

令和元年度 成果報告書

【平成 30 年 12 月～令和元年 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・革新技術共同研究所

レーザー応用研究グループ



表紙写真：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」実験時の様子

中部電力株式会社原子力安全技術研究所の公募研究「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」において、溶接試験片を垂直に配置し、レーザーを水平に照射して溶融部に働く重力方向が変化した条件での異種材料溶接のためのセッティングを行っている様子である。製作した溶接試験片はSPring-8放射光X線を用いて残留応力の測定を行い、これを低減する制御方法の検討を実施する。

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. 令和元年度の動き	7
3.1.2. 参考論文等の掲載	7
3.2. 成果報告会・セミナーの開催	18
3.2.1. レーザー応用技術 産学官連携成果報告会（平成 30 年度）	18
3.3. 各種検討会・見学会の実施	21
3.3.1. レーザー・革新技術共同研究所 御見学	21
3.4. レーザー技術の普及、人材育成への貢献	24
3.4.1. 夏期休暇実習生の受入	24
3.5. 表彰	26
3.6. 各種記事	27
3.6.1. 平成 30 年 12 月 12 日付電気新聞掲載記事	27
3.6.2. 平成 31 年 2 月 2 日付静岡新聞掲載記事	28
3.6.3. 平成 31 年 2 月 13 日付電気新聞掲載記事	29
3.6.4. 令和元年 6 月 14 日付電気新聞掲載記事	30
4. 研究発表等リスト	31
5. 実験室整備状況	34

1. 成果報告書出版にあたって

昨年4月の組織変更により、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は、旧レーザー共同研究所における研究活動の全てを引き継ぐ形で継続してきている。すなわち、平成21年9月に設立した旧レーザー共同研究所は、原子力分野、一般産業分野などへのレーザー技術の応用研究を10年に亘って進めて来ており、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、ここでの成果を定例の「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側面も持つ。

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）」を進め、平成30年度末には5年間の研究開発成果をNEDOに提出するとともに、NEDO ホームページ上にこれを一般公開して活動を終了した（<https://app5.infoc.nedo.go.jp/disclosure/SearchResultDetail>）。

他方、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（スマデコ；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ている状況にある。

更には、平成30年4月には、中部電力株式会社原子力安全技術研究所による公募研究事業に、「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」が採択され、2年間に亘る研究活動をスマデコ環境を利用して進めている状況にある。

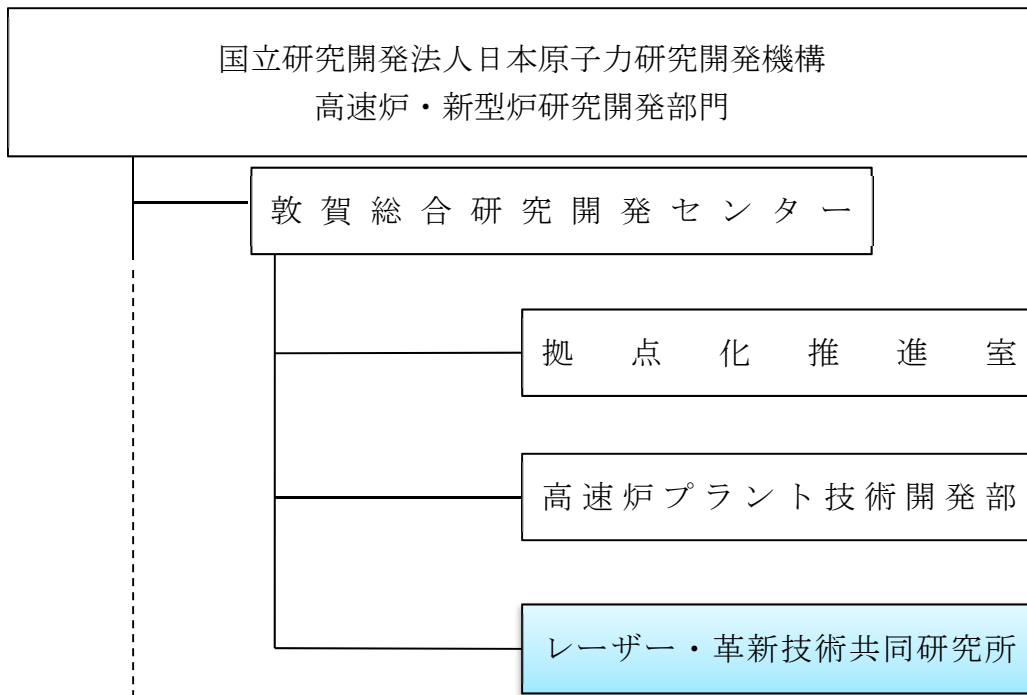
以上のように旧レーザー共同研究所の研究活動を引き継ぐこれまで研究成果が対外的に評価されつつある中で、研究開発テーマは、基礎・基盤的なスタンスを保ちつつも産学官での利用を念頭に置いた、応用面を意識・強調したものに変遷しつつある。この代表的な研究開発成果が、レーザー加工プロセスの適応制御アルゴリズムの実証試験であり、更にはレーザー加工プロセスの計算科学シミュレーションコードの産学官での実利用である。

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

に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



令和元年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. 令和元年度の動き

原子力機構内では、敦賀地区をはじめとして各拠点においてレーザーを活用した技術開発と活用（溶断・穿孔・破砕・溶接・接合・表面処理・精密計測など）が行われているものの、現状では夫々の拠点での技術や研究成果を横通しする仕組みが十分に機能していない状況にある。

この状況を打破するため、原子力機構内を横通しする「技術連絡会」状の組織を立上げ、各拠点での活動について情報・意見交換を行うフィールド、およびこれからレーザー技術を活用しようとしている拠点に適切なアドバイスや提言を行えるフィールドとして活動することが経営層より求められている。

この観点において、レーザー応用技術の研究開発フィールドを有する敦賀総合研究開発センターを中心に、「レーザー応用技術高度化連絡会」を平成30年度に立上げ、原子力機構内各部門におけるレーザー応用技術に係るニーズ・シーズの情報共有を行うとともに、必要に応じて外部機関（大学、企業、研究機関）とも連携して研究開発を進めている。

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

スマートプロセス学会誌 Vol. 8, No1(2019) p4-p8 村松壽晴

【令和元年11月6日 一般社団法人 スマートプロセス学会より許諾済】

II. 計算科学シミュレーションコード SPLICE による異種材料レーザー溶接プロセスの数値解析

日本機械学会 第13回生産加工・工作機械部門講演会、予稿集16.

