

レーザ光を使用することによって、遠隔・非接触で高感度な計測を瞬時に行うことが可能であり、原子力や火力などの発電分野における分析及び検査技術への適用が期待されている。

当社は、発電プラントにおいて、レーザを応用した水中微量元素分析技術、ナトリウム(Na)漏洩(ろうえい)検出技術、油漏れ検出技術などの分析技術、及びレーザ超音波探傷技術、軸トルク非接触計測技術などの検査技術の実現を目指して、これらのレーザ応用計測技術の実用化開発に取り組んでいる。

Laser-applying instrumentation technologies make it possible to perform remote, noncontacting, and highly sensitive measurement instantaneously, and are expected to be used for analysis and inspection work in both nuclear and fossil-fuel power plants. Toshiba is making efforts toward the development and practical use of laser-applying instrumentation technologies, aiming at the realization of detection technologies for power plants such as trace element analysis in water and sodium and oil leak detection, as well as inspection technologies such as laser-induced ultrasonic inspection and optical torque measurement.

## 1 まえがき

原子力プラントの保全技術の重要性は、プラントの高経年化とともに重要となっており、放射化した材料を取り扱う場合における遠隔・非接触計測技術が求められている。また、原子力プラントに対して安心感を与える技術を、経済性を確保したうえで提供することがユーザーから求められており、これまでの計測限界を超えた高感度計測が要求されてきている。例えば、プロセス内の元素の極微量分析、プラント内非可視情報の可視化、配管・機器における微細き裂や形状変化の高分解能測定などである。

当社は、遠隔・非接触で高感度な計測を瞬時に行うことが可能なレーザ応用計測技術を、分析室における計測ではなく、現場計測に用いるという視点から実用化に積極的に取り組んでいる。ここでは、原子力に加えて火力などの発電分野における分析及び検査技術への適用例について述べる。

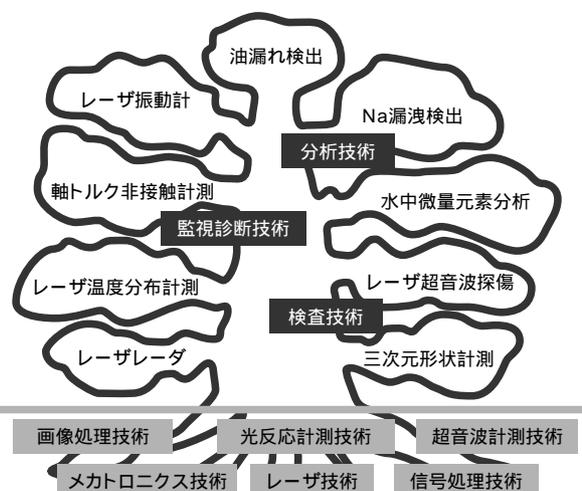


図1. 発電プラントにおけるレーザ応用計測技術 遠隔・非接触で高感度な計測を瞬時に行うことが可能な、レーザ応用計測技術の実用化を進めている。

Laser-applying instrumentation technologies for power plants

## 2 レーザ応用計測の特長

### 2.1 レーザ光の特性と計測技術への利用

発電プラントにおけるレーザ応用計測技術を図1に示す。ここで利用されるレーザ光の特性をまとめると、以下の3点となる。

(1) 単色性 レーザ光の発長幅は、発振器に応じて MHz ~ T(テラ)Hzまで幅広く選択が可能である。この単色性の代表的な利用例は、運動する物体による反射光の波長シフトを用いたレーザドップラー速度計測があり、流速計測や振動計測に利用している。また、原子・

分子を測定対象とした利用例としては、光励起共鳴現象を応用したレーザ誘起蛍光(LIF: Laser Induced Fluorescence)計測やレーザ共鳴質量分析などがある。

(2) 干渉性・指向性 位相がそろったレーザ光の干渉現象を用いることにより、レーザ波長オーダーの微小距離・間隔の計測を行うことが可能になる。また、レーザ光の持つ指向性は、距離の離れた計測対象の遠隔計測に利用している。

