

平成 30 年度 成果報告書

【平成 29 年 12 月～平成 30 年 11 月】



国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

高速炉・新型炉研究開発部門

敦賀総合研究開発センター

レーザー・革新技术共同研究所

レーザー応用研究グループ



表紙写真：平成 30 年度夏期休暇実習の様子

表紙写真は、9月3日から5日間、福井大学から10名、九州工業大学から2名の学生を受け入れ、現在、原子炉廃止措置への応用を目指し研究開発を進めているレーザー溶断技術を学習テーマに、夏期休暇実習を行った。実習生は、レーザー溶断実験と計算機シミュレーションを行い、レーザーパワーなどのパラメータが溶断特性に与える影響などを評価し、最終日には実習成果を発表し、レーザー応用研究グループの研究員を交えた活発な討論を行った。

また、ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点と量子科学研究開発機構の施設見学も行い、レーザーの基礎から廃止措置への応用まで幅広く学んでいただいた。

目 次

1. 成果報告書出版にあたって.....	4
2. 組織.....	6
3. 活動状況.....	7
3.1. 研究開発の概要と研究紹介.....	7
3.1.1. 平成30年度の動き.....	7
3.1.2. 参考論文等の掲載.....	9
3.2. 成果報告会・セミナーの開催.....	47
3.2.1. レーザー応用技術 産学官連携成果報告会（平成29年度）.....	47
3.3. 各種検討会・見学会の実施.....	50
3.3.1. レーザー・革新技術共同研究所 御見学.....	50
3.4. レーザー技術の普及、人材育成への貢献.....	53
3.4.1. 夏期休暇実習生の受入.....	53
3.5. 表彰.....	55
3.6. 各種記事.....	57
3.6.1. 平成29年11月22日付福井新聞掲載記事.....	57
3.6.2. 平成29年12月5日付読売新聞掲載記事.....	58
3.6.3. 平成30年6月17日付中日新聞掲載記事.....	59
3.6.4. 平成30年6月17日付朝日新聞掲載記事.....	60
3.6.5. 平成30年6月17日付福井新聞掲載記事.....	61
3.6.6. 平成30年6月17日付日刊県民福井掲載記事.....	62
3.6.7. 平成30年6月17日付毎日新聞掲載記事.....	63
3.6.8. 平成30年6月18日付日刊工業新聞掲載記事.....	64
3.6.9. 平成30年6月18日付日経産業新聞掲載記事.....	65
3.6.10. 平成30年6月19日付産経新聞掲載記事.....	66
3.6.11. 平成30年6月20日付電気新聞掲載記事.....	67
3.6.12. 平成30年6月20日付日刊工業新聞掲載記事.....	68
3.6.13. 平成30年7月20日付日刊工業新聞掲載記事.....	69
4. 研究発表等リスト.....	70
5. 実験室整備状況.....	74

1. 成果報告書出版にあたって

本年4月の組織変更により、敦賀総合研究開発センターが新たに発足した。同センターは、敦賀拠点において、高速増殖原型炉もんじゅの開発成果の取りまとめを含めた知識の体系化やその利用促進、高速炉工学としての知識、ナトリウム取扱い、保守及び廃止措置に関する研修の計画と実施、ナトリウム機器解体など高速炉特有の廃止措置に関する技術開発、原子力施設への応用を目指したレーザー技術開発、もんじゅおよび新型転換炉ふげんの廃止措置に係る技術開発を行うための中核組織として位置づけられた。また国際協力の推進として国内外の機関との研究協力、研究者受入れ、国際的な人材育成のための研修支援、海外の原子力技術情報の収集および提供を行うとともに、地域社会との連携として、福井県が進める「エネルギー研究開発拠点化計画」への協力、中部・西日本地区の大学・研究機関などとの研究協力の推進、小・中・高等学校などへの環境・エネルギー・原子力などに関する教育支援、当機構施設および研究開発成果の外部利用の促進までを所掌する。

旧レーザー共同研究所は、敦賀総合研究開発センター傘下のレーザー・革新技術共同研究所内に組織されたレーザー応用研究グループとして再出発を果たした。旧レーザー共同研究所は、平成21年9月の設立以来、主に原子力分野、産業分野、医療分野などへのレーザー技術の応用研究を9年に亘って進めて来た。この間、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター、国立大学法人福井大学、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構を初め、福井県、敦賀市、敦賀商工会議所などの地元自治体関係者や原子力機構内の関係各部署からの支援を受けつつ研究開発を展開し、ここでの成果を「レーザー応用技術産学官連携成果報告会」の場で報告して来ている。これと並行して産学官との個別の共同研究も進展し、研究成果の一部は産業界での製品高度化のツールとして利用されている状況にある。

このような研究開発を進める中、平成26年度からは内閣府が進める戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の内、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)を管理法人とする革新的設計生産技術に係る公募研究「高付加価値設計・製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発(大阪大学との共同提案)」を開始し、本年度末には5年間の活動を終了する。また平成28年12月には、文部科学省による「地域科学技術実証拠点整備事業」として、「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点(福井県、福井大学、若狭湾エネルギー研究センターとの共同提案)」が採択され、原子炉廃止措置技術研究の中心となる施設が平成30年3月末に完成し、同年6月16日の開所式を以て本格運用を開始した。

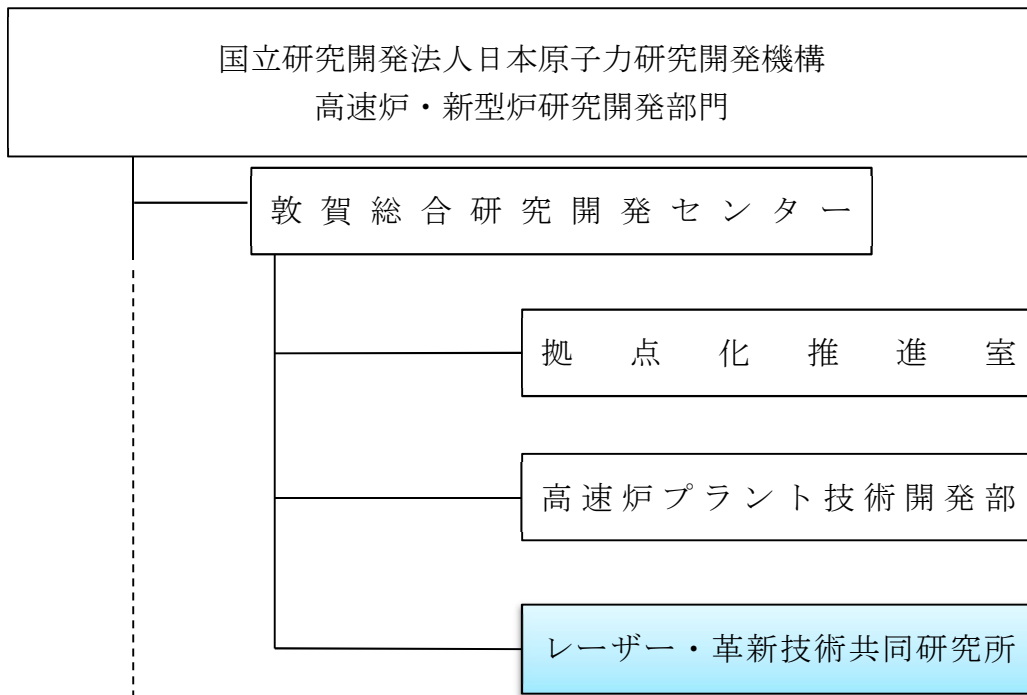
以上のように旧レーザー共同研究所のこれまで研究成果が対外的に評価されつつある中で、研究開発テーマは、基礎・基盤的なスタンスを保ちつつも産学官での利用を念頭に置いた、応用面を意識・強調したものに変遷しつつある。この代表的な研究開発成果が、レ

レーザー加工プロセスの適応制御アルゴリズムの実証試験であり、更にはレーザー加工プロセスの計算科学シミュレーションコードの産学官での実利用である。

今後とも新装なったレーザー応用研究グループにおいてレーザー応用技術に係る研究開発を進めてゆくにあたっては、産学官との連携、特にモノづくり分野との接点を持つ業界からの協力を負うところが非常に大きい。今後も皆様方からの一層のご支援、ご協力をお願いする次第である。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門
敦賀総合研究開発センター
レーザー・革新技术共同研究所
レーザー応用研究グループ GL 村松 壽晴

2. 組織



平成30年10月1日現在

3. 活動状況

3.1. 研究開発の概要と研究紹介

3.1.1. 平成30年度の動き

平成30年度は、文部科学省による「地域科学技術実証拠点整備事業」として整備を進めていた「ふくいスマートデコミッションング技術実証施設」が本格運用を開始する年であり、また同施設が敦賀総合研究開発センターの中心的な役割を果たすことが求められていることから、関連する研究開発の更なる効率的推進を目指し、レーザー応用研究グループ内に以下のチームを整備した。

- 1) レーザー加工プロセス適応制御技術の研究開発チーム
旧レーザー共同研究所の設立当初(平成21年)から進めてきたレーザー溶断プロセスに対する適応制御機能を、「ふくいスマートデコミッションング技術実証施設」を用いて実規模条件における性能を実証
- 2) レーザー加工プロセス協調制御技術の研究開発チーム
「ふくいスマートデコミッションング技術実証施設」として整備した3本の多自由度ロボットから成るシステムの、ロボットビジョンを含めた協調制御アルゴリズムの構築
- 3) レーザー加工プロセス計算科学シミュレーションコード SPLICE 知識処理モデルの研究開発チーム
評価の対象とした問題の定性的な特徴などを、数値処理を行うこと無く抽出し、数値解析により得られた結果の妥当性をチェックするためのアルゴリズムの構築
- 4) レーザー加工プロセス計算科学シミュレーションコード SPLICE 数値処理モデルの研究開発チーム
レーザー加工プロセスの評価に必要な数学モデル、物理モデルなどの高度化

上記4チームの研究開発のベースとなる考え方は、平成28年に総合科学技術・イノベーション会議が、第5期科学技術基本計画として提唱した Society 5.0（超スマート社会）の実現にある。すなわち、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（物理空間）を高度に融合したシステム（CPS：Cyber-Physical System）により、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会を目指すもので、サイバー空間に蓄積されるフィジカル空間からの膨大な情報を知識

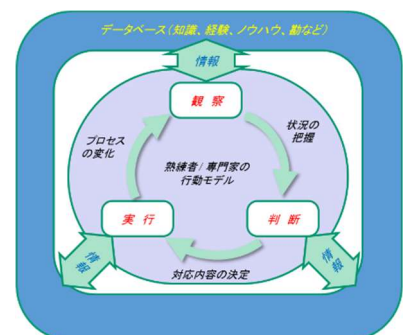


図 知識処理概念

処理し、フィジカル空間の人間に様々な形でフィードバックしようとするものである。言い換えれば、レーザー加工に関する熟練者や専門家が持つ知識、経験、ノウハウ、勘などに基づいて行動をモデル化することでレーザー利用に対するハードルを下げ、レーザー加工技術を産業界に更に浸透させることを目指すものである。

以上の基幹研究に加え、外部資金を利用した以下の研究を並行して実施中である。

- 1) 「高付加価値設計・製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発」戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 革新的設計生産技術 (2014～2018) 内閣府
- 2) 「ワンチップ光制御デバイスによる革新的オプト産業の創出」地域イノベーション・エコシステム形成プログラム (2018～) 文部科学省
- 3) 「異種材料溶接加工における残留応力等の低減に向けた研究開発」(2018～2019) 中部電力株式会社 原子力安全技術研究所
- 4) 「廃止措置 放射性二次廃棄物に起因する環境負荷の低減方策に係る研究開発」(2018～) 原子力機構理事長裁量経費

3.1.2. 参考論文等の掲載

業務に関する成果の内容をわかり易く紹介した論文および解説記事について、出版社・関係者等の承諾を得た上で、次頁以降に掲載した。

I. レーザコーティングプロセスの計算科学シミュレーション

レーザ加工学会誌 Vol. 25, No2(2018) p21-p25 村松壽晴

【平成 30 年 10 月 18 日 一般社団法人 レーザ加工学会より許諾済】

II. レーザーコーティングシミュレーションコード SPLICE の開発とレーザー照射条件の導出

レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会講演予稿集 村松壽晴

【平成 30 年 10 月 12 日 一般社団法人 レーザー学会より許諾済】

III. 放射光 X 線イメージング法によるレーザー照射下金属粒溶融時空間分解計測

レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会講演予稿集

菖蒲敬久, 城鮎美, 安田良, 小泉保行, 水谷春樹, 小林孝徳, 村松壽晴

【平成 30 年 10 月 12 日 一般社団法人 レーザー学会より許諾済】

IV. ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点の整備

— 廃止措置技術実証試験センター（仮称）—

Journal of RANDEC Vol. 57(Mar. 2018), p65-p74

村松壽晴, 佐野一哉, 寺内誠

【平成 30 年 XX 月 XX 日 公益財団法人 原子力バックエンド推進センターより許諾済】

V. 世界初！レーザーコーティング照射条件の施工前予測が可能なシステムを開発

～ レーザー加工の職人技を身近な技術に ～

平成 30 年 6 月 15 日 記者会・クラブへのプレスリリース

村松壽晴

VI. 溶かし切る、叩き割る！レーザー光により自在な切断が可能な制御装置を開発

～ スマデコ環境を利用した性能実証へ ～

平成 30 年 6 月 15 日 記者会・クラブへのプレスリリース

村松壽晴

VII. 平成 29 年度レーザー応用技術成果報告会を開催

原子力機構 広報誌 「つるがの四季」 No. 117, p6

- VIII. 廃止措置技術実証拠点「スマデコ」 3 設備が 6 月から運用開始
原子力機構 広報誌「つるがの四季」 No. 118, p6
- IX. 6 月 16 日スマデコ開所式
原子力機構 広報誌「つるがの四季」 No. 118, p7
- X. スマデコで原子炉本体解体工法の検証
原子力機構 広報誌「つるがの四季」 No. 119, p5
- XI. ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点
「スマデコ」を企業や大学でご利用いただけます。
原子力機構 広報誌「つるがの四季」 No. 120, p6

レーザーコーティングプロセスの計算科学シミュレーション

村松 壽 晴

日本原子力研究開発機構 レーザー共同研究所 (〒 914-8585 福井県敦賀市木崎 65-20)

Computational Science Simulations of Laser Coating Processes

MURAMATSU Toshiharu

(Received February 6, 2018)

Key words : Laser material processing, Laser coating, Computational science, Front-loading, Knowledge engineering, Cloud computing

1. はじめに

昨今のレーザー加工技術に関する展示会などからもわかるように、高エネルギー密度と局所加工性など、優れた熱源としてのレーザー光の特性を背景として、多くの産業分野においてさまざまな材料加工がレーザーを用いて行われている状況にある。さらには、福島第一原子力発電所の燃料デブリ取出しへのレーザー加工技術の適用性評価なども、基礎・基盤的な観点から進められている^{1,2)}。

他方、レーザー加工において、意図した性能や製品を実現するためには、ここで発生する溶融・凝固現象などを含む複合物理過程を把握した上で、レーザー照射条件などを適切に設定する必要がある。しかしながら、この条件適切化作業は、繰り返しによる膨大なオーバーヘッドを伴うのが一般的であり、多品種少量生産などを指向する産業分野へのレーザー加工技術の導入を阻害する一因ともなっている (Fig. 1)。このような課題を解決するためには、製品などを作り込む上で必要となる諸情報、すなわち、設計空間の構造、設計空間における現設計点位置、設計変数間のトレードオフ情報、設計空間のクリフエッジ、設計点のロバスト性などを、設計空間を可視化することによって把握し、製品設計を多目的最適化問題として捉える必要がある。

本稿では、加工材料にレーザー光が照射されてから加工が完了するまでの複合物理過程を定量的に取扱えるようにするために世界に先駆けて開発中の、伝熱流動計算をベースとした計算科学シミュレーションコード SPLICE の概要と評価例、およびレーザーコーティングプロセスでのオーバーヘッドの大幅低減を目指し、SPLICE コードをデジタルモックアップ装置として利用するフロントローディング実現に対する見通

し、さらには今後の研究開発の方向性などについて記述する。

2. レーザ加工プロセス計算科学シミュレーションコード SPLICE

SPLICE コードは、マイクロ挙動とマクロ挙動とを多階層スケールモデルにより接続する気-液-固統一非圧縮性粘性流解析コードであり、レーザー加工時のさまざまな物理現象、たとえばレーザー光-物質相互作用、半溶融帯を介した溶融金属-固体材料間の熱的機械的相互作用、溶融・凝固相変化過程などの複合物理過程を取扱うために必要なさまざまな物理モデルを導入している。コード開発に先立ち、導入すべき物理モデルなどを検討した結果を参考文献 3) に、また結果として SPLICE コードに導入した物理モデルなどの主要目を Table 1 にまとめる。

3. レーザコーティングプロセスの計算科学シミュレーション

3.1 解析モデルおよび解析条件

SPLICE コードを典型的なレーザーコーティングプロセスの評価に適用した。Fig. 2 に解析モデルを、Table 2 に解析

Table 1 Main feature of the SPLICE code.

1. Basic equation	Phase-mixed time-averaged Navier-Stokes equation, and conservation equations for mass and energy
2. Mathematical models	Finite difference method with staggered mesh arrangements
• Discretization	2 nd order Runge-Kutta method
• Time integration	5 th order WENO method
• Approx. method for convection terms	AMG-BICGstab method
• Matrix solver	
3. Physical models	Lambert-Beer's law
• Laser irradiation	THINC / WLIC methods
• Interface tracking	Surface tension force with Marangoni effects
• Free surface	Temperature recovering methods
• Phase change	

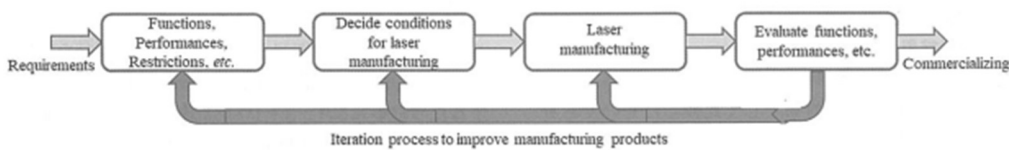


Fig. 1 Overhead to be appeared in iteration process to improve manufacturing products.

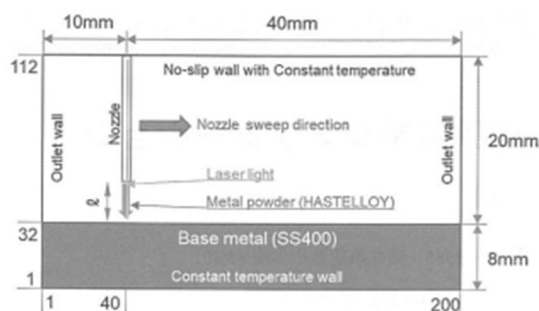


Fig. 2 Calculational model.

Table 2 Calculational conditions.

Parameters	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
Base metal	SS400	←	←	←
Metal powder	Ti	←	←	←
Powder supply rate Q_F (g/min)	2.0	4.0	3.0	3.0
Nozzle diameter d_F (mm)	1.0	←	←	←
Stand off ℓ (mm)	5.0	←	←	←
Laser power P_L (W)	750	←	400	300
Laser light diameter d_L (mm)	0.2	←	←	←
Sweep speed V_L (mm/min)	1000	←	←	←
Gas Velocity V_g (m/s)	1	←	←	←
Energy density D_E (kJ/mm ²)	4.8	←	2.5	1.9
Powder density D_F (g/mm ³)	0.025	0.005	0.0038	←

条件を示す。この SPLICE 解析は、レーザー光 (0.2 mm ϕ) と金属粉 (20 μ m 径チタン) を母材表面 (炭素鋼) に向かって噴出し、これを左側から右側に向かってスweep (1000 mm/min) する場合を想定し、メッシュ幅 0.25 mm の 2 次元計算体系とボリュームポロシティ (単位体積中の任意物質占有率) モデルを用いてマクロ評価するものである。評価上のパラメータは金属粉供給量 (Q_F)、レーザー出力 (P_L) とし、パラメータを組合せた 4 ケースの数値解析を行う。

なお、レーザー加工ヘッドからの金属粉が、母材表面に到達するまでにレーザー光からエネルギーを受けて温度上昇するプロセス (金属粉エネルギー授受モデル) は、式 (1) の関係を想定した。

$$\Delta T = \frac{D_E}{(d_L/2)^2 \ell \pi \gamma v Q_F \tau \rho C_p} \quad (1)$$

ここで、 D_E : エネルギー密度 (J/mm³)、 d_L : レーザ光径 (mm)、 ℓ : スタンドオフ (mm)、 γv : 金属粉体積割合 (-)、 Q_F : 金属粉供給率 (g/s)、 τ : 金属粉飛行時間 (s: $\equiv \ell/V_g$)、 V_g : ガス流速 (mm/s)、 ρ : 金属粉密度 (g/mm³)、 C_p : 金属粉比熱 (J/g \cdot °C) である。なお、用いた熱物性値などは、参考文献 4) に従った。

3.2 解析結果

Fig. 3 は、金属粉エネルギー授受モデルの有無による結果への影響を、Case-4 を対象として比較したものである。結果よりわかる通り、当該効果が無い場合にはレーザー光からのエネルギーのすべてが母材金属に吸収され、大きな溶

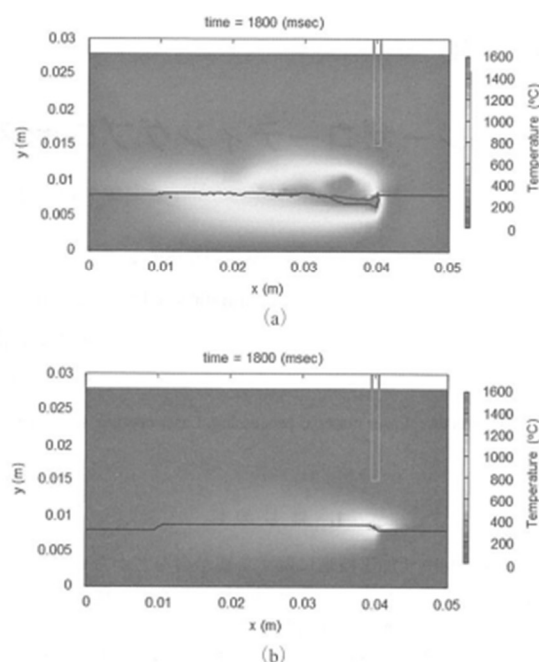


Fig. 3 Effects on laser light irradiation model to metal powder. (a) Without the effects, (b) With the effects.