村松壽晴、佐藤雄二、亀井直光、青柳裕治、菖蒲敬久

【令和元年11月1日 一般社団法人 日本機械学会より許諾済】

III. さらなる技術力の向上へ ～地元企業の廃止措置市場への参入を支援中～

原子力機構 広報誌 「つるがの四季」 No. 121, p6

I. 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



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

Provision of Laser Irradiation Conditions for Melting and Solidification Processes using Computational Science Simulation Code SPLICE

村松 壽晴*
Toshiharu MURAMATSU

Key Words: Laser Material Processing, Computational Science, Numerical Simulation, Front-loading, Response Surface

1. 緒言

昨今のレーザー加工技術に関する展示会などからも分かるように、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様々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。更には、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

るために開発中の計算科学シミュレーションコード SPLICE の概要と各種レーザー加工プロセスへの適用例を実験結果などとともに紹介する。更に、加工プロセスに対する設計空間を可視化することにより、レーザー加工に付随するオーバーヘッドを大幅に低減させ得る方法として、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に対する実現見通しについて述べる。

2. 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、レーザー加工時に現れる様々な物理現象 (Fig. 2)、例えばレーザー光-物質相互作用 (波長吸収-分子振動誘起による発熱)、半溶融帯 (Mushy zone) 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様々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. 評価事例

3.1 溶断プロセスシミュレーション

ここでは、厚さ 30 mm の SS400 軟鋼材を対象とした溶断

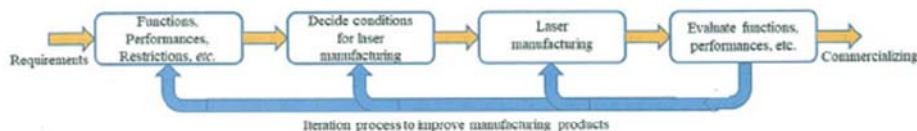


Fig. 1 Overhead in iterative manufacturing processes.

* 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 (〒914-8585 福井県敦賀市木崎 65-20)
Japan Atomic Energy Agency, Tsuruga Comprehensive R&D Center, Laser and Innovative Technologies Research Institute
(65-20 Kizaki, Tsuruga, Fukui 914-8585, Japan)

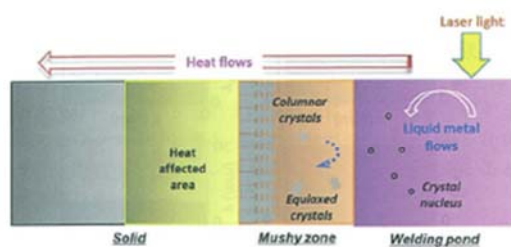


Fig. 2 Physical phenomena appearing in laser manufacturing processes.

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	Lambert-Beer's law
3. Physical models	THINC / WLC methods
• Laser irradiation	Surface tension force with Marangoni effects
• Interface tracking	Temperature recovering methods
• Free surface	
• Phase change	

プロセスの実験解析結果を紹介する。実験では、レーザー出力を4 kW (光径0.8 mm)、アシストガス流量を30 L/min、スタンドオフを2 mmに固定した条件において、左から右に移動するレーザー光のスイープ速度をパラメータ (60 mm/min, 70 mm/min, 80 mm/min および 90 mm/min) とし、溶断時のドラグラインなどが確認された。SPLICE コードによる数値解析では、SS400 軟鋼材を含む2次元空間領域 (50 mm×70 mm) を0.5 mm サイズの均等メッシュで分割して評価を行った。

Fig. 3は、数値解析開始後に溶断プロセスが安定に進行しているタイミングでの瞬時温度場を取出し、実験でのドラグラインと比較したものである。なお、数値解析による瞬時温度場中には、ドラグラインに相当する溶融池の気液界面を点線で示した。同結果より分かるように、スイープ速度が増すに従って溶融池の気液界面の傾きが緩和し、溶断性能の劣化傾向を裏付けるものとなっている。このような変化は、実験によるドラグライン変化の傾向と一致する。すなわち、スイープ速度が70 mm/min以下の条件では、液体金属が順調に排出されたことによってドラグラインの傾きが大きくなっているのに対し、スイープ速度が80 mm/min以上の条件では、液体金属の排出劣化によってドラグラインがカーブする。

3.2 金属光造形加工プロセスシミュレーション

ここでは、母材 (SS400 軟鋼材) 表面にスキージング高さ0.25 mmで敷き詰められた造形金属粉 (ハステロイ) に、レーザー光310 W (光径0.9 mm) を左側から右側に向かってスイープ (5.0 mm/s) する場合を想定し、2次元空間領域

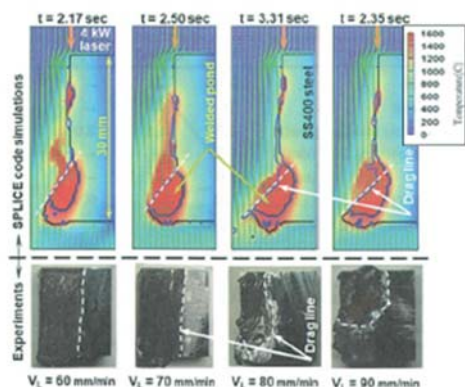


Fig. 3 Comparison of the drag line characteristics.

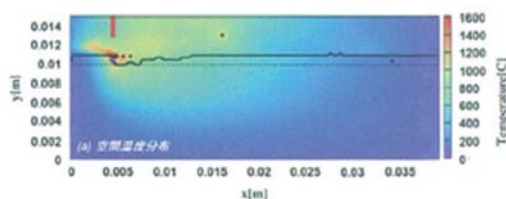


Fig. 4 Spatial temperature distribution in an additive manufacturing processes.

域 (40 mm×15 mm) を0.25 mm サイズの均等メッシュで分割して評価を行った。なお、上記数値解析条件は、金属光造形加工プロセスに影響を与えるレーザー光径とスイープ速度から成る設計空間を対象として事前評価を行い、熱影響範囲および軸方向温度勾配の両者が最小となるよう導出したものである⁴⁾。

Fig. 4に、金属光造形4層 (2往復) 終了時の空間温度分布および再凝固分布を示す。図中の点線が母材表面、その上部が再凝固を経た積層領域であり、溶融領域は母材中には及んでおらず、積層領域は概ね均質な状態となっていることが分かる。

3.3 コーティングプロセスシミュレーション

ここでは、レーザー光 (0.2 mm) と金属粉 (20 μm 径チタン) を母材 (軟鋼材) 表面に向かって噴出し、これを左から右に向かってスイープ (1,000 mm/min) する場合を想定し、2次元空間領域 (50 mm×30 mm) を0.25 mm サイズの均等メッシュで分割して Table 2 に示した計4ケースの評価を行った。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は、式 (1) の関係を想定した。

$$\Delta T \equiv \frac{D_E}{(d_L/2)^2 \epsilon \pi \gamma_V V_T Q_T A \rho C_p} \quad (1)$$

Table 2 Computational conditions for the SPLICE code.

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	←

ここで、 D_E : エネルギー密度 (J/mm²)、 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)、 V_F : 計算セル体積 (mm³)、 A : 計算セル断面積 (mm²) である。

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. 5 に比較する。

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。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分かる。

4. 設計空間の可視化とフロントローディング

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、単位面積当たりの母材への入熱量 E (kJ/mm²) と金属粉供給量 W (g/mm²) 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。

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

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

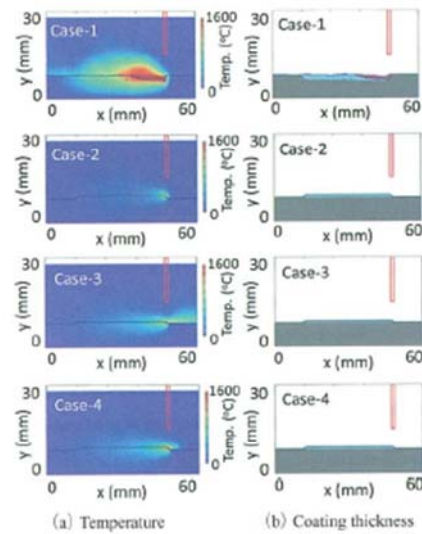


Fig. 5 Spatial distributions of temperature and coating thickness.