(3) 高輝度 レーザ応用計測では、短パルス(nsオーダー)レーザの適用が一般的である。この短パルスレーザ

を集光すると集光点でのエネルギー密度が極めて高くなり、プラズマ化現象が生ずる。このプラズマを用いて、物体を構成する元素の計測やプラズマ発生で生ずる衝撃波を用いた各種計測が可能となる。

## 2.2 レーザ応用計測の利点

単色性、干渉性・指向性、高輝度というレーザー光の特性を生かすことにより、レーザー応用計測では以下の利点を得ることができる。

- (1) 遠隔・非接触計測が可能 光がプローブであるため、測定対象に遠隔・非接触の測定が可能である。これは、計測器の接触による測定への悪影響を回避できるばかりでなく、放射線環境下での計測が必要な原子力分野ではもっとも大きな利点となる。
- (2) 高感度計測が可能 レーザ応用計測が高感度である理由は、レーザー光の持つ波長、空間、時間特性にある。レーザー照射により測定対象物で反射、吸収、散乱などの反応を受けた光の応答からは、長さとしては光の波長からサブミクロンオーダの計測が可能になり、時間としては光の速度からGHzオーダの計測が可能になるため、他の方法と比べて高精度な計測が実現できる。
- (3) 瞬間計測及びオンライン計測が可能 レーザ応用計測では、発生する物理現象の応答速度が非常に速いため短時間での計測やオンライン計測が可能になるとともに、時間分解計測手法により高S/N(信号/雑音)の計測が可能になる。

## 3 レーザ応用計測の適用事例

### 3.1 レーザによる微量元素分析法<sup>(1)</sup>

原子力プラントにおける水質管理は、プラントの予防保全のために非常に重要である。特に、原子炉水中にppt(1兆分の1)~ppb(10億分の1)オーダでごく微量含まれる鉄(Fe)、ニッケル(Ni)、コバルト(Co)などの金属元素は炉内構造物の腐食に影響する重要因子とされており、その濃度測定・監視は、プラント運転の主要項目とされている。現行の炉水分析では、炉水をフィルタで長時間サンプリングして元素分析を実施しているが、サンプリングに長時間を要することや、分析作業時の被ばく低減、分析に伴う廃棄物の削減のため、より簡便で迅速な分析手法が求められている。この課題を解決しうる、オンライン、遠隔、非接触の分析技術としてレーザーを用いた微量元素分析技術を開発している。

この技術では、水溶液中の微量元素検出にレーザーブレイクダウン(LIB: Laser Induced Breakdown)現象とLIFを用いた。装置体系を図2に示すが、この装置では試料溶液を水膜状として、この表面にパルスレーザーを集光照射してLIBを発生させ、これによりプラズマ化した試料にプラズマ中の特定の元素を励起する波長可変レーザーを照射する。このプ

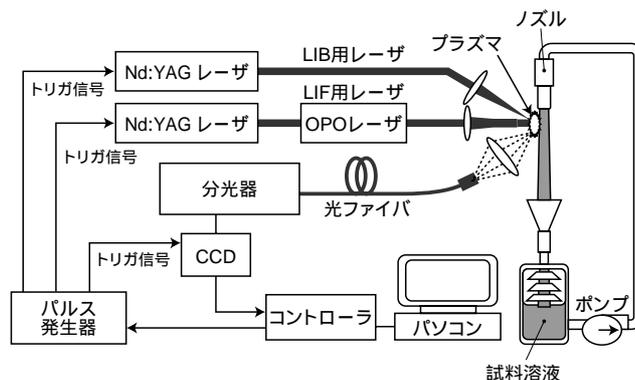


図2. 微量元素分析装置の構成 水溶液中の微量元素の検出を、試料のプラズマ化用YAGレーザーとLIF生成用の波長可変レーザーを組み合わせる。

Schematic diagram of trace element analysis by laser-induced breakdown (LIB) and laser-induced fluorescence (LIF)

