

DEN-CHU-KEN

# TOPICS

2018 3 March

VOL.25

Central Research Institute of Electric Power Industry

## レーザーを用いた電力設備の 遠隔・非接触診断技術

1. レーザーを用いた計測技術について
2. 鉄筋コンクリート構造物内部の塩分濃度を計測する技術
3. コンクリートキャスク内のキャニスタ付着塩分の遠隔計測を可能とする技術
4. がいし付着塩分濃度の遠隔・リアルタイム計測を可能とする技術

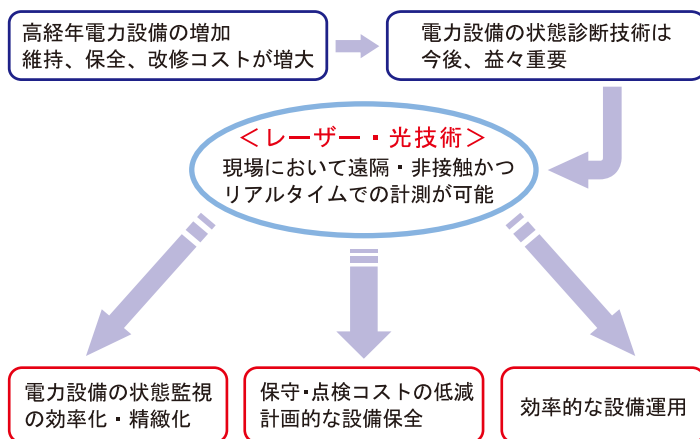
## レーザーを用いた電力設備の遠隔・非接触診断技術

## 1.レーザーを用いた計測技術について

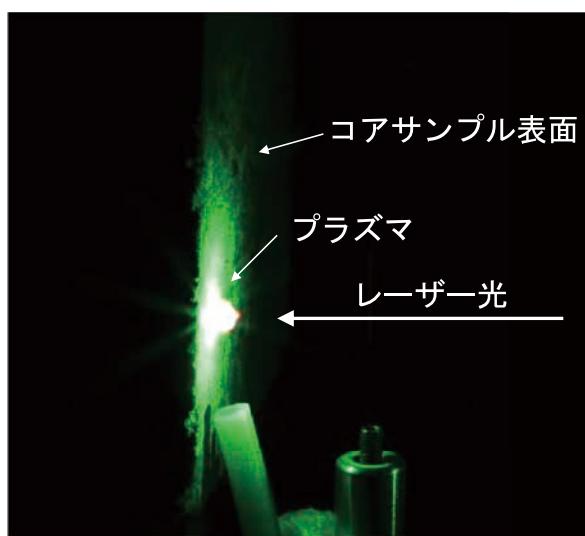
近年、電力設備の高経年化が進み、その維持、保全、改修コストが増大しています。特に、高度経済成長時代に大量に建設された電力設備を今後どのように保守、更新していくかは重要な課題です。このため、高度な設備診断技術を開発して、電力設備の劣化状態や余寿命等を評価することが求められています。現場において即座に設備の状態を診断することができれば、保守の工期を短縮することが可能になります。また、設備を停止することなく活線（電圧のかかった）状態で状態診断することができれば、停電に伴うコストの大幅削減が期待できます。

電力中央研究所では、これらの要請に対応するためレーザー技術を用い、様々な電力設備の診断に適用する研究を行っています。開発した技術は、現場において、遠隔・非接触かつリアルタイムでの計測に利用することができ、高所や放射線環境下、さらには送電線に電流が流れている活線状態などの、接近が困難な場所の設備の計測を可能とします。本TOPICSでは、各種のレーザー技術のうち、最新の電力設備診断技術に関する研究成果を紹介します。

電力技術研究所  
上席研究員  
藤井 隆



レーザー・光技術の電力設備診断への適用



コンクリートコア断面にレーザー光を集光照射した時のプラズマ生成の様子

電力中央研究所では、レーザーウラン濃縮への適用のため、1986年からレーザー技術の研究を開始しました。そこで得られた優れたレーザー技術と、当所が有する豊富な電力設備に関する知見を融合することにより、電力設備の革新的な診断技術の開発に取り組んでいます。本TOPICSで紹介する設備診断技術では、レーザー誘起ブレイクダウン分光(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy; LIBS)という手法を用いています。LIBSでは、レーザー光を測定対象物に集光することによりプラズマを発生させます。プラズマ中には測定対象物や大気等周囲のガスに含まれる多数の元素が原子およびイオンの状態で存在します。そのプラズマからの発光を分光し、目的とする元素の発光を選択的に計測することにより、測定対象物に付着・含有する元素を同定・定量します。開発されたLIBSによる電力設備診断技術は、以下の特長があります。

①真空容器およびサンプル前処理が不要であるため、現場での計測に適しています。②遠隔・非接

触計測が可能であるため、高所、狭隘部、放射線環境下などの接近することが困難な場所における計測、さらには活線状態での計測までが可能となります。③リアルタイムにデータを取得できるため、保守・点検時間が大幅に短縮されます。④様々な物質の同時計測が可能のため、より多くの情報に基づいた精緻な状態監視が可能になります。⑤精密な元素の付着・含有分布の計測が可能のため、高精度な劣化診断・余寿命評価が可能になります。本技術を電力設備診断に適用することにより、設備の劣化状態や余寿命の評価の効率化・精緻化が可能です。これにより、保守・点検コストの削減や効率的な設備運用が可能になると考えられます。

本TOPICSでは当研究所における最近の主な取り組みとして、LIBSを用いた鉄筋コンクリート構造物の劣化診断(第2章)、コンクリートキャスク内金属製容器(キャニスタ)の密封健全性評価(第3章)、絶縁がいしの汚損度計測(第4章)に関する研究成果を紹介いたします(表1)。

表1 LIBSを用いた電力設備診断技術の適用例

適用先	対象設備	測定対象物質	計測の特長*1	効果	成果
1.鉄筋コンクリート構造物の劣化診断	鉄筋コンクリート構造物	コンクリート内部の塩化物イオン	①③迅速計測 ⑤精密計測 ④多成分計測	構造物の劣化診断、余寿命評価	・コア断面の多元素濃度分布計測 ・コアの深さ方向5~85mmの範囲を60分未満で計測
2.コンクリートキャスク内金属製容器(キャニスタ)の密封健全性評価	コンクリートキャスク(キャニスタ)	金属付着塩分中の塩素	②狭隘部遠隔計測	応力腐食割れ(SCC)の予防	幅50mmの隙間において、塩素分布を5m離れた場所から計測
3.絶縁がいしの汚損度計測	絶縁がいし	がいし付着物質(ナトリウム、塩素、不溶性物質)	②遠隔計測 ④多成分計測	絶縁性能低下の監視	・がいしに付着した塩分中のナトリウム、塩素の発光強度を20mの離隔距離で遠隔計測 ・不溶性物質の計測