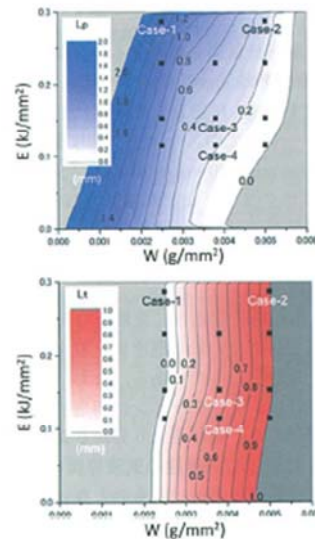


Fig. 6 Visualization of design space by response surface functions.

ここで、 P_L : レーザー出力 (W)、 V_L : スweep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. 7に示した溶融・凝固後の青色領域の様子から分かる通り、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。結果より分かる通り、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(流速急上昇による空間温度分布の形成)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。

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

ここで、 β : 体膨張係数 ($1/^\circ\text{C}$)、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 ΔT : 温度差 ($^\circ\text{C}$)、 l_c : ガス空間高さ (m)、 ν_c : 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(点線箇所)は、発生していない場合の約1.3倍となっており、母材固相中で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割が気相中に輸送された結果、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 フロントローディング機能

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なため、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、更なるユーザー

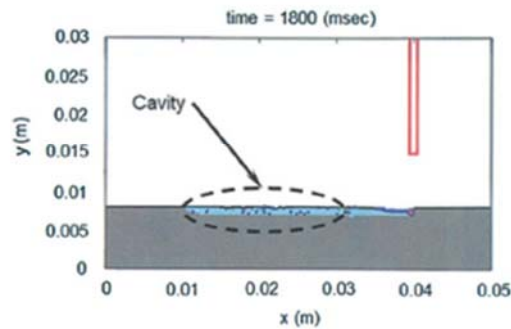


Fig. 7 Cavities in the case of combination of E=0.153 and W=0.0025.

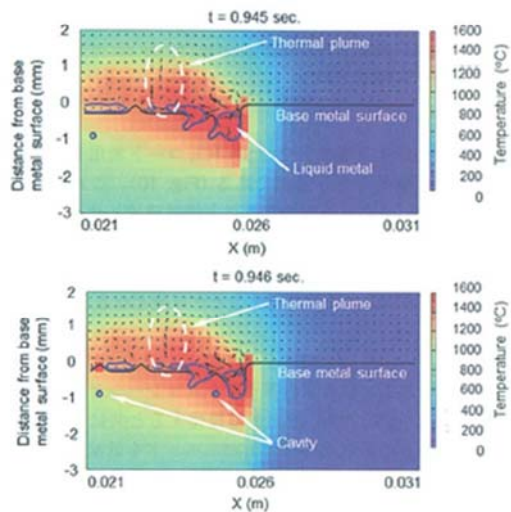


Fig. 8 Generation process of the cavities.

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。

上記したSPLICEコードによる数値解析結果は、クロック周波数2GHz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、超並列パソ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。しかしながら、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更に低いものとなる。今後は、ネットワーク環境を更に高

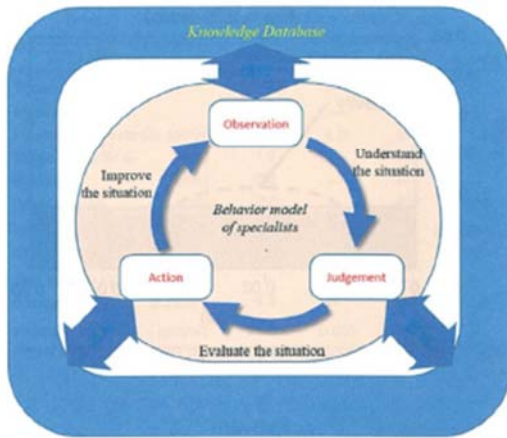


Fig. 9 Enhancement of evaluation functions by the use of knowledge engineering processes.

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)も、SPLICE コード運用に係るコストを押さ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。更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。

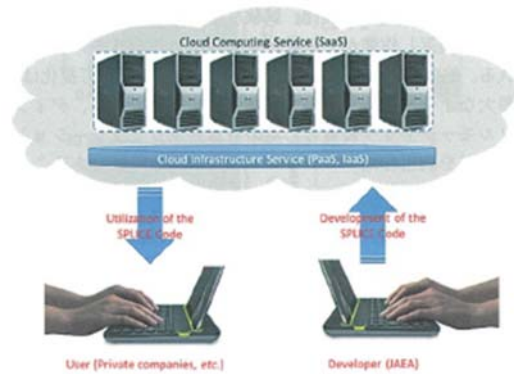


Fig. 10 Development of cloud computing environment for the SPLICE code.

引用文献

- 1) 村松 壽晴、山田 知典、羽成 敏秀、武部 俊彦、松永 幸大、“レーザー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、“レーザー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) T. Muramatsu, “Thermohydraulic Aspects in Laser Welding and Cutting Processes”, Proc. The 31th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics (ICALEO-31), 1904, (2012) 661-669.
- 4) 村松 壽晴、“レーザー加工プロセスの計算科学シミュレーション”、日本工業出版「光アライアンス」、28-12、(2017)31-35。

代表者メールアドレス

村松壽晴 muramatsu.toshiharu@jaea.go.jp

II. 計算科学シミュレーションコード SPLICE による異種材料レーザー溶接プロセスの数値解析

Copyright©2019 一般社団法人 日本機械学会

B16

計算科学シミュレーションコード SPLICE による 異種材料レーザー溶接プロセスの数値解析

Numerical Simulation of Laser Welding Different Kinds of Materials
using a thermohydraulics Computational Science Numerical Simulation Code SPLICE

○正 村松 壽晴^{*1}, 正 佐藤 雄二^{*1}, 亀井 直光^{*1},
青柳 裕治^{*1}, 菖蒲 敬久^{*1}

Toshiharu MURAMATSU^{*1}, Yuji SATO^{*1}, Naomitsu KAMEI^{*1},
Yuji AOYAGI^{*1} and Takahisa SHOBU^{*1}

^{*1} 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency

A general-purpose three-dimensional thermohydraulics computational science numerical simulation code SPLICE was applied to laser welding processes for different kinds of materials to understand the phenomenological welding and solidifying mechanisms of both the materials. The SPLICE code was developed at JAEA (Japan Atomic Energy Agency) and designed to deal with gas-liquid-solid consolidated incompressible viscous flows with a phase change process in various laser applications, such as welding, piercing, drilling, cutting, etc. The solves mass, momentum and energy conservation equations simultaneously in finite different form to evaluate various complex phenomena, such as a laser light-material interaction, liquid metal thermohydraulics in welded pond with a mushy zone, residual stress characteristics in welding processes, etc. The result obtained from the numerical simulation of the laser welding process for different kinds of materials is very encouraging in the sense that the SPLICE code would be used as one of the efficient tools for the evaluation of thermohydraulic phenomena in the welded pond.

