した三次元目視カメラを開発した。

浸透探傷検査(PT)に代わって表面の微細な欠陥を検出する方法として、欠陥深さと渦流探傷器出力の関係を補正できる機能を持った、シミュレーション応用高精度渦流探傷検査(S-ECT)装置を開発し、非接触で高速な表面検査を可能とした。同じ試験体で比較したS-ECT結果とPT結果を図6に示す。S-ECTはPTと同様なイメージで探傷できることがわかる。

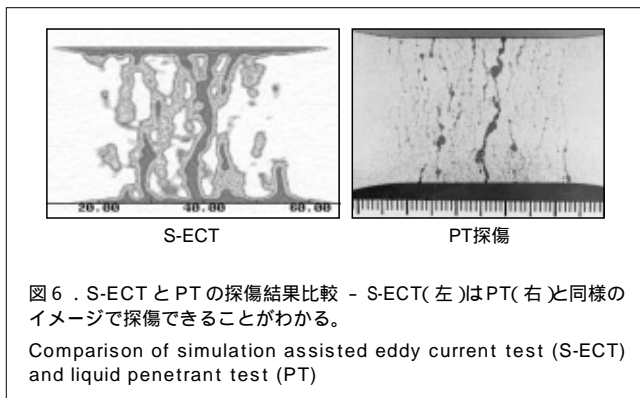


図6 . S-ECTとPTの探傷結果比較 - S-ECT(左)はPT(右)と同様のイメージで探傷できることがわかる。  
Comparison of simulation assisted eddy current test (S-ECT) and liquid penetrant test (PT)

3.1.2 フェーズドアレイ超音波探傷検査 従来の超音波探傷(UT)方法よりも正確かつ高速に欠陥の検出及びサイジングを可能にするために、多チャンネルの振動子を用いたフェーズドアレイ超音波探傷検査装置を開発し、実機適用を図っている<sup>(2)</sup>。

多チャンネルの振動子を電氣的に走査するため、探触子を移動する必要がなく、広範囲の検査が高速・高精度で実施できる。また、検査対象部位と非接触での検査が可能のため、従来の方法では探触子が設置できなかった部位に対する検査も可能となった。探傷結果のリアルタイムでの画像化の一例を図7(a)に、各チャンネル数の探触子プローブを図7(b)に示す。

3.1.3 レーザ UT レーザ UT は、送信レーザー光で検査対象表面に超音波を励起させ、対象物中を伝わった超音

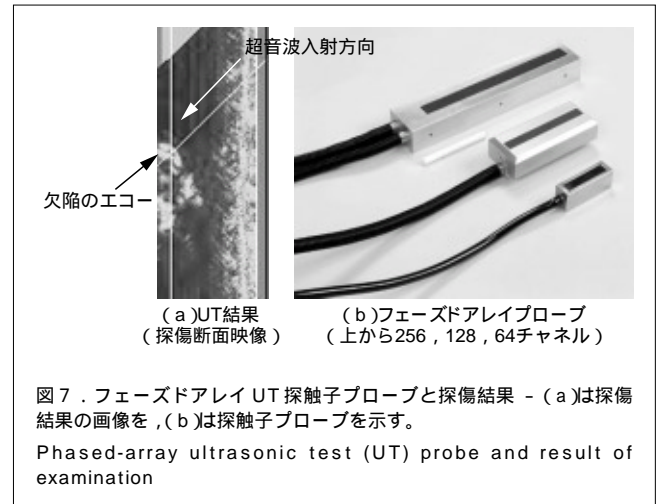


図7 . フェーズドアレイ UT 探触子プローブと探傷結果 - (a)は探傷結果の画像を、(b)は探触子プローブを示す。

Phased-array ultrasonic test (UT) probe and result of examination

波を受信レーザー光で検出するもので、超音波の変化を感じることにより、欠陥が検出できる<sup>(3)</sup>。また、受信した超音波の周波数分析を行うことで、深さの同定も可能である。レーザー光の伝送には光ファイバを用いることができるためアクセス性がよく、特に、炉底部の複雑形状部位などに有効な探傷方法であると考え、実機への適用化研究を進めている。

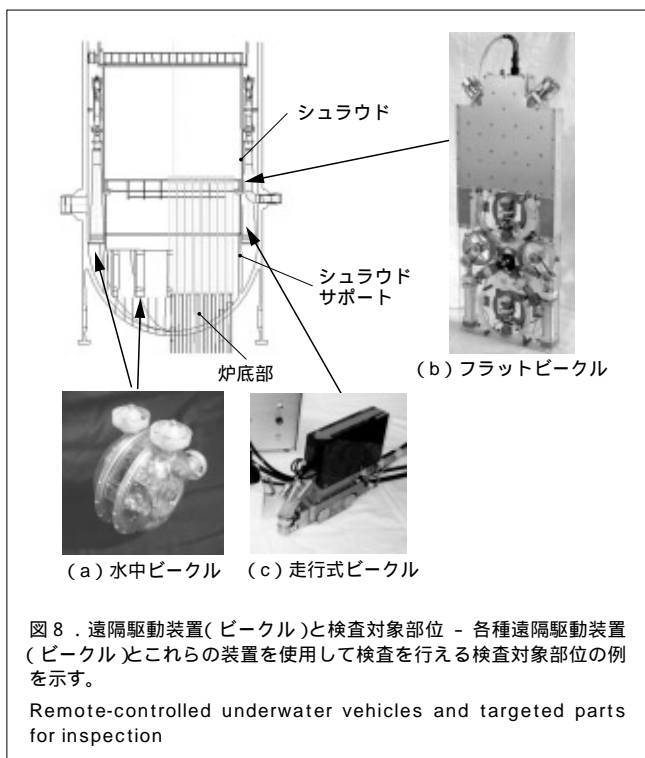
#### 3.2 遠隔操作技術

炉内検査の実施にあたっては、複雑かつ狭隘な炉内の所定位置に、検査装置を搬送し、位置決め、保持する遠隔操作装置(以下、ピークルという)の開発が重要である。当社では、各検査特性に応じたピークルを開発し、実機適用を進めている。