\*1:①~⑤は、本文中の①~⑤に対応

## レーザーを用いた電力設備の遠隔・非接触診断技術

## 2. 鉄筋コンクリート構造物内部の塩分

臨海部の鉄筋コンクリート構造物は、海塩を原因とする鉄筋の腐食によりその耐荷性能が低下することが知られています。電力分野においては、火力発電所の栈橋、取放水系コンクリート構造物などに塩害による劣化が生じる可能性があります。そのため、構造物の劣化状態や余寿命を評価する上で、鉄筋コンクリート構造物内の塩分濃度を計測することが重要です。特に、高度経済成長時代に大量に建設された鉄筋コンクリート構造物の老朽化がこのところ急速に進んでいることから、その耐荷性能の診断が重要性を増してきています。

従来、塩分の濃度は構造物から抜き取ったサンプルの化学分析によって測定されていますが、長時間を要します。そのため、現場で即座に塩分濃度を測定する技術の開発が必要です。

本章では、LIBSを用いて、鉄筋コンクリート構造物内部の塩分濃度を現場で迅速・簡便・精密に計測する技術について紹介します。

電力技術研究所  
主任研究員  
江藤 修三



地球工学研究所  
上席研究員  
松井 淳



栈橋の塩害劣化



道路橋の塩害劣化

(公社)日本コンクリート工学会「コンクリート構造物の劣化事例写真集」より引用

# 濃度を計測する技術

## 2.1 鉄筋コンクリート構造物内部の塩分濃度計測の現状

鉄筋コンクリート構造物に含有される塩分濃度は、一般に構造物から直径100mm程度の円柱状サンプル(コア)を抜き取り、電位差滴定法(JIS A 1154(2012))(以後、電位差滴定法)を用いて測定しています。しかしこの方法は、サンプルの前処理作業を伴い、測定に数日間を必要とします。また、コンクリート構造物の深さ方向の塩分濃度分布を計測するためには、サンプルを厚さ5~10mmで切断する必要があり、測定範囲が制限されます。供用期間が短い構造物の場合、塩分の浸透が浅いため、電位差滴定法では深さ方向に3、4点のデータしか得られず、将来の塩分浸透を精度良く予測するのは困難です。そのため、現場で迅速かつ高い精度で計測できる技術が求められています。

## 2.2 コンクリート内部の塩分計測へのLIBSの適用

図2-1および図2-2にLIBSのコンクリート含有塩分計測への適用例を示します<sup>1)</sup>。ここでは、鉄筋コンクリート構造物から切削したコアの断面において、塩素等各種元素の濃度分布を計測しています。コア断面にレーザー光を集光し、誘起したプラズマからの発光を光ファイバーで受光し、分光装置でそのスペクトルを取得します。レーザー光の集光点を掃引することにより、コア断面上における元素濃度分布を計測します。これにより、コンクリート構造物内部の塩分濃度分布を、現場において即座に計測することが可能となります。また、電位差滴定法では5~10mm間隔で塩分濃度分布を測定するのに対して、LIBSでは1mm以下での高い精度で計測できます。

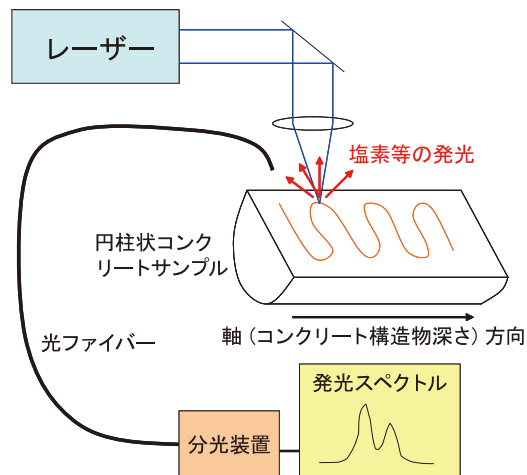


図2-1 LIBSによるコンクリートコア断面計測概念図

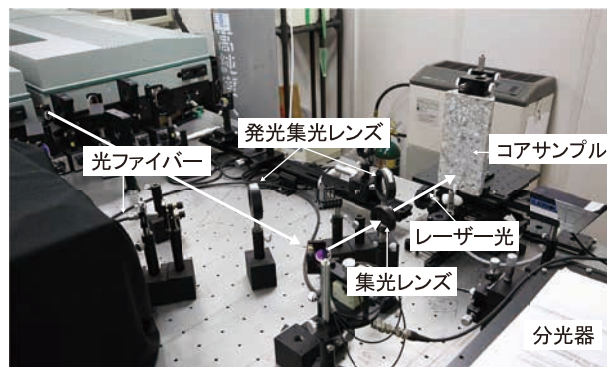


図2-2 実験装置写真

## 2.3 LIBSを用いた計測の基礎技術の開発

鉄筋コンクリート試験体に荷重を加えて、1.0~3.0mm程度のひび割れを導入した後、沿岸部における飛来塩分を模擬した室内環境下での暴露試験を22ヶ月間にわたり実施しました。試験体より、厚さ方向に直径100mmのコアを切り出しました。

図2-3に、コア断面におけるLIBSで計測した各種元素の発光強度の二次元分布を示します<sup>2,3)</sup>。塩素は塩害の指標になる一方、炭素は塩害と並ぶ劣化要因であるコンクリートの中性化の指標となります。また、カルシウムや鉄はセメント硬化体の主要

成分とコンクリート内部の鉄筋をそれぞれ示します。塩素の発光強度に着目すると、モルタル部分に比べて骨材からの発光強度が低いことから、塩素はモルタル部分を浸透することがわかります。また、鉄筋の周囲において塩素の発光強度が強く(図2-3の赤丸箇所)鉄筋が腐食して膨張したことを示唆しています。ひび割れ箇所における塩素濃度も高く、塩分はひび割れから浸透することがわかります。コア表面の元素濃度分布を計測する従来の手法として、電子線プローブマイクロアナライザ(EPMA)がありますが、EPMAではサンプル表面の研磨などの前処理が必要であるのに対し、LIBSの利点は、コアを切断して即座に計測でき、サンプルのサイズにも制限されません。