Key Words : Laser light, Welding, Welded pond, Computational science, Numerical simulation, Thermohydraulics

1. 緒 言

一般的な産業機械から発電プラントに至るまで、利用環境等に応じた異種材料の適切な接合によって、意図した性能を十分に発揮することが可能な製品の製作がなされている。例えば、原子炉圧力容器の設計・製作では、低合金鋼の内面に耐腐食性向上を目的として、ステンレス鋼による肉盛り溶接などが一般的に行われている。他方、これらの製品寿命期間中の構造健全性を担保する観点から、残留応力等を適切化することの必要性に迫られている。しかしながら、肉盛り溶接に伴うプロセス自体が、固相から液相に亘る溶融池内での非線形複雑物理挙動を伴うものであり、残留応力特性に影響を及ぼす因子群が不定であるといった課題が残されている。

本研究は、レーザー光を熱源として用いた異種材料溶接を対象とし、溶接時の温度管理等を適切に行うことによって、発生する残留応力を低減させることを目的としたものである。レーザー光を熱源とした溶接工法は、直径 1mm 程度に集光したレーザー光を熱源とするため、熱的な影響範囲が狭いと同時に局所加工性に優れ、またファイバー伝送が可能なことから、遠隔操作性にも優れていることが大きな特徴であるものの、残留応力の発生から逃れられる訳ではない。

本報告では、残留応力発生に大きな影響を及ぼす溶融池の凝固過程における過渡空間温度分布挙動を、溶融・凝固プロセス計算科学シミュレーションコード SPLICE によって評価し、異種材料溶接加工時の伝熱流動特性として考察した結果について述べる。

2. 溶融・凝固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、レーザー加工時に現れる様々な物理現象 (図 1)、例えばレーザー光-物質相互作用 (波長吸収-分子振動誘起による発熱)、半溶融帯 (Mushy zone) を介した熔融金属-固体材料間の熱的機械的相互作用、溶融・凝固相変化挙動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。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 (1) 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表 1 にまとめる。

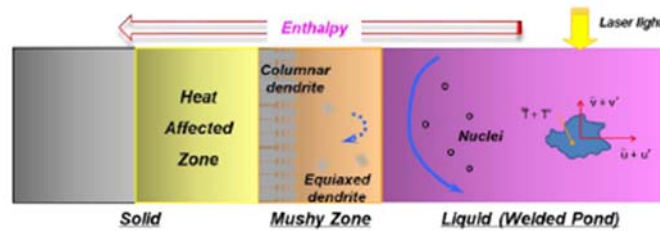


Fig. 1 Physical phenomena appearing in laser manufacturing processes

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	
• Discretization	Finite difference method with staggered mesh arrangements
• Time integration	2 nd order Runge-Kutta method
• Approx. method for convection terms	5 th order WENO method
• Matrix solver	AMG-BiCGstab method
3. Physical models	
• Laser irradiation	Lambert-Beer's law
• Interface tracking	THINC / WLIC methods
• Free surface	Surface tension force with Marangoni effects
• Phase change	Temperature recovering methods

3. 異種材料レーザー溶接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 コードを銅-炭素鋼 (S55C) 系の異種材料溶接プロセスに適用した。図 2 に解析モデルを示す。

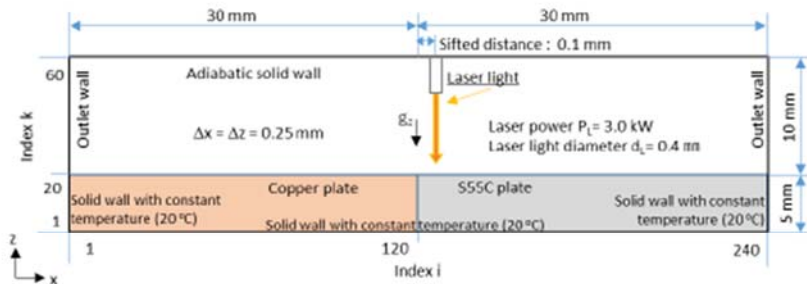


Fig. 2 Calculation model

解析モデルの設定では、左側に純銅を、右側に炭素鋼 (S55C) を配置し、突き合わせ面から炭素鋼側に 0.1 mm ずらした位置にレーザー光を照射する体系を想定した。数値解析では、レーザー光出力 P_L を 3.0 kW、レーザー光径 d_L を 0.4 mm、入熱密度 Q を 23.9 kW/mm^2 に固定した条件で、レーザー光照射時間 t_L を 80 ms、100 ms および 150 ms に設定し、総入熱量の違いによる冷却過程での熔融池近傍の空間温度分布過渡特性を評価した。

3・2 解析結果

図 3 に、総入熱量の違いによる冷却過程での伝熱流動挙動を比較する。図中、 $x=0.03 \text{ m}$ 位置が接合面であり、また時間 t はレーザー光の照射が終了した時点を基準とした冷却時間である。結果より分かる通り、レーザー光照射後の熔融池形状は銅と炭素鋼の熱物性値の影響を受けて左右非対称形状を示すとともに、熔融池が消滅するまでの時間は総入熱量 (非照射側からは保有熱量) の違いによって変化する。これら熱物性値の違いによる熱輸送を考えた場合、熔融池内においては、熱伝導度の違いによる拡散輸送効果と粘性係数の違いによる対流輸送効果のバランスによって場が支配されていると解釈できる。

