

企画セッション | 総合講演・報告：総合講演・報告1 東京大学弥生研究会 ー原子・分子の分光分析技術とその応用ー

■ 2019年9月11日(水) 13:00 ~ 14:30 | ■ N会場 共通教育棟 3F A32

[1N_PL] レーザーの特長を利用した研究開発IV

座長:長谷川 秀一(東大)

[1N_PL01] kW級CWレーザーを用いた表面クリーニング技術の開発と除染適用の試み

*藤田 和久¹ (1. 光産業創成大学院大)

[1N_PL02] 過酷環境下での遠隔レーザー分析技術

*大場 弘則¹ (1. QST)

[1N_PL03] レーザー法による原子炉厚板鋼材切断技術の開発

*田村 浩司¹ (1. QST)

総合講演・報告 1 東京大学弥生研究会 ―原子・分子の分光分析技術とその応用―

レーザーの特長を利用した研究開発 IV

Research developments using excellent properties of Lasers IV

(1) kW 級 CW レーザーを用いた表面クリーニング技術の開発と除染適用の試み

(1) kW-class laser cleaning for steel structure maintenance and decontamination

*藤田和久¹, 豊澤一晃², 高原和弘², 稲垣博光³, 移川隆行⁴, 藤田啓恵⁴, 山田正明⁴,
沖原伸一郎¹

¹光産業創成大学院大学, ²トヨコー, 中部電力³, 日本環境調査研究所⁴

1. 緒言

kW 級 CW (連続波) レーザー光の高速スキャンによる, 廃止措置の放射能除染技術 (レーザー除染) の研究開発に取り組んでいる。その基本技術は, インフラ維持管理を目的として開発していたレーザークリーニング技術であり, その内容と, 除染適用の試みについて紹介する。

2. インフラ維持管理を目的としたレーザークリーニング技術 [1]

2-1. 鋼構造物の維持管理

高度経済成長時代に多く建設されたインフラの老朽化が問題にされはじめて久しく, 高速道路や鉄道などを支える橋梁, 鉄塔, 石油備蓄用などの大型タンクなど, 鋼構造物もその代表である。国内に 60 万を超える橋梁に限っていえば, 海からの飛来塩分や融雪剤の塩にさらされ, 錆による橋梁の劣化が課題となっている。

橋梁の寿命と言われる 50 年を迎える長さ 2 m 以上の橋梁は, 2023 年には全体の 43%, 2033 年には 67%, 老朽化に伴い通行規制がある橋梁 (15m 以上) は 2013 年に 1,381 橋あり年々増加している。事後保全から予防保全, ライフサイクルコスト低減に資する維持管理手法が今後さらに重要となる。

2-2. 塗り替え塗装工事における素地調整の課題

鋼構造物の延命化には, 劣化塗膜と錆が混在する鋼構造物表面において, それらをきれいに除去し, 再塗装後の耐久性を与えられる素地調整を実施し, 鋼構造物を錆から守る必要がある。しかしながら従来はディスクサンダーといった電動工具による限定的な除錆 (3 種ケレン) にとどまっており, 短期間の再発錆が課題であった。ブラスト工法による 1 種ケレン作業も, 多く使用する研削材の飛散防止養生・産廃コスト, 騒音や粉塵環境下における作業性などに課題があり, よりよい工法が求められていた。

2-3. レーザークリーニング

そういった課題を持つトヨコーが光産業創成大学院大学と共同で開発したのが CoolLaser® (クーレーザー®) システムである。集光させた kW 級の CW レーザービームを円環状に高速スキャンさせ, 表面の付着物を瞬間的に急加熱し, 熔融・蒸散・熱破砕により除去するものである。