図2-4に、コアの深さ方向の塩素の発光強度(右軸)を示します。また、比較のために、電位差滴定法で測定した塩化物イオン濃度(左軸)も示します<sup>3)</sup>。LIBSで計測した発光強度に対して拡散方程式(フィックの拡散則)を適用し、みかけの拡散係数を算出しました<sup>3,4)</sup>。図中の回帰曲線が示すように、LIBSは電位差滴定法と同じ分布を示し、塩分浸透予測のために重要な指標となる拡散係数を算出でき、その精度も向上します。したがって、早期の劣化診断、余寿命評価が可能になります。

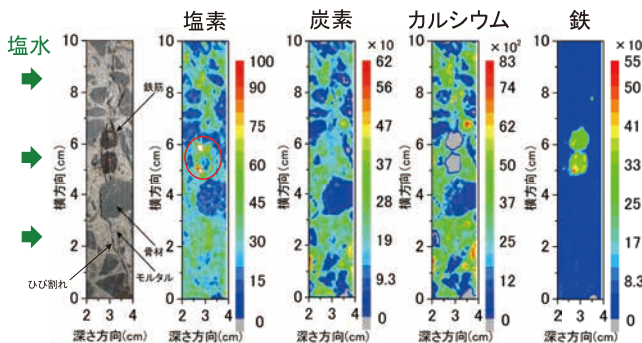


図2-3 コンクリートコア断面の元素分布<sup>2)</sup>

当研究所では、炭素とカルシウムの発光強度の関係を調べることにより、炭酸化で生じる中性化の程度を定量的に評価する手法を提案しました<sup>3,4)</sup>。LIBSを適用することにより、塩素濃度(塩害の指標)と炭酸化(中性化の指標)を同時に評価することが可能であり、コンクリートの劣化の要因を明らかにします。

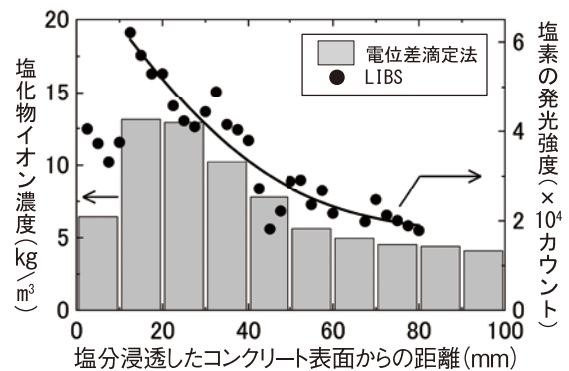


図2-4 コア軸方向の塩素の濃度分布とみかけの拡散係数の計測<sup>3)</sup>

## 2.4 現場計測装置の開発に向けて

2.3節では、コンクリートコア断面にLIBSを適用した元素濃度計測に関して紹介しました。本節で紹介する装置は、コアを縦方向に切断することなく、コンクリートコア表面にLIBSを適用し元素の濃度分布を計測する方法です。この計測であれば、前節よりも短時間で塩素の浸透を評価できるとともに、劣化の程度を評価したあとで圧縮強度試験などにコアを他の目的で利用することが可能になります。

コンクリート構造物から切削したコアの円周上で、塩分濃度の深さ方向の分布を計測する装置を試作しました<sup>5,6)</sup>。装置の概念図を図2-5に示し

ます。この装置では、コア円周表面にレーザー光を集光し、コアを回転させながらレーザー光を横方向に移動させることにより、コアの深さ方向の元素濃度分布を計測することができます。

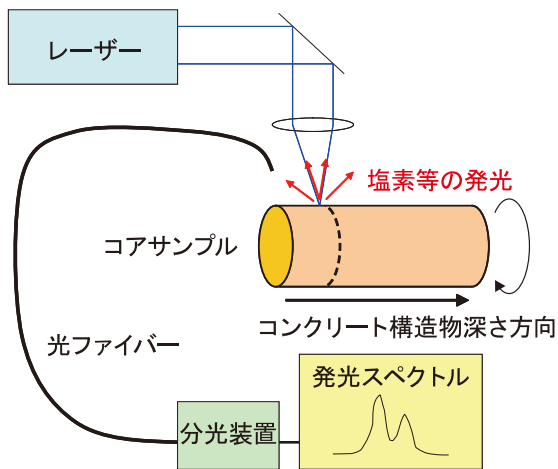


図2-5 コンクリートコア表面の元素分布計測概念図

塩素の濃度分布を計測した結果、電位差滴定法による計測結果と一致しました(図2-6)。また、コンクリート深さ5～85mmの範囲を5mm間隔で計測するのに要した時間は60分未満であり、電位差滴定法に比べ、格段に迅速な計測が可能です。また、改良した方法でレーザー光を照射することにより測定感度を向上することを試みた結果、コンクリート内部の鋼材の腐食の判定が可能である見通しを得ました<sup>6,7)</sup>。

さらに、海岸構造物から採取したコンクリートコアの円周表面に対してLIBS計測を行った結果、LIBSの計測結果が電位差滴定法で得られた結果と一致した<sup>8)</sup>ことから、本手法は現場で採取されたコンクリートコアの塩化物イオン濃度の定量計測に適用できる可能性があることが示されました。現在、各電力会社の現場から採取したコアの計測を行っており、これらの結果を元に、今後、現