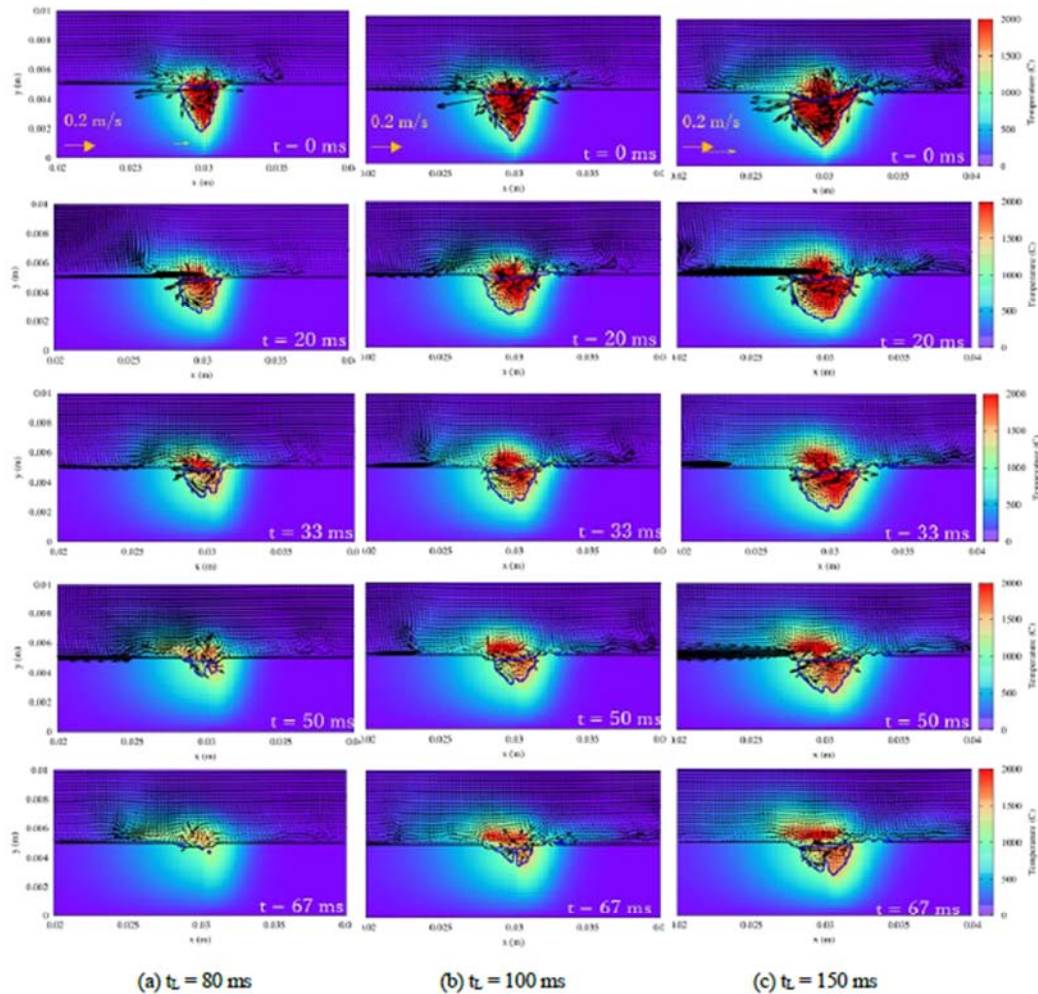


Fig. 3 Comparison of spatial temperature and flow field transients during cooling period after laser irradiation

3・3 考察

熱輸送における拡散輸送効果と対流輸送効果のバランスを評価するため、両者の比から定義されるペクレ数 Pe を導入する。

$$Pe = UL / \alpha = UL / (\lambda / \rho C_p) \quad (1)$$

ここで、 U は溶融池内代表速度 [m/s]、 L は溶融池代表長さ [m]、 α は温度拡散率 [m^2/s]、 λ は熱伝導率 [W/mK]、 ρ は密度 [kg/m^3]、 C_p は比熱 [J/kg K] である。

レーザー照射時間 t_L を 150 ms としたケースについて、レーザー照射終了後の冷却期間における溶融池表面上の Pe 数の横方向分布の推移を図 4 に示す。結果より分かる通り、融点の低い銅側では溶融池領域の急速な減衰に伴って Pe 数が低下し、この領域での熱輸送は拡散効果が支配的となる。これは急峻な温度勾配が同位置に存在する場合、それを解消するための手立ては可制御性の無い熱物性値のみであることを示唆している。他方、炭素鋼側では、比較的長時間に亘って溶融池領域が存在して対流熱輸送効果が維持されるため、急峻な温度勾配が同位置に存在する場合でも、それを解消する上で対流熱輸送効果が大きな役割を果たすことが期待できる。

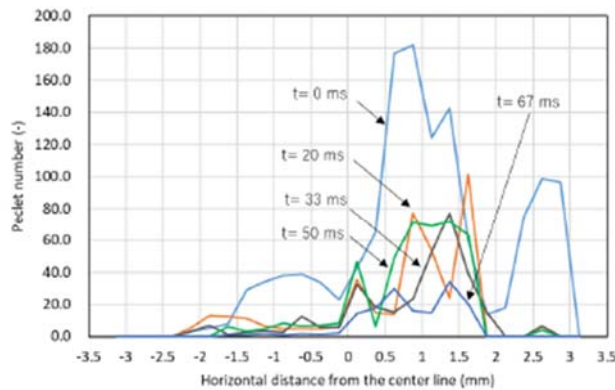


Fig. 4 Horizontal distribution transient of Peclet number on the welded pond surface during cooling period after laser irradiation

以上の考察結果は、溶接施工時に溶融池領域の表面温度分布をサーモグラフィーなどにより把握することができれば、これを指標として冷却速度をレーザー加熱などによって制御して、温度勾配解消が期待できる溶融池内の対流輸送効果を維持し、結果として発生する残留応力を低減できる可能性を示唆している。

7. 結 語

溶融・凝固プロセス計算科学シミュレーションコード SPLICE により、異種材料溶接加工時の伝熱流動特性を評価し、残留応力低減策の可能性を示した。

文 献

- (1) 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.



施設利用案内

さらなる技術力の向上へ

地元企業の廃止措置市場への参入を支援中

ふくいスマートデコミッショニング技術実証拠点（スマデコ）は、廃止措置ビジネスへの参入を支援する施設です。原子力発電所の廃止措置が徐々に本格化する今、廃止措置の現場を模倣的に体験でき、さらなる技術向上や新たなビジネスチャンスにつなげていただければ幸いです。

本格化する廃止措置市場

原子力発電所に関わる事業はこれまで、発電所の建設や設備などの維持管理・保守作業などが主でした。しかし、原子力発電の商業利用が始まって50年以上がたち国内外では多くの原子力発電所が廃止措置へ移行しつつあります。廃止措置に移行する原子力発電所が増えるのに伴い、廃止措置の基盤作りや人材育成などへのニーズが次第に高まっています。

新たな分野への参入を視野に

廃止措置の中でも、放射性物質を含まない場所の解体は、通常の建設・解体作業と変わりはありません。しかし、原子力施設の廃止措置では放射線測定や被ばく管理、ロボットによる作業、水中切断、廃棄物管理など原子力施設特有の作業が発生します。

スマデコではこのような体験ができます



廃止措置の現場を動く立体画像で仮想体験



材料のレーザー溶断検証



防護服やマスク等の装備体験

これらの特有な作業をより安全かつ効率的に行うために求められているのが、さまざまな分野での技術開発です。すでにこれを新たなビジネスチャンスと捉える企業も増えており、今後も廃止措置市場は、拡大が予想されています。スマデコは、福井県内に廃止措置に関する技術力を蓄えていただき、企業群の成長を支援する目的で開設しました。館内には、廃止措置に関する環境を模擬体験できる施設などを備えており、施設の利用を通じて廃止措置作業への新規参入に必要な技術力向上に役立てていただくことを期待しています。

（お問い合わせ）
 高速炉・新型炉研究開発部門
 敷設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：0770-2150333（直通）
 FAX：0770-5782
 URL：https://isdjaea.go.jp

を期待しています。廃止措置を新分野への参入のチャンスとお考えの企業の皆様には、ぜひスマデコを利用していただければと願っております。

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30年度）

平成30年12月6日、7日の二日間にわたり、国立大学法人 福井大学附属国際原子力工学研究所(敦賀キャンパス)「レーザー応用技術 産学官連携成果報告会(平成30年度)」を開催した。

本成果報告会は敦賀総合研究開発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青砥理事の挨拶に続き、共催者の福井大学附属国際原子力工学研究所 安濃田所長、量子科学技術研究開発機構 田島理事、若狭湾エネルギー研究センター 岩永専務理事の挨拶を頂いた。基調講演では福井大学工学部・工学研究科 原子力・エネルギー安全工学専攻の柳原敏教授から「原子力施設の廃止措置と適応技術の展望」、光産業創成大学院大学の坪井昭彦教授からは「レーザ加工事業実践を通しての起業家・事業家育成」と題した講演がなされた。

「レーザー応用技術」、「地元企業・産業界との連携」「ふくいスマートデコミッショニング技術実証拠点整備」のセッションを設け、「レーザー応用技術」では、レーザー技術を用いた最先端の研究成果について活発な議論を行い、「地元企業・産業界との連携」では、地元企業・産業界との連携を通じて研究開発した成果について、「ふくいスマートデコミッショニング技術実証拠点整備」では、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状況及び活用事例を報告した。

