

福島原子炉建屋内の気体漏洩計測に向けた レーザーリモートセンシング技術の開発

松田 晶平¹, 染川 智弘², 倉橋 真理², 石井 萌³, 久世 宏明⁴, 椎名 達雄³

¹ 日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター (〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1)

² レーザー技術総合研究所 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-6)

³ 千葉大学大学院 融合理工学府 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

⁴ 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

Development of laser remote sensing techniques to detect gas leakage inside reactor buildings at the Fukushima Daiichi nuclear power station

Shohei MATSUDA¹, Toshihiro SOMEKAWA², Shinri KURAHASHI², Moe ISHII³,
Hiroaki KUZE⁴, and Tatsuo SHIINA³

¹ MSRC, Japan Atomic Energy Agency, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148

² Institute for Laser Technology, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

³ Chiba Univ., 1-33 Yayoi-cho, Inage, Chiba 263-8852

⁴ CERE, Chiba Univ., 1-33 Yayoi-cho, Inage, Chiba 263-8852

Abstract: Over a decade after the severe accident at the Fukushima Daiichi nuclear power station in 2011, there are still concerns about partial damage to the primary containment vessel (PCV), which could potentially result in gas leaks. In order to effectively monitor gas leakage from the PCV, it is essential to establish remote sensing techniques. In this study, we have developed a flash Raman LIDAR system that consists of a frequency-doubled Q-switched Nd³⁺:YAG laser, a gated em-ICCD camera, and a series of bandpass filters. By replacing these filters, two-dimensional images of the Raman signals for nitrogen, oxygen, water, and water vapor were successfully acquired at a distance of 2 m. Furthermore, we have investigated gas visualization methods based on changes in refractive index.

Key Words: remote sensing, flash LIDAR, Raman scattering, refractive index, gas leakage

1. はじめに

現在、東京電力福島第一原子力発電所では廃炉作業が進められている。2024 年 10 月頃には燃料デブリの試験的な取り出しに着手する見込みである¹⁾。しかし、原子炉格納容器 (PCV) は事故により一部が損傷していることがわかっており、今後デブリの取り出しが本格化した際に気体状あるいはダスト状の放射性物質の漏洩が懸念されている²⁾。ただし、線量が高く、複雑な形状のため漏洩箇所の探索は容易でない。そこで、PCV からの漏洩気体の検出を目指してリモートセンシング技術を開発している。ここでは現在取り組んでいるフィルター方式フラッシュラマンライダーと屈折率変化の光学的可視化法について報告する。

2. フィルター方式フラッシュラマンライダー

気体漏洩箇所の検出には、観測視野にパルスレーザーを拡散照射することで視野内を一度に計測できるフラッシュライダーが有効と考えられる³⁾。そこで、測定対象のラマン散乱波長に合わせて干渉フィルターを切り替えることで数種の気体を測定できるフィルター方式フラッシュラマンライダーの開発を行った。

Fig. 1A にライダーの光学配置の模式図を示す。ライダーの送信光にはパルス幅ナノ秒、繰り返し 10 Hz の Nd:YAG レーザーの第二高調波 532 nm を用いた。パワーは 1/2 波長板と偏光ビームスプリッターで構成したアッテネータにより制御した。設置する平凹レンズの焦点距離によって拡散照射の範囲を調整した。気体の後方ラマン散乱信号は、フィルターホイールに設置した各種干渉フィルター (半値全幅 2 nm) を透過し、ゲート付き電子増倍画像センサー (em-ICCD) により二次元情報として取得した。さらに、3 ns のゲートを時間的に掃引することで気体を三次元的に可視化した。em-ICCD の直前にはカメラレンズを設置し、測定位置の像を結像することで空間分解能を向上させた。また、532 nm ノッチフィルターと 550 nm