場で迅速、簡便、低廉に計測が可能な装置を開発し、劣化診断や合理的対策に役立てていく予定です。

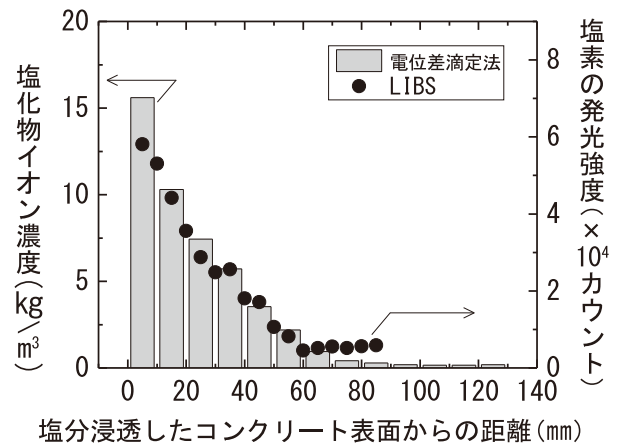


図2-6 コンクリートコア表面の塩素濃度分布計測結果<sup>6)</sup>

<参考文献>

- 1) 藤井, 杉山, 松村, 根本: レーザー誘起ブレイクダウン分光によるコンクリート含有塩分計測 (II) - コンクリート試験体を用いた塩素濃度測定の実験評価 -, 電中研研究報告 H08012, 2009.4
- 2) 江藤, 松尾, 松村, 藤井: レーザー誘起ブレイクダウン分光による鉄筋コンクリート断面における多元素同時2次元計測, 電中研研究報告 H11012, 2012.4
- 3) S. Eto, T. Matsuo, T. Matsumura, T. Fujii, and M. Y. Tanaka: Quantitative estimation of carbonation and chloride penetration in reinforced concrete by laser-induced breakdown spectroscopy, Spectrochim. Acta Part B 101, 2014, 245-253.
- 4) 江藤: コンクリートの炭酸塩化有無の判定方法、判定装置及び判定プログラム、並びに、コンクリートの炭酸塩化範囲の推定方法、推定装置及び推定プログラム、並びに、コンクリートの目的元素の拡散係数の推定方法、推定装置及び推定プログラム、特願2014-062655, 2014年3月25日出願
- 5) 藤井, 江藤: コンクリート含有物質の計測方法及び計測装置, 特願2015-122089, 2015年6月17日出願
- 6) 江藤, 藤井: LIBSによるコンクリート中の塩化物濃度の迅速計測法の提案, 電中研研究報告 H15005, 2016.6
- 7) 藤井, 根本, 松村, 塩電, 杉山: コンクリート含有物質計測方法および装置, 特願2007-237156, 2007年9月12日出願, 特許第5038831号, 2012年7月13日登録
- 8) 江藤 修三, 藤井 隆, 松野 隆: 第64回応用物理学会春季学術講演会, 2017, 16a-418-6.

## レーザーを用いた電力設備の遠隔・非接触診断技術

## 3. コンクリートキャスク内のキャニスタ付着塩分の

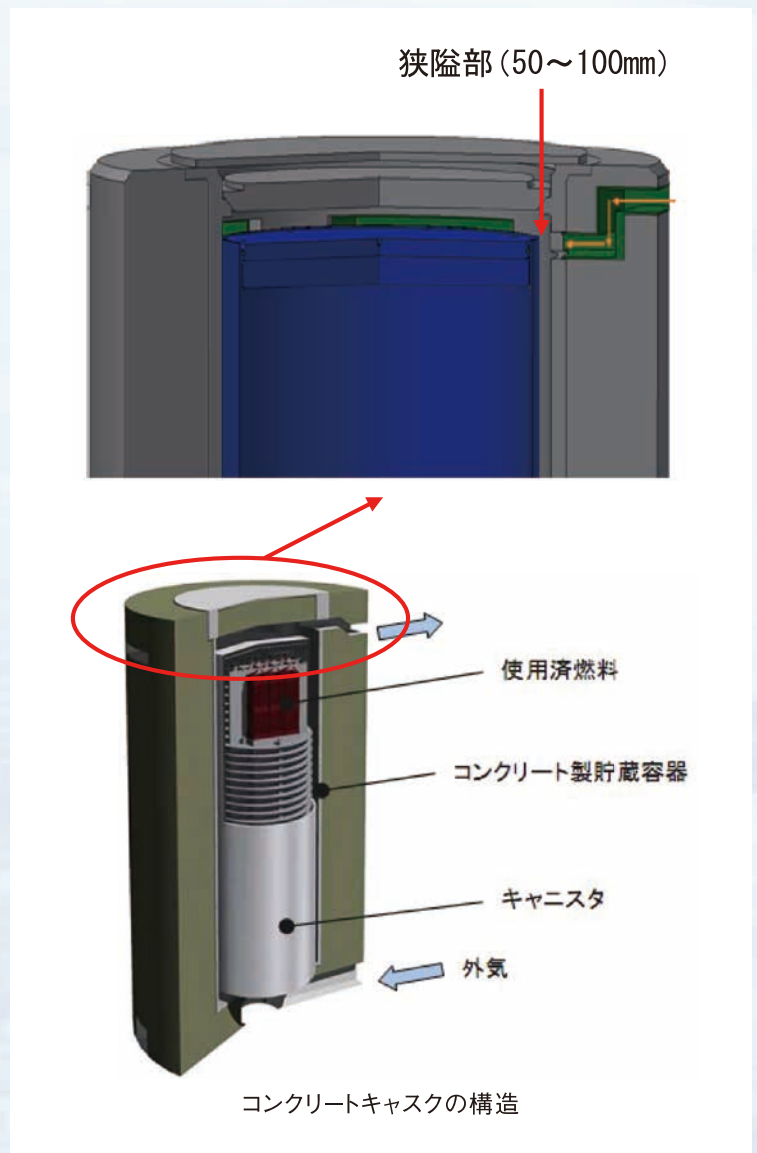
使用済核燃料の中間貯蔵方式の一つにコンクリートキャスク方式(右図)があります。貯蔵施設は海岸近くに立地されることが想定され、自然冷却用に導入する外気に海塩粒子が含まれるため、コンクリート容器内にあるステンレス鋼製キャニスタの表面に塩素が付着する可能性があります。キャニスタ表面の塩素濃度が上昇することにより腐食が進行すると、応力腐食割れが発生する可能性があるため、当研究所では、この対策として塩分流入低減装置<sup>注1)</sup>や溶接残留応力低減技術<sup>注2)</sup>を開発しています。これに加え、貯蔵中のキャニスタ表面における塩素濃度をモニタリングして、キャニスタの密封健全性を評価することが重要です。しかし、キャニスタ表面は高温かつ高放射線環境のため、遠隔での計測となり、さらに、コンクリート容器とキャニスタの50~100mmの狭隘部を通した計測が必要となります。

本章では、LIBSを用いて、コンクリートキャスク内のキャニスタ付着塩分の遠隔計測を可能とする技術について紹介します。

電力技術研究所  
主任研究員  
江藤 修三



地球工学研究所  
上席研究員  
亘 真澄



注1) TOPICS VOL.14参照

注2) 溶接部に鋼球を衝突(ショットピーニング)させたり、押し当てる(ボールバーニッシング)ことにより表面近傍に塑性変形を与え、引張残留応力を低減する技術



# 遠隔計測を可能とする技術

## 3.1 LIBSを用いたキャニスタ付着塩分の計測手法

コンクリートキャスク内のステンレス鋼製キャニスタ表面に塩分が付着すると、応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking; SCC) が発生する可能性があります。そのため、キャニスタに付着する塩分濃度を定期的にモニタリングすることが必要です。キャニスタは密封構造にするために溶接箇所が存在し、そこがSCCの主たる発生箇所であるためモニタリングの対象となります。しかし、キャニスタ表面は高温かつ高放射線環境のため、遠隔での計測が必要となります。さらに、コンクリート容器とキャニスタの間隔は50~100mmしかなく、モニタリングは容易ではありません。近年米国では、電気伝導度測定を用いた方法により、キャニスタ表面の塩化物イオン濃度を計測する技術が開発されましたが、測定精度に課題があることが指摘されています<sup>1)</sup>。