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、ふくいスマートデコミッショニング技術実証拠点にて「廃止措置解体技術検証フィールド」ではMR(MixedReality:複合現実感)システムによる原子力施設の仮想体験、「レーザー加工高度化フィールド」ではロボット協調・レーザー溶断適応制御システムによる厚板切断デモの実施、「廃止措置モックアップ試験フィールド」では高さ約10.5mの円筒型プールの設置された「水中技術実証試験エリア」、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切断作業や除染作業等を体験することができる「気中技術実証試験エリア」の見学を実施した。

12月6日：55名 12月7日：38名 のべ参加者：58名

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：レーザー・革新技術共同研究所 村松 壽晴

1. 原子力施設の廃止措置と適用技術の展望

福井大学 : 柳原 敏

2. レーザ加工事業実践を通しての起業家・事業家育成

光産業創成大学院大学 : 坪井 昭彦

【レーザー応用技術】

座長：レーザー・革新技術共同研究所 山極 満

3. 量研関西研におけるレーザー開発と社会実装への取り組み

関西光科学研究所 : 越智 義浩

4. レーザー異材溶接部の残留応力低減に向けた研究開発

レーザー・革新技術共同研究所 : 亀井 直光

5. 放射性 2 次廃棄物に起因する環境負荷低減方策に関する研究開発

レーザー・革新技術共同研究所 : 村松 壽晴

6. SPLICE コードのクラウド環境の整備

レーザー・革新技術共同研究所 : 石橋 淳一

7. レーザー計測技術のナトリウム中計装・検査技術への応用：

(1) レーザー距離計によるナトリウムレベル計測、

(2) ナトリウム中可視化装置用光学式超音波センサの開発

レーザー・革新技術共同研究所 : 猿田 晃一

【地元企業・産業界との連携】

座長：若狭湾エネルギー研究センター 高山 宏一

8. レーザー工法を用いた原子炉圧力容器模擬材の切断とダンパー材および粉じん評価

若狭湾エネルギー研究センター : 門脇 晴彦

9. 大出力レーザによるビード整形工法の研究開発

株式会社 ナ・デックスプロダクツ : 山口 貴大

10. ナトリウム中ルースパーツ回収装置の試作及び基礎試験

高速炉プラント技術開発部 : 上田 雅司

11. 国内外の原子力人材育成事業の促進

拠点化推進室 : 入江 勤

12. 技術課題解決促進事業について

レーザー・革新技術共同研究所 : 船橋 英之

【ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点整備】

座長：新型転換炉原型炉ふげん 井口 幸弘

13. ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点事業 統括者挨拶

日本原子力研究開発機構 副理事長・本部長 : 田口 康

14. エネルギー研究開発拠点化計画への参画

敦賀総合研究開発センター : 鈴木 隆之

15. ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点の概要

レーザー・革新技術共同研究所 : 山極 満

16. 解体技術検証フィールドについて

レーザー・革新技術共同研究所 : 寺内 誠

17. レーザー加工高度化フィールドについて

レーザー・革新技術共同研究所 : 猿田 晃一

18. レーザー溶断適応制御機能の高度化に関する研究開発:

溶融金属が発する光信号を利用したレーザー溶断制御方法の検討

レーザー・革新技術共同研究所 : 水谷 春樹

19. モックアップ試験フィールドについて

レーザー・革新技術共同研究所 : 中村 保之



青砥理事の主催者挨拶



安濃田所長の共催者挨拶



田島理事の共催者挨拶



岩永専務理事の共催者挨拶

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

令和元年度は公的機関や民間企業を含めて計 XX 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。

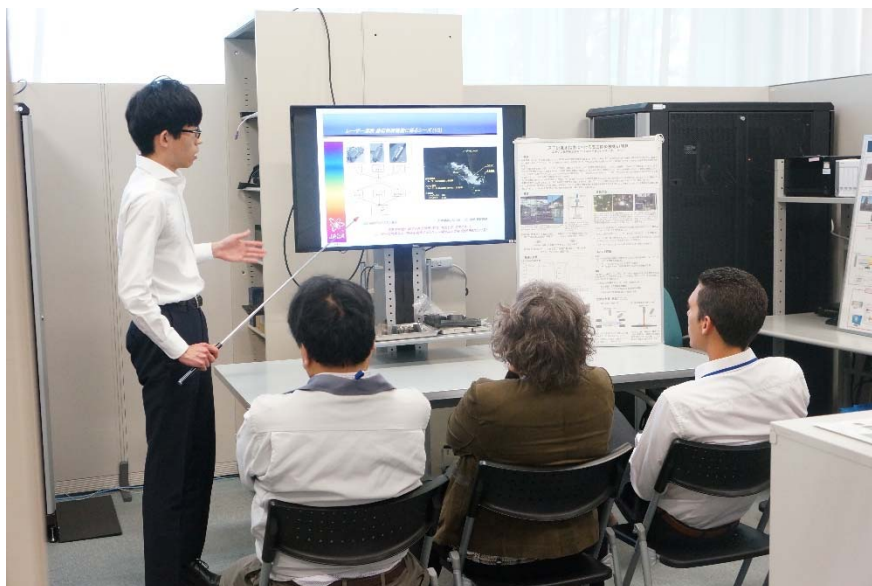
○敦賀ロータリークラブ 御見学

- ・見学日：平成 31 年 3 月 13 日（水）13：00～
- ・見学者：敦賀ロータリークラブ御一行



○原子力・代替エネルギー庁（フランス） 御見学

- ・見学日：令和元年 5 月 22 日（木）13：00～
- ・見学者：原子力・代替エネルギー庁（フランス）御一行



○台湾原子力員会 御見学

- ・見学日：令和元年6月6日（木）15：20～
- ・見学者：台湾原子力員会御一行



○国際原子力研究機関(IAEA) 御見学

- ・見学日：令和元年7月22日（月）13：45～
- ・見学者：クリストフ・グゼリ氏



○原子力デコミッショニング研究会 御見学

- ・ 見学日：令和元年10月3日（木）15：10～
- ・ 見学者：原子力デコミッショニング研究会御一行



○文部科学省原子力課 御見学

- ・ 見学日：令和元年10月17日（木）9：00～
- ・ 見学者：文部科学省原子力課御一行



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及び数値解析に関する実習

実施日：令和元年9月2日（月）～9月6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 4名 九州工業大学 1名 東京工科大学 1名