ロスにより選択的に励起された原子は、LIFを発生して安定な状態に遷移するが、このLIF量により試料中の特定元素の含有量を定量することができる。LIB生成用レーザーはNd:YAGレーザー<sup>注1)</sup>(波長1,064 nm、パルス幅3.5 ns、10 Hz)を、LIF生成用レーザーとして波長可変固体レーザー(OPOレーザー)を使用した。また、これによって生成した蛍光は光ファイバで分光器に導き、ゲート付CCD(電荷結合素子)で計測した。

なお、LIB+LIF法による元素検出には、検出対象とする原子に適した励起波長と測定する蛍光波長の選定が必要である。このため、原子の励起波長と蛍光波長、及びその強度についてのデータベースを作成し、これによりFe原子の検出に最高感度が得られる励起波長(296.7 nm)、及び検出する蛍光波長(373.5 nm)を選定した。10 ppb水溶液のFe原子のLIFスペクトルを図3に示すが、この場合のS/Nは約100となり、Feの検出下限として500 pptを有意に検出可能である結果を得ている。

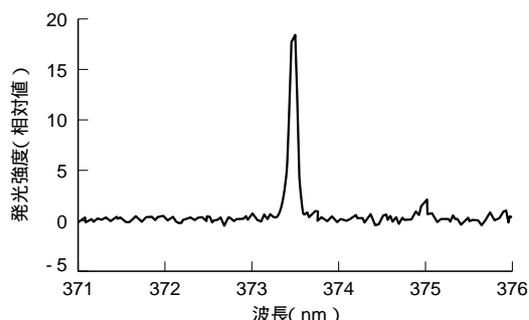


図3. Feの10ppb水溶液によるLIFスペクトル 波長373.5 nmにFeのLIFがある。

LIF spectrum of iron at 10 ppb concentration in water

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

今後の予定として、よりいっそうの高感度化(数十pptオーダー)を目指して装置の最適化を行うとともに、実炉水で含まれる非溶解成分(クラッド成分)の含有水への適用技術開発を進め、この技術の実プラントへの適用を目指していく。

### 3.2 Na微小漏洩検出におけるレーザの応用<sup>(2)</sup>

高速増殖炉には、冷却材であるNaの微小漏洩を検出するために放射線イオン化式検出器などが設置されているが、安全性を更に向上させるためにNaを選択的、かつ迅速に検出することが可能なレーザNa漏洩検出器(LLD: Laser sodium Leak Detector)の開発を進めた。

パルスレーザ光を集光して気中ブレイクダウンを発生させてプラズマを生成する。プラズマ中の原子は、高励起状態に遷移し、その状態から基底状態に自然遷移する際に蛍光を発生する。空气中にNaが存在する場合には、D線と呼ばれる強い蛍光(波長589nm)を発生するため、時間ゲート測定を使用して分光検出することによってNa微小漏洩を検出することができる。

試作したLLDを図4に示す。レーザとして半導体レーザ励起YAGレーザ(波長1,064nm,パルス幅10ns,出力25mJ/pulse)を、蛍光分光には光学的干渉フィルタを、光電変換器として小型光電子増倍管を使用した。光学部及び電源部を含めた寸法は、幅0.5m,奥行0.4m,高さ0.4mであり、質量は約40kgというコンパクト化を実現した。

