

福島第一原子力発電所の燃料デブリ 取り出しに資するレーザー技術



大道 博行

Daido Hiroyuki

(日本原子力研究開発機構)

1 はじめに

2011年3月11日に起こった東日本大震災とそれに引き続く福島第一原子力発電所の炉心溶融に至った過酷事故は、それまでの原子力利用技術への信頼を一変させるものとなった。福島第一原子力発電所の安全で確実な廃止措置（廃炉）への取組みは原子力技術の信頼回復に向けた第一歩になるものと考えている。このような中、2015年7月、原子力に関する総合研究開発機関である日本原子力研究開発機構（原子力機構）、原子力発電の総合プラントメーカーである日立GEニュークリア・エナジー(株)、水ジェット切断等のトップメーカーである(株)スギノマシンの3者が協力して、同発電所廃炉作業へのレーザー技術の適用拡大を見据えた基盤的研究を行うことで合意した。この共同研究では、同発電所の廃炉にとって最も困難な作業の1つとされている燃料デブリ取り出しに向けたレーザー工法開発に寄与する基盤的研究を実施することになっている。燃料デブリの性状把握に向けた燃料損傷及び溶融進展挙動、熱水力挙動、圧力容器の変形・損傷挙動を図1に示す。これらと実際の炉内観察等を踏まえて燃料デブリ取り出し工法、処置方策等の検討が進むと思われる。本稿では共同研究に関連するレーザー技術の現状、今回の共同研究を担当する3者のこれまでの取組み、3者が協力する意義、オー

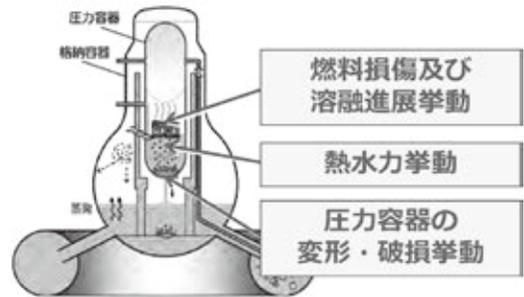


図1 福島第一原子力発電所の過酷事故の予想図と燃料デブリ、周辺機器等の性状把握に向けた研究課題¹⁾ 燃料デブリの取出し工法の検討はこれらの研究と相まって進められる(原子力機構提供)

ルジャパンの体制で臨むとされている燃料デブリ取出しに向けた今後の期待される展開を筆者の視点で述べることにする。

2 廃炉に貢献するレーザー技術の現状

従来から高出力レーザーの産業利用は進められてきたが²⁾、今世紀に入り、フレキシブルな導光特性、メンテナンスフリーを特長とするファイバーレーザー装置の高出力化、ビームの高品質化、それらの利用技術が進み、自動車産業や重工業等における微細加工や溶接にファイバーレーザーの活用が急速に広がっている³⁾。これら実績を背景に非接触、遠隔、高い制御性を有するレーザー技術は従来にも増して原子力プ

ラント建設・運転技術，原子炉の安全・確実かつ効率の良い廃炉等への適用可能性が高まりつつある⁴⁻⁸⁾。原子力の分野で使用するためには，従来の技術と比較してこれらレーザー技術の利点が最大限発揮される適用先，その適用先に合致した耐放射線性，高温，高い湿度，水滴の混じった環境，水中環境など過酷な環境に耐える強靱性が必要となる。耐放射線性に関してはこれまで放射性物質を用いた γ 線，電子線照射試験などが活発に行われている^{9,10)}。これらの結果から観察用光ファイバー等の使用可能な集積線量の目安として100 kGyが提唱されている¹¹⁾。これを踏まえ，より大きな線量に耐え得る利用法や技術開発が挑戦的な課題となっている。