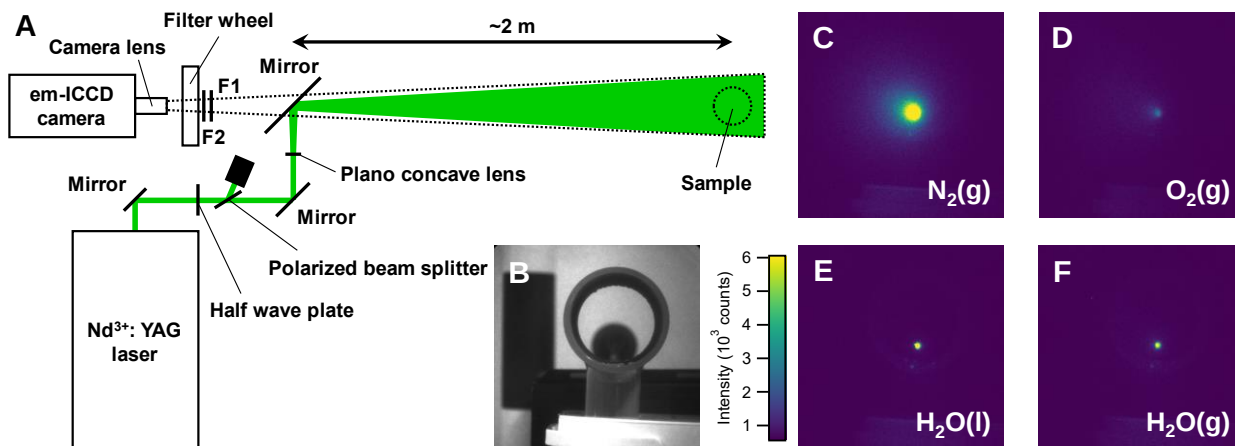


Fig. 1 (A) Schematic diagram of the flash Raman LIDAR system. F1: 532 nm notch filter, F2: 550 nm long-pass filter. (B) Field of view. (C to F) Two-dimensional images of Raman signals of (C) nitrogen, (D) oxygen, (E) water vapor, and (F) water.

ロングパスフィルターを用いて送信光 532 nm の迷光を除去した。送信光と受信光は同軸になるように配置した。

Fig. 1A のサンプル位置に加湿器を置き水蒸気を噴霧させた。この時の観測視野を Fig. 1B に示す。加湿器の噴出口に丁字型の塩化ビニルパイプを設置することで、噴霧される水蒸気を捕集し、視線方向に残留させた。この状態で干渉フィルターを切り替えて測定した結果を Fig. 1, C-F に示す。干渉フィルターは各気体のラマン散乱波長に合わせ、窒素には 607.5 nm、酸素には 580.3 nm、水には 649.2 nm、水蒸気には 660.6 nm を用いた。レーザーのパルスエネルギーは 500 mJ, em-ICCD の積算は 100, ゲインは 100 であった。Fig. 1, C-F のように、フィルターを切り替えることで 4 つの測定対象を識別して計測することに成功した。

気体の定量のために検量線の取得を試みた。ガラスセルに窒素ガスを封入し、圧力を 0-800 Torr に制御して標準試料とした。この標準試料を測定した結果を Fig. 2 に示す。窒素用の 607.5 nm のフィルターではラマン散乱信号が圧力に対して線形に応答した。一方、酸素用の 580.3 nm のフィルターではすべての圧力範囲において有意な信号が得られなかった。切片に相当する圧力 0 Torr での信号強度は、背景由来の蛍光と考えられる。この結果から検量線が作成できることがわかった。他の測定対象でも同様にして定量が可能である。

3. 屈折率変化の光学的可視化

気体の挙動を二次元的かつ直観的に探索する方法として、屈折率変化を可視化することが候補に挙げられる。そこで、まずシャドウグラフ法を試した。Fig. 3A に光学配置を示す。光源には波長 532 nm の

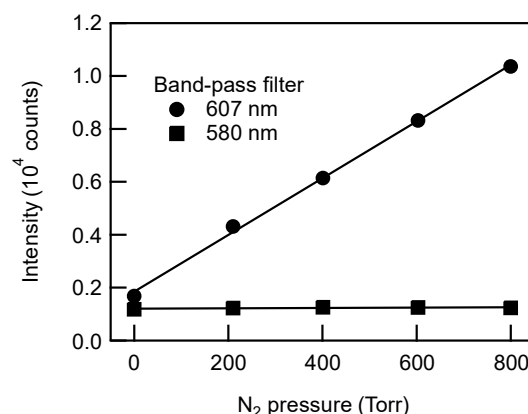


Fig. 2 LIDAR signal intensity measured with 580- and 607-nm band-pass filters as a function of nitrogen pressure.

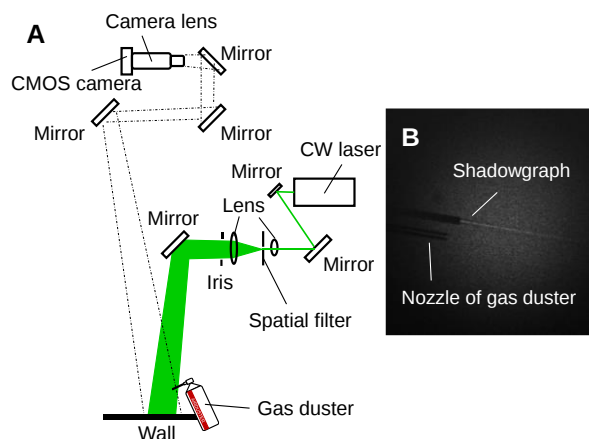


Fig. 3 (A) Experimental setup of the shadowgraph system. (B) Shadowgraph image of gas ejected from a duster.