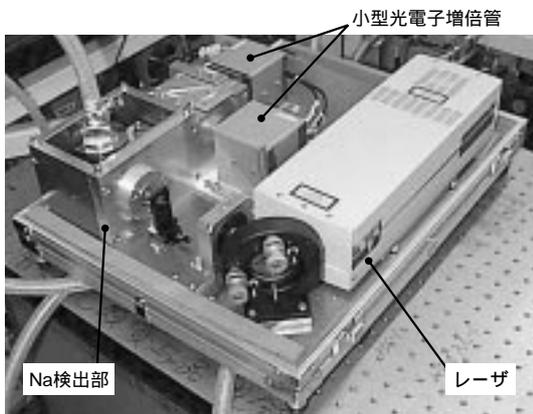


図4 . LLDの外観 レーザ誘起ブレイクダウン分光法でNaを選択的に検出する。

Sodium leak detector using LIB spectroscopy

空气中におけるNa漏洩を想定して、LLDのNa検出感度特性試験を実施した。窒素ガス(N<sub>2</sub>)中で金属Naを加熱してNa蒸気を発生させ、N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>混合ガスを注入して空气中に酸化ナトリウムエアロゾル(主にNa<sub>2</sub>O)が含まれる状態を作る。このNaエアロゾルをサンプリングチューブでLLDに導き、LIBでNa原子を検出をした。同時に、Naエアロゾルを

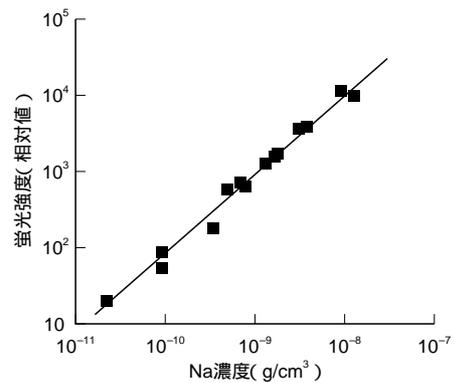


図5 . Na検出感度特性 蛍光強度は、10<sup>-11</sup> ~ 10<sup>-8</sup> g/cm<sup>3</sup>の広い範囲でNa濃度と比例関係にある。

Sensitivity of sodium leak detector using LIB spectroscopy

フィルタで捕集し、その定量分析から求めたNa濃度を試験の基準として使用した。

Na濃度と蛍光強度の関係は、図5に示すとおり両対数グラフ上で傾き1の直線上に乗り、Na濃度10<sup>-11</sup> ~ 10<sup>-8</sup> g/cm<sup>3</sup>の広い範囲で蛍光強度がNa濃度に比例することを確認した。今後、更に確認試験を進め、実機への適用を図っていく予定である。

### 3.3 レーザを用いた油漏れ検知法<sup>(3)</sup>

発電プラントに設置した機器の油漏れ監視は、機器の異常を初期段階で発見できるため、重要な監視項目の一つになっている。しかし、目視点検や現状の点計測型の油漏れセンサでは、にじみのような早期段階での油漏れが検知できないとか、漏洩部位の特定ができないなどの問題がある。そこで、監視対象の油の吸光特性を考慮したレーザ光を照射して、油から発生する蛍光を画像センサで捕らえて、漏洩油を検知する計測システムを開発した。

紫外光を吸収した油分子が励起状態から基底状態に戻る時に、数十ns ~ 数μsの発光寿命を持った蛍光が放出される。図6に示すように、油の蛍光特性(吸収波長, 蛍光波長, 蛍光寿命)を考慮して、照射するレーザ(又は光)の波長、測定する蛍光の波長、測定する時間(タイミング)を適切に設定することにより、選択的に油の種類を識別して検出できる。このシステムは、発電プラントのタービン油を対象に、前記の観測条件を最適化して、照明や他の物質の発光などノイズが存在する中から、対象とする油を高いS/Nで選択的に検知することを可能にした。

装置構成を図7に示す。紫外光源には、YAGレーザの第4高調波(波長266nm,パルス幅5ns)を用いた。紫外パルスレーザを用いることによって、瞬間的に照明や他の物質の発光などのノイズより高強度の蛍光を得ることができる。IICCD(高速ゲート付き高感度CCD)装置は、観測波長を選択する光学フィルタ及び観測時間を選択できる高速シャッタ