福島第一原子力発電所の廃炉作業では，水素爆発，溶融・凝固により機器が複雑かつ大きく変形あるいは破壊していることが予想される。詳細は今後の調査を待つ必要があるが，一般に狭隘な箇所に遠隔操作機器・装置を導入し，燃料デブリ等の対象物を安全・確実に取り出すことが要求される。レーザー工法は時間的・空間的に自在に制御されたビームスポットに高密度のエネルギーを投入できることから，一般的にはほかの熱的工法と比較して対象物への熱的影響範囲を極小にできることが知られている²⁾。また，非接触加工であることから加工時の反力がほとんどないので頑丈な剛性のある構造を組む必要がなく，機器・装置の小型化が可能である。

これまでの研究で空气中，水中での厚さ数cm～10 cm以上のステンレス鋼の溶融切断が実証されている⁴⁻⁶⁾。また燃料デブリの主要な構成要素である金属酸化物（セラミックス）¹²⁻¹⁴⁾にレーザー光をパルス状に照射し，瞬時に発生する熱応力により，あたかも光で叩き割るような破碎処理も実証されている¹⁵⁾。図2に高速度カメラにより捉えられたアルミナの破碎の様子を示す。また切断における粉塵の発生量の評価

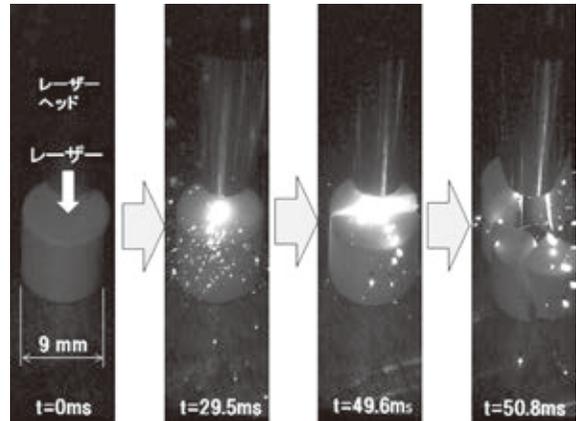


図2 レーザー出力2 kW，照射の時間幅50 msのファイバーレーザー光（波長1.07 μm ）を燃料デブリに見立てたアルミナ（セラミックス）に集光照射したときの写真
図中のtはレーザー照射開始からの時間である。白く光っている部分にレーザーが照射されている。このケースでは，右端の写真のように照射が終了するのとほぼ同時に亀裂が走り破碎されている（原子力機構レーザー共同研究所の提供）

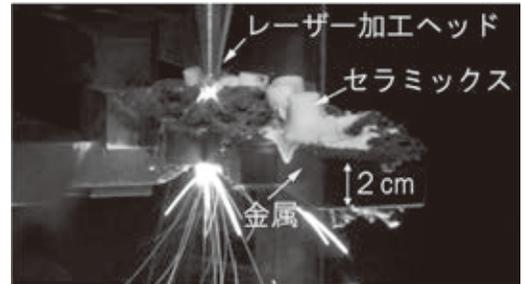


図3 事故で溶けた後，固まった核燃料と周辺の金属材料の混じりあった燃料デブリを模したアルミナと金属の混合体のレーザー切断・破碎処理の写真
（原子力機構レーザー共同研究所の提供）

試験では，カーフ幅（切断幅）が数mmと小さいため粉塵の量も少なくなることが原子力機構ふげんのグループにより示されている。図3は金属とセラミックスの要素試験を基にして両者の混合体を燃料デブリの模擬体として使用し，写真の下方向に向けてレーザー光を照射している様子を表している。金属部分は時間的に連続してレーザー照射し続け溶断する。一方，セラミックスはパルス状に照射して破碎することで処理の模擬試験が行われている。これとは

別に(株)東芝のグループにより、燃料デブリ取り出しに向けたユニークなレーザー工法の開発事例も発表されており¹⁶⁾、この分野の今後の発展が期待される。

このように、これまでの研究開発成果を基に国立研究機関とそれぞれに高い技術を有する民間企業がそれぞれの強みを結集して共通の目標である燃料デブリ取出しに資するレーザー技術を飛躍的に発展させることが、このたびの共同研究の大きな目的となっている。