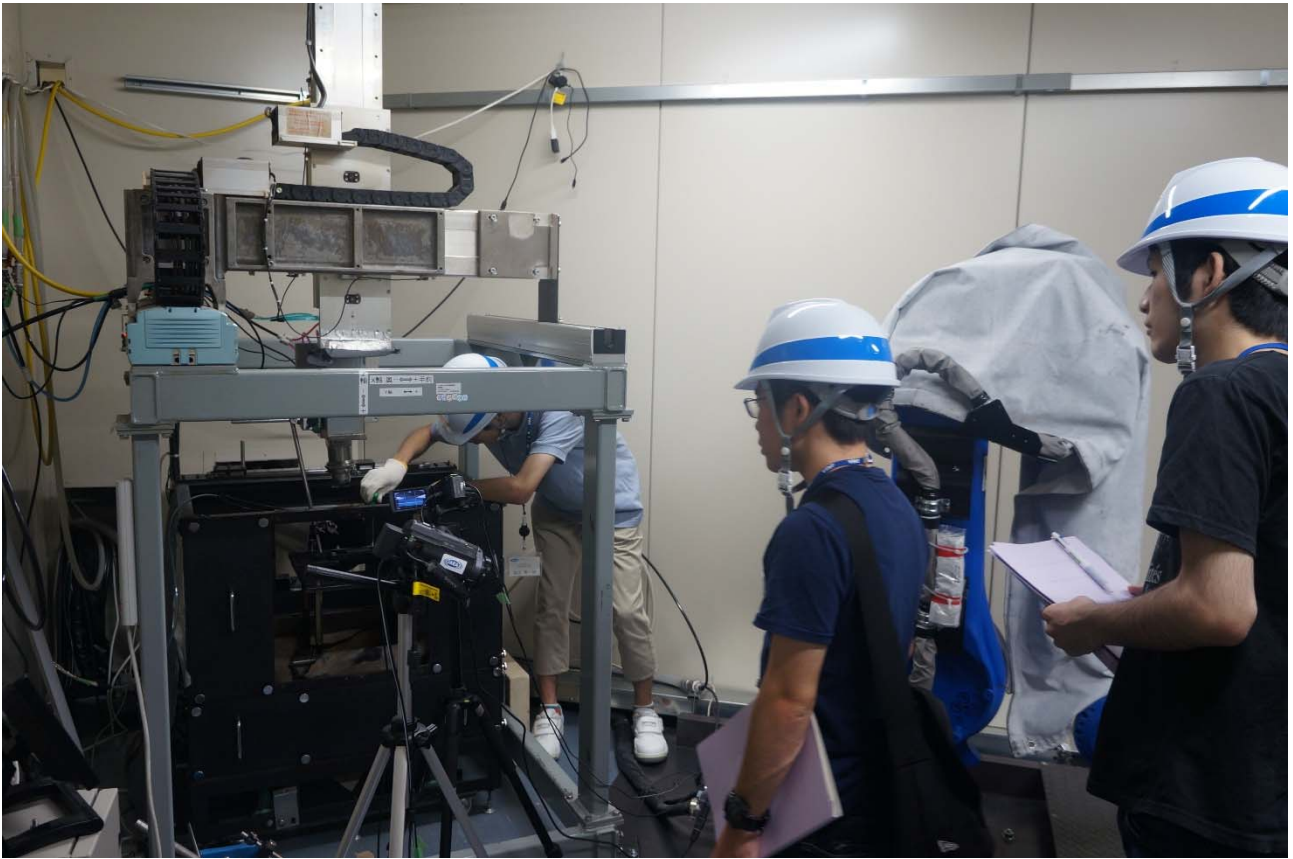
内容：

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。

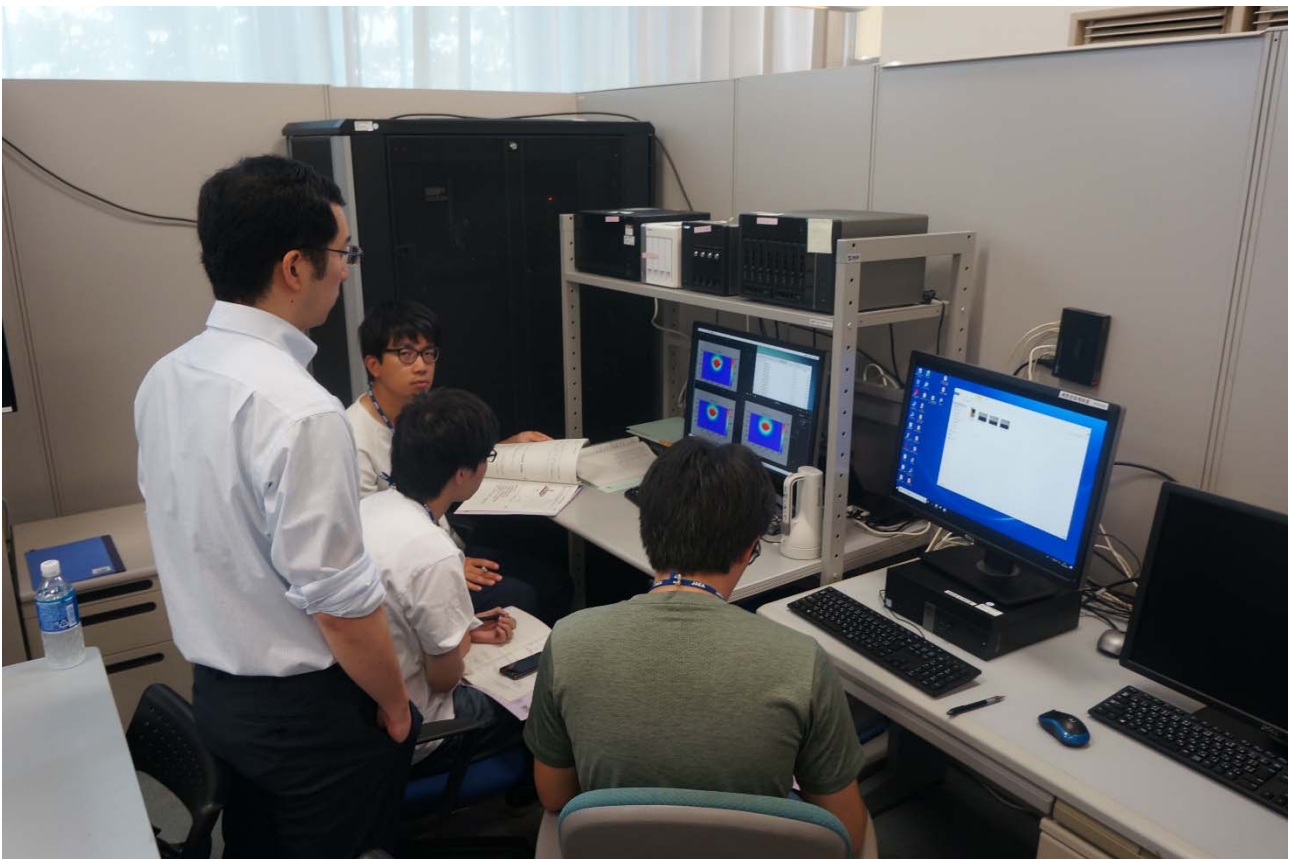
新型転換炉原型炉ふげん、高速増殖炉もんじゅの見学を通じて、廃止措置作業の現状と課題について理解を深め、スマートデコミッショニング実証施設では廃止措置に必要なレーザー技術について見学と設備の体験学習を行った。

スケジュール：

月 日	時 間		実習内容
9月2日 (月)	14：00	15：40	開講式・安全衛生教育
	15：00	17：00	レーザー技術の講義
9月3日 (火)	8：30	12：00	SPLICE 実習
	13：00	16：30	レーザー溶接実習
	16：30	17：00	実習内容のまとめ
9月4日 (水)	8：30	12：00	新型転換炉原型炉ふげん 施設見学
	13：00	16：30	高速増殖炉もんじゅ 施設見学
	16：30	17：00	実習内容のまとめ
9月5日 (木)	8：30	12：00	実習内容のまとめと発表準備
	13：00	14：00	スマートデコミッショニング実証施設見学・体験
	14：00	17：00	実習内容のまとめと発表準備
9月6日 (金)	8：30	11：10	実習内容のまとめと発表準備
	11：10	12：00	発表・閉講式