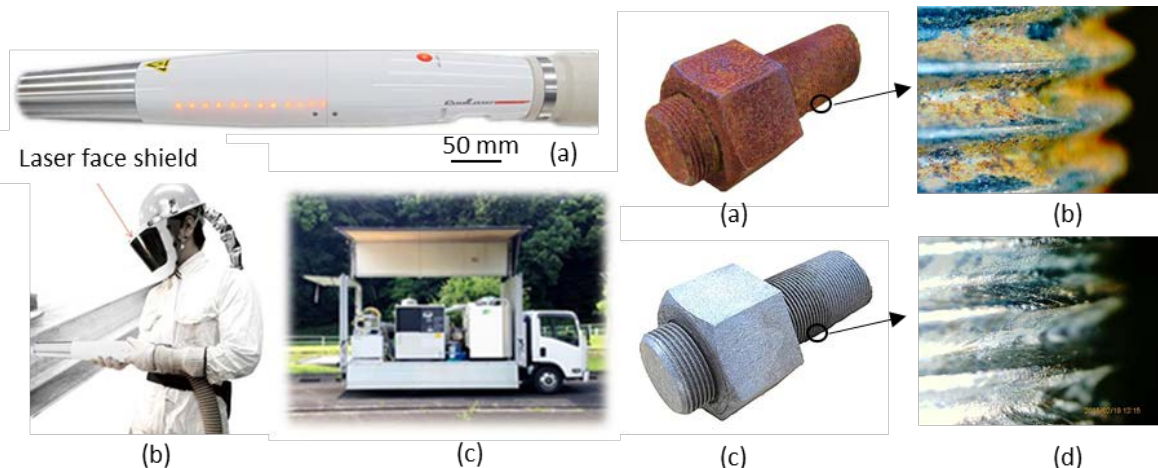


図 1 レーザークリーニングシステムの外観 図 2 錆除去の例 (a)(b) 除去前、(c)(d) 除去後

図1にCoolLaser システムを示す。波長 $1\ \mu\text{m}$ 帯のファイバーレーザーを光源とし、光ファイバーにより 100 m の伝送を可能とし、これらを搭載したトラック(c)により橋梁の塗り替え工事に対応している。光ファイバーの先端には円環状の高速スキャンを可能にするレーザーヘッド(a)を取付け、安全に配慮された装備をまとった作業員が手に持って作業できるようにしている(b)。現在、現場にて実用化が進んでいる。

図2に錆びたサンプルの照射前後の写真を示す。電動工具ではもちろん、ブラスト工法においても研削材の大きさからねじ山内の研削が困難であるが、レーザーの場合は光が届けば処理可能である。光は吸収により消滅するため、使用済みの研削材の処理も不要であり、粉塵環境や騒音問題についても有利である。再発錆の主要因である塩分の除去にも有利であるため、表面の塩分濃度 $50\ \text{mg}/\text{m}^2$ 以下の達成が従来工法より容易である点が特に鋼構造物の維持管理にとって利点とされている。

3. 除染適用の試み

2章で述べたレーザークリーニング技術を利用して、廃止措置の放射能除染技術（レーザー除染）に適用するための研究開発に、中部電力及び日本環境調査研究所が加わって取り組んでおり、それらを概観する。

3-1. 処理速度の推定 [2]

金属部材の汚染は放射性物質が鋼材表面の酸化被膜に付着することで生じるため、レーザー除染の処理速度は、放射性物質が含まれる深さまでの表層除去に必要なエネルギーを投入しながら、鋼材表面を走査する速度として評価できる。

そこで、CW 500 W の Yb ファイバーレーザーを無垢の 316 ステンレス表面に直線状に走査しながら集光照射し、レーザーフルエンスをパラメータとしてステンレス表面の除去量を測定した。そのデータをもとに、当時ファイバーレーザーで最大級出力であった 10 kW レーザーの使用を想定し、放射性物質の含有深さを $10\ \mu\text{m}$ と仮定し、最適照射条件における処理速度を推定すると、 $1\ \text{m}^2$ あたり 15 分となった。除染対象物によって必要な処理速度は異なるものの、十分に検討に値する速度であり、実用化の可能性が期待できる。

3-2. 粉塵飛散防止機構の原理確認 [3]

水中におけるレーザークリーニング手法について検討した。水中におけるレーザー光の減衰、発生除去物による光路遮断、近接照射系などを検討し、図3に示すような錆びサンプルの水中におけるクリーニング試験に成功している。

3-3. 発生粉塵の特性把握 [4]

レーザー除染で発生する放射性物質を含む粉塵・ガスの処理方法について検討するため、金属板へのレーザー照射で発生する粉塵・ガスを分析する基礎実験を行った。そのうち、図4は発生粉塵の粒径分布であり、対象物によって異なるがおおむねマイクロメータ程度以下であることがわかった。