3 共同研究の開始に当たって

ここでは共同研究を開始する3者の福島第一原子力発電所の廃炉に向けたこれまでの取組みを簡単に紹介する。

(1) 原子力機構

原子力機構は2011年3月に発生した福島第一原子力発電所事故後、事故の対処に関わる活動を経営上の重点実施項目に掲げ、廃止措置、環境回復に関わる活動を実施している。廃止措置に関しては“福島第一原子力発電所1~4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ”に基づき、燃料デブリの取り出し準備に係る研

究開発や放射性廃棄物の処理・処分に係る研究開発に取り組んでいる。

このような取組みの中で、福島研究開発部門福島研究基盤創生センターでは、福島第一原子力発電所の廃炉を推進するために必要不可欠なレーザーやロボット等の遠隔操作機器の開発実証施設である檜葉遠隔技術開発センターが平成27年度末に完成する。図4示すように試験棟においては、福島第一原子力発電所建屋内の現場状況を模擬した試験環境を整備するため、幅や傾斜を変更できる階段、温度調節機能や塩水利用が可能な水槽など設備を導入する。その中で国内外のユーザーとともにロボット等遠隔技術活用法の開発を行う。その一環でレーザーと遠隔技術の組み合わせた工法の実証試験の実施も期待される。

(2) 日立GE ニュークリア・エナジー(株)

(日立GE)

日立GEは、(株)日立製作所と米国ゼネラル・エレクトリック社とが経営資源を融合して設立された原子力専門メーカーであり、現在、福島第一原子力発電所関連の廃炉・除染に向けた技術開発やサービスを、日立グループの総力を

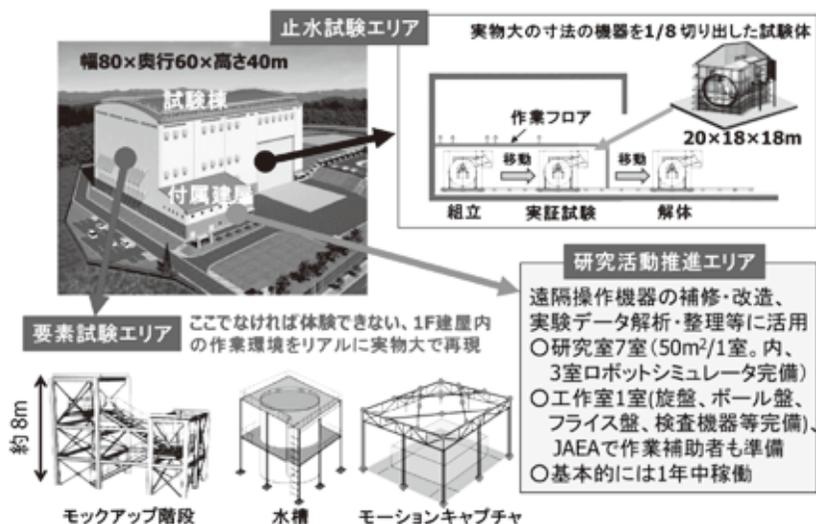


図4 檜葉遠隔技術開発センター試験棟(高さ約40m)の外観と遠隔技術の試験装置(福島研究開発部門研究基盤創生センター提供)

結集して提供するとともに、福島事故を鑑み、原子力発電所の安全性向上に対してもソリューションを提供し、既設プラントの早期再稼働に向けた各種対応を推進している。

東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉に関しては、国際廃炉研究開発機構の組合員として、必要な研究開発に取り組んでおり、当面の重要課題として、燃料デブリを炉心から回収して安全に保管するための一連の技術開発を進めている。

(3) (株)スギノマシン

(株)スギノマシンは原子力施設の保守保全を目的とした装置の開発・製造を行ってきた。福島第一原子力発電所事故後、(株)スギノマシンのコア技術である超高压水を用いた原子炉建屋の遠隔操作型除染装置を製造し、廃止措置に貢献してきた。燃料デブリ取り出しに際して人が近付くことができない環境での遠隔操作機器が必要であり、図5に同社が開発した特殊環境向け水中多関節ロボット