け込み深さをもつ溶融池が形成されている。他方、当該効果を考慮した場合には、レーザー光からの一部が母材到達前に金属粉に供給され、結果として母材自体の溶融範囲が低下する。この効果は、単位面積当たりの金属粉供給量が大きく、結果として母材金属に向かうレーザー光の進行を遅る効果が大きい場合に顕著に現れる。

Case-1 ~ Case-4 について、温度分布および溶け込み・コーティング膜厚の空間分布を Fig. 4 および Fig. 5 に比較する。これらすべての結果は、上記の金属粉エネルギー授受効果を考慮したものである。

結果よりわかる通り、レーザー出力が大きく、金属粉供給量の小さな Case-1 では、母材溶け込み深さが顕著なものとなっている。他方、レーザー出力を抑え、金属粉供給量を増やした Case-3 および Case-4 では、溶け込み深さが小さく且つ薄いコーティング膜厚が実現できている。これらの中間条件に位置する Case-2 では、溶け込み深さは小さいものの、コーティング膜厚は大きなものとなっていることがわかる。

4. フロントローディングを旨としたデジタルモックアップ装置としての SPLICE コードの利用と今後の研究

4.1 設計空間の可視化

要求仕様を満足するレーザーコーティング製品を実現するためには、多くの試作を通じてレーザー照射条件などを規定するための膨大なオーバーヘッドを伴う繰返し作業が必要となる。この問題を SPLICE コードを用いたフロントローディングにより解決できれば、産業分野へのレーザー加工技

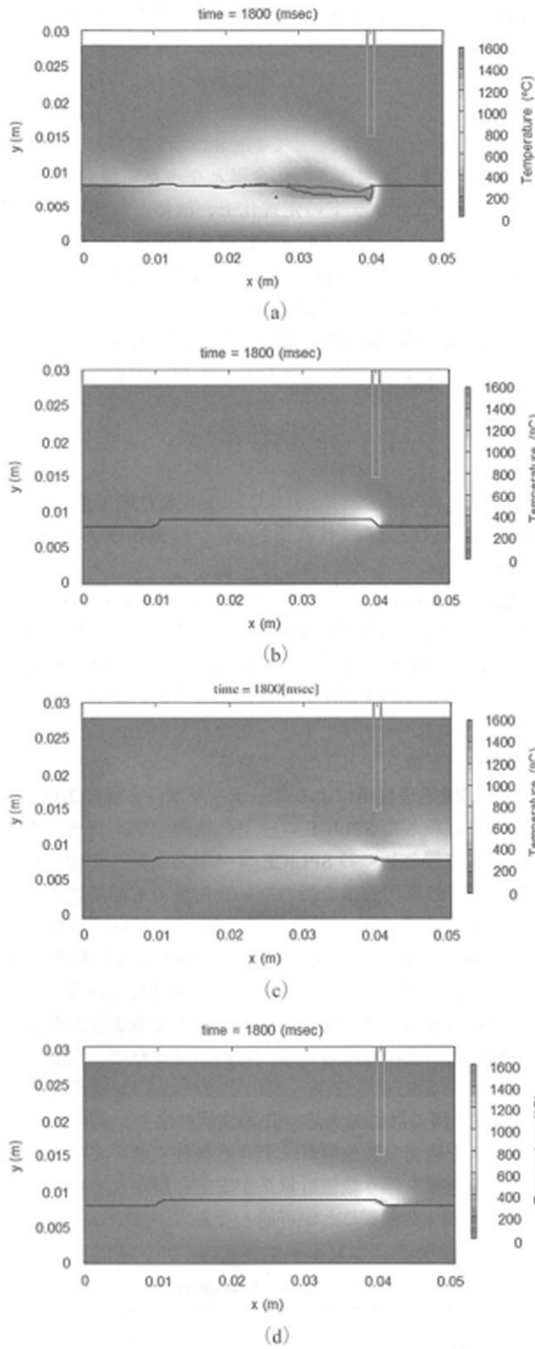


Fig. 4 Comparison of spatial temperature distributions. (a) Case-1, (b) Case-2, (c) Case-3, (d) Case-4.

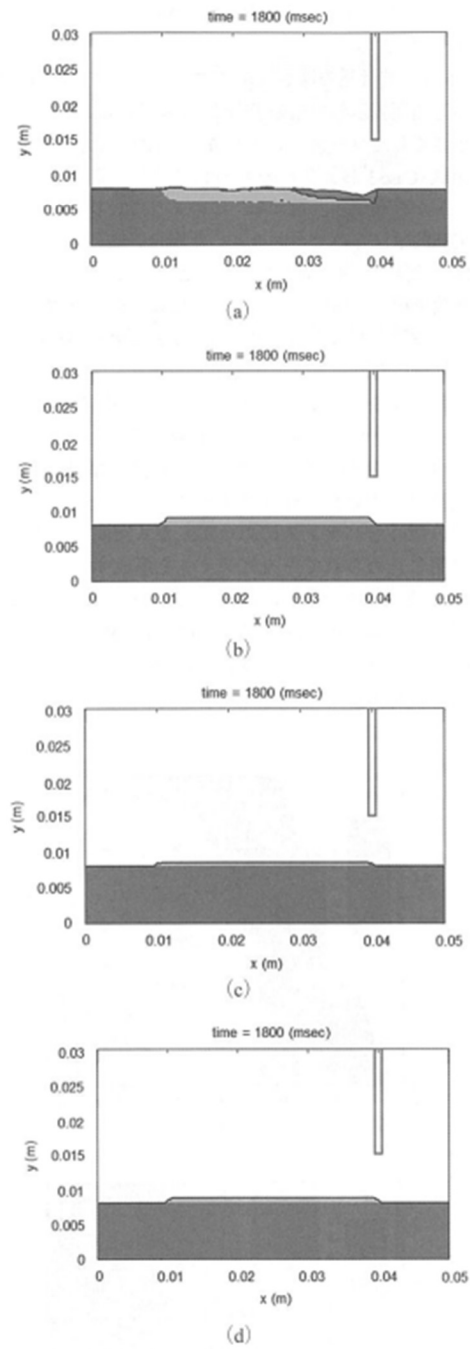


Fig. 5 Comparison of spatial distributions for melting penetration and coating film thickness. (a) Case-1, (b) Case-2, (c) Case-3, (d) Case-4.

術の導入がさらに加速されると予想できる。

レーザコーティングプロセスに影響を与えるパラメータを、単位面積当りの母材への入熱量 E と金属粉供給量 W として整理し(式(2)および(3))、 E と W から成る設計空間 ($0.115 \leq E \leq 0.286$, $0.0025 \leq W \leq 0.005$) 内で計7ケースの SPLICE 追加解析を行った。

$$W = \frac{Q_f}{(d_f/2)^2 \pi} \frac{d_f}{V_L} = \frac{4Q_f}{d_f \pi V_L} \quad (2)$$

$$E = \frac{P_L}{(d_L/2)^2 \pi} \frac{d_L}{V_L} = \frac{4P_L}{d_L \pi V_L} \quad (3)$$

ここで、 P_L ：レーザー出力(W)、 V_L ：スワイプ速度(mm/min)である。

Fig. 6は、溶け込み深さ(L_p)とコーティング膜厚(L_t)について応答曲面表示した結果である。溶け込み深さと膜厚とを共に小さくしたコーティング製品を目指す場合、設計空間の中央領域(Case-3 および Case-4) 近傍に条件設定のスイートポイントが存在すると言える。このような設計空間特性の把握を実験的手法のみで行おうとした場合、施工現場での試験片製作、試験片切断、試験片検査などの膨大な繰り返し作業が、母材と金属粉との組合せ毎に求められる。他方、SPLICE コードによる設計空間特性の可視化は、膨大なオーバーヘッドの大幅な低減に有効であり、デジタルモックアップ装置としての計算科学シミュレーションコードを利用したフロントローディングが可能であることを示唆している。

4.2 施工不良時のキャビティー閉じ込め挙動評価

金属溶融凝固過程を伴う溶接やコーティングでは、入熱と徐熱の微妙なバランスによって、ガス空間中のガスが固相中に閉じ込められてキャビティーを形成する。

上記一連の解析ケースの内、単位面積当りの母材への入熱量 E と単位面積当りの金属粉供給量 W を、それぞれ 0.153、0.0025 とした場合の結果は、キャビティー閉じ込めが発生したものに該当する。

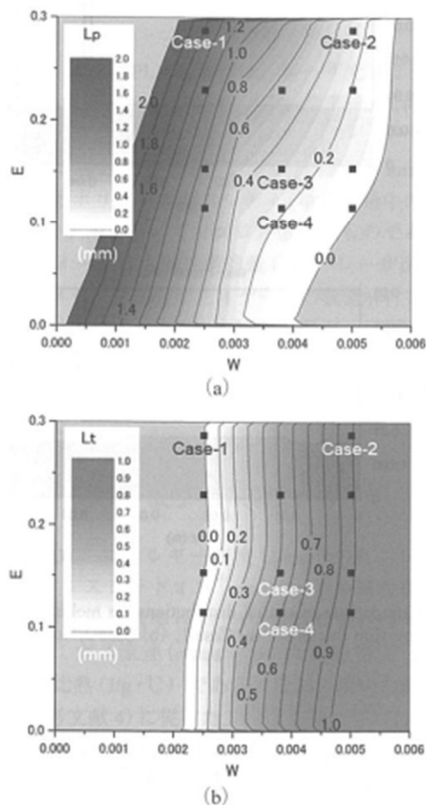


Fig. 6 Response surface maps for melting penetration and coating film thickness. (a) Melting penetration L_p . (b) Coating film thickness L_t .

Fig. 7に示した溶融・凝固後の様子からわかる通り、微細なキャビティーが空間的に不規則に取り残されている。

キャビティーの形成挙動を確認するため、母材表面近傍領域を拡大し、ガス領域での流速ベクトルとともに空間温度分布を1msの間で比較してFig. 8に示した。結果よりわかる通り、融点を越えて液体金属となった領域(赤色部分)であり、SPLICEコードの定式化上、液体と気体の混合相に相当)が、サーマルブルームによる局所的な徐熱によって縮小し、この際に微小部分が取り残されてキャビティーが発生している。この局所的徐熱に寄与するサーマルブルームの強さは、流れ場における粘性力に対する浮力の相対的な影響を表すグラスホフ数 Gr (式(4))で表示できる。

$$Gr = \frac{\beta g \Delta T \ell_c^3}{\nu^2} \quad (4)$$

ここで、 β ：体膨張係数(1/℃)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 ΔT ：温度差(℃)、 ℓ_c ：代表長さ(m)、 ν ：動粘性係数(m^2/s)である。

Fig. 8に見られるサーマルブルーム発生時の Gr 数は、発生していない場合の約1.3倍となっており、母材固相中の伝熱輸送量が同等であると仮定すると、液体金属塊が保有する熱量の約3割が気相側に輸送された結果、液体金属塊の凝固によりキャビティーとなって固相中にガスが取り残されたと解釈することができる。

4.3 知識処理援用によるユーザーサポート機能の強化

以上に記載した SPLICE コードの機能やデジタルモックアップ装置としての SPLICE コードを、レーザー加工や数値解析などの専門知識を持たない利用者でも簡単に利用できるようにするため、数値解析条件の入力や解析結果の図形処理などを対話形式で行うことが可能な専用のグラフィックユーザーインターフェースを用意している。今後は、さらなるユーザーサポートが可能となるよう、数値解析分野の専門家が有する知識、経験、ノウハウ、勘などをデータベースとする知識援用によるサポート機能の強化(Fig. 9)を図る計画である。この実現により、評価すべきプロセスを適切な数値解析モデルと条件で解いているか否か、反復過程を伴う数値計算系が安定に解かれているかなどを、チェックすることが可能となる。

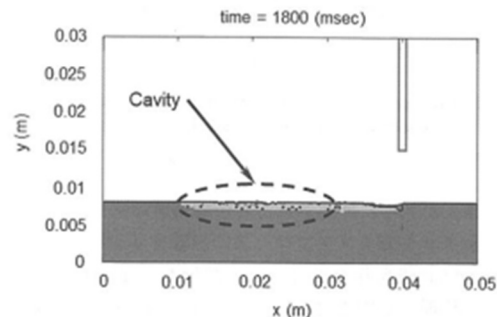


Fig. 7 Spatial distribution of solidified area containing cavities in the condition of $E=0.153$ and $W=0.0025$.

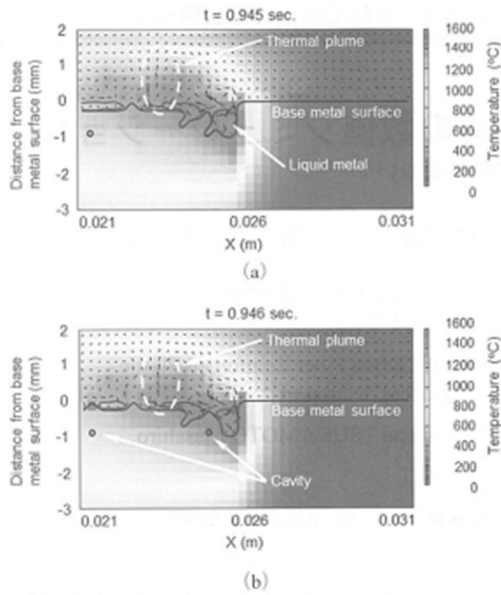


Fig. 8 Cavity generation due to local cooling by thermal plume. (a) $t = 0.945$ sec, (b) $t = 0.946$ sec.

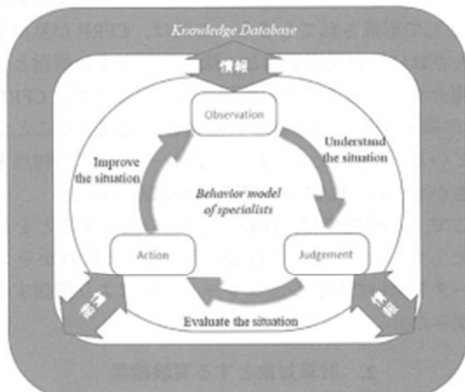


Fig. 9 Enhancement of evaluation functions by the use of knowledge engineering processes.

4.4 クラウドコンピューティング環境による利用促進
 本稿に記載した SPLICE コードによる数値解析結果は、クロック周波数 2 GHz 以上の CPU を搭載したエンジニアリングワークステーションの中位機種を利用したものである。ひと昔前、超並列スパコンなどを利用しなければ解くことができなかった状況を考えれば、隔世の感は大きい。しなしながら、ユーザーが計算環境やその資源を意識しないで済むようになれば、SPLICE コード利用に対するハードルはさらに低いものとなる。今後は、ネットワーク環境をさらに高度化したクラウド環境下での SPLICE コード利用を目指したシステム構築を行う計画である (Fig. 10)。これによりユーザーは、必要最低限のクラウド接続環境とサービス利用料のみで、必要な時に SPLICE コードを利用可能となる。他方、SPLICE コードの開発側 (原子力機構)

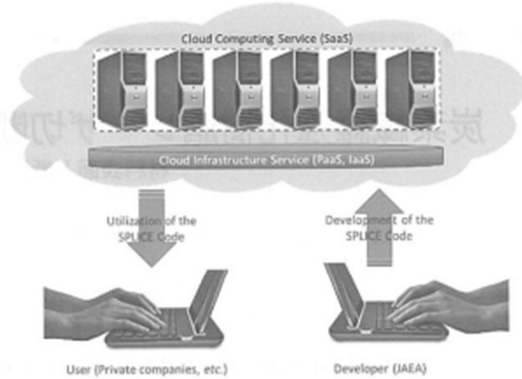


Fig. 10 Development of cloud computing environment for the SPLICE code.

も、SPLICE コード運用に係るコストを抑えることが可能となる。

5. 結 論

レーザー加工プロセス計算科学シミュレーションコード SPLICE によって、設計空間を可視化すると共にレーザー照射条件などの設定の伴うオーバーヘッドを低減させることが可能であることを確認した。さらにフロントローディングのためのツールとして、また複合物理過程を定量的に評価し、レーザー加工プロセスを適正化するためのツールとして効果的であるとの見通しを得た。なお同手法は、溶接・溶断プロセスに対しても有効であることを確認している。

参考文献

- 1) 村松壽晴, 山田知典, 羽成敏秀, 武部俊彦, 松永幸大: レーザ光を用いた燃料デブリ・炉内構造物取出しに向けた研究 (I) ~ 研究計画および平成 24 年度研究成果 ~, JAEA-Research 2013-024 (2013).
- 2) 村松壽晴, 山田知典, 羽成敏秀, 武部俊彦, 松永幸大: レーザ光を用いた燃料デブリ・炉内構造物取出しに向けた研究 (II) ~ 平成 25 年度研究成果 ~, JAEA-Research 2014-018 (2014).
- 3) Muramatsu, T.: Thermohydraulic Aspects in Laser Welding and Cutting Processes, Proc. The 31th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics (ICALEO-31), No. 1904 (2012), pp. 661-669.
- 4) 日本熱物性学会編, 「新編 熱物性ハンドブック」, 養賢堂 (2008).

著者紹介



村松壽晴
 MURAMATSU Toshiharu
 1994 年 東京工業大学原子核工学専攻 工学博士。
 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 敦賀事業本部 敦賀連携推進センター レーザ共同研究所 所長 主任研究員。レーザー加工プロセスに対する計算科学シミュレーションコードの研究開発およびレーザー溶断加工に対する適応制御システムの研究開発に従事。
 E-mail: muramatsu.toshiharu@jaca.go.jp
 TEL: (0770) 21-5050

II. レーザーコーティングシミュレーションコード SPLICE の開発とレーザー照射条件の導出

シンポジウム
S826aV02

レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会講演予稿集

レーザーコーティングシミュレーションコード SPLICE の開発と レーザー照射条件の導出

Development of laser coating simulation code SPLICE and provision of the laser irradiation condition

村松 壽晴(日本原子力研究開発機構)

Toshiharu MURAMATSU (Japan Atomic Energy Agency)

1. はじめに

レーザー加工において、意図した性能や製品を実現するためには、ここで発生する溶解・凝固現象などを含む複合物理過程を把握した上で、レーザー照射条件などを適切に設定する必要がある。しかしながら、この条件適切化作業は、繰返しによる膨大なオーバーヘッドを伴うのが一般的であり、多品種少量生産などを指向する産業分野へのレーザー加工技術の導入を阻害する一因ともなっている。

本稿では、加工材料にレーザー光が照射されてから加工が完了するまでに発生する複合物理過程を定量的に取扱えるようにするために開発中の、計算科学シミュレーションコード SPLICE の概要とレーザーコーティングプロセスの評価例、およびオーバーヘッドの大幅低減を目指した SPLICE コードを利用したフロントローディング実現に対する見通しを述べる。

2. 計算科学シミュレーションコード SPLICE¹⁾

SPLICE コードは、ミクロ挙動とマクロ挙動とを多階層スケールモデルにより接続する気-液-固統一非圧縮粘性流解析コードであり、レーザー加工時の様々な物理現象、例えばレーザー光-物質相互作用、半溶解帯を介した溶解金属-固体材料間の熱的機械的相互作用、溶解・凝固相変化過程などの複合物理過程を取扱うために必要な様々な物理モデルを導入している。Table 1 に、SPLICE コードの主要目をまとめる。

Table 1 Main features of the SPLICE code.

Category	Features
1. Basic equation	Phase-mixed time-averaged Navier-Stokes equation, and conservation equations for mass and energy
2. Mathematical models	Finite difference method with staggered mesh arrangements
• Discretization	2 nd order Runge-Kutta method
• Time integration	5 th order WENO method
• Approx. method for convection terms	AMG-BiCGstab method
• Matrix solver	
3. Physical models	Lambert-Beer's law
• Laser irradiation	THINC / WLIC methods
• Interface tracking	Surface tension force with Marangoni effects
• Free surface	Temperature recovering methods
• Phase change	

3. レーザーコーティングプロセスの計算科学シミュレーション

3.1 解析モデルおよび解析条件

SPLICE コードを典型的なレーザーコーティングプロセスの評価に適用した。Figure 1 に解析モデルを、Table 2 に解析条件を示す。この

SPLICE 解析は、レーザー光 (0.2mm φ) と金属粉 (20 μm 径チタン) を母材表面 (炭素鋼) に向かって噴出し、これを左側から右側に向かってスウィープ (1000 mm/min) する場合を想定し、メッシュ幅 0.25mm の 2 次元計算体系とボリュームポロシティモデルを用いてマクロ評価するものである。評価上のパラメータは金属粉供給量 (Q_F)、レーザー出力 (P_L) とし、パラメータを組合せた 4 ケースの数値解析を行う。

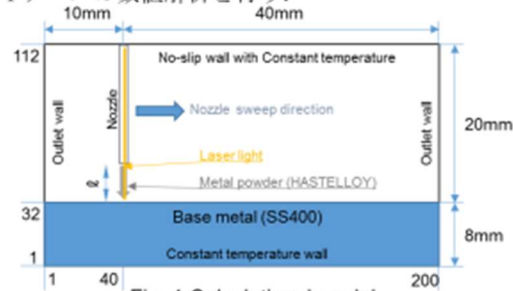


Fig. 1 Calculational model.

Table 2 Calculational conditions.

Parameters	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
Base metal	SS400	—	—	—
Metal powder	Ti	—	—	—
Powder supply rate Q _F (g/min)	2.0	4.0	3.0	3.0
Nozzle diameter d _N (mm)	1.0	—	—	—
Stand off l (mm)	5.0	—	—	—
Laser power P _L (W)	750	—	400	300
Laser light diameter d _L (mm)	0.2	—	—	—
Sweep speed V _N (mm/min)	1000	—	—	—
Gas Velocity V _G (m/s)	1	—	—	—
Energy density D _E (kJ/mm²)	4.8	—	2.5	1.9
Powder density D _P (g/mm³)	0.025	0.005	0.0038	—

なお、レーザー加工ヘッドからの金属粉が、母材表面に到達するまでにレーザー光からエネルギーを受けて温度上昇するプロセス (金属粉エネルギー授受モデル) は、式 (1) の関係を想定した。

$$\Delta T \equiv \frac{D_E}{(d_L/2)^2 \ell \pi \gamma_V Q_F \tau \rho C_P} \quad (1)$$

ここで、D_E: エネルギー密度 (J/mm³)、d_L: レーザー光径 (mm)、ℓ: スタンドオフ (mm)、γ_V: 金属粉体積割合 (-)、Q_F: 金属粉供給率 (g/s)、τ: 金属粉飛行時間 (s; ≡ ℓ/V_G)、V_G: ガス流速 (mm/s)、ρ: 金属粉密度 (g/mm³)、C_P: 金属粉比熱 (J/g・°C) である。なお、用いた熱物性値などは、参考文献 2) に従った。

3. 2 解析結果

Case-1～Case-4 について、空間温度分布を Figure 2 に比較する。これら全ての結果は、金属粉エネルギー授受効果を考慮したものである。結果より分かる通り、レーザー出力が大きく、金属粉供給量の小さな Case-1 では、母材溶け込み深さが顕著なものとなっている。他方、レーザー出力を抑え、金属粉供給量を増やした Case-3 および Case-4 では、溶け込み深さが小さく且つ薄いコーティング膜厚が実現できている。

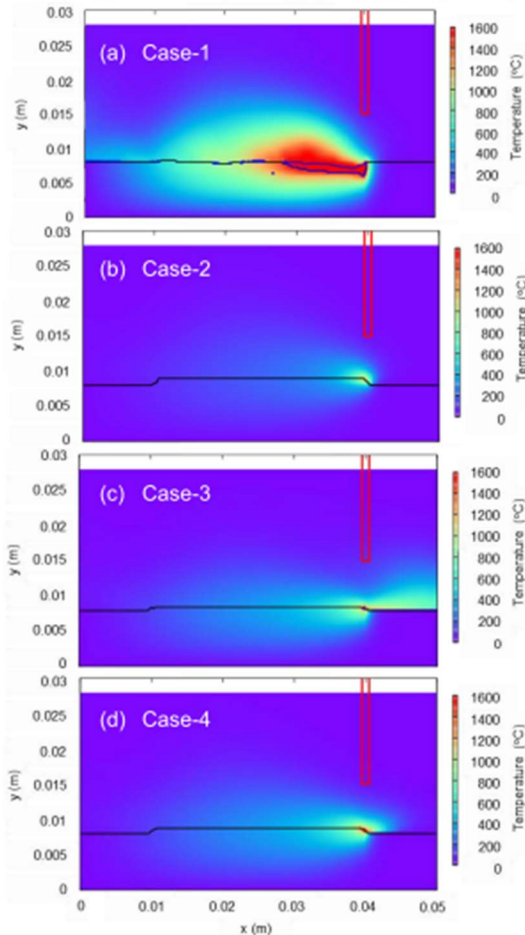


Fig. 2 Comparison of spatial temperature distribution.