CW レーザーを用いた。レーザー光は凸レンズとスペイシャルフィルターによりガウシアンビームへと変換した。その後、レンズと虹彩絞りによって壁面でのビーム径が直径 10 cm になるよう拡大し、走査ミラーを介して壁面へ照射した。漏洩気体を模擬するため、エアダスターを壁面から 20 cm 手前で噴射した。カメラレンズを用いて拡大した壁面の像を CMOS カメラのセンサー面に結像させ、壁面に投影された影絵を観測した。このようにして気体を可視化するための実験を行った。

Fig. 3B にエアダスターから噴射される気体の影絵を観測した結果を示す。レーザーの出力は 250 mW, CMOS カメラの露光時間は 10 ms であった。手前の像がエアダスターのノズルであり、奥に見える像がその影絵である。噴射された気体の屈折率勾配を反映した輝度の明暗像としての影絵が生じていることがわかる。このことから、実体では視認が難しいエアダスターから噴射される気体を影絵によって可視化できることが示唆された。

また、屈折率変化を可視化する別の方法として、表面の亀裂や欠陥の非破壊検査に用いられるシアログラフィーを応用できる可能性がある⁴⁾。その基礎検討として干渉画像を得るために、Fig. 4A のように撮像部の前にビームスプリッターと 2 つのミラーから成る干渉光学系を設置した。

干渉縞を形成させた状態で、エアダスターから噴射する気体を撮影した画像が Fig. 4B である。この干渉画像の楕円で囲んだ領域を見ると、拡散した気体による干渉縞の乱れが確認できる。気体が干渉縞に影響を与えることから、流出する気体の形状などに繋がる位相情報を間接的に取得できると考えられる。

4. まとめ

構造物から漏洩する気体を遠隔から空間的に検出するために、フラッシュラマンライダーと屈折率変化の光学的可視化法を開発している。フラッシュライダーでは、フィルターを切り替えることで窒素、酸素、水蒸気、水のラマン信号を画像として測定した。今後はフィルター方式からグレーティング方式へ変更し、複数の測定対象を同時に記録できるように開発を進めたい。屈折率変化の光学的可視化法では、視認が難しい気体を影絵として可視化し、干渉画像でも気体の情報が得られた。今後は、シアログラフィー法による可視化技術の確立を目指す。これらの方法による漏洩気体の遠隔計測の適用可能性を検証したい。

謝 辞

本研究は、JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JPJA23P23813496 の助成を受けたものであり、課題解決型廃炉研究プログラム「PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発」において実施された。

参考文献

- 1) 東京電力ホールディングス株式会社, 廃炉中長期実行プラン 2024, 2024 年 3 月 28 日, p.22, <https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/plan/2024-j.html>
- 2) 原子力損害賠償・廃炉等支援機構, 東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン 2023, 2023 年 10 月 18 日, p.14-16 <https://www.dd.ndf.go.jp/strategic-plan/index2023.html>
- 3) T. Somekawa, Y. Ichikawa, M. Ogita, S. Sugimoto, H. Chosrowjan, S. Taniguchi, and I. Asahi: Opt. Commun. **513** (2022) 128083.
- 4) Y.Y. Hung and H.P. Ho: Mater. Sci. Eng. R-Rep. **49** (2005) 61.

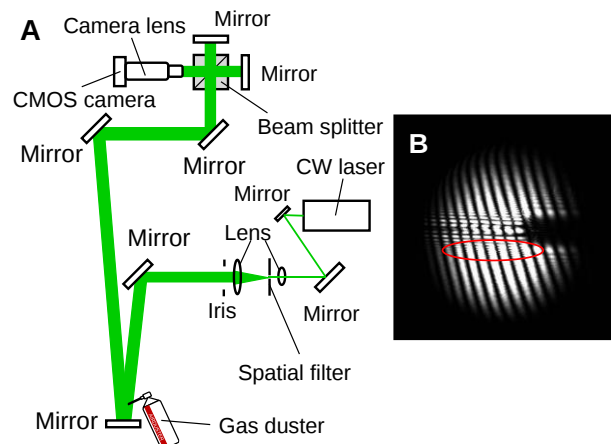


Fig. 4 (A) Optical setup of the interferometric system. (B) Effect of diffused gas on interference fringes.