当研究所では、LIBSを用いてキャニスタ付着塩分濃度の遠隔計測が可能な手法を開発しています<sup>2-8)</sup>(図3-1)。コンクリート容器とキャニスタの隙間にプローブを挿入し、キャニスタに付着した塩分の濃度を計測します。近年米国では、ロボットにLIBS装置を搭載したキャニスタ付着塩分の計測装置の開発が進められています<sup>9,10)</sup>。

LIBSによる計測で注意すべき点として、キャニスタ表面のレーザー照射箇所引張残留応力が生じ、SCCが発生することが挙げられます。3.2節では、レーザー照射そのものがSCCを誘発する可能性を調べた結果について述べ、3.3節では、狭隘部に挿入可能な測定機器の試作と性能確認のために行った小型モックアップを用いた試験結果について紹介します。

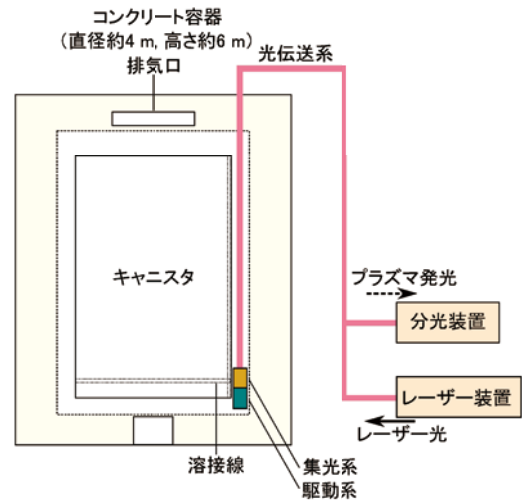


図3-1 LIBSを用いたキャニスタ付着塩分の計測の概念図

## 3.2 SCC発生に及ぼすパルスレーザー照射の影響

キャニスタ候補材であるSUS304L試験片を用いて、レーザー光を照射した箇所に人工海水を滴下し、SCCが発生する環境条件下に設置して、発生の度合いを調べました<sup>5)</sup>。試験後に試験片の断面観察を行った結果、レーザー照射箇所近傍でSCCと考えられるき裂を観測しました(図3-2)。LIBSの典型的な計測条件(レーザーエネルギー:30mJ)

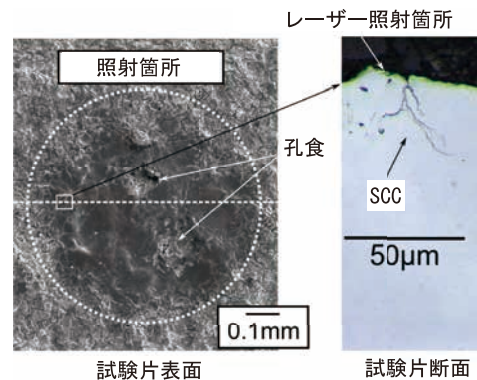


図3-2 パルスレーザー照射後のSCCの発生

において、SCCの最大深さは各照射点において10～40  $\mu\text{m}$ でした。LIBS計測の影響で発生し得るSCCの最大き裂深さは、キャニスタ候補材の肉厚(12.7mm)の約0.5%と評価され貯蔵60年間に進展し得るSCCの最大き裂深さ(4.1mm)の方が大きくなります。これは、LIBS計測の有無が、発生するSCCの最大き裂深さにほとんど影響を及ぼさないことを示唆しています。

### 3.3 狭隘部での計測用機器の開発と 小型モックアップを用いた動作試験

狭隘部において、移動しながら壁面のLIBS計測が可能な計測機器を開発しました(図3-3、3-4)<sup>6,7)</sup>。幅50mmの狭隘部に挿入可能な100mm×100mm×38mmの機器内にレーザー光を挿入し、狭隘部での壁面に集光します。発生するプラズマからの発光は、バンドルファイバに集光され、外部に設置した分光装置(分光器、検出器)まで伝送されて分光されます。

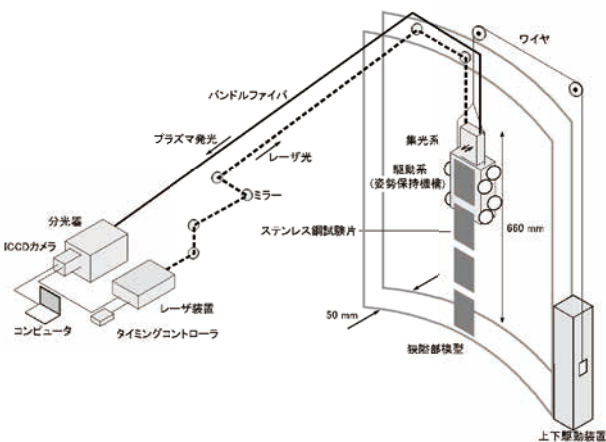


図3-3 小型モックアップでの実験システム

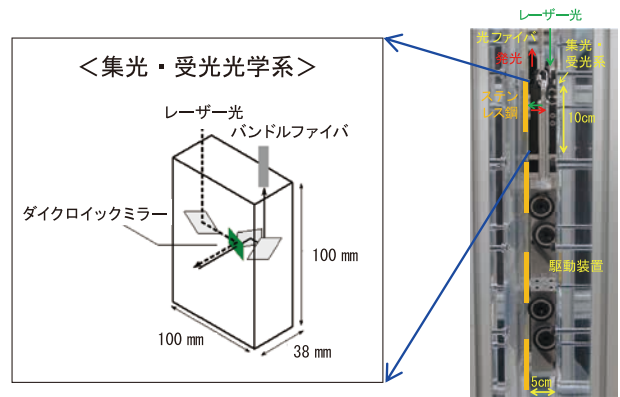


図3-4 小型モックアップでの実験装置と  
狭隘部での計測用機器

実規模のコンクリートキャスクを想定し、コンクリート容器とキャニスタの隙間を模擬した曲率800mmおよび幅50mmの狭隘部を有し、高さが1mのモックアップを作製しました(図3-3、3-4)<sup>6,7)</sup>。上記の計測機器を用いて5mの離隔距離で、狭隘部において上下に660mm移動しながら、狭隘部壁面に設置したステンレス鋼に付着した塩分の塩素濃度を定量計測しました(図3-5)。狭隘部において、塩分濃度の異なるステンレス鋼の試験片を高さ方向に4か所設置し、さらにその上下に2か所(0～75mm、585～660mm)塩分が付着していない試験片も設置しました。図3-5の左図に、LIBSと化学分析法(イオンクロマトグラフィー)によるモックアップの高さ方向の塩素濃度の計測結果を示します。イオンクロマトグラフィーに比べてLIBSでの計測結果はばらつきが大きいです。イオンクロマトグラフィーの計測結果の試験片全体の平均値に一致し、LIBSでは試験片における付着塩分濃度の不均一な分布が観測されたものと考えられます。右図には、イオンクロマトグラフィーとLIBSによる、各試験片における平均の塩素濃度の計測結果を示し、両者はよく一致していることがわかります。この実験により、LIBSを用い