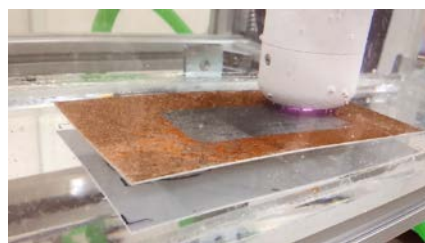


図3 水中試験

4. まとめ

インフラ維持管理向けのレーザークリーニング技術とその除染適用についての概要を述べた。本大会では、移川よりホット試験についての発表を行う予定である（レーザー塗膜除去技術の原子力プラントへの適用に向けた研究開発(4)実金属廃棄物を用いた除染試験）。

参考文献

- [1] 藤田和久 他、レーザー研究, **45**, 7, 418-422, (2017).
 [2] 稲垣博光 他、日本原子力学会「2015 年春の年会」 B41.
 [3] 藤田和久 他、日本原子力学会「2015 年秋の大会」 E15. [4] 稲垣博光他、日本原子力学会「2018 年秋の大会」 2L17.

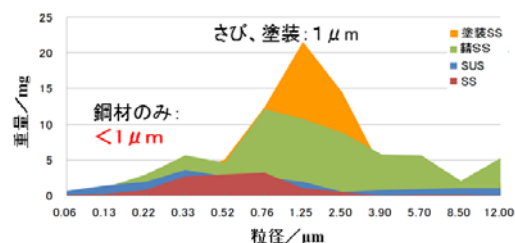


図4 発生粉塵の粒径分布

*Kazuhiisa Fujita¹, Kazuaki Toyosawa², Kazuhiro Takahara², Hiromitsu Inagaki³, Takayuki Utsushikawa⁴, Hiroe Fujita⁴, Masaaki Yamada⁴, and Shin-ichiro Okihara¹

¹The Graduate school for the Creation of New Photonics Industries, ²TOYOKOH Inc., ³Chubu Electric Power Co., ⁴Japan Environment Research Co.

総合講演・報告 1 東京大学弥生研究会 ―原子・分子の分光分析技術とその応用―

レーザーの特長を利用した研究開発 IV

Research developments using excellent properties of Lasers IV

(2) 過酷環境下での遠隔レーザー分析技術

(2) Remote laser analysis technique in severe environments

*大場 弘則^{1,2}, 田村 浩司^{1,2}, 佐伯 盛久^{1,2}, 田口 富嗣¹, 若井田 育夫², 平等 拓範^{3,4}¹量研機構, ²原子力機構, ³理研播磨, ⁴自然機構

東電福島第一原子力発電所(1F)の廃炉においては、世界でも例のない事故炉からの熔融燃料デブリ等の安全かつ円滑な取り出しが求められている。これまでに、原子力機構において長さ50mの耐放射線性光ファイバーを活用したレーザー誘起プラズマ発光分光(以下LIBS: Laser-induced breakdown spectroscopyという)技術が提案されており、本技術の適用により水中・近赤外波長域での燃料デブリその場迅速分析可能性の-highことが示されている¹⁾。しかしながら、高出力のレーザーを光ファイバーに導入する際にはその長さに大きな課題が存在する。レーザー光伝送ファイバーLIBS技術では、高出力のレーザーを光ファイバーに導入して先端の分析プローブまで伝送させるが、1F廃炉措置における炉内状況調査では、人間が十分に余裕を持って安全に作業ができるエリアから高放射線環境下検知位置までの距離は100m以上が想定される。また、分析ヘッド近傍での高輝度発光源を実現するためにはレーザー出力を上げる必要があり、導入レーザー光の高出力化に伴って光ファイバー入射端面の損傷頻度が格段に増加する。こうしたことから、現在開発中の光ファイバーLIBSと並行して代替技術の開発も進めることが不可欠である。