3.2.1 水中ピークル この装置は、シュラウドサポートプレート下面などを含む炉内の広範囲にアクセスすることのできる遊泳式のピークルである(図8(a))。炉内での運動性を考慮し、水中重量と浮力がほぼ等しく(以下、中性浮力化という)なっている。上下姿勢角を制御できる CCD(電荷結合素子)カメラと照明を内蔵し、検査対象面に対して遊泳してアクセスする。各スラストにより潜航/浮上、前後進、旋回といった遊泳移動が可能である。

3.2.2 フラットピークル この装置はシュラウド外面といった最小すき間が約50mm程度しかない狭隘な垂直面へアクセスするための薄型ピークルである(図8(b))。水中ピークル同様、中性浮力化を図っている。検査対象面へは吸着しながら車輪で走行移動する。各スラストにより潜航/浮上、前後進、旋回、垂直軸周りの回転といった遊泳移動が可能である。この装置は、目視検査のほか、超音波探傷プローブなどを搭載することにより、他の検査も実施可能である。

3.2.3 走行式ピークル この装置はシュラウドサポートプレート上面といった最小すき間が約60mm程度の狭隘な底面へアクセスし、作業を行う走行式のピークルである(図8(c))。一対のクローラ駆動により、前後進、旋回、垂直



軸周りの回転といった平面上の移動が可能である。

#### 4 水化学技術

BWRプラントでは、冷却水は超純水に維持され、耐腐食環境は良好に維持されるよう水質管理がなされてきたが、最近では更に進んだ水質改良によりSCCを抑制する対策がとられてきている。BWRの腐食環境は水の放射線分解により生成する酸素の濃度に依存するため、微量の水素を原子炉冷却水に注入することにより、酸素濃度を抑制する技術が適用されている。このような対策の効果の評価の際には、複雑な構造の原子炉内の腐食環境を知る必要があるため、流動解析、放射線化学反応、電気化学反応を組み合わせた総合的解析手法を開発した。

近年、多くの実用例が見られる光半導体を、金属材料の腐食抑制に応用できる可能性が指摘されている。原子炉内には放射線によるチェレンコフ光源があり、SCC抑制効果が期待できる<sup>(4)</sup>。光触媒表面に光が照射されると電気化学反応により電位の低下が起こる。光半導体としてよく知られた酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)の薄膜を構造物表面に形成することによりSCC環境が緩和され、水素注入などに代わる次世代技術と

して有望である。更に、原子力発電所における放射線作業環境の改善のために、除染剤としてオゾンガスを利用した新技術も開発した<sup>(5)</sup>。

#### 5 あとがき

以上、原子力発電所における原子炉保全新技術の概要を述べた。当社は、原子炉保全に必要な点検・検査、補修・取替の各種基盤技術の開発から、実機適用技術まで広く開発を進めており、今後とも、高経年化プラントの安定運転や稼働率向上に寄与する原子炉保全技術の更なる開発と、機能の向上を目指した開発を推進していく。

電力会社各位の更なるご指導とご支援をお願いする次第である。

#### 文献

- (1) Sano, Y., et al. "Development of Fiber-Delivered Laser Peening System to Prevent Stress Corrosion Cracking of Reactor Components," 9th Int. Conf. on Nuclear Engineering( ICONE-9 ). April 2001, Nice, France.
- (2) 平澤泰治,ほか."フェーズドアレイ UT法を用いた炉内機器溶接部の探傷技術開発".日本非破壊検査協会,平成13年度春季大会概要集.2001-01, p.1-2.
- (3) 落合 誠,ほか."レーザー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.
- (4) Ichikawa, et al., "Evaluation of Structural Material Protection from IGSCC by the Photoelectric Method in BWR", International Conf. on Water Chem. of Nucl. Reactor Sys.8, Oct. 2000, UKAEA.
- (5) Yaita, Y., et al. "Chemical Decontamination Using Ozone Oxidation Process", ICONE-9. 2001.



前川 治 MAEKAWA Osamu

電力システム社 磯子エンジニアリングセンター 原子力機器設計部長。  
原子炉構成機器の設計に従事。米国機械学会会員。  
Isogo Nuclear Engineering Center



服部 靖弘 HATTORI Yasuhiro

電力システム社 京浜事業所 原子炉機器部長。  
原子炉炉内構造物の製造設計に従事。  
日本原子力学会会員。  
Keihin Product Operations



須藤 亮 SUDO Akira

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 機器・システム開発部長。原子炉構成機器の研究開発に従事。  
日本原子力学会, 日本機械学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center