4 共同研究の成果を廃炉技術に

本共同研究ではレーザーによる燃料デブリの取り出しに貢献する画期的レーザー技術の開発を目標に掲げ進めている。この共同研究の成果を踏み台にして実際の適用を目指すために必要な技術を筆者の視点で述べる。レーザー工法は機械工法等との相補的活用を図る具体的検討が必要である。レーザー工法の適用場所としては一般に狭隘部、強固な支柱の設置しにくい場所などがある。このような場所で安全・確実にこの工法の適用を図るためには遠隔検知技術との結合が必要となる。検知技術として γ 線をはじめとする放射線、特に核反応を直接検知するためのコンパクトな中性子検出器との連携が重要



図5 特殊環境向け水中多関節ロボット
(株)スギノマシン提供

となる。高速で詳細な光画像、 γ 線画像との連携によるイメージガイドによる確実な処理が望まれる。これらは要素技術としては既に存在しており、適切な放射線遮蔽を施したシステム化技術に力点を置いた開発が望まれる。さらに、遠隔作業のためのロボット技術との結合が必要となる。植葉遠隔技術開発センターには利用者の要望に従って原子炉等の各種モックアップ(工法の試験、訓練に向けた実物大模型)が設置されることになっている。これらを用いると遠隔機器としてのトータルな評価が可能である。いずれにしても遠隔検知、処理と基盤的レーザー技術開発とを上手に結合することにより研究開発の一層の推進が期待される。

5 まとめ

冒頭にも書いたように福島第一原子力発電所の確実な廃止措置(廃炉)は、原子力工学、関連産業の持続的発展にとって不可欠なものであ

り、これから少なくとも数十年にわたり世代を引き継ぎながら息長く続けることが求められている。このような事業では廃炉への貢献を第一に掲げつつもその基盤的研究開発においては産業技術等への波及効果も期待できる挑戦的な魅力ある課題を適切に掲げ、廃炉への協力の輪を、分野を超え、世代を超え、国境を超え求めていくことも重要な課題になると思われる。本共同研究がこのような国民的課題に少しでも貢献できれば大きな喜びである。読者の皆様方のご指導、ご支援をお願いする次第である。

【謝辞】

本原稿の取りまとめに当たって原子力機構福島研究開発部門・研究基盤創生センター、同敦賀事業本部レーザー共同研究所、日立 GE ニュークリア・エナジー(株)、(株)スギノマシンの関係者諸氏に多くの有益な助言、助力をいただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置技術に係る原子力機構の取り組み 2013 年版, (独)日本原子力研究開発機構 (2013)
- 2) 新井武二, レーザー加工の基礎工学 改訂版, 丸善 (2013)
- 3) 坪井昭彦, 自動車産業におけるレーザー加工技術の動向, レーザー研究, **42**, 295-298 (2014)
- 4) 西村弘, 原子力 eye, **56**(8), 13-18 (2010)
- 5) 黒川登, 原子力 eye, **56**(8), 26-27 (2010)
- 6) 小林紘二郎, 他, 溶接技術, **59**(7), 64-69 (2011)
- 7) 大道博行, レーザー学会誌, **41**, 906-910 (2013)
- 8) 大道博行, ひかりアライアンス, **25**(8), 47-51 (2014)
- 9) 草野譲一(編), JAEA-Review2008-012, 日本原子力研究開発機構 (2008)
- 10) 四竈樹男, 応用物理, **80**, 1065-1068 (2011)
- 11) Ito, C., *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **51**, 944-950 (2014)
- 12) Kirkland, H.W., *et al.*, *Nuclear Technology*, **87**, 932-945 (1989)
- 13) Rubin, A. and Beckjord, E., *Nucl. Safety*, **35**, 256-269 (1994)
- 14) 永瀬文久, 原子力学会誌, **54**, 727-731 (2012)
- 15) 村松壽晴, 他, JAEA-Research, 2013-024, (2013); 村松壽晴, 他, JAEA-Research, 2014-018, (2014)
- 16) Nomura, K., *et al.*, *Proc. ICONE-23-1600*, Chiba, Japan (2015)