そこで我々は、発想の転換として、従来的高出力パルスレーザー光をファイバー伝送する方法(図1上図)ではなく、光ファイバーの先端にレーザー光発振機能を持たせることにより、より長距離の分析標的への高いエネルギーを投入して高輝度のプラズマ発光を可能とし、高放射線環境下での炉内デブリ性状等の高感度分析技術を考案した。これを実現するために、セラミックマイクロチップレーザー技術^{2,3)}を活用して、短波長化による高感度LIBS分析手法(図1下図)の開発に着手した。これは、ジャイアントパルスマイクロチップレーザー(以下マイクロチップレーザーという)技術を活用して、短波長化による高感度LIBS分析手法を開発し、量研機構のガンマ線照射施設を利用して高線量放射線環境下でのマイクロチップレーザーの適用可能性について評価するものである。

本報告では、まず光ファイバーに関する放射線環境下における耐性について、これまでに報告された事例等のレビューを行い、続いて従来型ファイバーLIBS技術を改良して可搬性を高めた装置を開発し、過酷環境下において遠隔迅速その場分析を実証した試験結果を述べ、更にマイクロチップレーザーLIBS技術開発の概要・進捗状況について紹介する。

本報告は、文部科学省の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業により実施された委託業務「先進的光計測技術を駆使した炉内デブリ組成遠隔その場分析法の高度化研究」の成果を含みます。

文献

- 1) M. Saeki, et al., J. Nucl. Sci. Technol. 51 (2014) 930.,
- 2) H. Sakai, et al., Opt. Express 16 (2008) 19891.
- 3) L. Zheng, et al., Opt. Express 7 (2017) 3214.

*Hironori Ohba^{1,2}, Koji Tamura^{1,2}, Morihisa Saeki^{1,2}, Tomitsugu Taguchi¹, Ikuo Wakaida², Takunori Taira^{3,4}

¹QST, ²JAEA, ³RIKEN, ⁴NINS,

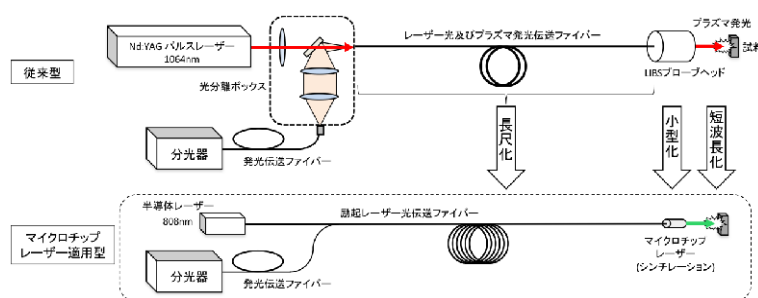


図1 新規考案ファイバーLIBS装置の概略図 従来型の問題点を解決して、より高感度で安全性の高い炉内検知LIBSプローブを提供

総合講演・報告 1 東京大学弥生研究会 —原子・分子の分光分析技術とその応用—

レーザーの特長を利用した研究開発Ⅳ

Research developments using excellent properties of Lasers Ⅳ

(3) レーザー法による原子炉厚板鋼材切断技術の開発

(3) Development of Laser cutting technology of thick steel plates for nuclear facilities

* 田村 浩司^{1,2}, 遠山 伸一², 門脇 春彦³, 石神 龍哉³, 山岸 隆一郎³¹量研機構, ²原子力機構, ³若エネ研

1. はじめに

運転期間を終了した原子炉では、順次廃止措置が行われる。その際、原子炉構造物の切断解体が必要とされる。従来から実績のある切断法であるプラズマアーク法や機械式切断法と比較して、レーザー光を熱源とするレーザー法は、遠隔制御性が高く、ブレードなどの交換部品の必要性がないなど利点が多く、原子炉解体に適用できるならば有効な選択肢となりうると期待されている。しかし、原子炉は压力容器など 100mm を超える板厚の大きい鋼材で構成されているため、レーザー法の廃止措置適用にはこのような厚板鋼材の切断が必要とされる。しかし、レーザー法はこのような厚板鋼材切断に関しては知見や実績に乏しく、その適用性や有効性の展望に関しては必ずしも肯定的なものばかりではなかった。

