

放射線工学部会セッション

レーザーを活用した分析計測・制御システムの研究と原子力工学への展開

Researches on analysis and control systems using lasers and their applications to nuclear engineering

レーザー誘起ブレイクダウン分光法を用いた過酷環境下における遠隔その場分析

Remote and in situ analysis under rough and severe radiation environments using laser induced breakdown spectroscopy

*若井田 育夫¹, 大場 弘則¹, 赤岡 克昭¹, 狩野 貴宏¹,
坂本 寛², 中西 隆造³, 柏倉 俊介⁴, 平等 拓範⁵, 池田 裕二⁶, 出口 祥啓⁷
¹JAEA, ²NFD, ³QST, ⁴立命館大, ⁵分子研, ⁶i-Lab. Inc., ⁷SL&PS Co.

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（1F）の廃炉においては、過酷事故炉内から熔融燃料デブリ等を取り出すという世界的に類例のない作業を安全かつ円滑、迅速に実行することが求められている。このためには、まず、圧力容器や格納容器内に存在する燃料デブリがどのような状態なのか、どんな組成構成となっているかを事前に知り、これを取り出し計画に反映させることが重要となる。また、中、長期的展望に立てば、取り出し作業時におけるデブリや構造物などの現場スクリーニングとそれに基づく分別採取、作業自身のモニタリング、そして最終的には、燃料デブリ等の取り出し完了確認のための炉内残存核燃料物質等のサーベランス等が不可欠であり、遠隔でのその場分析技術は、廃炉工程において重要な役割を持つものと考えられる。

レーザー誘起ブレイクダウン分光法（LIBS）は、非接触・その場・迅速分析が可能な手法の一つであり、光ファイバーによる伝送を組み合わせることで（図1）、遠隔その場分析を可能とする技術として耐放射線性等を含む基礎的な性能実証を重ね、実機適用に向けた技術開発に発展させてきた。本報告では、LIBS によるレーザーモニタリング分析手法開発の一連の取り組みと、1F への適用を目指した技術開発の現状について紹介する。

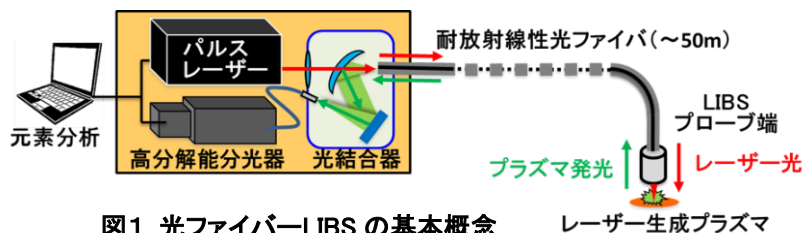


図1 光ファイバーLIBS の基本概念

レーザー生成プラズマ

2. 技術開発の現状

2.1 光ファイバーLIBS の特性

高線量率環境での利用を前提に、耐放射線性光ファイバーを利用した可搬型 LIBS 装置を開発し^[1] 光ファイバー長さ 50 m、線量率 10 kG/h、積算線量数 2 MGy の耐放射線性を有すること、図2に示すように、線量率 0 ～ 10 kGy/h の環境でも、検量線に変化がなく、原理的に LIBS 法自体が放射線の影響を受けにくいことを実証した^[2]。なお、水没試料に対しても、プローブ部からのガスによるバブリングにより、明瞭なスペクトル取得と気中同様の検量線が取得でき、定性・定量分析が可能であることも確認されている。

さらに、より現実的な燃料デブリへの適用性を実証するために、LIBS プローブのみをホットセルに導入し、使用済み燃料を含有した模擬燃料デブリを対象とした実証試験を行った。試験の様子を図3に、取得されたスペクトル例を図4に示す。使用済み燃料と Zr、Fe の

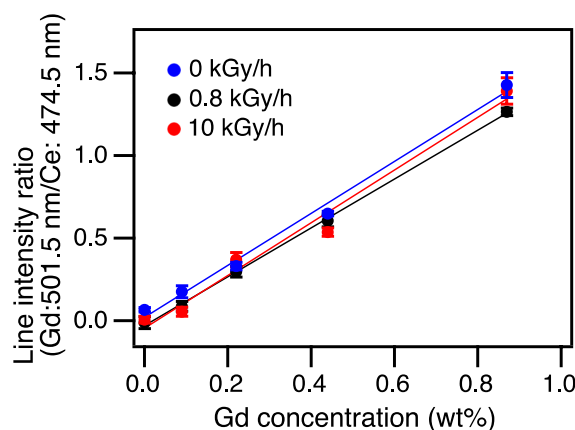


図2 ガンマ線照射下でのCe酸化物中のGd濃度に対する発光強度比 (Gd/Ce) の検量線図

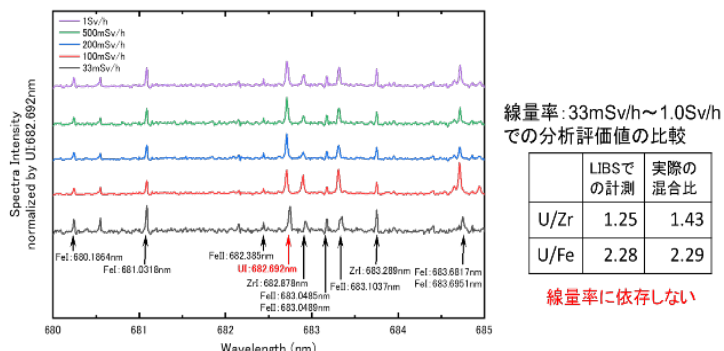
*Ikuko Wakaida¹, Hironori Ohba¹, Katsuaki Akaoka¹, Takahiro Karino¹, Kan Sakamoto², Ryuzo Nakanishi³, Shunsuke Kashiwakura⁴, Takunori Taira⁵, Yuji Ikuda⁶, Yoshihiro Deguchi⁷

¹JAEA, ²NFD, ³QST, ⁴Ritsumeikan Univ., ⁵IMS, ⁶i-Lab., Inc., ⁷SL&PS Co.