ることで、ステンレス鋼付着塩分中の塩素濃度を100mg/m<sup>2</sup>まで、空間的な分布を定量的に計測できることを示しました。

前述の実験では、レーザー光を空間伝送させましたが、レーザー光の送信とプラズマ発光の受光にともに光ファイバを用いることができれば、格段に操作性が向上します。光ファイバはレーザー光により損傷しやすいという課題に対してホモジナイザを用いてレーザー光の強度分布を均一にすることにより光ファイバ内部の損傷を低減しました。これにより、エネルギー10mJのレーザー光を光ファイバで伝送し、離隔距離5mにおいてモックアップ(図3-3)で塩素濃度50mg/m<sup>2</sup>を検出できることを確認しました<sup>8)</sup>。

以上により、提案するLIBSを用いた手法では、コンクリートキャスク内のキャニスタに付着した塩分の濃度を遠隔で測定でき、貯蔵中のキャニスタ表面塩分の監視技術として有効であると考えられます。この手法は、有識者を加えた「コンクリートキャスク構造規格改訂検討委員会」を通じて、コンクリートキャスク構造規格に反映するべく現在検討に付されています。コンクリートキャスク構造規格の改訂に向けた作業は現在も進められています。

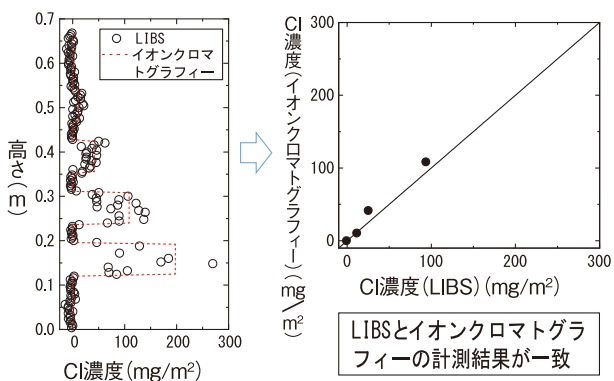


図3-5 小型モックアップでの実験結果<sup>7)</sup>

<参考文献>

- 1) CENG: Calvert Cliffs, Independent Spent Fuel Storage Installation, Response to Request for Additional Information Regarding the License Renewal Application, ML131190290, 2013.
- 2) 江藤, 藤井, 白井, 谷, 竹田, 亘, 名雪: 金属表面付着成分の濃度計測方法および装置, 特願2011-144134, 2011年6月29日出願, 特許第5840400号, 2015年11月20日登録
- 3) 江藤, 藤井, 福地: 金属表面付着成分の濃度計測方法および装置, 特願2012-116862, 2012年5月22日出願, 特許第6022210号, 2016年10月14日登録
- 4) S. Eto, J. Tani, K. Shirai, and T. Fujii: Measurement of concentration of chlorine attached to a stainless-steel canister material using laser-induced breakdown spectroscopy, Spectrochim. Acta Part B 87, 2013, 74-80.
- 5) 江藤, 三浦, 谷, 藤井: レーザーを用いたキャニスタ付着塩分計測技術の開発—SCC発生に及ぼすパルスレーザー照射の影響—, 電中研研究報告H12003, 2013.4
- 6) 江藤, 藤井: レーザーを用いたキャニスタ付着塩分計測技術の開発—計測装置開発および使用済燃料貯蔵中を想定した付着塩分濃度計測—, 電中研研究報告H14004, 2015.5
- 7) S. Eto and T. Fujii: Laser-induced breakdown spectroscopy system for remote measurement of salt in a narrow gap, Spectrochim. Acta Part B 116, 2016, 51-57.
- 8) 江藤, 藤井: レーザーを用いたキャニスタ付着塩分計測技術の開発—光ファイバ伝送による狭隙部へのアクセス性の向上—, 電中研研究報告H16005, 2017.5
- 9) EPRI Product Abstract: Dry canister storage system inspection and robotic delivery system development, 3002008234, 2016, pp. 1-98.
- 10) C. J. Lissenden, S. Choi, H. Cho, A. Motta, K. Hartig, X. Xiao: Robotic inspection of dry storage casks for spent nuclear fuel, In ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, 2016, PVP2016-63312, 1-10.

## レーザーを用いた電力設備の遠隔・非接触診断技術

## 4. がいし付着塩分濃度の遠隔・リアルタイム

送電、変電、配電を行う上で、がいしは不可欠な装置です。正常ながいしは、非常に高い絶縁性能を有しています。ところが、がいしの表面に塩分が付着すると、がいしの絶縁性能が低下してフラッシュオーバーなどの送電事故や継続的な局部放電などが起こる場合があります。このため、がいし表面の塩分付着量をモニタリングすることは、送電事故の発生リスクを評価する上で重要です。これまで、がいしの汚損状況は、モニタリング用に設置されたがいしに付着した塩分量を、手作業あるいはソルトメータと呼ばれる機械を用いて測定することにより評価されてきました。LIBSを用いた汚損評価手法を適用することにより、付着した物質の多成分、オンサイト、迅速かつ遠隔での計測が可能となります。

本章では、LIBSを用いた絶縁がいしの汚損度の遠隔・リアルタイム計測技術について紹介します。

電力技術研究所  
上席研究員  
藤井 隆



電力技術研究所  
主任研究員  
屋地 康平



送電鉄塔とがいし



変電所のブッシングがいし

# 計測を可能とする技術

## 4.1 LIBSを用いたがいしの汚損度計測手法

がいしの汚損状況は、現在、手作業の筆あらい法(図4-1)やソルトメータを用いて、汚損モニタ用として設置されているパイロットがいしに付着した汚損物を溶液に溶解させた時の電気伝導度を計測し、等価な電気伝導度を有するNaClの密度に換算した等価塩分付着密度を指標として評価されています。しかしながら、これらの汚損度評価方法は、主にオフサイトでかつオフライン計測であり、付着物質の化学組成同定には、別途イオンクロマトグラフィー等の化学分析を必要とします。これに対してLIBSを用いた汚損度評価手法では、がいし付着物質の多成分、オンサイト、迅速かつ遠隔計測が可能です。