4. フロントローディングを目指したデジタルモックアップ装置としての SPLICE コードの利用

要求仕様を満足するレーザーコーティング製品を実現するためには、多くの試作を通じてレーザー照射条件などを規定するための膨大なオーバーヘッドを伴う繰返し作業が必要となる。この問題を SPLICE コードを用いたフロントローディングにより解決できれば、産業分野へのレーザー加工技術の導入が更に加速されると予想できる。

レーザーコーティングプロセスに影響を与えるパラメータを、単位面積当りの母材への入熱量 E と金属粉供給量 W として整理し(式(2)および(3))、 E と W から成る設計空間 ($0.115 \leq E \leq 0.286$, $0.0025 \leq W \leq 0.005$) 内で計 7 ケースの SPLICE 追加解析を行った。

$$W \equiv \frac{Q_F}{(d_F/2)^2 \pi} \frac{d_F}{V_L} = \frac{4 Q_F}{d_F \pi V_L} \quad (2)$$

$$E \equiv \frac{P_L}{(d_L/2)^2 \pi} \frac{d_L}{V_L} = \frac{4 P_L}{d_L \pi V_L} \quad (3)$$

ここで、 P_L : レーザー出力 (W), V_L : スウィープ速度 (mm/min) である。

Figure 3 は、コーティング膜厚 (L_t) について応答曲面表示した結果である。膜厚を小さくしたコーティング製品を目指す場合、設計空間の中央領域近傍に条件設定のスイートポイントが存在すると言える。このような設計空間特性の把握を実験的手法のみで行おうとした場合、施工現場での試験片製作、試験片切断、試験片検査などの膨大な繰返し作業が、母材と金属粉との組合せ毎に求められる。他方、SPLICE コードによる設計空間特性の可視化は、膨大なオーバーヘッドの大幅な低減に有効であり、デジタルモックアップ装置としての計算科学シミュレーションコードを利用したフロントローディングが可能であることを示唆している。

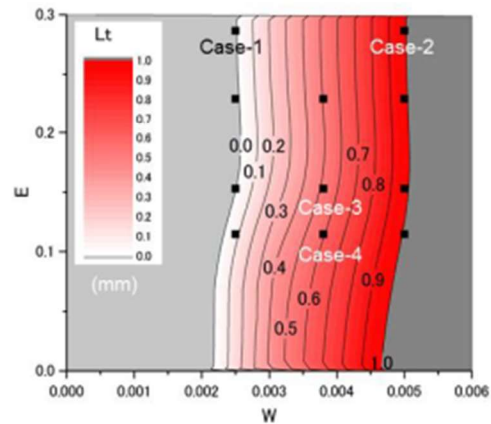


Fig. 3 Response surface for coating film thickness.

5. おわりに

SPLICE コードを用いてレーザーコーティングプロセスの評価を行い、フロントローディングを行うためのツールとして有効であるとの見通しを得た。

参考文献

- 1) T. Muramatsu, Proc. ICALEO-31, No. 1904 (2012) p. 661.
- 2) 日本熱物性学会編: 新編 熱物性 H.B. (養賢堂 2008).

III. 放射光 X 線イメージング法によるレーザー照射下金属粒溶融時空間分解計測

シンポジウム
S826aV03

レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会講演予稿集

放射光 X 線イメージング法によるレーザー照射下金属粒溶融時空間分解計測

How to make a contributed manuscript for the submission

○菖蒲 敬久, 城 鮎美^A, 安田 良^A, 小泉 保行, 水谷 春樹, 小林 孝徳, 村松 壽晴
(国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, ^A国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構)

Takahisa SHOBU, ^AAyumi Shiro, ^ARyo Yasuda, Yasuyuki Koizumi, Haruki Mizutani, Takanori Kobayashi,
Toshiharu Muramatsu (Japan Atomic Energy Agency, ^ANational Institutes for Quantum and Radiological Science
and Technology)

1. はじめに

「軽い・薄い(価格が)安い・強い・長持ち」といったユーザーニーズに応えるデライト設計ベースの工業製品開発およびそれらを実現するためのコーティング装置に必要なレーザーコーティング技術を確認するための基板基礎研究として、金属球のレーザー照射による溶融現象を高速イメージング測定により行い、系統的現象を明らかにすることを目的として本研究を実施した。

2. 実験方法

実験は、SPring-8、BL22XU を用いて実施した。使用したエネルギーは 30keV である。試験片には $\phi 0.2\text{mm}$ の銅球をはじめ数種類の金属球を用意した。基板には Al_2O_3 セラミックスをはじめ、金属材料を使用し、その上に 1 個の金属球を設置し、その上部より Yb ファイバーレーザーを 300W 以下の出力で照射、そのときの金属球溶融現象を X 線可視光変換ユニットを介したハイスピードカメラにより 1msec 以下の時間分解能で透過イメージング法により計測した (図 1)。なお、試験片周りの環境は大気、真空、ガス雰囲気と 3 条件である。

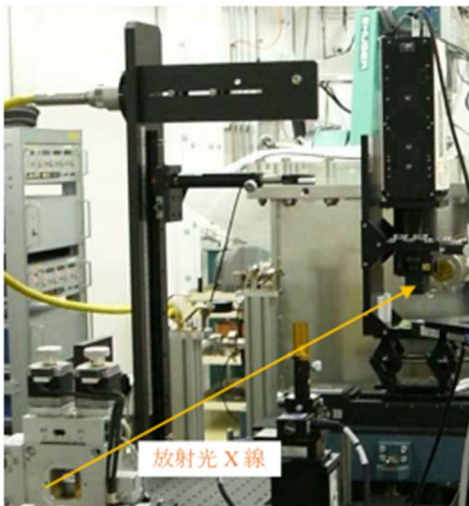


図 1 イメージング測定セットアップ。

3. 実験結果、考察

一例として、図 2 に Al_2O_3 基板上的の $\phi 0.2\text{mm}$ 銅球へ照射径 $\phi 0.4\text{mm}$ 、入熱量 $4 \times 10^4 \text{W/cm}^2$ でレーザー照射下際の溶融凝固イメージング像と照射後の金属球の写真を示す。左側は大気中、右側は真空中である。大気中に関しては、レーザー照射後から銅球は溶け出し、そのまま基板に広がりだしたが、途中で基板の中に銅球もぐりこんでしまい、その後基板の中で溶けた。これはおそらく基板の融点が 2000 度強に対して銅球の融点は 1000 度強と基板の温度がはるかに高いために基板にもぐりこんだ後は濡れの効果

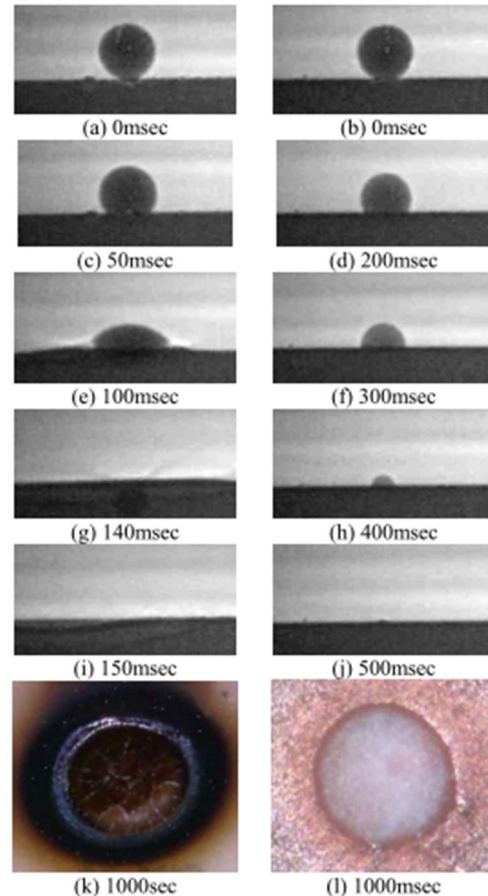


図 2 基板 Al_2O_3 上の $\phi 0.2\text{mm}$ 銅球のレーザー照射下イメージング計測

で球形を取り戻したのではないかと思われる。ただし、このような現象はレーザー出力に大きく依存し、レーザー出力が弱くなるとゆっくり基板の上で広がるケースもある。一方、図 2 の右側、真空中においては、時間の経過とともに銅球が徐々に小さくなっている。基板の界面を注意して観察すると銅球直下の基板の界面の色が徐々に黒く広がっていることがわかる。これは、銅球はすぐに溶けているが、基板の温度が十分でないために銅球は最初のうちは広がらないが、レーザー照射時間とともに基板の温度が上昇し、銅の融点よりも基板の融点が高くなったため広がったのであろうと考えられる。

図 2(k)、(l)はレーザー照射 1 秒後の基板の様子である。大気中では黒く、明らかに酸化していることがわかる。一方、真空中では銅色が残っており、酸化の影響が無く高品質な膜が出来ていることがわかる。内部が白くなっているのはレーザー照射時間が長く、銅が回りに押し出され、基板が残ったためであると思われる。

4. 結言

本研究では、レーザー照射現象をリアルタイム計測するために放射光 X 線を利用した。結果は以下の通りである。

- 1) 放射光 X 線を利用することにより 1msec の時間分解能でも十分計測できる。
- 2) 銅球にレーザーを照射すると Al_2O_3 基板上では大気と真空中で大きく振る舞いが異なる。当日は、ガス雰囲気中、基板と金属球の異なる組み合わせの現象についても紹介する予定である。

IV. ふくいスマートデコミッショニング技術実証拠点の整備

— 廃止措置技術実証試験センター（仮称） —

Journal of RANDEC No. 57 (Mar. 2018)

ふくいスマートデコミッショニング技術実証拠点の整備 — 廃止措置技術実証試験センター（仮称） —

村松 壽晴*、佐野 一哉**、寺内 誠***

Establishment of Fukui Smart Decommissioning Technology Demonstration Base — Decommissioning Technology Demonstration Test Center (tentative name) —

Toshiharu MURAMATSU*, Kazuya SANO** and Makoto TERAUCHI***

廃止措置技術実証試験センター（仮称）は、文部科学省の支援施策である平成28年度補正「地域科学技術実証拠点整備事業」で採択された「ふくいスマートデコミッショニング技術実証拠点」の中核の施設として整備するものである。

この施設は、原子力発電所の廃止措置に関する技術について地元企業の成長を支援し、産学官が一つ屋根の下で地域経済の発展と廃止措置の課題解決に貢献するための拠点であり、廃止措置解体技術検証フィールド、レーザー加工高度化フィールド及び廃止措置モックアップ試験フィールドの3つから構成される。

本報告では、これらの各フィールドの設備について概要を紹介する。

The Decommissioning Technology Demonstration Test Center (tentative name) is established as a central facility of "Fukui Smart Decommissioning Technology Demonstration Base" which was adopted by the support policy "Regional Science and Technology Demonstration Base Establishment Project" of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology in FY 2016 supplementary budget.

This facility is a base to train local companies about technology concerning the decommissioning of nuclear power plants and for the industry, academia and government to contribute to the development of the regional economy and the solutions to problems of decommissioning under one roof. The facility consists of 3 fields: decommissioning dismantling technology demonstration, advanced laser processing and decommissioning mock-up test.

The report describes the outline of the facilities in each of these fields.

1. はじめに

1.1 廃止措置技術実証試験センター（仮称）とは
廃止措置技術実証試験センター（仮称）は、文部科学省の支援施策である平成28年度補正「地域

科学技術実証拠点整備事業」で採択された「ふくいスマートデコミッショニング技術実証拠点」の中核の施設として整備するものである。

この施設は、原子力発電所の廃止措置に関する技術について地元企業の成長を支援し、産学官が

* : (国研) 日本原子力研究開発機構 敦賀事業本部 レーザー共同研究所
(Applied Laser Technology Institute, Tsuruga Head Office, Japan Atomic Energy Agency)
** : (国研) 日本原子力研究開発機構 原子炉廃止措置研究開発センター 技術開発部
(Technology Development Department, FUGEN Decommissioning Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency)
*** : (国研) 日本原子力研究開発機構 敦賀事業本部 産学連携推進室
(Industry and Academia Cooperation Promotion Office, Tsuruga Head Office, Japan Atomic Energy Agency)

一つ屋根の下で地域経済の発展と廃止措置の課題解決に貢献するための拠点であり、廃止措置解体技術検証フィールド、レーザー加工高度化フィールド、廃止措置モックアップ試験フィールドから構成される。なお、開設は平成30年度を予定している。

1.2 廃止措置とは

「廃止措置」とは、運転の終了した原子力発電所などの原子力施設から放射性物質を取り除き、安全に解体・撤去することをいう。

廃止措置は、原子炉等規制法に従って、運転終了後も維持管理が必要な設備について考慮しながら、安全かつ合理的に施設の解体を進める必要がある。

なお、(国研)日本原子力研究開発機構は廃止措置のための技術開発や廃止措置を通じて得られる成果などについて、わが国における他の原子力施設の廃止措置においても有効に活用できるよう、関係機関との連携や技術協力を行いつつ、積極的に公開し情報共有していくこととしている。

1.3 廃止措置技術実証試験センター(仮称)が目指すもの

廃止措置技術実証試験センター(仮称)は、福井県の強み(15基の様々なタイプの原子炉が存在、原子力関連産業に携わっている企業が多く、原子力関連の教育・研究インフラが多い等)を活かし、地元企業の成長を支援する拠点として整備し、廃止措置技術の基礎研究から実証までを一貫して取り組めるように整備するものである。ここでは、技術力の強化により地元企業の廃止措置事業への参画を容易にし、廃止措置ビジネスの確立と関連企業群の育成を目指している。

2. 施設概要

2.1 施設の位置及び建物仕様

施設は、福井県敦賀市木崎の敦賀事業本部横に位置し、既存の建物と鉄骨構造3階建の新築建物からなる。施設の位置をFig. 1に、建物の仕様をFig. 2に示す。



Fig. 1 Facility location

所在地	福井県敦賀市木崎65-20
敷地面積	11,674.37m ²
建物構造	鉄筋構造3階建て(新築建物)
建設床総面積	645m ² (新築建物)
主要施設 (フィールド)	廃止措置解体技術検証フィールド
	レーザー加工高度化フィールド
	廃止措置モックアップ試験フィールド
	企業等利用者交流スペース、他

Fig. 2 Building specification

2.2 建物内配置

新築建物内部には、モックアップ試験室及びMRシステム開発室等を整備する。また、既存建物には、レーザー加工に関する施設を整備する。建物内部の配置をFig. 3に示す。

3. 廃止措置解体技術検証フィールド

廃止措置解体技術検証フィールドでは、複合現実感(Mixed Reality: MR)システムを利用してふげんのプラント内を実寸の臨場感で仮想体験できる設備を整備している。

ここでは、廃止措置作業で必要となる現場の事前確認・検討、機材の操作性確認、作業者の被ばく予測などを可能としている。

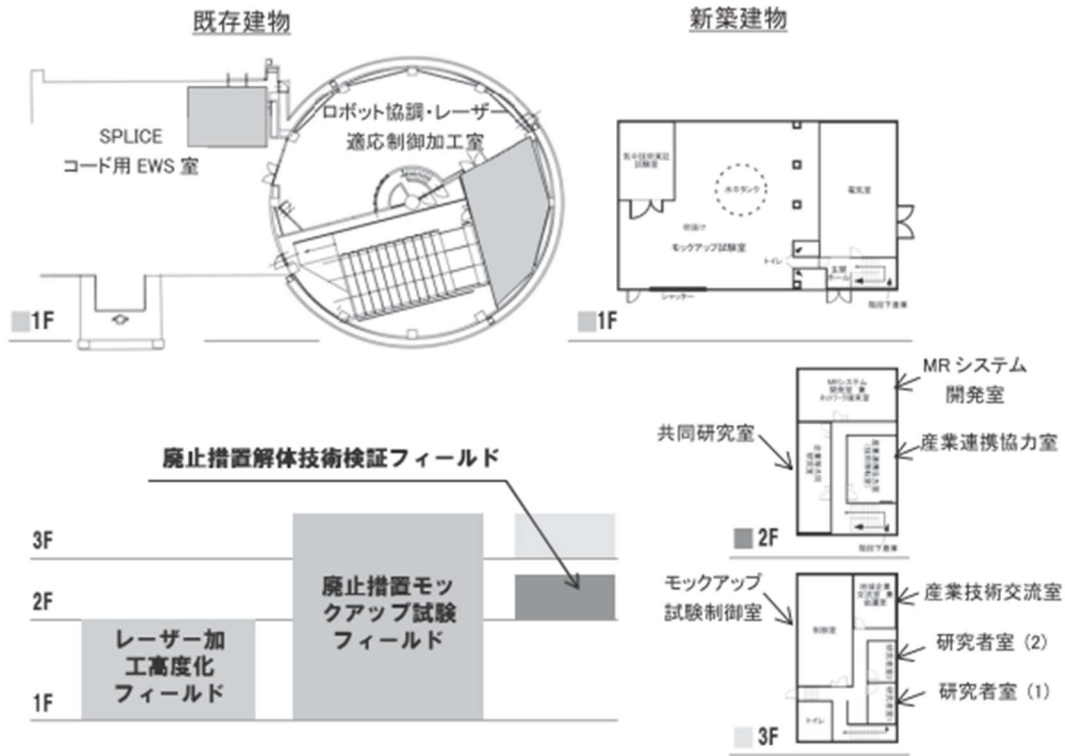


Fig. 3 Placement inside the building

3.1 複合現実感 (MR) システムの活用

廃止措置作業を安全かつ合理的に実施するためには、作業手順などを事前に十分検討する必要がある。この方法の一つとして、MRシステムを活用することにより現場に入城することなく、実寸大で臨場感ある現場を仮想体験するという方法がある¹⁾。

MRシステムでは、Fig. 4～Fig. 7に示すように、解体設備の解体手順の検討、現場の線量当量率 (mSv/h) の可視化、仮設機材 (足場、養生、遮蔽) の設置場所や大きさの検討、解体作業に必要な設備の搬入ルートや干渉確認が可能である。

MRシステムは、MRシステム開発室に設置され、HMD (頭部装着ディスプレイ)、MR用PC、光学センサー、50インチディスプレイなどから構成される。



Fig. 4 Verification of reasonable dismantling procedure

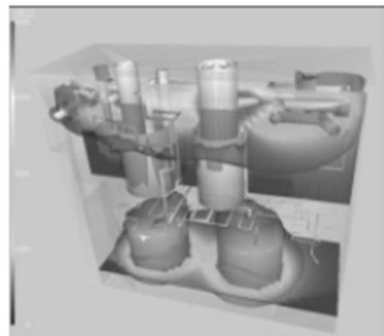


Fig. 5 Visualization of dose equivalent rate

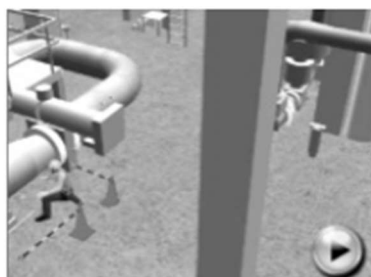


Fig. 6 Confirmation of workability



Fig. 7 Consideration of interfering objects

mの範囲で、この中を動きながら現場体験をすることが可能である。MR体験者は1名で、MR体験者以外の参加者はMR体験者の見ている映像を2D映像としてディスプレイで確認することができる。

このMRシステムは廃止措置作業に参入したい県内企業を支援し、人材育成、技術力の向上を図るとともに大学生などの実習体験などに活用してもらうことを想定している。

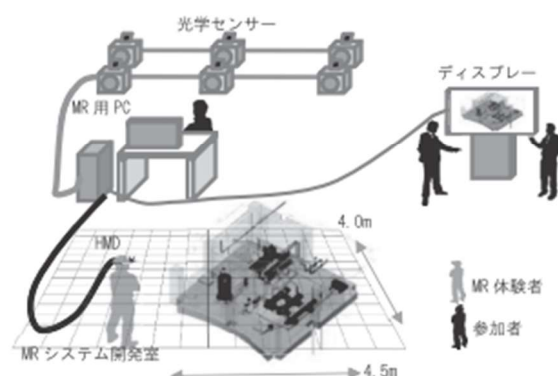


Fig. 8 MR system image

3.2 複合現実感 (MR) システムとは

Fig. 8にMRシステムのイメージを示す。

光学センサーによりHMDやハンドツールの位置・姿勢を検出することで、MR体験者に正しい表示画像 (3D) を見せることができる。MRシステムの稼働領域は約幅4.5 m×奥行4.0 m×高さ2.5