本報告では、原子炉に用いられるような厚板鋼材のレーザー切断技術の開発や、その廃炉現場適用を目指した最近の技術開発の成果に関して報告する。

2. 厚板鋼材切断の技術開発

2-1. 厚板鋼材のレーザー切断試験

図 1 にレーザー切断の試験配置を示す。熱源として米国 IPG フォトニクス社製ファイバーレーザーの発振光を用いた。レーザー光を光ファイバーで導き、加工ヘッド内のレンズで集光し、鋼材試験片に照射した。熱で熔融した金属を除去するためのアシストガスを、レーザー光と同軸状に噴射している。厚板鋼材切断を目指して、レーザー光の照射条件、鋼材の移動速度やガス噴射圧力など様々な条件を探索して、切断試行を行った[1, 2]。

図 2 はステンレス鋼 (図左側の薄い部分) と低炭素鋼 (図右の厚い部分) を組み合わせた鋼材試験片のレーザー切断試行結果である[2]。それぞれ、沸騰水型 (a) と加圧水型 (b) 原子炉の压力容器壁を模している。中心部の切断溝が直線状に左側 (加工ヘッド側) から右側 (出射部側) に抜けており、切断が達成された結果を示している。このような試験結果から、压力容器の板厚として想定される 300mm 程度の鋼材 (炭素鋼やステンレス鋼) のレーザー切断が可能であることを示した。

また、廃炉現場への適用で想定される複雑な形状を有する構造物や、大型配管を模した鋼材に関しても試験を行った。図 3 はゲートバルブ切断への適用例で、ノズル先端から照射したレーザー光により、バルブの複雑な形状によらず切断が可能であることが示された。これら結果は、レーザー切断が压力容器や廃炉現場

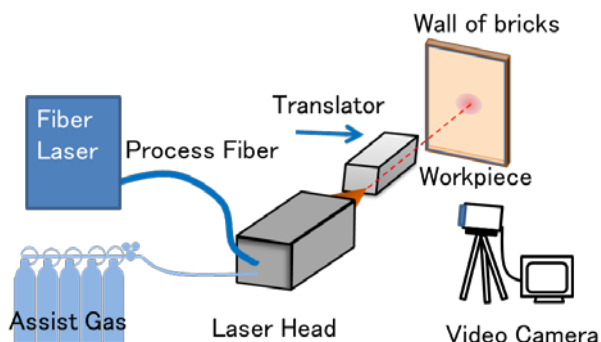


図 1 レーザー切断試験配置



図 2. 压力容器を模擬した厚板鋼材の切断結果

の様々な対象構造物の切断に十分適用可能であることを示しており、レーザー切断の廃止措置における適用性や有効性を実証する結果である。

2-2. 切断条件の解析

一方、切断に必要な諸条件を満たさないと、このような切断は達成されない。達成されない場合、高出力のレーザーエネルギーが対象鋼材溝内に滞留し、熔融金属を吹き戻したり、照射部分が大きくえぐり取られたりする。これは、作業上危険性の伴う事象である。そこで、どのような条件の組み合わせで切断が可能となるのか条件解析を行った。図4(a)-(f)に切断試行を行った後の鋼材側面の例を示す。また、試行結果を鋼材入射面のカーフ幅とアシストガス流量で整理し、切断可否(○、×)をまとめた結果を図4(g)に示す。これにより、おおよそ切断可能条件が、前面カーフ幅とガス流量のある条件範囲内で実現できていることが把握できた[3]。この結果に基づきアシストガス圧力の鋼材前面からの距離依存性を計算した(図5)。この結果から、切断長に沿って熔融金属が移動できるようなガス圧力が維持できる場合に切断が可能となる、と考えると傾向がおおよそ説明できることがわかった。このような解析を行うことにより、廃炉現場における高出力レーザーによる切断技術の適用を、より安全に予測・制御して行えるようにできるものと期待される。

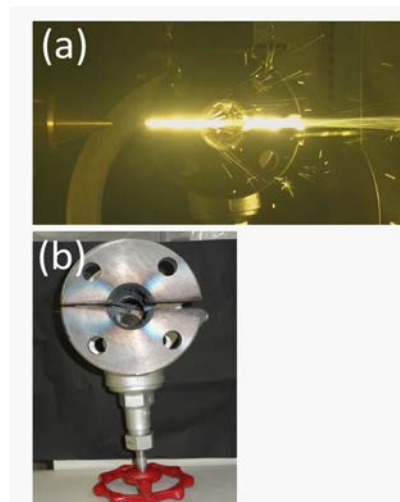


図3 構造物の切断過程(a)と切断結果(b)