がいし付着物質の遠隔計測手法を用いれば、地上から送電鉄塔のがいしの計測が可能になるとともに、活線部に接近することなく、がいしに付着した汚損物の情報を得ることができます(図4-1)。これによって、充電線路のがいしを安全に測定することが可能になり、電力設備の保守・点検コストの削減に貢献します。また、様々な物質を同時に計測することにより、火山灰、工場からの排煙等、多様な塩類によるがいし汚損の評価も可能となります。さらに、がいし表面において付着物の位置を特定することが可能であるため、塩分付着分布の偏りによる局所的な導電路の形成等も検出できます。このような計測は、筆あらい法やソルトメータを用いる手法では困難であり、LIBSを用いた計測は既存の方法に比べて、測定者に多くの情報を提供する方法であると言えます。

地域ごとの汚損度は、その地域の塩分付着密度の大きさに応じて、いくつかの階級に分けることができます。この階級のことを汚損区分といいます。

LIBSによるがいしの塩分付着密度の遠隔計測としては、これまで10mの離隔距離において人工汚損がいしの塩分付着密度を $0.1\text{ mg/cm}^2$ (上限)で計測した例<sup>1)</sup>が報告されています。しかし、日本の電力系統網における汚損区分<sup>2,3)</sup>を網羅した範囲の塩分付着密度計測を行うためには、さらに高い濃度の計測が必要です。また、送電設備のがいしでは、さらに長い距離の遠隔計測が求められます。

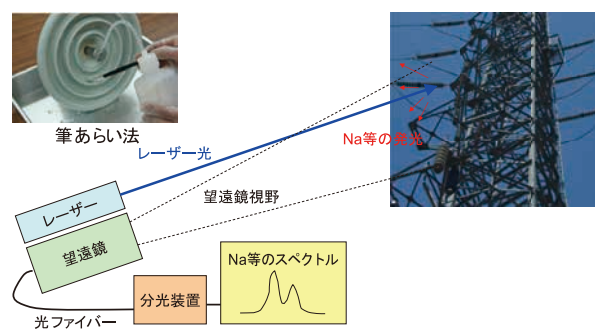


図4-1 LIBSによるがいし付着物質の遠隔計測概念図と筆あらい法による汚損度計測

## 4.2 がいし汚損の多成分計測

計測ターゲットとして、直径68mmの円盤状の磁器にうわぐすり(釉薬)を施し、人工汚損させたサンプル(以下、磁器がいしサンプルと呼ぶ)を用いました<sup>4)</sup>。サンプルの磁器の材質や焼成方法は、一般的な磁器がいしと同様です。国内の変電所において適用されている汚損区分<sup>2)</sup>に応じた5種類のサンプルを用意しました。磁器がいしサンプルにレーザー光を照射した時の様子を図4-2に示します。

遠隔計測を行う前に、近距離(焦点距離250mmのレンズでレーザー光を集光)でのLIBSにより発光スペクトルを計測しました(図4-3)<sup>4)</sup>。塩分の

主たる構成元素であるナトリウム(Na)、塩素(Cl)のみならず、マグネシウム(Mg)、アルミニウム(Al)、ケイ素(Si)、カルシウム(Ca)が計測されました。上記の元素は、工業汚損物質のCa(OH)<sub>2</sub>、塵埃(ちりやほこり)汚損物質のCaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O、火山灰に含まれるSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、ならびに融雪剤に含まれるCaCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub>等を構成する元素であり<sup>2)</sup>、これらの元素も同時に計測できることから、がいし汚損に関わる原因物質を特定できる可能性があります。

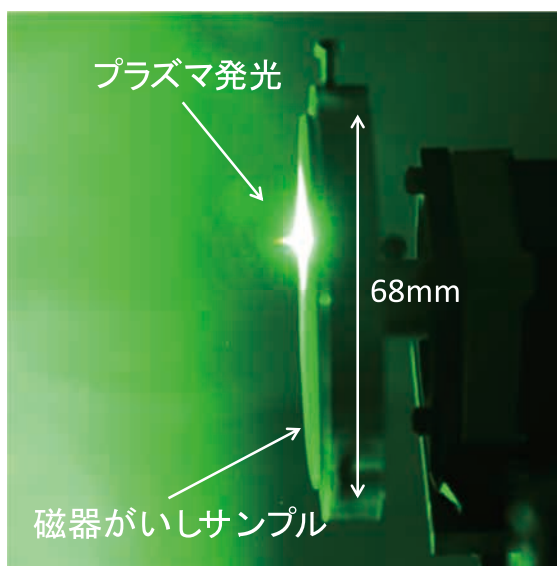


図4-2 磁器がいしサンプルとレーザー照射によるプラズマ生成の様子

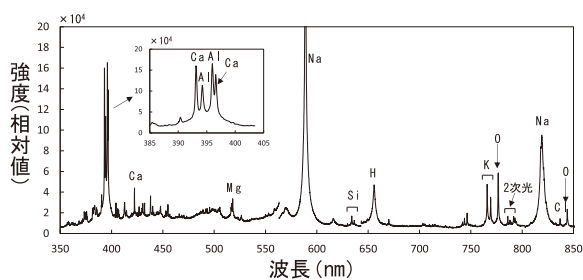


図4-3 LIBS計測による磁器がいしサンプル付着物質の発光スペクトル<sup>4)</sup>

### 4.3 がいし汚損の遠隔計測

離隔距離20mにおいて、磁器がいしサンプル付着塩分の遠隔計測を行いました(図4-4~4-6)<sup>5)</sup>。用いたレーザー装置のヘッド寸法は幅92mm×長さ390mm×高さ84mmであり、将来的に可搬型装置への搭載も可能です。エネルギー150mJのレーザー光を、光源から20m離れた位置に設置した磁器がいしサンプルに集光し、プラズマを生成しました。プラズマからの発光は、レーザー光集光光学系の近傍に設置した直径152mmの望遠鏡を用いて集光し、分光器と検出器(ICCDカメラ)を用いて受光しました。