3.3 MRシステムの仕様

Fig. 9にMRシステムの主要機器の仕様を、また、Fig. 10にシステム構成を示す。

機器名	仕様 (相当品)	備考
HMD 振動デバイス コントローラ	メーカー: キヤノン 型式: MD-10 表示角度: 68° (対角)、60° (水平) × 40° (垂直) 表示解像度: 1,920 × 1,200 (MUXGA) 表示モード: 3D表示 撮影角度: 73° (対角)、66° (水平) × 40° (垂直) 撮影解像度: 1,920 × 1,080 (FULL HD) 重量: 約1100g 台数: 1	
MR用パソコン コントローラ	メーカー: HP 型式: Z840 CPU: Xeon® E5-2643v4 3.40GHz メモリー: 64GB ディスクSSD/HDD: 256GB SSD/512GB SSD/1T HDD グラフィック: NVIDIA Quadro P6000 台数: 1	- MR用ソフト MRプラットフォーム MR Visualizer MR Visualizer jt importer メディアプレパレーション EnSight EnSight forMR
ディスプレイ 解像度変換機	メーカー: NEC 型式: LCD-E505 サイズ: 50型 (127cm) 液晶パネル/バックライト: 白色LEDバックライト (直下型) 表示画素数: 1,920 × 1,080 画素ピッチ: 0.0670mm 表示色: 約1677万色 台数: 1	
光学センサー (カメラ) PcE	メーカー: Vicon 型式: Vero v2.2 解像度: 2,048 × 1,088 最大フレームレート: 330 Hz 台数: 6	- 光学センサーソフト

Fig. 9 Main equipment in MR system

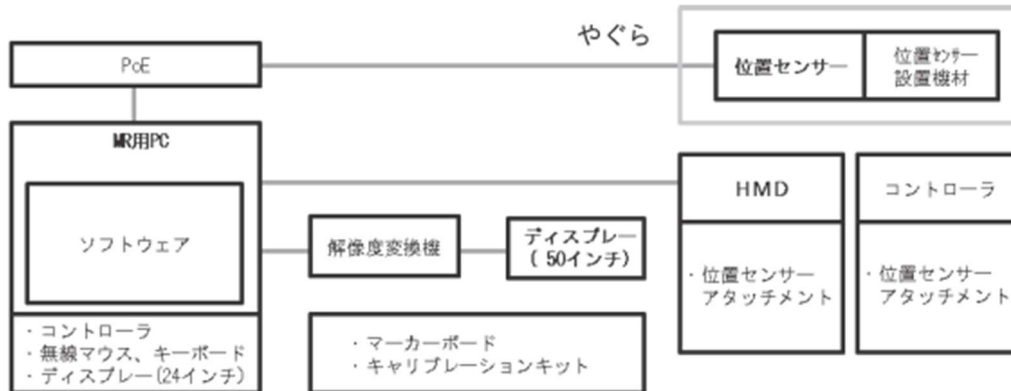


Fig. 10 Configurations of MR system

3.4 MRシステムの能力

(1) MRシステムを用いた訓練

MRシステムを廃止措置作業に適用することにより、Fig. 11～Fig. 14に示すようにプラント内部を実寸大で作業員目線で観察することや、廃止措置工事の進捗の各段階での現況に合った最適な工事手順（搬入、設置、解体、搬出など）等の教育・訓練に用いる。



Fig. 11 Confirmation of work site (Realistic sense of presence, checked with worker's eyes)



Fig. 12 Confirmation of workability (confirmation of working space)

<主な機能>

- ・最適な工事手順の検討
- ・作業被ばく線量の検討
- ・作業性の確認（工具類の干渉、作業姿勢等）



Fig. 13 Confirmation of workability (confirmation of tool interference)



Fig. 14 Confirmation of workability (confirmation of working posture)

4. レーザー加工高度化フィールド

Fig. 15に示すレーザー加工高度化フィールドでは、レーザー光を熱源として利用する廃止措置技術を高度化するため、様々な外界情報のモニタ

リング機能を備えた多機能レーザー加工ヘッドや溶断性能を常に適切な状態に維持することが可能な適応制御機能を搭載した3本の多自由度ロボットから成る協調制御システムを設置している。さらに、レーザー照射条件などを施工前に評価できるようにするため、10台のエンジニアリングワークステーションにより、レーザー溶融・凝固計算科学シミュレーションコードSPLICEを利用することができる。

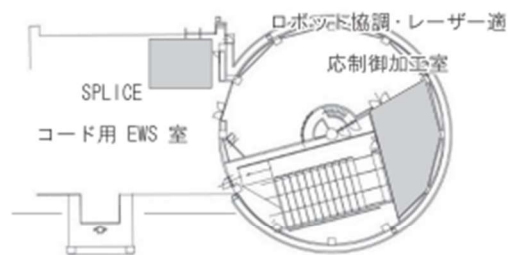


Fig. 15 Adaptive laser processing field

4.1 ロボット協調・レーザー溶断適応制御システム

レーザー光を熱源とした金属溶断などの加工作業は、これまで熟練者が有する知識や経験、さらに、勘に依る部分が多く、その利用範囲を狭めて来た。

これを解決するための技術の一つが、外界情報を利用する適応制御機能を搭載したロボット協調制御システムであり、写真をFig. 16に示す。

このシステムでは、15 kgまでの溶断対象物をロボットアームで把持し、スパッタを回収しながら10 kWのファイバーレーザーにより自由自在に溶断することが可能で、加工手順や作業工程の検討を進めることができる。

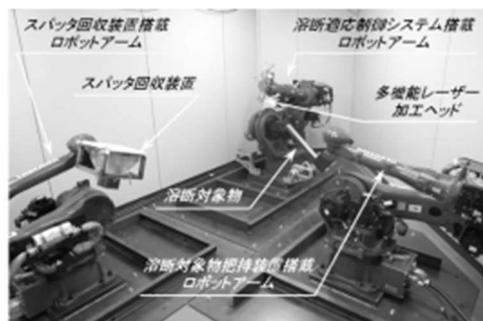


Fig. 16 Cooperative robot movement and adaptive laser cutting control system

4.2 レーザー溶融・凝固計算科学シミュレーション

レーザー光を熱源として金属溶断などの加工作業を的確に行おうとする場合、レーザー照射条件やアシストガス流量、スイープ速度などに関する設計空間を事前に把握しておく必要がある。これを行うための技術の一つが、SPLICEコードを用いた計算科学シミュレーションである。

Fig. 17に示すようにSPLICEコードは、レーザー照射から相変化を考慮した溶融・凝固過程までの複雑系物理を一気通貫で評価することが可能で、対話形式での解析条件設定などにより、容易に利用することができる。

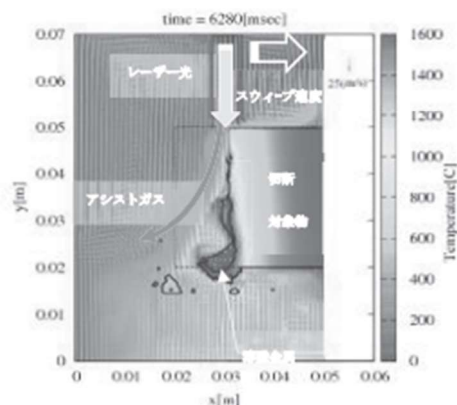


Fig. 17 Example of a laser cutting simulation by the SPLICE code

4.3 レーザー加工装置の仕様・能力

(1) 装置の仕様

(a) ロボット協調・レーザー溶断適応制御システム (Fig. 18)

- ・ 10 kWファイバーレーザーシステム
- ・ 溶断適応制御システム搭載ロボットアーム
- ・ 溶断対象物把持装置搭載ロボットアーム (最大可搬重量15 kg)
- ・ スパッタ回収装置搭載ロボットアーム
- ・ スパッタ回収装置
- ・ 加工ブース

(b) レーザー溶融・凝固計算科学シミュレーション (Fig. 19)

- ・ 計算科学シミュレーションコードSPLICE
 - ・ グラフィックユーザーインターフェース
 - ・ エンジニアリングワークステーション
- 型式：Dell Precision T7910

C P U : デュアルインテルXeonプロセッサー
E5-2637 v4
メモリ : 64GB 2400MHz DDR4 RDIMM ECC
台 数 : 10台 (並列解析可能)

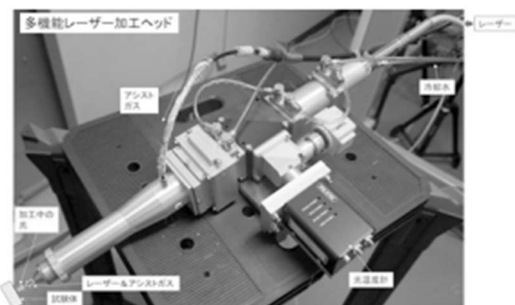


Fig. 18 A multi-functioned laser processing head for an adaptive laser cutting control system



Fig. 19 Engineering workstation for the SPLICE code

(2) 装置の能力

(a) ロボット協調・レーザー溶断適応制御システム

溶断プロセスの状態を光温度計などの外界センサーにより監視し、溶断性能が常に適切な状態となるよう制御することができる。(適応制御)

3本のロボットアームは、それぞれに搭載した機能が常に適切な役割を果たすよう制御することができる。(協調制御)

これらの機能を利用することにより、現場での加工手順や作業工程の検討をサポートすることができる。

レーザー溶断適応制御実験映像を Fig. 20 に示す。

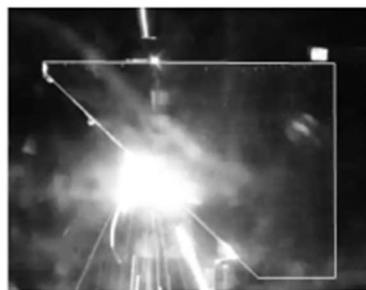


Fig. 20 Image of laser blown adaptive control experiment

(b) レーザー溶融・凝固計算科学シミュレーション

Fig. 21 に示すように SPLICE コードによる溶断シミュレーションにより、溶断性能などの設計空間 (応答曲面) を事前に可視化し、レーザー照射条件などの検討を効率的に行うことができる²⁾。

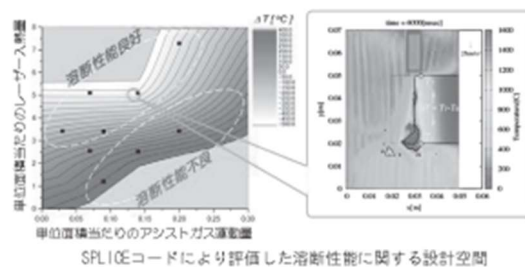


Fig. 21 Example of a response surface evaluated by the SPLICE code

5. 廃止措置モックアップ試験フィールド

Fig. 22 に示す廃止措置モックアップ試験フィールドでは、廃止措置解体技術検証フィールドやレーザー加工高度化フィールドで得た研究成果を実証するために、ふげんで使用した実機材やモックアップ部材を持ち込んで、地元企業等が解体検証を実施する場を提供する。

なお、本試験フィールド (モックアップ試験室) には、「水中技術実証試験エリア」と「気中技術実

証試験エリア」がある。

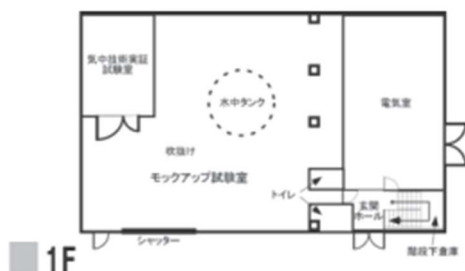


Fig. 22 Decommissioning Mock-up test field

5.1 水中技術実証試験エリア

水中技術実証試験エリアには、高さ約10.5 mの水中タンクが設置されており、水中タンクには、7軸遠隔水中ロボットを常設してある。水中タンクの水位は、試験条件に合わせて10 m以下で任意に調整ができ、タンク内の水については循環及び浄化システムが備えられている。

これら整備された装置を使用して、例えば、Fig. 23に示すように遠隔多関節水中ロボットの先端に、プラズマ又はレーザー切断ヘッドを取り付けて、放射線量が高くなる原子炉構造材の模擬材を水中タンク内に設置して切断実証試験を行うことで、各種データの取得や解体手順の構築・確認をすることができる。

Fig. 24にレーザー及びプラズマによる水中切断時のイメージ写真を示す。

他にも、原子炉施設には多くの貯蔵タンク等が存在しており、これらの解体や溶接作業等の作業環境を模擬でき、安全かつ効率的な作業方法を事前に確認・習得することができる。

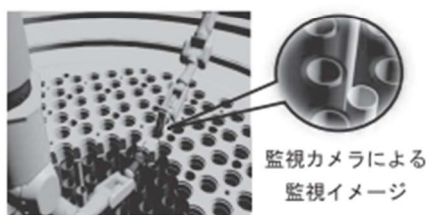


Fig. 23 Image of reactor core dismantled using robot in water



レーザー水中切断



プラズマ水中切断

Fig. 24 Image of underwater cut

5.2 気中技術実証試験エリア

気中技術実証試験エリア(気中技術実証試験室)は、天井高さ約4 m×幅5 m×奥行7 mの規模である。気中技術実証試験室には、排煙浄化装置を常設しており、切断等で発生するヒュームや粉じん等を処理し、室内の清浄度を維持できるように作業環境にも配慮している。

ここでは、Fig. 25に示すような6軸遠隔気中ロボットによる遠隔での切断実証や汎用のダイヤモンドワイヤソー等の切断工具や研磨工具等を使用して、「ふげん」で実際に使用していた実機材や模擬材を使用して切断作業や除染作業等を体験することができる。また、地元の各企業が独自に開発した切断等の工具や各種装置等の実証をすることも可能である。

廃止措置作業では、供用中と同様の安全管理や作業管理が求められることから、これから廃止措置ビジネスに参入を計画している地元企業には、これらの廃止措置モックアップ試験フィールドを活用して解体作業(切断・分解)や除染作業等を事前に確認できることは大きなメリットになる。また、自社開発した装置や工具等が実際の現場において、使用可能かどうか等を検証するにも大いに役立つと考えられる。

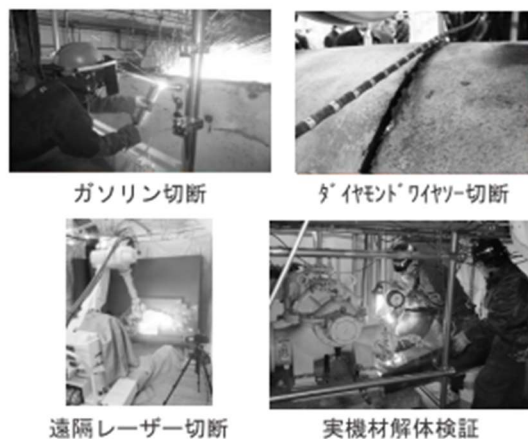


Fig. 25 Image of tests in Technology Demonstration Laboratory in the air

5.3 廃止措置モックアップ装置の仕様・能力

廃止措置モックアップ装置の配置を Fig. 26 に示す。

(1) 装置の仕様

- (a) 水中技術実証試験エリア
- ・水中タンク (高さ: 約10.5 m、外径: 約4.5 m)
 - ・7 軸遠隔水中ロボット
 - ・水中監視カメラ等
- (b) 気中技術実証試験エリア
- ・6 軸遠隔気中ロボット
 - ・排煙浄化設備等
- (c) 共用装置
- ・高出力レーザー切断装置 (出力30 kW)
 - ・プラズマ切断装置 (出力600 A)
 - ・圧縮空気設備
 - ・各種切断工具等

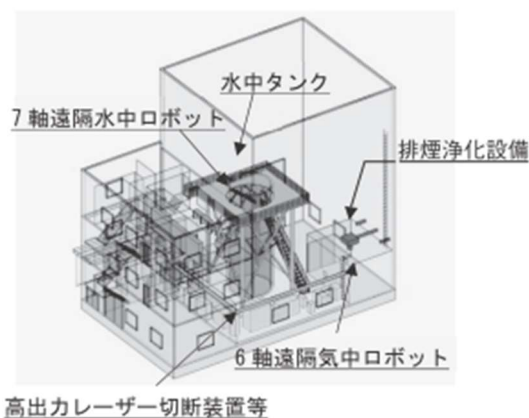


Fig. 26 Device arrangement

(2) 装置の能力

(a) 水中タンク (Fig. 27)

- ・外径約4.5 m (内径約4 m)
- ・高さ約10.5 m (水深最大10 m)
- ・材質ステンレス製

〈主な機能〉

- ・7 軸遠隔水中ロボット装置及び昇降装置
- ・循環・浄化設備 (ろ過精度 $2 \mu\text{m}$)
- ・水位計
- ・水中監視カメラ、水中照明
- ・内部確認窓
- ・内部アクセス用ラダー
- ・プラットフォーム (床耐荷重 200 kg/m^2)

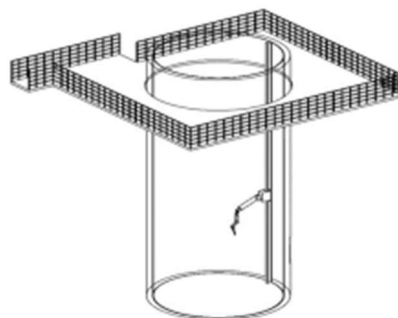


Fig. 27 Underwater tank

(b) 7 軸遠隔水中ロボット (Fig. 28)

- ・型番: PA-25-UW (三菱重工工業製)
- ・軸数: 7 軸
- ・可搬重量: 25 kg
- ・動作温度範囲: $0 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$
- ・使用環境: 水中 (水深10m以上)
気中でも使用可能



Fig. 28 Articulated remote underwater robot

- (c) 6軸遠隔気中ロボット (Fig. 29)
- ・型番：MOTOMAN-MH50 (安川電機製)
 - ・軸数：6軸
 - ・可搬重量：50 kg
 - ・動作温度範囲：0～45℃
 - ・使用環境：気中

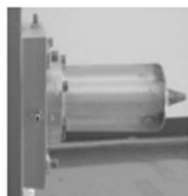


Fig. 29 Articulated remote aerial robot

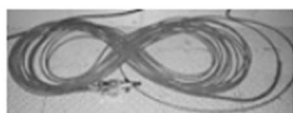
- (d) 高出力レーザー切断装置 (Fig. 30)
- ・型番：YLS-30000 (IPG Photonics 社製)
 - ・定格出力：30 kW
 - ・発振波長：1070-1080 nm
 - ・発振形態：連続発振 (CW)



レーザー発振器



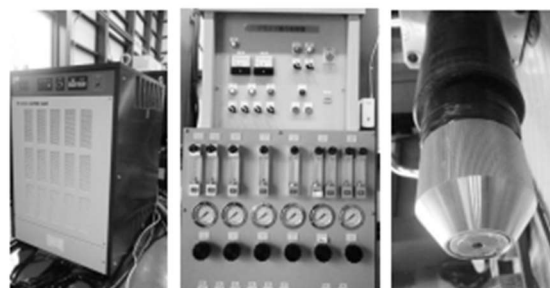
レーザー切断ヘッド



レーザー伝送用ファイバー (HLC-16)

Fig. 30 High power laser cutting device

- (e) プラズマ切断装置 (Fig. 31)
- ・型番：SUPER600 (小池酸素工業製)
 - ・出力定格電圧：200 V
 - ・出力定格電流：600 A
 - ・出力調整範囲：50 A～600 A
 - ・プラズマガス種：酸素、水素、アルゴン、窒素
 - ・シールドガス種：空気、窒素等



プラズマ電源 流量調整盤 プラズマトーチ

Fig. 31 Plasma cutting device

6. おわりに

国内外で原子力発電所の廃止措置ニーズが高まりつつある中、本拠点が福井県の強みを活かし、若狭地区の電気事業者と連携を図りつつ、地元企業の成長を支援し、技術力強化等により廃止措置ビジネスをリードするための一端を担うことで、地域経済の発展と廃止措置の課題解決に貢献できることを期待する。

参考文献

- 1) 庄司 公明, “原子力施設の廃止措置における大規模点群・複合現実感技術の可能性,” デコミッションング技報, No. 55, pp. 8-21, (2017).
- 2) T. Muramatsu, “Thermohydraulic Aspects in Laser Welding and Cutting Processes,” Proc. The 31th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics (ICALEO-31), No. 1904, pp. 661-669, (2012).