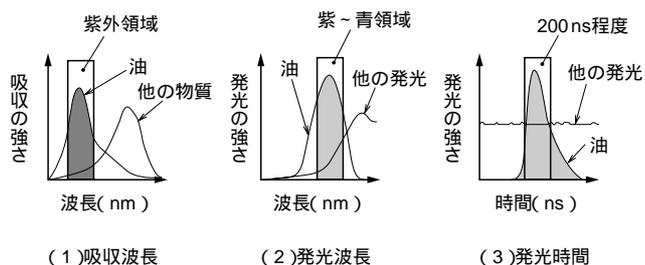


図6. 蛍光法による油計測の原理 紫外パルスレーザーで励起された油分子から発生する蛍光を画像センサで捕らえて、油分子を選択的に検知する。

Principle of oil detection using fluorescence

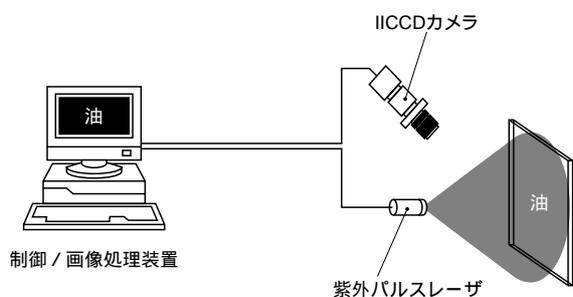


図7. 油漏れ検知システムの構成 紫外パルスレーザー励起で発光する蛍光を、IICCDカメラで捕らえて画像化する。

Outline of oil detection system

を備え、油の蛍光波長及び蛍光寿命に合わせて観測するようになっている。IICCD装置の出力画像は画像処理装置へ送られ、ノイズ除去及び漏洩領域の抽出処理を行う。

このシステムによる油漏れの検知結果の一例を図8に示す。現場盤に漏れた油をこの装置で可視映像に変換し、元の盤の映像に重ね合わせて表示したものである。これにより、発電プラントなどの環境下における微量の油漏れを、有

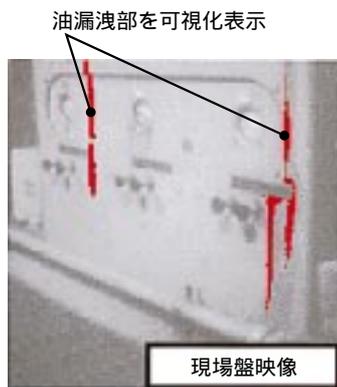


図8. 油漏れの検知結果 蛍光法により検知した油漏れ映像を、現場盤映像に重ね合わせて表示した。

Image processing result of oil leak detection

効に可視化して検知できることが確認できた。この方法によれば、油の噴出のような霧状の漏洩の可視化も可能である。

### 3.4 超音波探傷におけるレーザーの適用<sup>(4)</sup>

原子力発電プラントの高経年化に伴い、近年、原子炉本体や炉内構造物の材料の劣化評価手法の確立が課題となっている。特に、応力腐食割れに代表される表面き裂を、その初期段階である深さ1 mm以下の段階で検知し、かつ、そのき裂深さを計測できる検査手法は予防補修のための検査ツールとして重要になる。検査対象である構造物は、複雑な形状で、炉内の狭い部位にあるため、対象部位への近接性や遠隔操作の容易性も検査装置の大切な要件となる。

2種類のレーザー光を用いて検査対象に超音波を送受信するレーザー超音波技術は、従来手法と異なり遠隔・非接触の手法であり、かつ広帯域の超音波を高い空間分解能で送受信できることから、微小き裂検知への適用性が高く、次世代の炉内検査技術として期待されている。そこで、レーザー超音波法を用いた実用的な炉内検査装置と、計測結果からき裂深さを計測する評価技術を開発している。