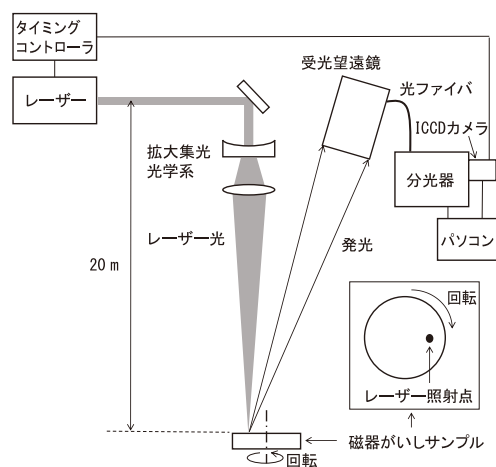


図4-4 遠隔LIBS計測実験系

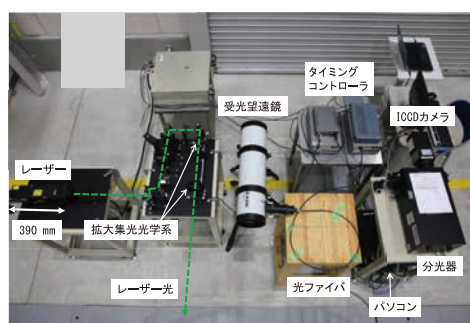


図4-5 遠隔LIBS計測実験系写真

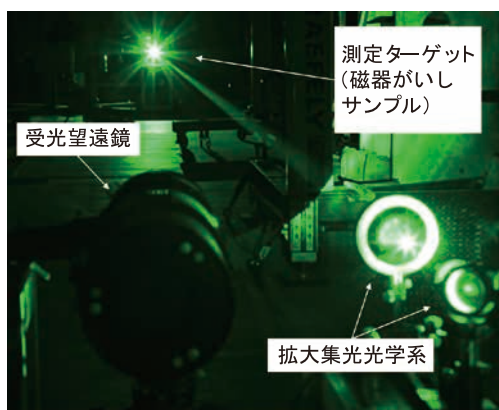


図4-6 離隔距離20mの遠隔計測の様子

ナトリウム(発光波長:819.48nm)と塩素(837.59nm)の発光強度の塩分付着密度依存性を図4-7に示します。ナトリウムに関しては、用意したサンプルの中で、最も低い塩分付着密度(0.009mg/cm<sup>2</sup>)の場合でも発光が観測され、最も高い塩分付着密度(0.612mg/cm<sup>2</sup>)の場合まで発光強度は単調増加しています。一方、塩素については、ナトリウムに比べて発光強度は低いです。塩分付着密度が0.076 mg/cm<sup>2</sup>以上の場合に、発光強度が単調増加することが確認されました。以上の結果より、濃度約0.1mg/cm<sup>2</sup>を上限に、低濃度側ではナトリウム、高濃度側ではナトリウムと塩素の発光強度を用いることで、塩分付着密度の定量的な遠隔計測が可能となることが示されました<sup>5,6)</sup>。

送電用支持物設計標準(JEC-127)では、66kV送電鉄塔の標準的な腕金高さが20mとされています<sup>7)</sup>。前述の試験において20mの離隔距離を取ったのは、送電設備への適用も睨んでのことです。また、変電所で使用するがいしの汚損区分は、一般汚損地域(0.01mg/cm<sup>2</sup>以下)から特殊汚損地域(0.35mg/cm<sup>2</sup>以上)に分類されています<sup>2)</sup>。送電設備に関しては、最大想定塩分付着密度として、汚損区分A(320mm耐塩用懸垂がいし:0.038mg/cm<sup>2</sup>)~D(長幹がいし:0.55mg/cm<sup>2</sup>) (Eは海水のしぶきが直接かかる場合を対象)に区分されています<sup>3)</sup>。本手法の基礎実験では、離隔距離20mを取ったとしても、少なくとも上記の一般汚損地域

に相当する0.01mg/cm<sup>2</sup>から、汚損区分Dに相当する0.55mg/cm<sup>2</sup>の範囲では定量的な測定が可能であることが示されましたので、日本の送変電設備のほぼ全ての塩害汚損区分をカバーすることが示されたと言えます。今後は、実がいしでの定量計測を行っていく予定です。

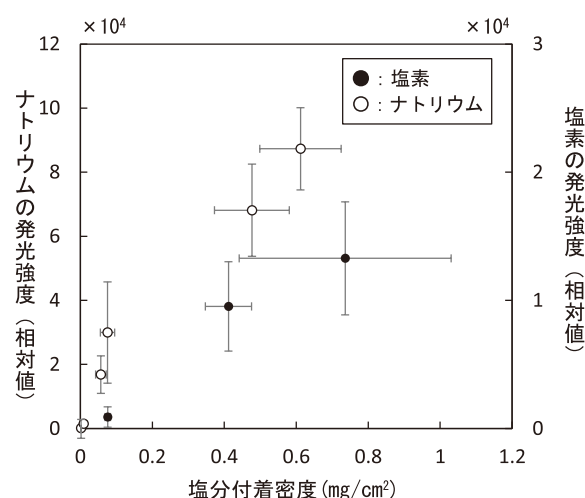


図4-7 離隔距離20mの遠隔計測における塩分付着密度に対するナトリウム(819.48nm)と塩素(837.59nm)の発光強度<sup>5)</sup>

<参考文献>

- 1) 藤吉, 本田, 村岡, 前田: レーザー塩害観測装置の開発, レーザー研究 20, 1992, 955-962.
- 2) 電気協同研究, 第69巻, 第3号, 2013.
- 3) 電力中央研究所, 送電機能研究委員会: 500kV送電に関する研究報告 (その6) 500kV送電設備の耐塩害設計, (500kV送電特別委員会絶縁専門委員会塩害対策部会報告書), p. 63, 1969.
- 4) 藤井, 元木, 屋地, 江藤: レーザー誘起ブレイクダウン分光によるがいし付着物質計測技術の開発—広い汚損区分を対象とした磁器がいしの塩分付着密度の遠隔計測—, 電中研研究報告H15016, 2016.
- 5) 藤井, 元木, 屋地, 江藤, 堀田, 末包: レーザー誘起ブレイクダウン分光によるがいし付着物質計測技術の開発 (その2)—送変電設備への適用に向けた磁器がいし付着塩分中Na, Clの遠隔計測—, 電中研研究報告H16008, 2017.
- 6) 藤井, 屋地, 江藤, 元木: がいし類の汚損の計測方法、計測装置、及び計測プログラム, 特願2016-090859, 2016年4月28日出願
- 7) JEC-127, 電気学会電気規格調査会標準規格, 送電用支持物設計標準, 1979.

DEN-CHU-KEN  
**TOPICS**

発行：一般財団法人 電力中央研究所 広報グループ

〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1（大手町ビル7階）

TEL：03-3201-6601 FAX：03-3287-2863

<http://criepi.denken.or.jp/>