V. 世界初！レーザーコーティング照射条件の施工前予測が可能なシステムを開発
～ レーザー加工の職人技を身近な技術に ～

【本件リリース先】
6月15日(金) 15:00
(資料配付)

文部科学記者会、科学記者会、原子力規制庁記者会(仮称)、福井県政記者クラブ、敦賀記者クラブ、兵庫県政記者クラブ、中播磨県民局記者クラブ、西播磨県民局記者クラブ、大阪科学・大学記者クラブ



平成30年6月15日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

国立大学法人大阪大学

世界初！レーザーコーティング照射条件の施工前予測が可能なシステムを開発
～ レーザー加工の職人技を身近な技術に ～

【発表のポイント】

- レーザーコーティング加工ではコーティング粉末の供給量やレーザー光の出力の適切化が課題であり、経験または従来のシミュレーションコードから算出することは時間・費用の観点から困難である。
- 原子力機構は、レーザーコーティング加工時に生じる固体金属の熔融・凝固過程に対して、汎用エンジニアリングワークステーションでも利用可能な計算科学シミュレーションコード SPLICE を世界に先駆けて開発した。
- SPLICE を活用することで、コーティング膜厚、溶込み深さなどの要求仕様を満足するレーザー照射条件などの施工前評価が実測では数ヶ月要していたのに対して数週間に短縮した。
- レーザーコーティング装置に組み込むことで装置の市場拡大が期待される。
- 本成果での条件事前評価に係る考え方の一部は、平成30年度より開始する予定のレーザー溶断に係る研究開発「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点」事業でも活用する計画である。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(理事長 児玉 敏雄)高速炉・新型炉研究開発部門 敦賀総合研究開発センター レーザー・革新技術共同研究所の村松 壽晴 GL、原子力科学研究部門 物質科学研究センター 放射光エネルギー材料研究ディビジョンの菖蒲 敬久 研究主幹と国立大学法人大阪大学(総長 西尾 章治郎)接合科学研究所の塚本 雅裕 教授らの研究グループは、レーザーコーティング加工時に生じる固体金属の熔融・凝固過程を汎用エンジニアリングワークステーション¹⁾により評価可能な計算科学シミュレーションコード SPLICE²⁾を世界に先駆けて開発しました。レーザーコーティング加工は、基板上にコーティング粉末を噴射すると同時にレーザー光を照射し、高品質なコーティング膜を付与する技術です。本加工技術は金属基板に異なる金属膜を薄くコーティングすることで異なる機械的性質を付与できることが特徴です。しかしながら、要求仕様を満足するコーティング膜を付与するためには、コーティング粉末の供給量やレーザー光の出力などを、基板材料とコーティング粉末材料の組合せに応じて適切化することが求められます。今回開発した SPLICE はこのコーテ

ィング膜厚、溶込み深さなどの要求仕様を満足するレーザー照射条件などの施工前評価を実測では数ヶ月要していたのに対して数週間に短縮することができました。SPLICE の根幹を成す固体金属の溶融・凝固過程の評価性能は、SPring-8³⁾からの高輝度放射光 X 線⁴⁾を用いたイメージング法などにより、その妥当性を確認しています。今回の成果により、今後市場展開が計画されているレーザーコーティング装置の産業界での市場拡大が期待されます。

本成果は、内閣府が進める戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) / 革新的設計生産技術 (管理法人: NEDO) の研究テーマの一つ「高付加価値設計・製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発 (研究開発責任者: 国立大学法人大阪大学 接合科学研究所 塚本 雅裕 教授)」において、平成 26 年度より進めている研究成果の一部です。

なお、本成果での条件事前評価に係る考え方の一部は、平成 30 年度より新たに開始する予定のレーザー溶断に係る研究開発「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点」事業⁵⁾でも活用する計画です。

【本件に関する問合せ先】

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(研究内容について)

高速炉・新型炉研究開発部門 敦賀総合研究開発

センター レーザー・革新技術共同研究所

レーザー応用研究グループ

村松 壽晴 (むらまつ としはる)

TEL : 0770-21-5050, FAX : 0770-25-5782

(報道担当)

広報部報道課

TEL : 03-3592-2346

FAX : 03-5157-1950

【研究開発の背景と目的】

近年、様々な産業分野において、材料を接合する、穴を開けるなどの加工にレーザーが用いられています。レーザー加工は、加工領域が小さい、短時間、精密、遠隔操作が可能などのすぐれた特徴を有しています。一方で、レーザー加工では、これらの加工を実現するためにレーザー照射条件などを適切に設定するという課題があります。一般的には、この条件適切化は繰返しによる膨大な時間と作業を浪費して取得します。これこそが、多品種少量生産などを指向する産業分野へのレーザー加工技術の導入を阻害する一因ともなっています。今回研究開発の対象であるレーザーコーティングに関しても同様の課題が発生しています。

レーザーコーティングとは、基板上にコーティング粉末を噴射すると同時にレーザー光を照射し、高品質なコーティング膜を付与する技術です。レーザークラッティング（肉盛溶接）と似ていますが、レーザーコーティングは金属基板に異なる金属膜を薄くコーティングすることで異なる機械的性質を付与できることが大きな違い、特徴です。現在開発中であり、最終的には製品として市場販売を目指しています。市場販売する上で最も大きな課題は、このレーザーコーティング技術が誰でもすぐに取り扱えるようにすることです。そのためにはこの匠の技術を手助けする手段が必要となります。本研究では、この手助けする手段として計算科学的手法を考案しました。

【研究成果】

本研究では、計算精度を確保しつつも計算負荷を可能な限り低減し、汎用エンジニアリングワークステーションでも数値解析を可能にする事を第一に考えました。そのため、マイクロ挙動とマクロ挙動⁶⁾を多階層スケールモデル⁷⁾により接続し、気相・液相・固相を一流体モデルにより定式化した非圧縮性粘性流モデル⁸⁾を基礎式に採用しました。加えて、レーザー加工時に現れる核となる物理現象、例えばレーザー光-物質相互作用、半熔融帯を介した熔融金属-固体材料間の熱的機械的相互作用、熔融・凝固相変化過程などの複合物理過程を取扱うために必要な様々な物理モデルを導入しました(図1)。以上を考慮し、計算科学シミュレーションコードとして SPLICE が開発されました。

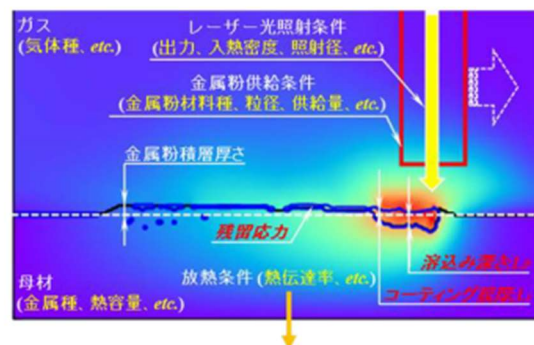


図1 レーザーコーティング加工に影響を及ぼすレーザー照射条件などのパラメータ

一方、計算シミュレーションの検証には、実証実験との比較がもっとも一般的です。SPLICE に関しても 3 つの方法で検証を行いました。図 2 でも示しますが、レーザーコーティングしている様子の計算シミュレーションの検証は大型放射光施設 SPring-8 からの高輝度放射光 X 線を用いたイメージング測定により行いました。本測定では金属を透過させ 10 マイクロメートル程度の空間分解能、千分の 1 秒の時間分解能でレーザーコーティングしている様子が観察できます。この観察結果と SPLICE の計算シミュレーションを比較することで、コーティング、及び溶込みが生成される様子を確認しました。またコーティングの厚さや溶込み深さ、キャビティーの有無など定量的な評価は生成した試験片を切断し、顕微鏡等で観察した結果と比較することで行いました。以上より、SPLICE の妥当性を明らかにするとともに、より質の高い結果を得るための高度化も合わせて行ないました。

図 2 は、キッチンや調理器具などの金属素材に使われているオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 母材表面に、さらにさびにくい金属であるニッケル基合金ハステロイ金属粉（大きさ数十マイクロメートル）をコーティングした例です。SPLICE を使用すると単位面積当たりの母材への入熱量 E と金属粉供給量 W の変化に伴い図 2 (a) から (d) の様に予測することができます。この結果、適正施工が行われているのは、図 2 (d) であることがわかります。このようなシミュレーションを様々な条件で実施し、整理すると図 2 (e) が完成します。以上より適正条件を導き出す E と W が決定します。このような計算を行うことで、作成したいコーティングの厚さに対して、どの程度の溶込

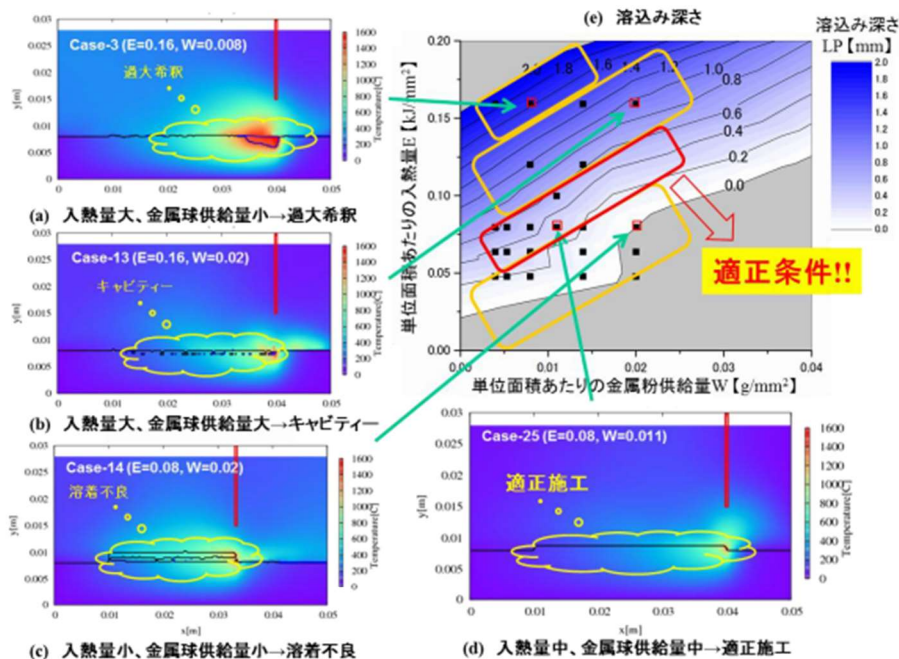


図 2 SPLICE コードを用いたレーザーコーティング溶込み深さ評価の一例

み深さが発生するのか、逆に許される溶込み深さに対してどの程度の厚さのコーティングができるのか、SPLICE により施工前に予めこのような特性を評価することが、従来法では数ヶ月要していたのに対して、わずか数週間で導き出すことができます。

【今後の展開】

今後市場展開が計画されているレーザーコーティング装置の産業界での利用促進を目指し、SPLICE コードの外部利用を積極的に進める予定です。また本成果での条件事前評価に係る考え方の一部は、平成 30 年度より新たに始まるレーザー溶断に係る研究開発「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点」事業でも活用する計画です。

用語説明

1) 汎用エンジニアリングワークステーション

数値演算機能やグラフィックス機能を強化した汎用計算機であり、科学技術計算やグラフィックデザインなどの分野で多く利用される。

2) SPLICE コード

レーザー溶断・溶接、レーザーコーティング現象の解明などを目的として開発した多次元コード。一流体モデルを用いて統一的に気・液・固の挙動が解析可能であり、溶接時の残留応力制御を目標としていることから、residual Stress control using Phenomenological modeling for Laser welding repair process In Computational Environment とし、SPLICE と命名。

3) 大型放射光施設 SPring-8

理化学研究所が所有する、兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高の大型放射光施設。SPring-8 の名前は Super Photon ring-8 GeV に由来する。SPring-8 では、遠赤外から可視光線、軟 X 線を経て硬 X 線に至る幅広い波長域で放射光を得ることができるため、原子核の研究からナノテクノロジー、バイオテクノロジー、産業利用や科学捜査まで幅広い研究が行われている。SPring-8 は日本の先端科学・技術を支える高度先端科学施設として、日本国内外の大学・研究所・企業からの年間 1 万 4,000 人以上の研究者によって利用されている。

4) 高輝度放射光 X 線

高エネルギーの電子等の荷電粒子が磁場中でローレンツ力により曲がるとき、電磁波を放射する現象をシンクロトロン放射といい、この電磁波を放射光 X 線、または単に放射光と呼ぶ。放射光 X 線は通常使用される実験室系 X 線に比べて、非常に明るい (= 高輝度) 性質を持っている。

5) 「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点」事業

科学分野での技術革新を促すため、研究開発機能を持つ施設・設備の整備を後押しする文部科学省による平成 28 年度公募事業として採択された拠点の一つ。具体的には、原子力発電所の廃止措置に係わる技術について地元企業の成長を支援し、産学官が一つ屋根の下で地域経済の発展と廃止措置に係わる課題の解決に貢献することを目指した拠点で、廃止措置解体技術検証フィールド、レーザー加工高度化フィールドおよび廃止措置モックアップ試験フィールドから構成される。

6) ミクロ挙動、マクロ挙動

レーザー光を熱源とした加工では、空間的・時間的に幅広く広がる各種スケール(ミ

クロ～マクロ)の挙動を取扱う必要がある。マイクロ挙動を厳密に扱うためには、膨大な計算負荷を伴うことになるため、これを低減するためにはマイクロ挙動とマクロ挙動とを関連づけた取扱いが必要となる。

7) 多階層スケールモデル

レーザー光を熱源とした加工の過程では、熱源からの入熱により、加熱・溶融・対流・凝固・固相変態が生じる。この一連のプロセスで生じるレーザー光と物質の相互作用、物質の溶融、気化、凝固など複雑な相変化などは、原子レベルから目視可能な液体の運動レベルまで様々なスケールの物理現象が複雑に絡まりあう物理過程であり、これを微視化および粗視化を通じて取扱うモデル。

8) 非圧縮性粘性流モデル

圧力による流体の伸縮を考慮せず、粘性を持つ流体の流れを数値的に模擬するモデル。

VI. 溶かし切る、叩き割る！レーザー光により自在な切断が可能な制御装置を開発
～ スマデコ環境を利用した性能実証へ ～

【本件リリース先】
平成 30 年 6 月 15 日(金)15:00
(資料配付)
文部科学記者会、科学記者会、原子力規制庁記者会(仮称)、福井県政記者クラブ、敦賀記者クラブ



平成 30 年 6 月 15 日
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

溶かし切る、叩き割る！レーザー光により自在な切断が可能な制御装置を開発
～ スマデコ環境を利用した性能実証へ ～

【発表のポイント】

- レーザー光による切断・破碎は万能では無く、様々な材質、厚みなどに的確に対応できるよう、予め切断対象物の構造情報を入手しておくことが重要である。
- 原子力機構は、溶断・破碎対象物に関する外界情報(形状、材質、切断性能など)をその場で計測し、レーザー照射条件などを自動で適応制御する装置を世界に先駆けて開発した。
- この適応制御方式は、レーザースキャナ、光検出器などを外界センサーとして利用し、金属材料に対する溶断、及びセラミックス材料に対する破碎の各動作を、ロボットシステムと連動して行うものである。
- この技術は、鉄骨とコンクリートから成るビルや金属とセラミックスから成るタービンブレードなどの複相構造物の解体作業に原理的に用いることができる。
- 平成 30 年度からは、「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点」設備を用い、性能を実証していく計画である。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(理事長 児玉 敏雄)高速炉・新型炉研究開発部門 敦賀総合研究開発センター レーザー・革新技術共同研究所 レーザー応用研究グループの村松 壽晴 グループリーダーの研究チームは、切断性能(切れ味)の状況を反射光(レーザー照射によって発生する光)により時間とともに変化する状況を監視し、切断性能が低下する兆候を検出した場合には、レーザー出力や切断速度を調整するなど状況変化に合わせて、常に適切な切断性能の維持が可能な適応制御装置を世界に先駆けて開発し、平成 30 年 1 月 5 日に特許登録(第 6265417 号)がなされました。

この適応制御方式は、形状を認識するためのレーザースキャナ、切断性能を監視する光検出器などを外界センサーとして利用し、金属材料に対する溶断と、セラミックス材料に対する破碎の各動作を、ロボットシステムと連動して行うもので、これまでの研究により基礎基盤的な観点からの基本性能が確認されました。この技術は原理的に、コンクリート中に鉄筋を埋め込んだビル構造物などの解体作業にも適用することが可能です。

平成 30 年度からは、文部科学省 平成 28 年度補正「地域科学技術実証拠点整備事業」として採択された「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点」設備を用い、

実機適用性能を実証していく計画です。

【本件に関する問合せ先】
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
(研究内容について)
高速炉・新型炉研究開発部門 敦賀総合研究開発センター レーザー・革新技術
共同研究所 レーザー応用研究グループ
村松 壽晴 (むらまつ としはる) TEL : 0770-21-5050, FAX : 0770-25-5782
(報道担当)
広報部報道課
TEL : 03-3592-2346, FAX : 03-5157-1950

【研究開発の背景と目的】

レーザー光を熱源として利用する構造物の切断では、様々な材質、厚みなどに的確に対応できるようにしておく必要があります。これを実現するためには、予め切断対象となる構造物の諸情報を用意しておく必要があります。しかしながら、福島第一原子力発電所の燃料デブリのように形状や材質などの情報が無い場合もあります。

本研究はこのような場合を想定し、切断性能の状況を時間とともに変化する状況を監視して、切断性能が低下する兆候を検出した場合には、レーザー出力や切断速度を調整するなど状況変化に合わせて、常に適切な切断性能を維持することが可能な制御装置の確立を行いました。

【研究成果】

燃料デブリなどの取出しを行おうとする場合には、不規則表面形状(凹凸)を持つ金属材料とセラミックス材料の混合物に対処する必要があります。このため、不規則表面形状をレーザーキャナ(レーザー光を用いたスキャニング機能)により認識し、これに基づいてレーザー加工ヘッドをx-y-z 3軸ロボットにより制御する装置を構築しました。更に、金属材料に対するレーザー連続照射による溶断と、セラミックス材料に対するレーザーパルス照射による破碎の各動作を、ロボット制御と連動させる機能も付加しました(図1参照)。

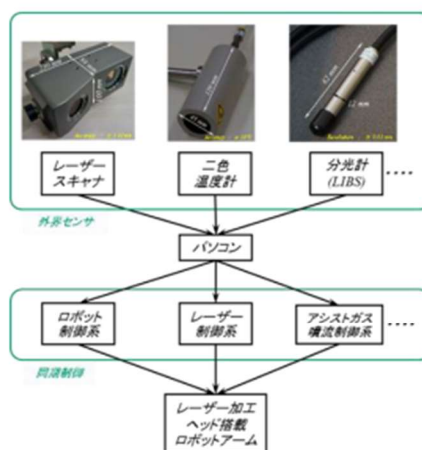


図1 レーザー溶断・破碎 適応制御装置の構成

図2はこれら機能の性能確認を行った際の写真で、不規則表面形状を持つ炭素鋼の上面にセラミックス材料(アルミナペレット)を接着した試験体に対し、レーザーキャナにより表面形状を認識した後、レーザー光の連続 / パルス照射をロボット動作と連動させて溶断 / 破碎を行ったものです。この結果から、不規則表面形状を持つ金属材料とセラミックス材料の混合物を的確に溶断 / 破碎でき、この制御装置は福島第一原子力発電所の燃料デブリ取出し作業に適用可能な工法の一つになり得ることを確認しました。

レーザー溶断時には、レーザー照射によって発生する光、反射光が発生します。レーザー光によって溶けた金属が良好に排出できている(切断良好)時には、反射光信号は低く安定していますが、排出が良好に行われなくなる(切断不良)と、反射光信号は急激に増加するとともに大きく振動するようになります。これは、排出できなかった溶けた金属が周囲に飛び散ることにより生じていると解釈できます。

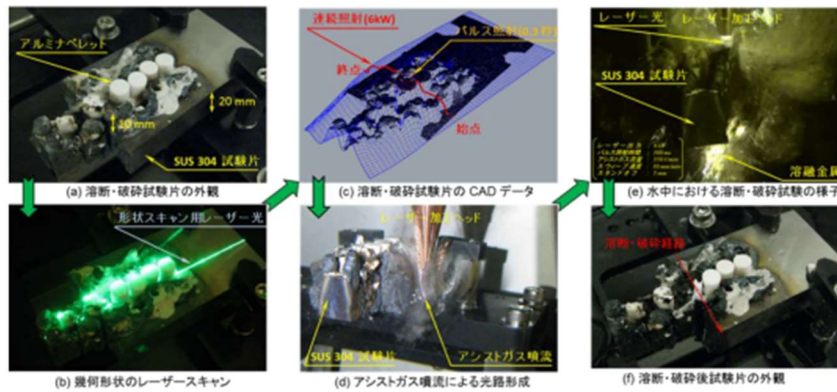


図2 レーザー溶断・破碎 適応制御試験の一例

図3は、試験片の厚みが裏側で2mmから50mmまで徐々に増加する形状不定材料を対象とした溶断適応制御試験の写真で、試験片の厚み増加に従って変化する反射光特性に応じて、レーザー出力とアシストガス圧力の回復・緩和動作によって溶断性能が維持され、最大厚み50mmまでの溶断が適切に行われることを確認しています。

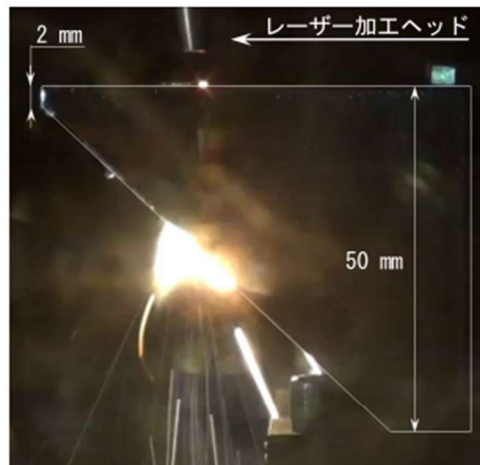


図3 レーザー溶断 適応制御試験の一例

【今後の展開】

これまでの研究により、レーザー溶断・破碎 適応制御装置の基礎基盤的観点からの基本性能が確認できたことから、今後は応用研究を主体としたフェーズに移行する予定です。平成30年度からは、文部科学省 平成28年度補正「地域科学技術実証拠点整備事業」として採択された「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点」設備を用い、レーザー溶断・破碎 適応制御装置の実機適用性能を実証していく計画です。

用語説明

1) 「地域科学技術実証拠点整備事業」

科学分野での技術革新を促すため、研究開発機能を持つ施設・設備の整備を後押しする文部科学省による公募事業。平成 28 年度は、計 22 拠点が採択された。

2) 「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点」

原子力発電所の廃止措置に係わる技術について地元企業の成長を支援し、産学官が一つ屋根の下で地域経済の発展と廃止措置に係わる課題の解決に貢献することを目指した拠点で、廃止措置解体技術検証フィールド、レーザー加工高度化フィールドおよび廃止措置モックアップ試験フィールドから構成される。

平成 30 年 6 月 15 日 記者会・クラブへのプレスリリース

村松壽晴

Ⅶ. 平成 29 年度レーザー応用技術成果報告会を開催



成果報告会

平成29年度レーザー応用技術成果報告会を開催
地元企業等との連携研究成果を報告

11月21・22日、敦賀連携推進センターレーザー共同研究所は、「平成29年度レーザー応用技術産学官連携成果報告会」をプラント技術産学共同開発センター（アクアトム3階）にて27社73名の方々にご参加いただき、開催いたしました。

産業界、研究開発法人、大学との連携をテーマに意見交換

本成果報告会は、主に事業運営や研究成果を広く情報発信し、今後のレーザー共同研究所の事業発展のため、相互の協力体制を構築すると



成果報告会の様子

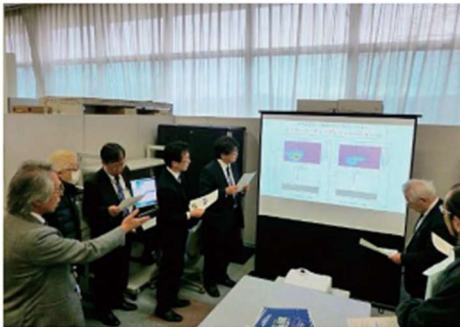
もに、ご参加いただいた方からの評価を受けることを目的として開催するものです。

報告会では、レーザー技術の基礎基盤研究から産業応用研究等について、「産業界」「研究開発法人・財団法人」「大学・学会」との連携をテーマに、それぞれ意見交換や研究交流などを行いました。他機関との連携では、福井県鯖江市のウラセ機によるレーザー遮光カーテンの開発と利用・石川県工業試験場によるレーザー加工時の物理現象シミュレーションSP-LICEコードの応用事例・量子科学技術研究開発機構による多機能レーザー加工ヘッドの耐放射線性に係る研究開発成果などが報告され、参加者と活発な議論を行いました。

今後とも、レーザー共同研究所では地元福井県の産業界、大学、研究機関をはじめとした幅広い分野の

方々とのつながりを強化し、研究開発を推進してまいります。

敦賀地区でのレーザー応用技術の研究現場を参加者に紹介



レーザー加工時のシミュレータSPLICEコードの概要説明

今回のプログラムの最後には、敦賀地区におけるレーザー応用技術の研究現場を紹介することを目的に施設見学ツアーを行いました。レーザー研では、現在、敦賀事業本部の敷地内で建設を進めている廃止措置ビジネスの支援施設（文科省支援事業「ふくいスマートデコミッション



施設見学ツアーで切断デモンストレーションを行った「レーザー加工高度化設備」

業「ふくいスマートデコミッション」技術実証拠点の整備」として設置・調整中のレーザー加工高度化設備を用いたレーザー切断実験を実演し、複雑な形状の金属がレーザー光で自動切断される様子をご覧いただきました。