パルスレーザー光を対象表面に照射すると、レーザーエネルギーを対象表面が吸収して熱膨張し、その反力として対象表面を伝わる表面波が発生する。また、対象表面の異なる位置に連続発振レーザー光を照射しておけば、表面波が到達した際の微小変位を、レーザー干渉技術を用いて検出することができる。表面波の伝播経路上にき裂が存在すると表面波成分の一部は反射・回折し、残りは透過する。異なる深さのき裂について計測した透過表面波の波形を図9に示す。き裂が深くなると高周波の表面波が透過しにくくなるため、結果的に、その波形にはき裂の深さに比例した平滑化特性が現れる。この特性を用いることで、深さ1 mm以下の微小な人工き裂の深さの計測を可能とした。パルスレーザーで励

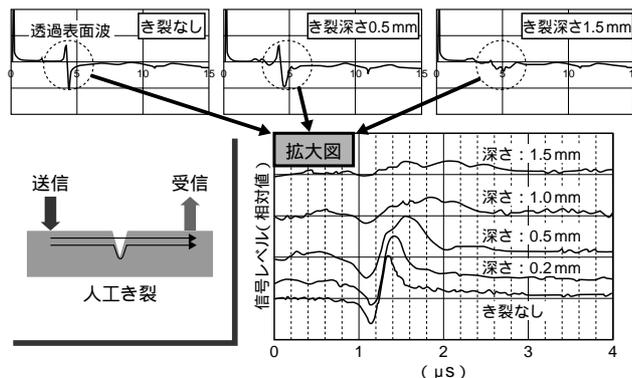


図9. 透過法を用いたレーザー励起表面波による欠陥検査 き裂の深さが大きい場合には、高周波の表面波の透過が抑制されるため、透過表面波に平滑化特性が現れる。拡大図については極性を反転して表示している。

Crack detection and sizing using laser-induced surface wave filtering characteristics

起した表面波は数十MHzまでの高い周波数帯域を持つこと、計測点がスポットであるため高い空間分解能で表面波の応答を計測できることなどから、従来技術よりもより微細なき裂を検知することが可能になる。

また、図10に示すように、送信と受信レーザをき裂の手前部分においた場合、き裂が存在した場合にはそこからの反射波を計測することができる。受信波形には、励起された表面波の直達波に加えて、き裂が存在した場合には、その端面からの2種類の反射波を観測できる。一つは、表面の端部からのエコー(R1)であり、もう一つは、き裂先端部からのエコー(R2)である。この二つのエコーの時間差からき裂深さの計測が可能となる。

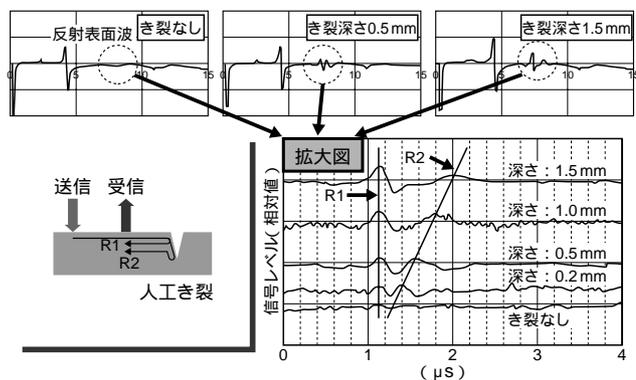


図10. 反射法を用いたレーザ励起表面波による欠陥検査 き裂の深さに比例して、表面き裂端部と、き裂先端部からの二つの異なるエコーが観測される。

Crack detection and sizing using laser-induced surface wave echo signals

このレーザ超音波探傷技術を実用的なものにするには、狭あい部でも使用可能のようにプローブを小型化することが必要である。特に、炉内検査などで要求される狭あい部へのアクセス性を向上させるために、小型探傷プローブと干渉系を光ファイバで分離した装置を開発中である。開発中の小型プローブの外観と、炉内構造物の溶接部近傍の熱影響部に生ずるき裂の検出方法の概念を図11に示す。超音波励起用のパルスレーザの送信については、残留応力改善に用いられているレーザピーニングで開発された光ファイバによる高出力パルス伝送技術をそのままの形で活用できる<sup>(5)</sup>。パルスレーザ照射により生ずる表面波のき裂からの反射エコーを、小型プローブで検知することで、微細なき裂の存在を検知できる。更に、装置(励起用レーザとプローブ)を水平方向にスキャンしながら検出信号を収録し、反射表面波の振幅に応じて色分けなどで表示することにより、表面き裂の分布を画像化することも可能になる。