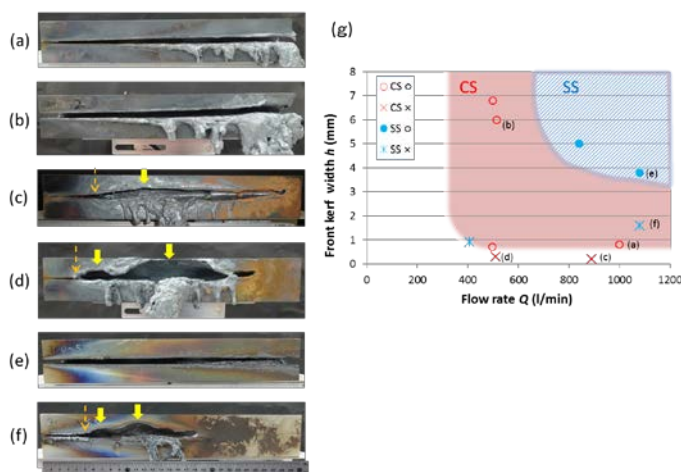


図4 炭素鋼(a-d)とステンレス鋼(e, f)の切断試行後の側面、及び試行可否結果(○、×)の前面カーフ幅とガス流量とによるまとめ(g)。

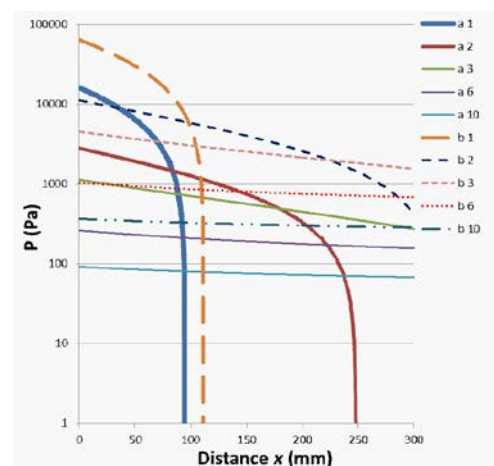


図5 カーフ領域のガス圧力の計算結果。

2-3. 切断過程観察手法の開発

レーザー切断部は高エネルギーのレーザー光が集光・照射されているため、その切断プロセスの直接観察は従来容易ではなかった。そこで、家庭用ビデオカメラを用いた簡便安価な方法を考案し、詳細な切断過程の観察を実現した[4]。図6は、この方法により観察された風圧で変形している熔融金属(a)とそのモデル(c)であり、また、(b)は熔融金属が照射部を下流側に移動し最終的に除去される様子を表している。この方法により切断過程の詳細をリアルタイムで観察することが可能である。

また必要条件を満たさず切断が達成できない過程についても観察可能であった。この場合、切断部が熔融金属で閉塞し、レーザーエネルギーが壁面を削り、切断部に図7(a)に矢印で示すような空孔部を生じる場合がある。このような空孔の生成を観察した(図7(b, c))。高出力レーザーの廃炉現場適用では、安全なプロセス管理が不可欠であるが、本手法は、プロセス監視や、危険な状況を早期に知見する手法としても有効であり、レーザー切断の安全な運用にも貢献するものと期待できる。

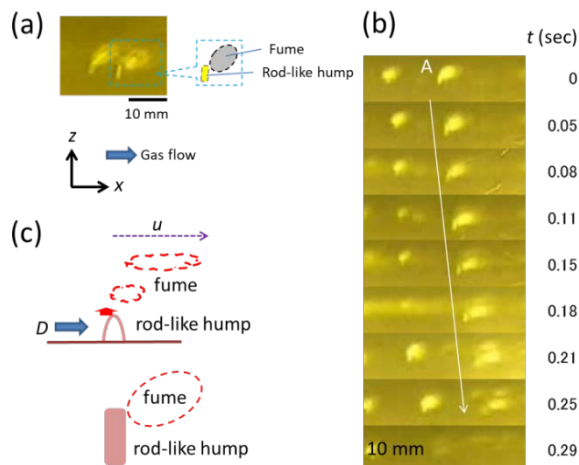


図6 炭素鋼切断時の側面観察(a,b)とモデル(c)