酸化物混合試料に対し、雰囲気線の線量率を 33 mSv/h～1.0 Sv/h に変化させた。その結果、スペクトル形状も、評価される混合比も、線量率に依らず計測・評価が可能であった。この結果は、実際の燃料デブリにおいても分析できる可能性が高いことを示している。なお、簡易分析手法として比較される携帯型 XRF では、15 mSv/h を超える試料に対して計測が困難となっており、光ファイバーLIBS の有用性が示されている^[3]。



図3 使用済み燃料での試験^[3]



典型的なU、Fe、Zrスペクトル(UI:682.692nmで規格化)

2-2. マイクロチップレーザーの導入

光ファイバーLIBS では、パルスレーザー光を光ファイバーに入射することから、光ファイバーの長さとして 50 m 程度の制限がある。一方、1Fでの適用を考えると、100 m 級の超遠隔分析も求められてくる。そこで、発想を転換し、近年、その開発が目覚ましい手のひらサイズのマイクロチップレーザーを利用し、レーザー光源そのものを光ファイバーの先端に位置するマイクロチップレーザーLIBS の導入を図った。分析性能はファイバーLIBS とほぼ同様以上であり、耐放射線性も 1 kGy/h、1 MGy と十分であること、光ファイバー長さ 100 m であっても、問題なくスペクトルが取得できることが確認され、超遠隔分析の実現性が示された。実機適用に向け、より過酷な環境での利用実現を図る。

図4 Zr、Fe、酸化物混合使用済み燃料での計測例^[3]

光ファイバーLIBS（基本性能の実証済み）

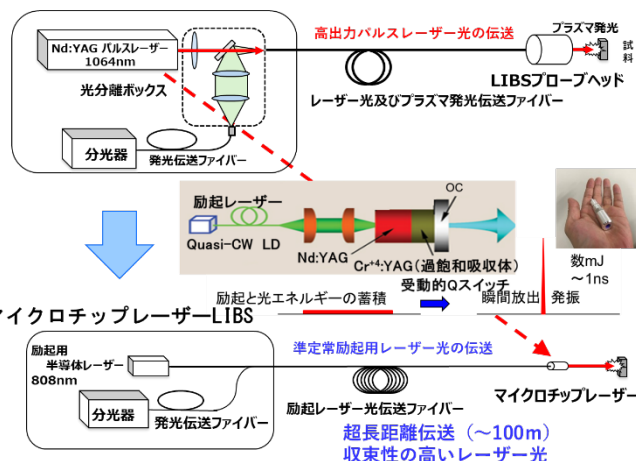


図5 マイクロチップレーザーLIBS の導入

3-3 LIBS システムの拡張

光ファイバーLIBS、マイクロチップレーザーLIBS を基本とし、可搬型で使いやすい従来システム、超長尺対応のマイクロチップレーザーLIBS、プラズマ寿命の延長に伴う信号強度の増倍を図るマイクロ波重量LIBS、そして水没試料、含水試料対応のレーザー二重照射 LIBS 等、適用場面に応じたシステムの拡張を図る計画である。

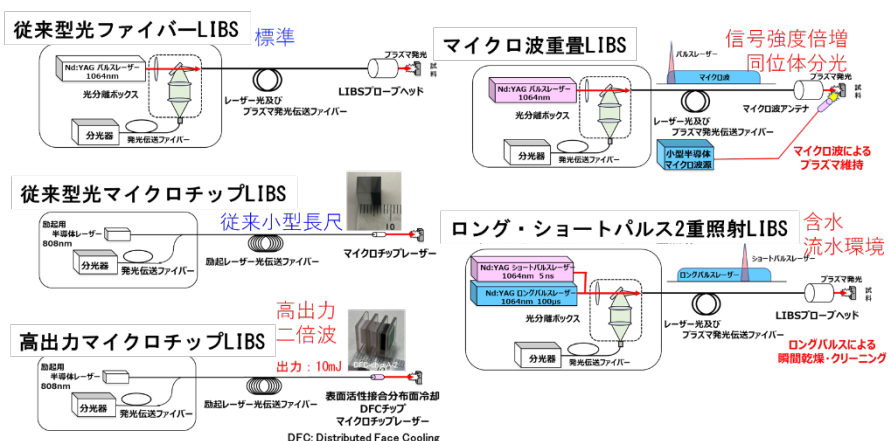


図6 拡張していく各種光ファイバーLIBS システムの概要^[3]

- [1] Morihisa Saeki, et.al, J. Nucl. Sci. Technol. 2014, 51, 930–938
 [2] Ryuzo Nakanishi, et. al., Appl. Sci. 2020, 10, 8985
 [3] https://dccc-program.jp/wp-content/uploads/20231117_JAEA.pdf

本報告には、経済産業省資源エネルギー庁「令和3年度開始廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（燃料デブリの分析精度の向上、熱挙動の推定及び簡易分析のための技術開発）」^[3] および文部科学省英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業JPJA20P20337946 の成果の一部が含まれます。