また、(株)ナ・デックスR&Dセンター（敦賀市肋生野）では100kWファイバーレーザーを用いた溶接実験、(公財)若狭湾エネルギー研究センター（敦賀市長谷）ではレーザー除染実験をご覧いただき、敦賀地区でのレーザー応用研究を肌で感じていただきました。



施設紹介

廃止措置技術実証拠点「スマデコ」 3設備が6月から運用開始

敦賀総合研究開発センターは、廃止措置技術の基礎研究から実証までの課題に一貫して取り組むための産学官連携拠点「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点」(以下「スマデコ」)を平成29年度末に完成し、平成30年6月から運用を開始しました。

廃止措置ビジネスをリードする企業の育成支援・地域経済の発展・廃止措置の課題解決への貢献を目的に、スマデコは以下の3つの設備があります。

① 解体技術検証設備



放射線量当量率可視化
(緑色部分が高濃度放射線)

作業性の検証
(切断工具を用いた作業の確認)

複合現実感(Mixed Reality:MR)システム

最新のビジュアル設備を導入し、実際に解体が進められている「ふげん」の解体現場をMRシステムでリアルに擬似体験できます。放射線の分布を可視化したり、切断工具を用いて配管切断をシミュレーションできます。

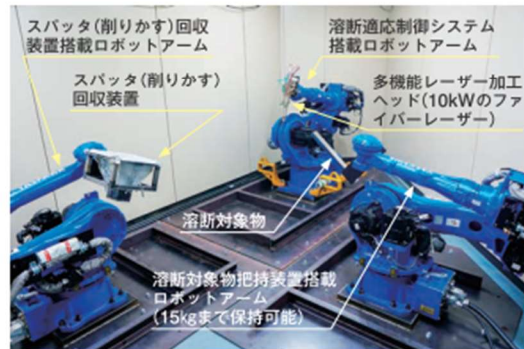
③ 実証試験(モックアップ)設備



モックアップ試験施設

水中でも切断試験が可能な高さ約10.5m、外径約4.5mの円筒型のプールを備えています。「ふげん」で使用した「実機材(放射性物質を含まない)」を用いた解体や分解等の訓練、自らの解体工具の検証等も行えます。

② レーザー加工高度化設備



レーザー溶断適応制御システム

3本のロボットアームを利用することで、常に良好な溶断性能を維持しながら廃止措置作業を行うことができます。

10台のワークステーション(SPLICEコード格納)

適切なレーザー照射条件を事前に評価することができます。

つるほんだより

6月16日 スマデコ開所式

スマデコの運用開始にあたり、6月16日、藤田福井県副知事、渕上敦賀市長、山口美浜町長をはじめとする自治体の皆様、国会、県議会、市議会の議員の方々など約60名の参加のもと、開所式が盛大に行われました。

県内企業等に本設備を活用していただき、廃止措置のノウハウ等を得て、廃止措置作業への新規参入の促進や技術力向上に大きく寄与することを目指します。多くの企業の方のご利用をお待ちしております。



テープカットの様子

●スマデコの利用に関するお問い合わせ

敦賀総合研究開発センター
リーザー・革新技術共同研究所
革新技術開発グループ

TEL 0770(21)5033
URL <https://fisd.jaea.go.jp>

原子力機構 広報誌「つるがの四季」No. 118, p7 より転載



「ふげん」のロゴマーク
慈悲の象徴の普賢菩薩が乗って居られる「象」
をイメージしたもの

ふげんREPORT

スマデコで原子炉本体 解体工法の検証

～モックアップ試験フィールドで今年度から開始予定～

**世界初、レーザー切断技術を
原子炉本体の解体に採用**

「ふげん」では、原子炉本体解体作業に向けて、安全かつ確実な解体工法の検証を進めています。

原子炉本体は放射線量が非常に高いため、遮へい効果の高い水中で遠隔操作によって解体作業を行います。解体にはさまざまな工法がありますが、「ふげん」特有の原子炉内部が狭くて複雑な構造に最適な解体工法を選定するために、これまで数々の技術的検討や切断試験などを重ねてきました。その結果、作業の容易性や切断時に飛散する二次放射性廃棄物の発生量の少なさなどから、レーザー切断技術を基幹工法として採用する計画を進めています。

原子炉本体の解体工法としてレーザー切断技術を採用するのは世界初のため、安全かつ確実に実施できるよう、本番に備えて実証試験を行います。この実証

試験は、本年6月に運用を開始した「ふくい」スマートデコミットシヨニング技術実証拠点（スマデ



過去に実施してきた遠隔操作による水中レーザー切断試験状況

コ)の廃止措置モックアップ試験フィールド(試験フィールド)を用いて実施します。

**試験フィールドで
遠隔操作による
切断試験**

本実証試験は、本番に備えて適切な切断条件等の検証や操作員の習熟訓練、さらに今後開発を進める予定の原子炉本体遠隔解体装置の設計への反映などを目的として行います。

具体的には、試験フィールドに設置されている高さ約10・5mの円筒型プールを用いて、実際の高さが約7mになる「ふげん」原子炉本体の解体を想定した水中環境を模擬します。このプールの中に原子炉本体内部に使用されている構造材と同じ試験体を配置し、先端にレーザー切断ヘッドを取り付けた多関節マニピュレータ(工業用ロボット)と高出力レーザー発振器を組み合わせた解体装置を用いて実際に遠隔操作による水中レーザー切断試験を行います。

これまで基礎試験などで得られた遠隔制御方法や切断条件が実用的で安全かつ確実な解体に適用できるかという観点から工学的に検証を重ね、解体までの約5年間をかけて万全の準備を進めていきます。

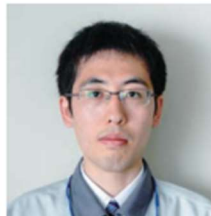


試験フィールドにある円筒型プール(写真上)とタンク内を上下に昇降可能な多関節マニピュレータ(写真下)

この研究に携わっている機構職員

あわ たら けい ひと
栗谷 悠人

敷設廃止措置実証部門
新型転換炉原子炉ふげん
廃止措置部 技術実証課



「ふげん」の原子炉解体には、レーザー切断工法を採用します。レーザー技術は既に金属加工や医療等の一般産業界において広く活用されている安全性の高い技術です。今年度からスマデコを活用した実証試験を通じてさらに万全の準備を行い、「ふげん」の原子炉解体でレーザー切断技術の有効性を証明し、その成果を福井県から国内はもとより世界へ情報発信していきたいと考えています。

XI. ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点
「スマデコ」を企業や大学でご利用いただけます



施設利用案内

ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点
「スマデコ」を企業や大学でご利用いただけます

「スマデコ」は、国内外で多くの原子力発電所が廃止措置へ移行する中、地域企業の廃止措置ビジネスへの参入を促進するための支援施設として、敦賀事業本部に新たに整備したものです。「スマデコ」には3つのフィールドがあり次のような使い方ができます。

利用促進のための企業向け制度も

10月3日には、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが主催する、「廃止措置技術セミナー」の実習でスマデコが利用されました。

当日は、県内企業の方々をはじめ、欧州の発電所の廃止措置について精通する研究者の方も参加され「廃止措置に活用するためのMRシステムのような設備はドイツにはなく、とても興味深い」「欲しくらいだ」との感想がありました。

スマデコは有料の供用施設ですが、初回の利用にあたっては無料で利用できる企業向けの制度もあります。まずは、お気軽に相談ください。今後ともスマデコの3つのフィールドを地域企業の方々に活用いただき、廃止措置等の技術力向上に貢献してまいります。



解体技術検証フィールド

最新のビジュアル設備(MRシステム)を導入し、原子力施設の現場を疑似体験し、現場での作業姿勢や干渉チェック、放射線の可視化による被ばく低減など作業環境の確認ができます。



レーザー加工高度化フィールド

廃止措置作業でのレーザー切断の体験や計算プログラムSPICEにより、事前に被写体をレーザー切断する際の照射条件を評価することができます。



実証試験(モックアップ)フィールド

原子力施設の作業環境を模擬した気中・水中でのロボットを用いたレーザー、プラズマ等により、原子力発電所の実機材の切断試験や解体作業の体験ができます。

〈お問い合わせ〉
高速炉・新型炉研究開発部門
敦賀総合研究開発センター
レーザー・革新技術共同研究所
革新技術開発グループ
TEL: 07770(21)5033(直通)
FAX: 07770(25)5782
URL: <https://fsd.jaea.go.jp/>

3.2. 成果報告会・セミナーの開催

3.2.1. レーザー応用技術 産学官連携成果報告会（平成 29 年度）

平成 29 年 11 月 21 日、22 日の二日間にわたり、プラント技術産学共同開発センター（アクアトム 3 階）「レーザー応用技術 産学官連携成果報告会（平成 29 年度）」を開催した。本成果報告会は敦賀連携推進センターの事業運営や研究成果を産学官連携協力推進の立場で捉え、それらについて広く情報発信し、外的な評価を受けるとともに今後の事業の一層の発展のための協力体制を構築することを目的としたものである。

報告会の冒頭、主催者である原子力機構の田口副理事長・敦賀事業本部長の挨拶に続き、共催者の量子科学研究開発機構 田島理事、若狭湾エネルギー研究センター 岩永専務理事 福井大学附属国際原子力工学研究所 安濃田所長の挨拶を頂いた。基調講演では福井大学産学官連携本部長の米沢晋教授から、廃止措置技術として将来的に利用可能となる超小型化した画像投影装置の開発と、これを眼鏡に装着したスマートグラスの実用化を目指した文部科学省公募事業「ワンチップ光制御デバイスによる革新的オプト産業の創出」、福井工業大学原子力技術応用工学科の来馬克美教授からは「福井県における産学官連携について（エネルギー研究開発拠点化推進への期待）」と題した講演がなされた。

「産業界との連携」、「研究開発法人・財団法人との連携」「大学・学会との連携」のセッションを設け、「産業界人の連携」では、地場産業界と共同開発した技術や装置について、「研究開発法人・財団法人との連携」では、レーザー加工時の物理現象シミュレータ SPLICE の応用事例や、高出力ファイバーレーザーを用いた応用技術の研究開発について、「大学・学会との連携」ではレーザー技術を用いた最先端の研究成果について、外部招待講演 6 件を含む計 9 件の報告と共に活発な議論を行った。また一昨年 12 月からの 1 年間の成果を取りまとめた成果報告書を配布するとともに、敦賀市内 3 箇所の見学ツアーを実施し、ナ・デックス レーザ R&D センターの 100kW 高出力ファイバーレーザ装置、若狭湾エネルギー研究センターのレーザー除染装置、原子力機構レーザー共同研究所のレーザー厚板溶断適応制御システムを用いたデモを実施した。

11 月 21 日：66 名 11 月 22 日：45 名 のべ参加者：73 名



田口副理事長の主催者挨拶



量子科学技術研究開発機構
田島理事の共催者挨拶



若狭湾エネルギー研究センター
岩永専務理事の共催者挨拶



福井大学附属国際原子力工学研究所
安濃田所長の共催者挨拶

主催：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

共催：国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学研究部門

関西光科学研究所、

公益財団法人 若狭湾エネルギー研究センター、

国立大学法人 福井大学附属国際原子力工学研究所

後援：文部科学省、福井県、敦賀市、敦賀商工会議所

場所：敦賀市 アクアトム 3階 プラント技術産学共同開発センター

講演内容一覧

以下、敬称略

【基調講演】

司会：JAEA レーザー共同研究所 村松 壽晴

1. ワンチップ光制御デバイスによる革新的オプト産業の創出

福井大学 産学官連携本部 : 米沢 晋

2. 福井県における産学官連携について（エネルギー研究開発拠点化推進への期待）

福井工業大学 原子力技術応用工学科 : 来馬 克美

【報告】

3. ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点の整備

JAEA 敦賀連携推進センター : 山口 隆司

【産業界との連携】

座長：(公財) 若狭湾エネルギー研究センター 高山 宏一

4. 多軸ロボット協調制御の現状

(株) 安川電機 : 益富 茂樹

5. レーザー遮光カーテンの開発と利用

ウラセ (株) : 針井 智明

6. スマデコ・レーザー加工高度化フィールドの概要

JAEA レーザー共同研究所 : 村松 壽晴

【研究開発法人・財団法人との連携】

座長：レーザー技術総合研究所 井澤 靖和

7. QST における社会実装に向けたレーザー応用研究の進展

量子科学技術研究開発機構 : 越智 義浩

8. 30kW ファイバーレーザーによる厚板切断試験

(公財) 若狭湾エネルギー研究センター : 門脇 春彦

9. 金属材料レーザー加工時の放射光 X 線イメージング観察

JAEA 物質科学研究センター : 菖蒲 敬久

10. SPLICE コードの活用によるレーザーコーティング技術の開発

石川県工業試験場 : 舟田 義則

11. 多機能レーザー加工ヘッド用 3D レーザースキャナの対放射線性試験

量子科学技術研究開発機構 : 阿部 浩之

12. 福井県におけるレーザー関連技術ものづくり

JAEA レーザー共同研究所 : 西村 昭彦

【大学・学会との連携】

座長：JAEA レーザー共同研究所 西村 昭彦

13. レーザーディスプレイのための超小型光学エンジンの研究開発

福井大学 : 勝山 俊夫

14. レーザークリーニングによる鋼構造物のメンテナンス

光産業創成大学院大学 : 藤田 和久

15. 高温燃焼ガス・鋼材を対象とした遠隔 LIBS オンライン分析

徳島大学 : 出口 祥啓

16. コンクリート構造物の高経年化・火災時の劣化について

東京理科大学 : 兼松 学

17. レーザーによる配管補修とその関連

JAEA レーザー共同研究所 : 古澤 彰憲

18. 文部科学省 エネルギー対策特別会計委託事「ナトリウム冷却高速炉における格納容器破損防止対策の有効性評価技術の開発」での活動の紹介

福井大学 : 宇埜 正美

3.3. 各種検討会・見学会の実施

3.3.1. レーザー・革新技術共同研究所 御見学

平成 30 年度は公的機関や民間企業を含めて計 81 件の施設見学の受け入れを実施した。その中から代表的なものを抜粋して以下に紹介する。

○光産業創成大学院大学 御見学

- ・見学日：平成 30 年 2 月 16 日（金）16：00～
- ・見学者：光産業創成大学院大学御一行



○廃止措置セミナー 御見学

- ・見学日：平成 30 年 3 月 15 日（木）9：30～
- ・見学者：廃止措置セミナー参加者御一行



○敦賀商工会議所 御見学

- ・ 見学日：平成 30 年 5 月 22 日（木）14：00～
- ・ 見学者：敦賀商工会議所御一行



○三浦参議院議員 御見学

- ・ 見学日：平成 30 年 10 月 22 日（月）14：00～
- ・ 見学者：三浦参議院議員御一行



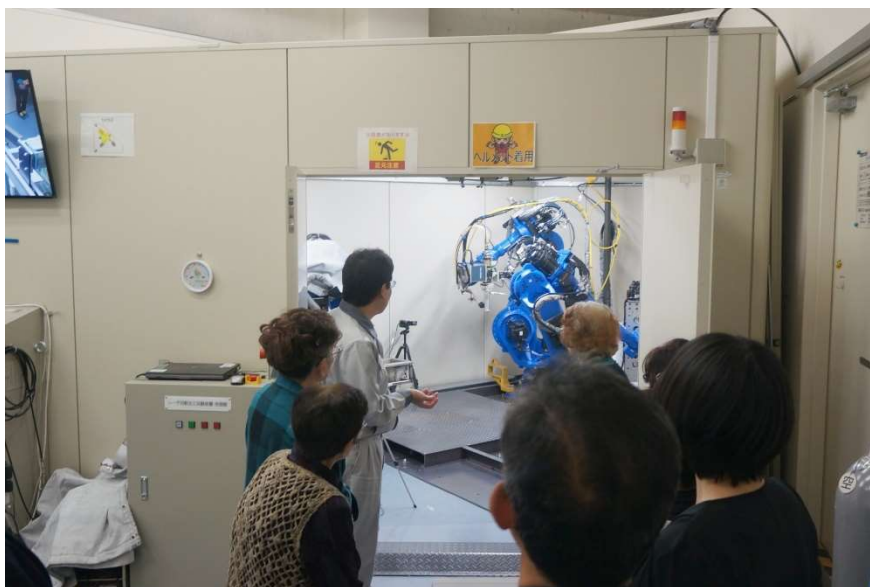
○ふげん廃止措置技術専門委員会 御見学

- ・見学日：平成 30 年 10 月 25 日（木）15：25～
- ・見学者：ふげん廃止措置技術専門委員会御一行



○第 14 次原子力機構モニター・福井 御見学

- ・見学日：平成 30 年 11 月 5 日（月）10：30～
- ・見学者：第 14 次原子力機構モニター・福井参加者御一行



3.4. レーザー技術の普及、人材育成への貢献

3.4.1. 夏期休暇実習生の受入

実習テーマ：原子炉廃止措置のためのレーザー溶断技術高度化に係る実験および数値解析に関する実習

実施日：平成30年9月3日（月）～9月7日（金） 計5日間

時間：9：00～17：00

場所：日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 敦賀総合研究開発センター レーザー・革新技術共同研究所 他

参加者：福井大学 10名 九州工業大学 2名

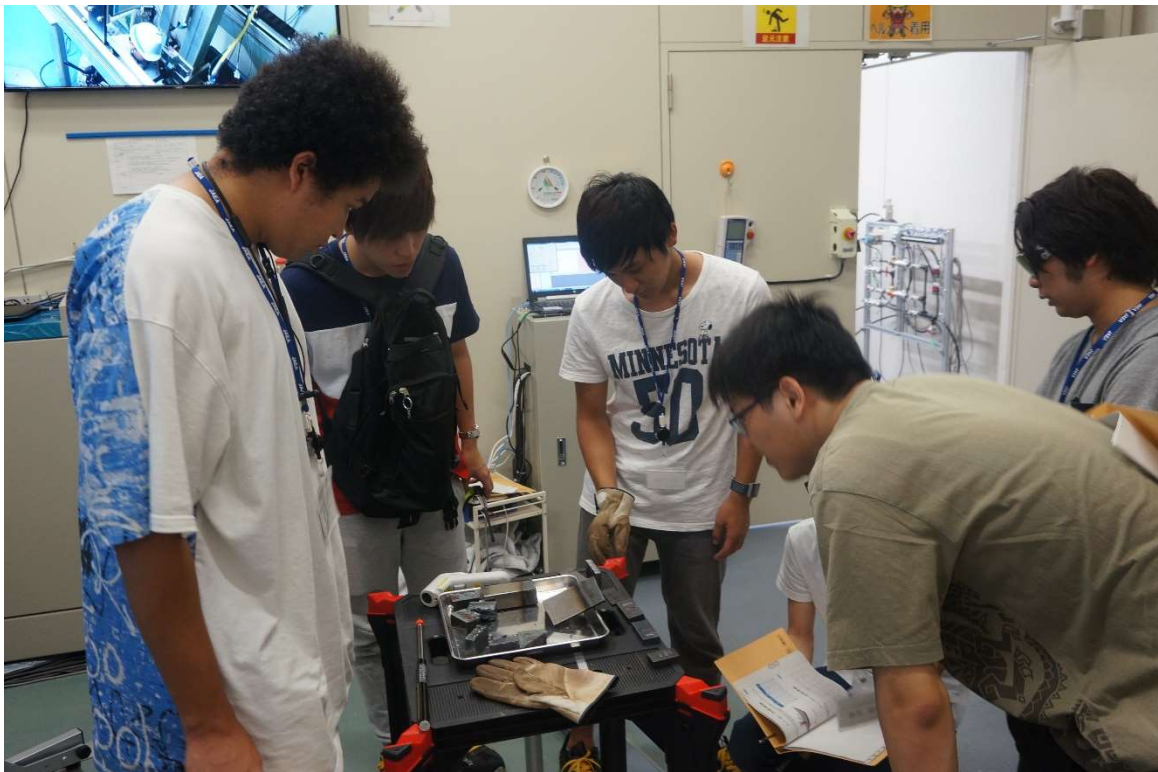
内 容：

本テーマではレーザー加工の基礎となる光学やレーザー溶断技術について学び、実験と計算機シミュレーションの両面から、各種のパラメータがレーザー溶断の特性・溶断面の品質に影響を与えることを体験・実習した。実験とシミュレーションの特徴を理解し、両手法を相補的に用いることが、レーザーの吸収・散乱、熱伝導、溶融、凝固といった複数の物理現象の結果なされるレーザー溶断の高品質化を実現するうえで重要であることを学習した。

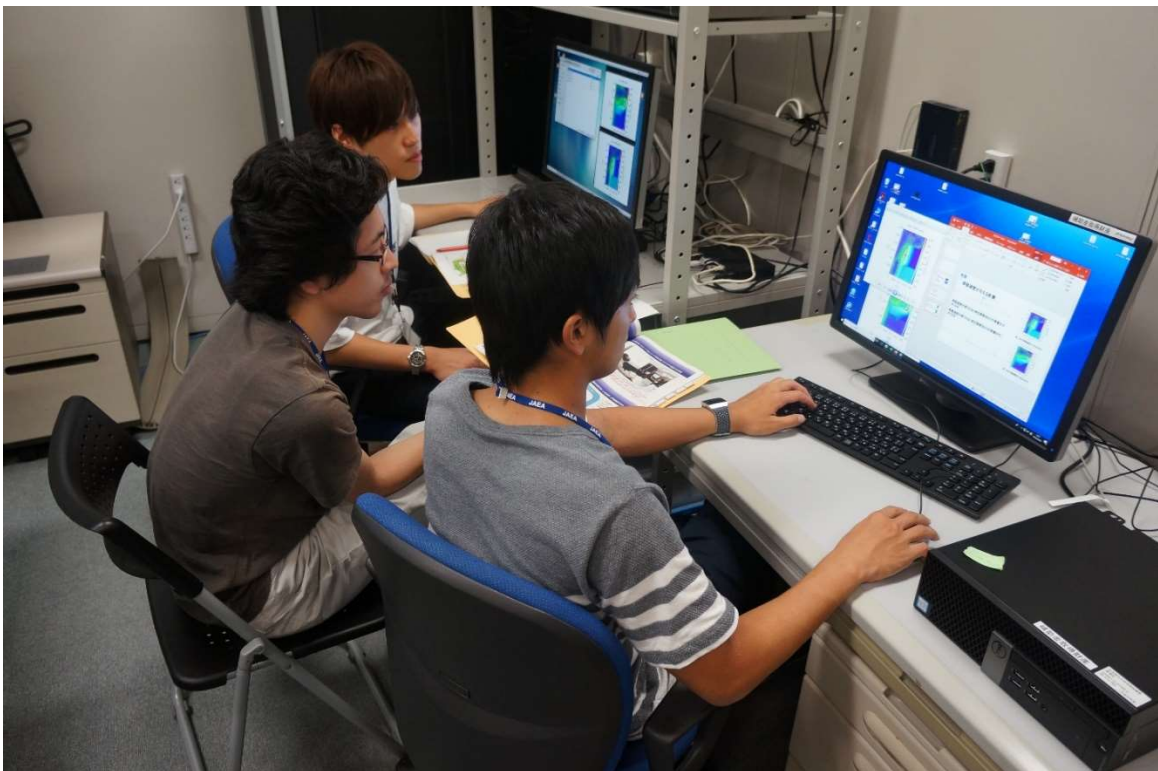
量子科学技術研究開発機構のフェムト秒レーザー装置の見学を通じて、先進的な光技術について学習し、スマートデコミッシング実証施設では廃止措置に必要となるレーザー技術について見学と設備の体験学習を行った。