レーザ励起超音波によるき裂検査技術は、まだ基礎的な

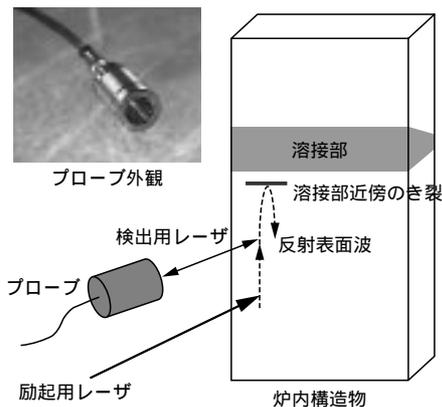


図11. レーザ励起超音波による炉内構造物の欠陥検査 小型のプローブを使用して、完全非接触で炉内構造物の表面の検査を行うことができる。

Ultrasonic testing of reactor internals with laser-induced acoustic wave

開発段階であるが、完全非接触で超音波検査が可能なこと、狭あい部に適用可能であること、微細なき裂の検知が可能なことなど多くの長所があり将来の適用が期待されている。今後の開発・実証により、この技術を炉内検査法の一つとして確立していきたい。

### 3.5 レーザによる軸トルク非接触計測装置<sup>(6)</sup>

発電プラントの熱効率、運転管理上の重要な指標である。特に、コンバインドサイクル発電では、ガスタービン及び蒸気タービンの二つのタービンを用いるが、両者の実出力を分離して計測する有効な手段は現状ではない。しかし、両者の実出力の直接計測は、性能劣化診断と改良保全戦略の立案にとって重要な情報となるため、精度の良い計測が望まれていた。

そこで、ヘリウム・ネオン(He-Ne)レーザを用いた光センサと相関法による信号処理を組み合わせ、各タービンの出力トルクを高精度に計測するトルク計測システムを開発した。このシステムの構成を図12に示す。この手法では、タービンと発電機間の伝達軸の両端に、バーコード型反射シールを取り付け、光センサを対向設置させる。そして、バーコードに集光照射した波長633nmのHe-Neレーザ光の正反射を光検出器で計測し、伝達軸のねじれを計測する。集光のスポット径を5 $\mu$ mに絞ることで、光検出器の応答時間を100nsオーダーに高め、両端のバーコードからの反射信号の相関処理により、S/Nを向上させている点が特長である。この処理により、タービン-発電機間のねじれ角を、従来技術では困難であった計測誤差0.5%以内(角度の計測精度: 7/10,000 deg)で計測できることを確認した。

発電機-蒸気タービン間のダイヤフラムカップリング両端に光センサを設置し、負荷運転中の蒸気タービンの出力トルクを測定している例を図13に示す。この測定で、実機においても十分な精度で蒸気タービン出力を計測できること

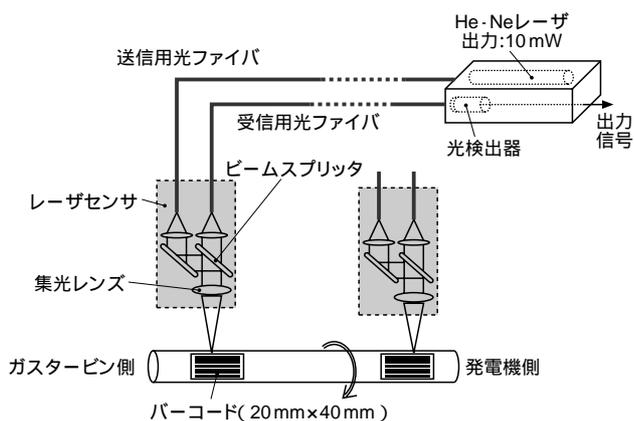


図12 .トルク計測システムの構成 レーザとバーコードを組み合わせ、軸ねじれから軸トルクを高精度で計測する。  
Principle of torque measurement system using laser beam