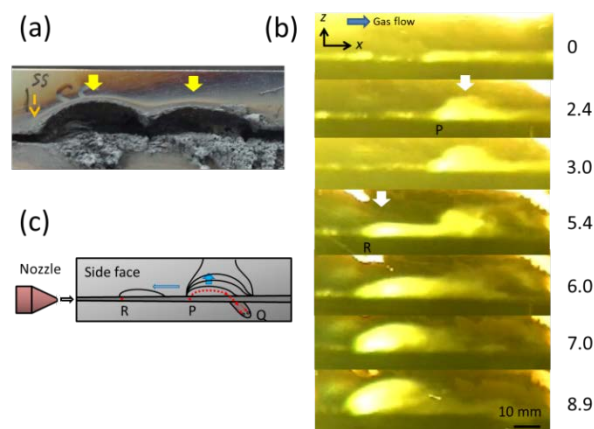


図7 試行後の側面(a),側面の空孔生成過程の観察(b),過程のモデル(c)

3. レーザー切断システムの構築

以上のような 300 mm 厚の鋼材切断技術を実際の廃炉現場で利用するためには、システムの小型化や遠隔操作の技術開発が必要である。そのために開発されたレーザー切断試験システムのプロット図を図 8 に示す[5]。システムは、移動用台車に設置した産業用ロボットアームを制御し、カメラによって切断する試料の形状を確認しつつ、アームの状態をパソコンに表示し、距離計で試料までの

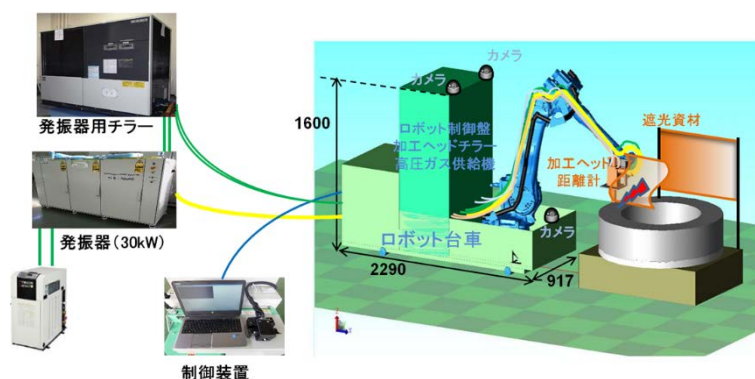


図8 試作切断システムのイメージ

距離を測定して試料を切断することを特長としている。本システムにより、毎分 3 m から低速では 6 mm までの切断速度で、切断材厚みでは数 10 mm から 300 mm まで切断が可能となっている。

4. おわりに

厚板鋼材のレーザー切断法技術開発に関する成果を報告した。これらの開発によりレーザー法は様々な対象物への適用や遠隔操作による被ばく低減等も期待され、廃炉現場への適用をはじめ、福島事故収束、国土保全のための老朽社会産業インフラの解体など様々な応用への有望な選択肢となりうるものと期待される。

謝辞

本技術開発の成果は福井県の助成のもと得られたものであり、関係機関各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Tamura, R. Ishigami and R. Yamagishi, J. Nucl. Sci. Technol., 53, 916-920, 2016.
- [2] K. Tamura, and R. Yamagishi, Mech. Eng. J. 3, 15-00590, 2016.
- [3] K. Tamura and S. Toyama, J. Nucl. Sci. Technol., 54, 1011-1017, 2017.
- [4] K. Tamura and R. Yamagishi, J. Nucl. Sci. Technol., 54, 655-661, 2017.
- [5] 遠山 伸一、峰原 英介, デコミッションング技報, 56, 55-65, 2017.

*Koji Tamura^{1,2}, Shin'ichi Toyama², Haruhiko Kadowaki³, Ryoya Ishigami³, and Ryuichiro Yamagishi³

¹QST, ²JAEA, ³The Wakasa wan Energy Research Center.