スケジュール：

月 日	時 間		実習内容
9月3日 (月)	--：--	--：--	-
	13：00	15：00	開講式・レーザー安全教育
	15：00	17：00	レーザー技術の講義
9月4日 (火)	9：00	12：00	レーザー切断実習・SPLICE 実習①
	13：00	16：30	レーザー切断実習・SPLICE 実習②
	16：30	17：00	実習内容のまとめ
9月5日 (水)	9：00	12：00	バス移動
	13：00	16：30	量子科学技術研究開発機構 施設見学
	16：30	17：00	量子科学技術研究開発機構 施設見学
9月6日 (木)	9：00	12：00	レーザー切断実習・SPLICE 実習③
	13：00	15：00	レーザー切断実習・SPLICE 実習④
	15：00	17：00	スマートデコミッシング実証施設見学・体験
9月7日 (金)	9：00	10：00	実習内容のまとめと発表準備
	10：00	12：00	発表・閉講式
	--：--	--：--	-



レーザー切断実習における試験片の切断面を観察する学生らの様子



SPLICE を用いてレーザー照射下の金属の溶融挙動を解析する学生らの様子

3.5. 表彰

本年度は、業務に関し以下の表彰を受けた。

- 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 理事長表彰【研究開発功績賞】を受賞

受賞日 : 平成 30 年 10 月 1 日 月曜日

受賞件名 : レーザーコーティングにおける入熱制御技術の研究開発

受賞者 : 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) レーザーコーティング基礎現象解明グループ

村松 壽晴, 菖蒲 敬久, 吉氏 崇浩

要旨 : 内閣府が進める SIP 国家プロジェクトにおいて、レーザーコーティングを行う際の入熱制御技術を確立し、その成果を装置設計に的確に反映するため、原子力機構が独自に開発したレーザー加工プロセス計算科学シミュレーションコード SPLICE と大型放射光施設 SPring-8 からの高輝度放射光 X 線を利用したレーザーコーティング基礎現象の解明に係る研究開発を実施した。更に、レーザーコーティングを行う際の膜厚、溶け込み深さなどの要求仕様に応じたレーザー照射条件の適切化を効率的に行うことができるよう、SPLICE コードをデジタルモックアップ装置として利用する評価システムを構築した。これにより、レーザーコーティング施工者は、対象とする加工プロセスを設計空間として可視化することが可能となり、レーザー照射条件の設定に掛かる時間などを大幅に短縮することを可能とした。

- 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 理事長表彰【模範賞】を受賞

受賞日 : 平成 30 年 10 月 1 日 月曜日

受賞件名 : ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点の整備完遂

受賞者 : スマデコ実証拠点整備グループ

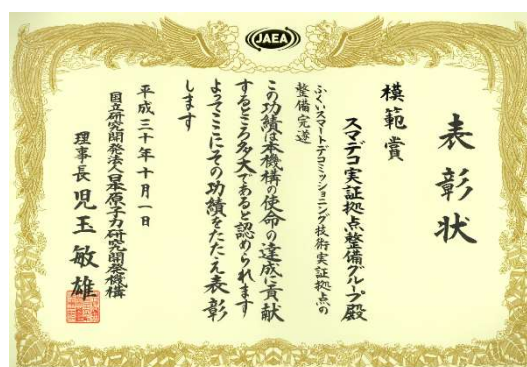
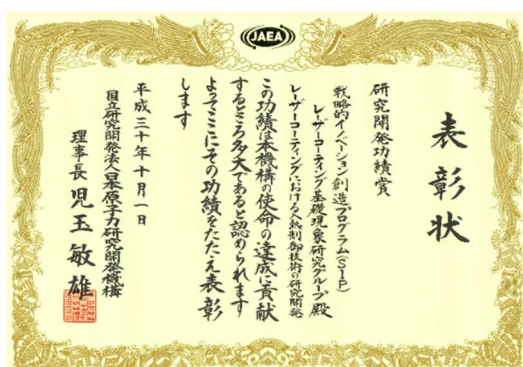
寺内 誠、 岡田 学、 山口 隆司、 村松 壽晴、 水谷 春樹、
尾崎 信治、 竹内 雅昭、 佐野 一哉、 中村 保之、 岩井 紘基、
水井 宏之、 岩井 正樹、 藤枝 定男、 新井 裕一、 山下 良一、
岡本 久彦、 中野 申一、 竹仲 由加里、 中川 奈那

要旨 : 平成 28 年度の文部科学省の支援施策である「地域科学技術実証拠点整備事業」の公募事業に関するものである。「もんじゅ」の廃止措置に関する基本的な計画において、地元雇用や地元経済に大きな影響を与えないよう、地元企業の参入促進や雇用拡大に向け、廃止措置関連業務の計画に関連す

る情報提供や技術交流等を行い、地域振興の取組みに貢献することとしている。このため、「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点」（以下「スマデコ」と略す。）を整備し、地元企業がスマデコを利用することにより、廃止措置に必要となる技術の習得や、新たな技術の開発を行うことを支援する拠点の整備を完遂し、拠点形成に大きく貢献した。

スマデコは、以下の3つのフィールドよりなる。

- (1) 廃止措置解体技術検証フィールド：複合現実感 (Mixed Reality:MR) システムを利用してふげんのプラント内を実寸の臨場感で仮想体験できる設備を整備。
- (2) レーザー加工高度化フィールド：レーザー光を熱源とする廃止措置技術を高度化するため、様々な外界情報のモニタリング機能を備えた多機能レーザー加工ヘッドや溶断性能を常に適切な状態に維持することが可能な適応制御機能を搭載した3本の多自由度ロボットから成る協調制御システム等を設置。
- (3) 廃止措置モックアップ試験フィールド：水中および気中技術実証試験エリアを有し、地元企業が自社開発した技術等のふげんで使用した実機材やモックアップ部材による検証・実証、さらに解体作業の事前確認、体験・習得等の場として利用することができる。



3.6. 各種記事

3.6.1. 平成 29 年 11 月 22 日付福井新聞掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

3.6.2. 平成 29 年 12 月 5 日付読売新聞掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

3.6.3. 平成30年6月17日付中日新聞掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

3.6.4. 平成30年6月17日付朝日新聞掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

3.6.5. 平成30年6月17日付福井新聞掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

3.6.6. 平成30年6月17日付日刊県民福井掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

3.6.7. 平成30年6月17日付毎日新聞掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

3.6.8. 平成30年6月18日付日刊工業新聞掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

3.6.9. 平成30年6月18日付日経産業新聞掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

3.6.10. 平成30年6月19日付産経新聞掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

3.6.11. 平成30年6月20日付電気新聞掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

3.6.12.

平成30年6月20日付日刊工業新聞掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

3.6.13.

平成30年7月20日付日刊工業新聞掲載記事

この記事は著作権法上の都合により閲覧できません。

4. 研究発表等リスト

- 論文発表（平成 29 年 11 月 1 日～平成 30 年 10 月 31 日）…2 件

No	タイトルおよび掲載資料名	発行年月	著者	共著者
1	ふくいスマートデコミッショニング技術実証 拠点の整備；廃止措置技術実証試験センター (仮称) <i>デコミッショニング技報, (57), p. 65 - 74</i>	2018 年 3 月	村松 壽晴	佐野 一哉、寺内 誠
2	A Consideration on the use of shear waves to improve the sensitivity of an optical ultrasonic sensor for under-sodium viewers <i>E-Journal of Advanced Maintenance (Internet), 10(2), p. 1 - 8</i>	2018 年 8 月	猿田 晃一	白浜 卓馬、山口 智 彦、上田 雅司

- 会議等における論文発表（平成 29 年 11 月 1 日～平成 30 年 10 月 31 日）…4 件

No	タイトルおよび掲載資料名	発表年月	発表者	共同発表者
1	放射光 X 線イメージング法によるレーザー照 射下金属粒溶融時空間分解計測 <i>レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会</i>	2018 年 1 月	菖蒲 敬久	小泉 保行、水谷 春 樹、村松壽晴
2	レーザーコーティングシミュレーションコー ド SPLICE の開発とレーザー照射条件の導出 <i>レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会</i>	2018 年 1 月	村松 壽晴	
3	計算科学シミュレーションコード SPLICE によ るレーザー溶融・凝固プロセスの評価 <i>第 89 回レーザー加工学会講演論文集</i>	2018 年 5 月	村松 壽晴	
4	レーザー溶融・凝固プロセス計算科学シミュ レーションコード SPLICE を用いたレーザー照 射加工条件の導出 <i>日本機械学会 2018 年度年次大会講演論文集 (DVD-ROM), F01300(5)</i>	2018 年 9 月	村松 壽晴	

● 解説・特集記事など（平成 29 年 11 月 1 日～平成 30 年 10 月 31 日）…2 件

No	タイトルおよび掲載資料名	発表年月	発表者	共同発表者
1	レーザー加工プロセスの計算科学シミュレーション <i>光アライアンス, 28(12), p. 31 - 35</i>	2017 年 12 月	村松 壽晴	
2	レーザーコーティングプロセスの計算科学シミュレーション <i>レーザー加工学会誌, 25(2), p. 81 - 85</i>	2018 年 4 月	村松 壽晴	

● 口頭発表（平成 29 年 11 月 1 日～平成 30 年 10 月 31 日）…4 件

No	タイトルおよび発表先会議名	発表年月	発表者	共同発表者
1	高付加価値設計製造を実現するレーザーコーティング技術研究開発 -計算科学的手法によるレーザーコーティングシミュレーション- <i>2018 年国際ウエルディングショー</i>	2018 年 4 月	村松 壽晴	
2	「環境負荷低減を目指した革新的レーザー切断技術」 <i>第 1 回 JAEA 技術サロン</i>	2018 年 8 月	村松 壽晴	
3	「環境負荷低減を目指した革新的レーザー切断技術」 <i>ピッチコンテスト 未来 2019</i>	2018 年 12 月	村松 壽晴	
4	「放射光高速イメージングによる金属溶融凝固時空間分解計測」 <i>金属光造形複合加工医療機器フォーラム 第 14 回シンポジウム</i>	2018 年 12 月	菖蒲 敬久	

● SPLICE コード外部利用リスト…7 件

会社名	件名	実施期間	担当者
株式会社 NESI	計算科学シミュレーションコードのユーザビリティ向上に係わる研究	平成 27 年度～	村松壽晴
石川県工業試験場	レーザーコーティングプロセスの定量化に向けた数値解析的研究	平成 28 年度～	村松壽晴
株式会社松浦機械製作所	金属光造形プロセスの定量化に向けた数値解析的研究	平成 28 年度～	村松壽晴
東京工業大学	レーザー照射条件と攪拌抵抗と現象論的解釈に係る数値解析的研究	平成 29 年度～	村松壽晴
九州工業大学	金属光造形加工プロセスの定量化に向けた数値解析的研究	平成 29 年度～	村松壽晴
福井県工業技術センター	金属光造形加工プロセスの定量化に向けた数値解析的研究	平成 29 年度～	村松壽晴
光産業創成大学院大学	光加工プロセスの現象論的解釈に係る数値解析的研究	平成 30 年度～	村松壽晴

● 平成 30 年度共同研究リスト…9 件

共同研究先	件名	実施期間	担当者
株式会社 NESI	計算科学シミュレーションコードのユーザビリティ向上に関わる研究	平成 30 年 4 月 ～ 平成 31 年 3 月	村松壽晴
若狭湾エネルギー研究センター 株式会社ナ・デックス 株式会社ナ・デックスプロダクツ	原子炉構造物を対象としたレーザー切断技術の確立に向けた研究	平成 30 年 4 月 ～ 平成 31 年 3 月	村松壽晴
石川県工業試験場	レーザーによるコーティングプロセスの定量化に向けた数値解析的研究	平成 30 年 4 月 ～ 平成 31 年 3 月	村松壽晴
大阪富士工業株式会社	モルテンプール型レーザーコーティングプロセスの定量化に向けた数値解析的研究	平成 30 年 4 月 ～ 平成 31 年 3 月	村松壽晴
九州工業大学	金属光造形プロセスの定量化に向けた数値解析的研究	平成 30 年 4 月 ～ 平成 31 年 3 月	村松壽晴

古河電気工業株式会社	ファイバーレーザーを用いた材料加工技術等の高度化に関する研究	平成30年4月 ～ 平成31年3月	村松壽晴
作州機工株式会社 津山工業高等専門学校 人形峠環境技術センター	異種鋼材レーザー溶接等加工技術の高度化に関する研究	平成30年4月 ～ 平成31年3月	村松壽晴
福井大学 株式会社ナ・デックス 株式会社ナ・デックスプロダクツ	多自由度ロボット協調制御技術に係る研究開発	平成30年4月 ～ 平成31年3月	村松壽晴
J-PARC 株式会社ナ・デックス D-Laser 株式会社	ファイバーレーザーを用いた水銀ターゲット廃止措置技術の構築に係わる研究	平成30年4月 ～ 平成31年3月	村松壽晴

● 外部資金の取得状況…4件

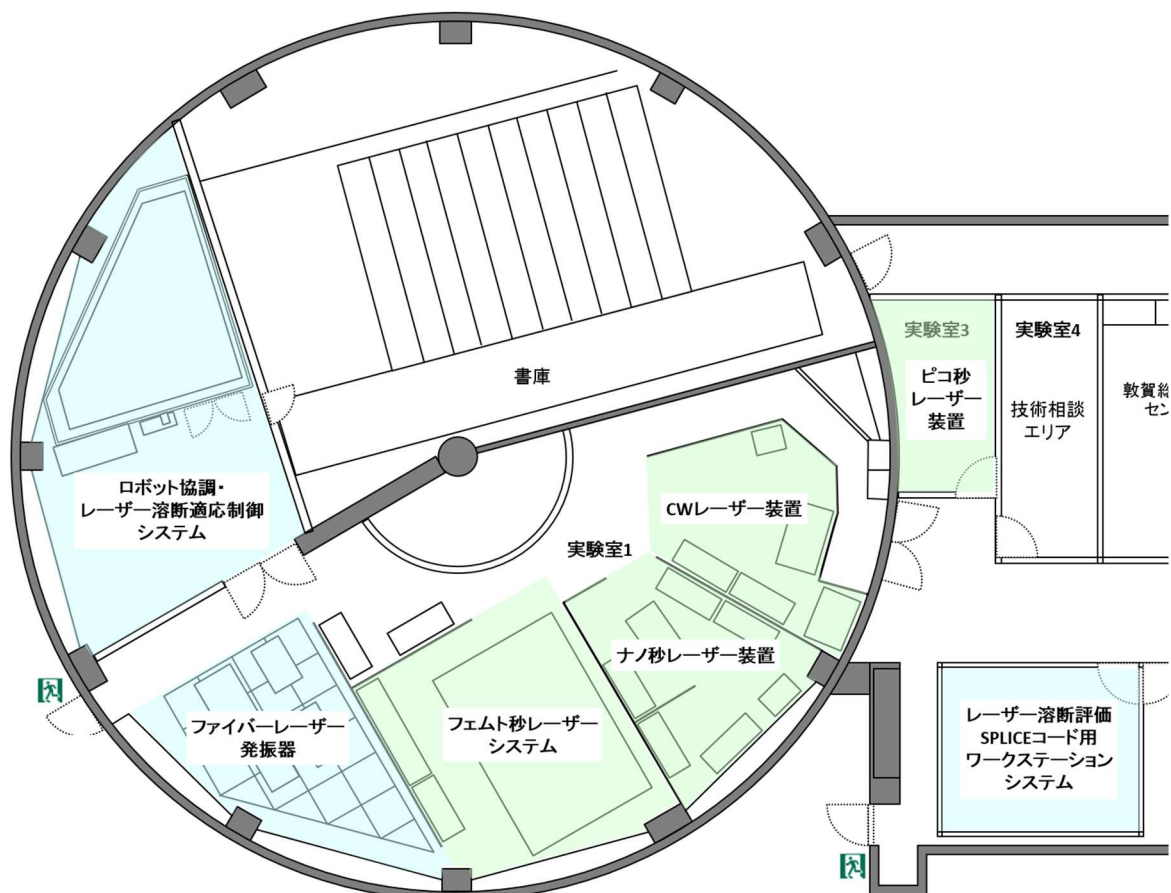
No	研究題名	実施期間	担当者
1	「高付加価値設計・製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発」 <i>戦略的イノベーション創造プログラム, 内閣府</i>	平成25年 ～ 平成30年	村松壽晴 菖蒲敬久
2	「ワンチップ光制御デバイスによる革新的オプト産業の創出」 <i>地域イノベーション・エコシステム形成プログラム, 文部科学省</i>	平成30年 ～	村松壽晴 寺内 誠
3	「異種材料溶接加工における残留応力等の低減に向けた研究開発」 <i>公募研究, 中部電力株式会社 原子力安全技術研究所</i>	平成30年 ～ 平成31年	村松壽晴 亀井直光 菖蒲敬久
4	「廃止措置 放射性二次廃棄物に起因する環境負荷の低減方策に係る研究開発」 <i>原子力機構理事長裁量経費, 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構</i>	平成30年	村松壽晴 猿田晃一 亀井直光 水谷春樹 小泉保行

5. 実験室整備状況

アトムプラザにレーザー実験室を開設してから9年が経過した。この間、敦賀事業本部をはじめとする原子力機構内外のご支援の下、毎年設備の整備・拡充を図ってきた。平成30年度は文部科学省による地域科学技術実証拠点整備事業「ふくいスマートデコミッション技術実証拠点整備」の一部として、レーザー加工高度化フィールド内へのロボット協調・レーザー溶断適応制御システムおよびレーザー溶断評価 SPLICE コード用ワークステーションシステムが整備され、6月16日の開所式を以て本格運用を開始した。

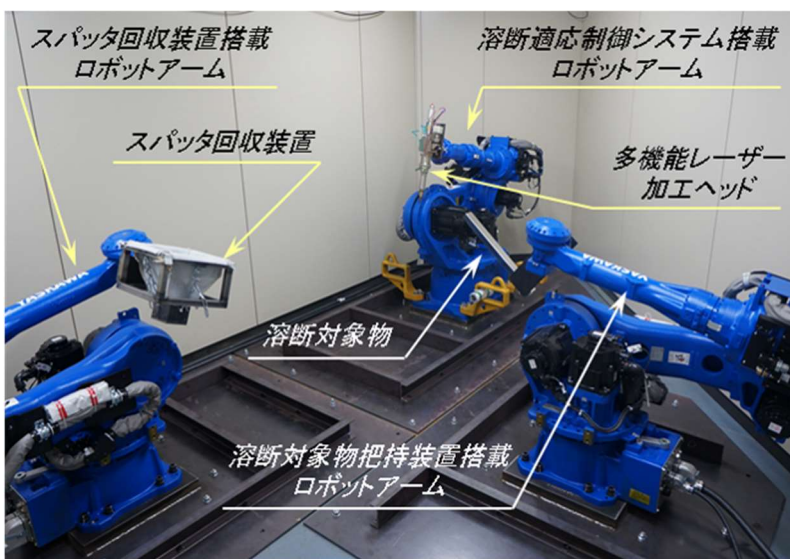
—レーザー加工高度化フィールド—

- 1) ロボット協調・レーザー溶断適応制御システム
 - 2) レーザー溶断評価 SPLICE コード用ワークステーションシステム
-
- 3) フェムト秒レーザーシステム
 - 4) ピコ秒レーザー装置
 - 5) ナノ秒レーザー装置



1) ロボット協調・レーザー溶断適応制御システム

「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点」として整備したレーザー加工高度化フィールドでは、レーザー光を熱源とする廃止措置技術の高度化を行うため、様々な外界情報のモニタリング機能を備えた多機能レーザー加工ヘッドや溶断性能を常に適切な状態に維持することが可能な適応制御機能を搭載した 3 本の多関節ロボットシステム(ロボット協調・レーザー溶断適応制御システム)を設置し、これらを利用することによって加工手順や作業工程の検討を進めることが可能となる。



10kW ファイバーレーザー発振器

《構成》

- 10kW ファイバーレーザー発振器
- 高軌跡精度ロボット 1台
- 汎用性多関節ロボット 2台
- 多機能レーザー加工ヘッド
- 適応制御システム
- スパッタ回収装置

2) レーザー溶断評価 SPLICE コード用ワークステーションシステム

レーザー加工高度化フィールドの両輪をなすレーザー溶断評価用ワークステーションシステムでは、計算科学シミュレーションコード SPLICE による溶断シミュレーションにより、溶断特性などの設計空間を事前に可視化し、レーザー照射条件などの検討を効率的に行うことができる。また、レーザー加工や数値解析などの専門知識を持たない利用者でも、数値解析条件などの入力や解析結果の図形処理などが簡単に行えるよう、専用のグラフィックユーザーインターフェースを導入している。SPLICE コードが実行出来るこれら 10 台のワークステーションにより、SPLICE コードで取り扱う溶融・凝固モデルなどの研究開発も行うことができる。