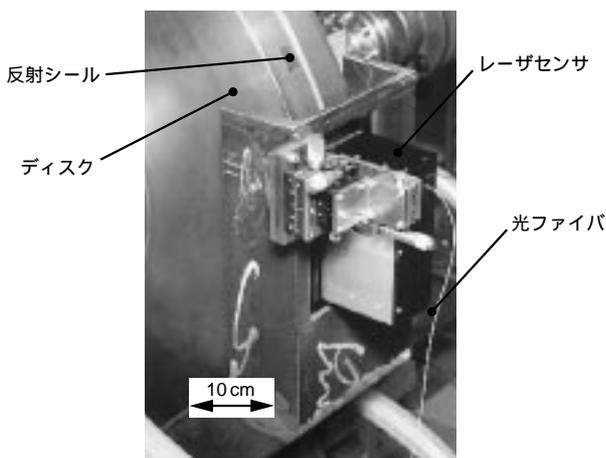


図13 .実機に取り付けたトルクセンサ 蒸気タービンの出力トルクを十分な精度で計測できる。  
Torque sensor attached to ACC plant

が確認された。また、ヒートバランス法による蒸気タービン出力の解析値ともよく一致する結果が得られており、実機の性能劣化を的確に計測できるツールとして今後の応用が期待される。

#### 4 あとがき

原子力や火力などの発電分野においては、供用中のプラ

ント性能を保証・維持していくための技術として、遠隔・非接触で高感度という特長を備えたレーザ応用計測は重要な位置を占めるものと考えられる。計測性能に加えて、信頼性及び経済性を備えたレーザ応用計測技術の実用化に注力していく。

#### 謝辞

微量分析技術、油漏れ検出技術、軸トルク非接触計測技術の開発においてご指導いただいた、東京電力(株)原子力研究所並びにエネルギー環境研究所の関係各位、及びNa漏洩検出技術の開発においてご指導いただいた、核燃料サイクル開発機構大洗工学センターの関係各位に深く感謝の意を表します。

#### 文献

- 中根昌代,ほか.“LIB+LIF法による微量元素の分析”.日本原子力学会2000年春の年会.F40.
- 竹島徳幸,ほか.“レーザ誘起ブレイクダウン分光法を使用したNa漏えい検出器の開発”.日本原子力学会1999年春の年会.E22.
- 黒木雅彦,ほか.“パルス蛍光法による透明な漏油の画像化技術”.電気学会論文誌-E.118,1998,p.449.
- 落合 誠,ほか.“レーザ励起表面波による微小欠陥検査(1)”.日本原子力学会1999年春の年会.E27.
- 依田正樹,ほか.“光ファイバによる20 MWレーザーパルスの伝送とその応用”.レーザー研究.28,5,2000,p.309.
- 梅沢修一,ほか.“ガスタービンの高精度トルク計測手法の開発”.日本機械学会1999年度年次大会講演論文集(1).p.197.



竹島 徳幸 TAKESHIMA Noriyuki

電力システム社 原子力事業部 原子力開発設計部主査。  
新型炉の計測制御設備のエンジニアリング業務に従事。日本原子力学会会員。  
Nuclear Energy Systems & Services Div.



桑子 彰 KUWAKO 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・システム開発部主幹。レーザ応用の研究・開発に従事。日本原子力学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



兼本 茂 KANEMOTO Shigeru, D.Eng.

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 計測検査技術開発部グループ長,工博。原子力発電所の監視診断システムの研究・開発に従事。日本原子力学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center