討議用大型スクリーン

解析用ワークステーション

操作端末



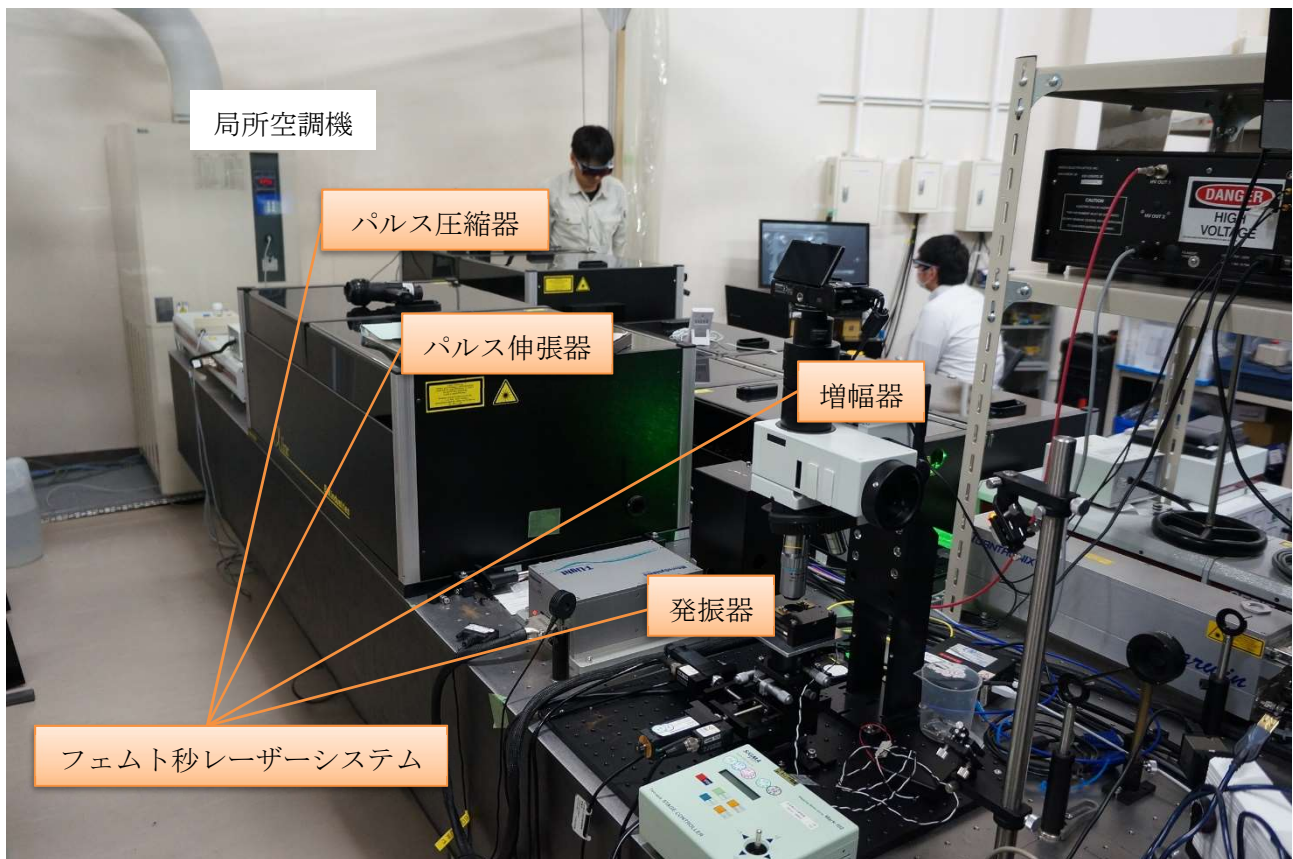
《構成》

- 解析用ワークステーション
型式: Dell Precision T7910、0 S: CentOS7、
CPU: デュアル インテル Xeon プロセッサー E5-2637 v4、
メモリ: 64GB 2400MHz DDR4 RDIMMECC、HDD: 1TB、
台数: 8 台 (並列解析可能)
- ログインサーバー
型式: Dell Precision T3420、0 S: CentOS7、
CPU: インテル Xeon プロセッサー E5-1225 v5、
メモリ: 16GB 2133MHz DDR4、HDD: 1TB、
台数: 2 台 (並列解析可能)
- データ処理用 PC
型式: Dell Optiplex 3040、0 S: Windows10 Pro、
CPU: インテル Core i5 プロセッサー 6500、
メモリ: 8GB 1600MHz DDR43L、HDD: 1TB、台数: 2 台
- データ保存用ディスク
型式: QNAP TVS-471、HDD: 8TB、台数: 2 台

3) フェムト秒レーザーシステム

フェムト秒レーザーをはじめとする超短パルスレーザーは理科学分野での利用が主であるが、近年では材料を非加熱で加工できるという特徴などからシリコンウエハやサファイア基盤のダイシングを目的とした専用レーザー加工機が市販されている。しかし、その産業分野への応用は未だ開拓途上である。

市販のフェムト秒レーザーシステムはオールインワン化され、内部構造を把握することができないが、当研究所で有するフェムト秒レーザーシステムは、元々理科学実験に用いられていた一世代前の構成の装置群であるため内部構造が判りやすく用途に応じて手を加えやすいといったメリットもある。基礎的なレーザー照射試験から、チャープパルス増幅の原理を学びたい学生の実習などで活用することが可能である。



《構成》

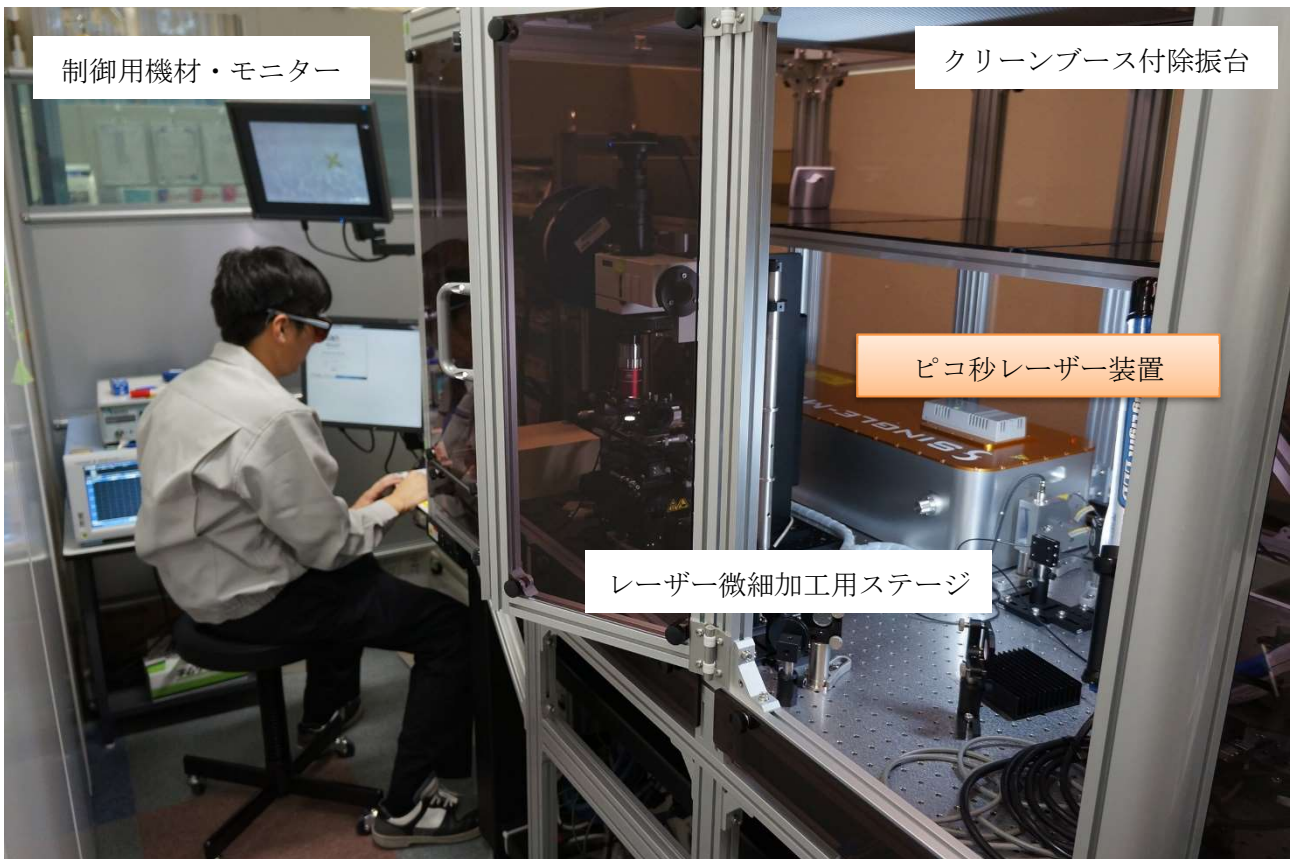
- フェムト秒レーザーシステム

中心波長：790nm，パルス幅：150fs，出力：5mJ，繰返し動作：10Hz

4) ピコ秒レーザー装置

一般にレーザーによる加工が加熱であるか非加熱であるかのパルス幅の目安は 20 ピコ秒程度であるとされているが、近年では装置の小型化が進み、パルス伸張器や圧縮器などを用いない単純な構造で、かつ非加熱加工が可能なレーザー光源として、10 ピコ秒前後のパルス幅のレーザー発振器・加工機が様々なメーカーから発売されている。

当研究所では、短パルスレーザーを用いたレーザー微細加工技術精度を向上させるため、フェムト秒レーザー装置よりも出力安定性の高いピコ秒レーザー装置と高速位置決めステージを導入し、これらが整備されている状況である。



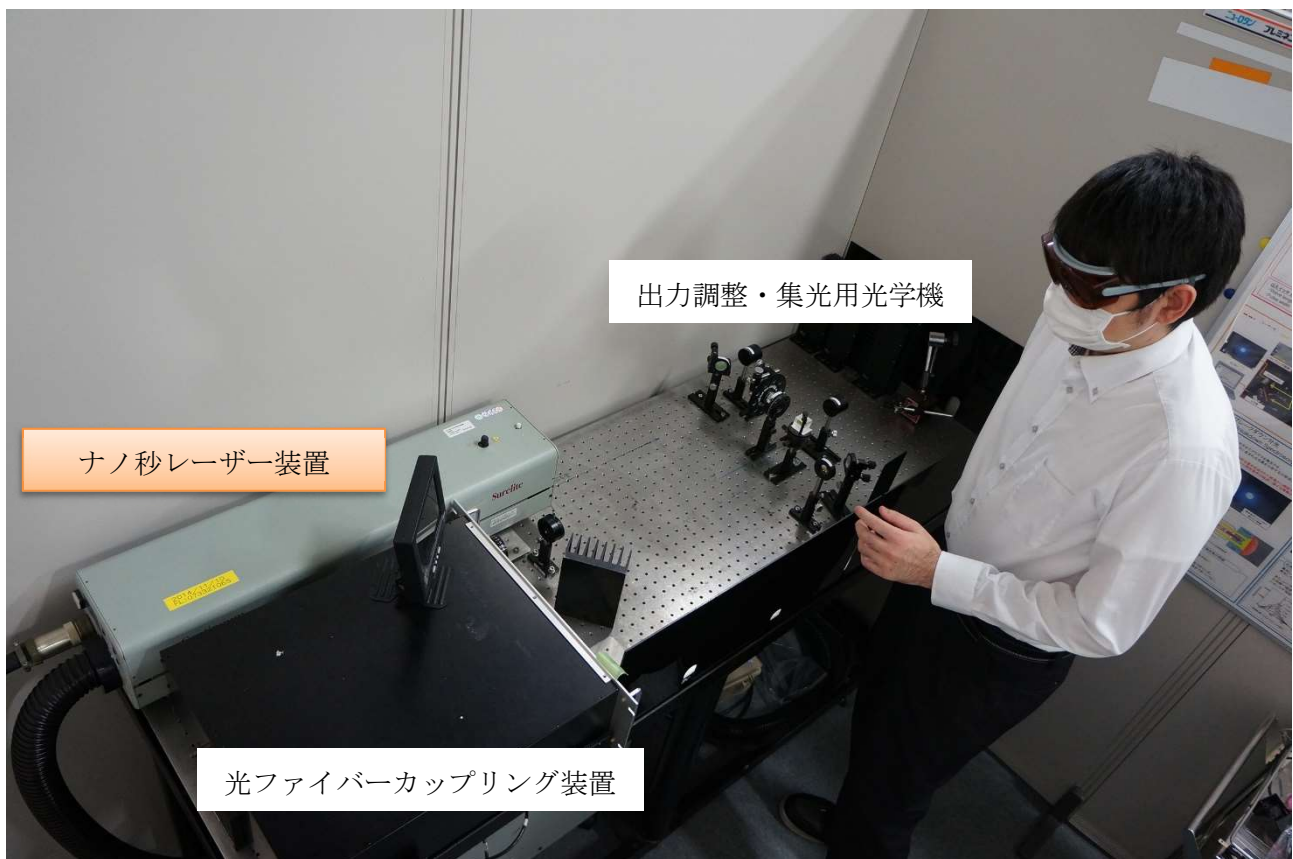
《構成》

- ピコ秒レーザー
波長：1,031nm, パルス幅：3ps, 出力：平均 5W, 繰返し動作：100～300kHz
- 加工ステージ
共焦点顕微鏡と高速直進ステージを組み合わせたレーザー微細加工用ステージ

5) ナノ秒レーザー装置

Qスイッチ発振方式の Nd:YAG レーザーは、パルスレーザーの代表格として産業分野でも幅広く使われており、金属材料への精密穴あけ加工の他、金属表面に応力腐食割れ防止効果を付加するレーザーピーニングと呼ばれる表面改質加工などにも役立てられている。

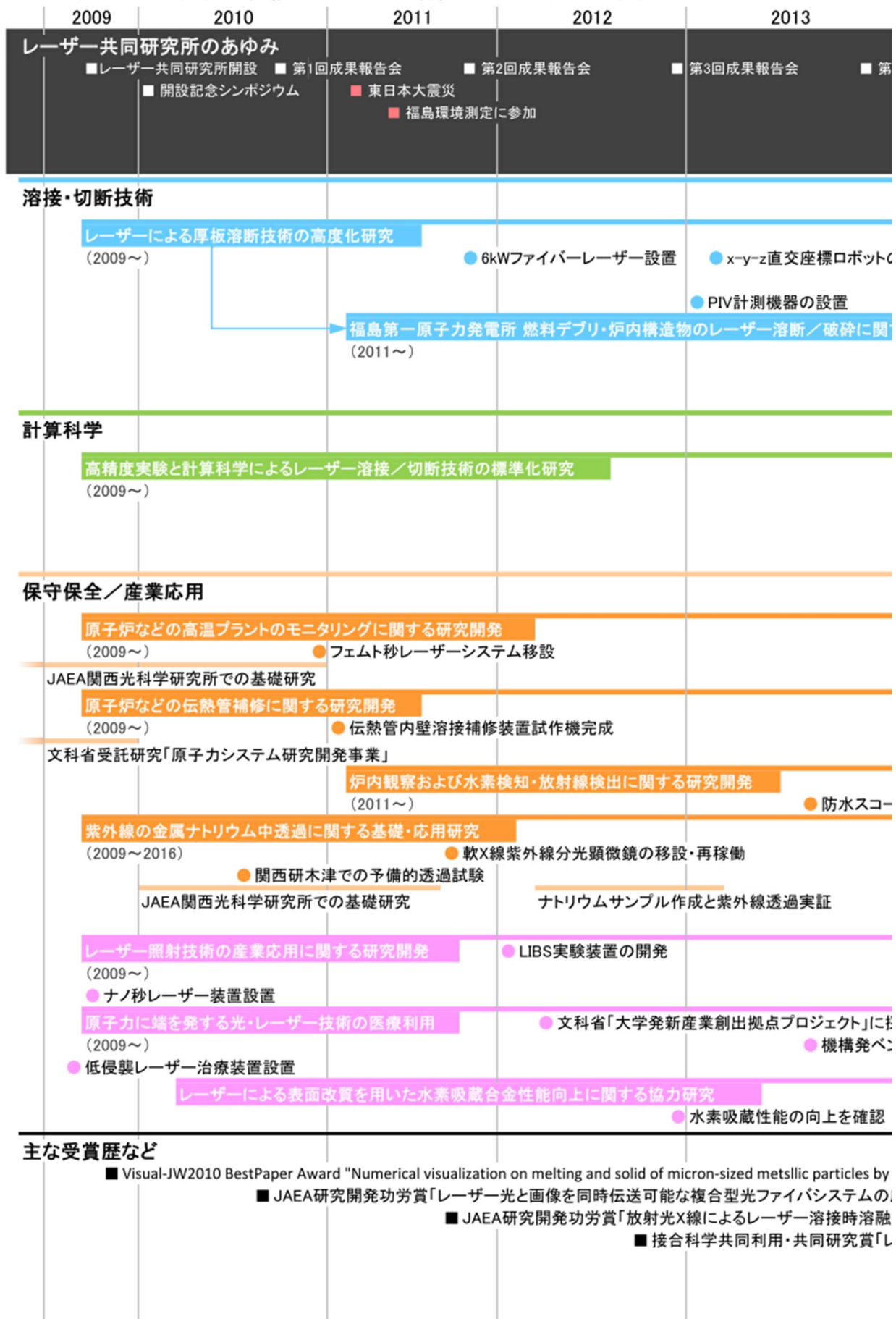
当研究所では、近赤外波長の基本波と可視波長の第二高調波の2波長のレーザー光を出力可能な Nd:YAG レーザーに加え、ミラー・レンズなどを各種光学機器や位置決めステージ、光ファイバーとのカップリング装置などを組み合わせることで、ナノ秒レーザーパルスを使った精密加工やプラズマ分光分析への応用が可能である。

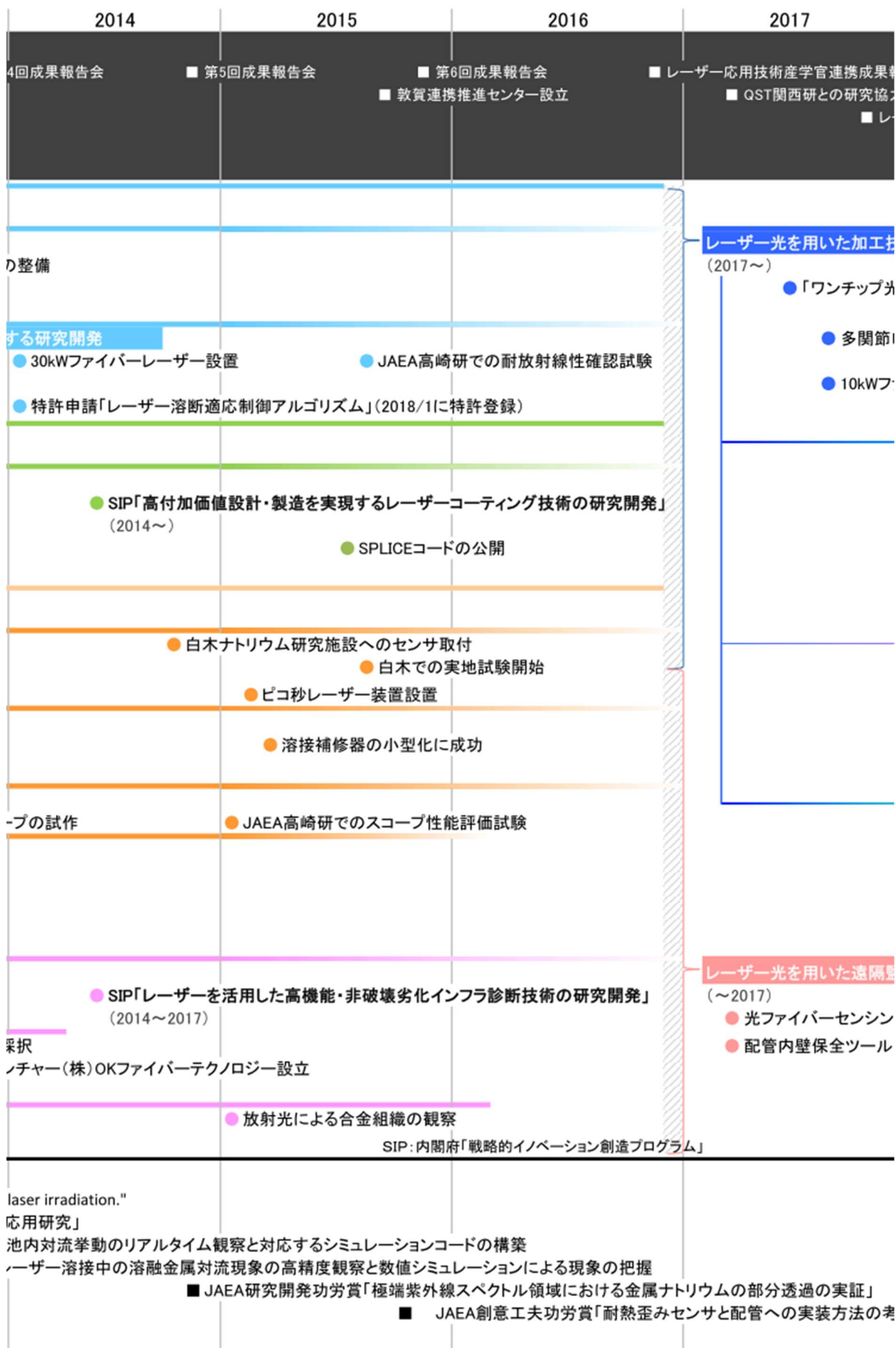


《構成》

- ナノ秒レーザー
波長：基本波 1,064nm / 第2高調波 532nm, パルス幅：6ns,
出力：基本波 270mJ / 第2高調波 130mJ, 繰返し動作：10Hz
- 光ファイバーカップリング装置
- 位置決めステージ
- 出力調整用や集光用の各種光学機器

日本原子力研究開発機構 レーザー・革新技術共同研究所の展開





2018	2019～
報告会(平成28年度) 力の締結 ■ 敦賀総合研究開発センター設立 レーザー応用技術産学官連携成果報告会(平成29年度)	■レーザー応用技術産学官連携成果報告会(平成30年度)
技術に関する研究開発	
制御デバイスによる革新的オプト産業の創出」	
ロボットアーム協調制御システム整備	
ファ이버レーザー整備	
→ ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点をを用いた研究開発 (2018～)	
<ul style="list-style-type: none"> ●「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点整備」 ● 中部電力原子力安全技術研究所公募研究「異種材料溶接加工における残留応力等の低減に向けた研究開発」 <ul style="list-style-type: none"> ● スマデコ・レーザー加工高度化フィールドのユーザビリティ向上に関する地元企業との共同研究 ● 理事長裁量経費を用いた研究「廃止措置 放射性二次廃棄物に起因する環境負荷の低減方策に係る研究開発」 	
→ レーザー加工プロセス適応/協調制御技術の研究開発 (2018～)	
	<ul style="list-style-type: none"> ● 協調制御アルゴリズム開発用6軸制御ロボットアームシステム整備(2019予定)
→ レーザー加工プロセス計算科学シミュレーションコード SPLICE 数値/知識処理モデルの研究開発 (2018～)	
<ul style="list-style-type: none"> ● SPLICEコード クラウド化へ向けた環境整備 	<ul style="list-style-type: none"> ● SPLICEコード拠点装置汎用化設備(クラウドサーバマシン)設置 ● SPLICEコード 一般公開(2019予定)
点検・補修に関する研究開発	
グの研究開発	
の研究開発	
<ul style="list-style-type: none"> ■ JAEA研究開発功績賞「レーザーコーティングにおける入熱制御技術の研究開発」 ■ JAEA模範賞「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点の整備完遂」 	
案」	

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
敦賀総合研究開発センター レーザー・革新技術共同研究所
レーザー応用研究グループ
〒914-8585 福井県敦賀市木崎 65 号 20 番地
電話番号 (研究所代表番号) : 0770-21-5050
ホームページ : <http://www.jaea.go.jp/04/turuga/laser/index.html>