レーザー実習における試験体へのレーザー照射準備を行う学生らの様子



SPICE 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

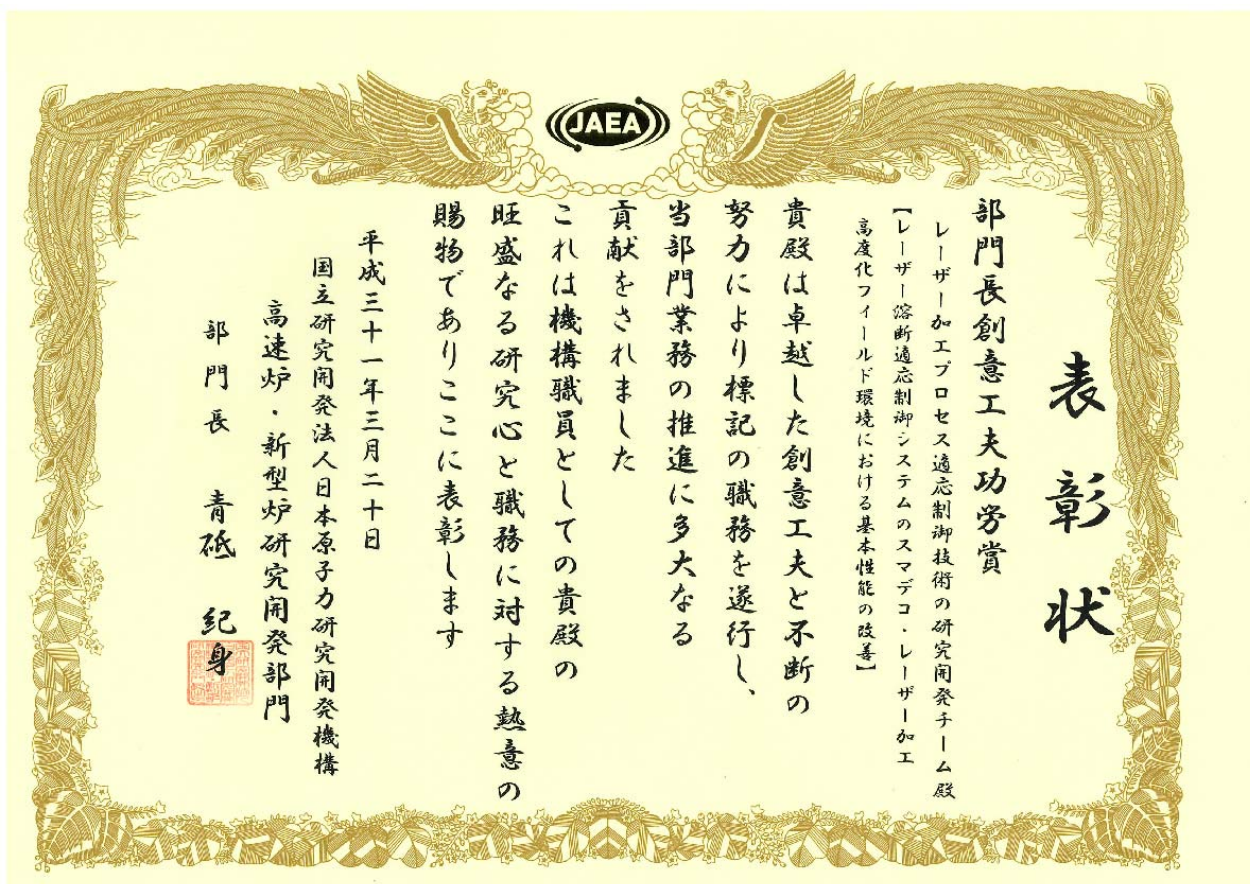
本年度は、業務に関し以下の表彰を受けた。

- 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 【部門長創意工夫功労賞】を受賞

受賞日 : 平成31年3月20日 水曜日

受賞件名 : レーザー溶断適応制御システムのスマデコ・レーザー加工高度化フィールド環境における基本性能の改善

受賞者 : レーザー加工プロセス適応制御技術の研究開発チーム



3.6. 各種記事

3.6.1. 平成30年12月12日付電気新聞掲載記事

廃炉廃棄物削減へ レーザー切断紹介

原子力機構 報告会で知見共有



研究者間で知見を共有し、質疑応答も活発に行った

日本原子力研究開発機構は6日、レーザー切断技術の普及を目的に、産学官連携推進事業の一環として、産学官の連携を通じてレーザー技術を開発する産学官の連携を促進する目的で、研究者間で知見を共有する狙い。放射性廃棄物の削減を低減するためのレーザー技術について

の発表などを実施し、約60人が参加した。同機構レーザー・革
新技術共同研究所の村松壽晴氏は、原子力施設での廃止措置に活用する技術として、放射性二次廃棄物の削減を低減しながらプラント機器・構造物をレーザーで切断するためのシ
ステムを紹介した。放
射線透過性のある鉛に商用炉の建設が進められ、現在は廃止措置が加えられていることに加え、外部環境が及ぼす影響も高速度レーザーを照射する仕組み、増殖炉型炉「もんじゅ」や新型転換炉型炉「ゆげん」を含め、設置したレーザーヘッドからレーザーを照射し、パルスレーザーの衝撃波も組み合わせる現状を紹介した。
柳原教授は、「廃止措置に技術的な課題は放射性二次廃棄物の削減を低減する。十分な技術基盤を構築し、開発を念頭に研究を進めていくことを説明。経済性を追求しつつも、作業員の労力を削減できるかが今後の課題になると指摘し、施設の特徴に合わせたプロジェクトマネジメントが重要になるとした。」

平成30年12月12日（水）付 電気新聞 8面

（令和元年11月15日 一般財団法人 日本電気協会新聞部より許諾済）

3.6.2. 平成31年2月2日付静岡新聞掲載記事

ロボット用いた
レーザー加工解説
15日、浜松で講座

光産業創成大学院大
(浜松市西区)は15日、
ロボットを用いたレ
ーザー加工技術につ
いて解説する無料講
座「レーザーロボテ
ィクスの新たな取
り組みに迫る」を
同市中区のSMB
C日興証券浜松支
店で開く。

日本原子力研究開
発機構レーザー・革
新技術共同研究所
の村松寿晴所長が、
東京電力福

島第1原発でのレ
ーザーによる廃止
措置作業の自動
化について説明
する。

地元企業関係者
や龍口義造学長ら
も登壇し、ロボ
ットを導入し
ている中小企
業の事例とポ
イント、ドイ
ツにおけるレ
ーザー産業の
最新事業など
を紹介する。

時間は午後2時
5分から5時
。定員50人。聴
講希望者は8
日までに申し
込む。問い合わせ
は同大へ電053
(484)2501
へ。

平成31年2月2日(土)付 静岡新聞 7面
(令和元年10月10日 株式会社静岡新聞社より許諾済)

3.6.3. 平成31年2月13日付電気新聞掲載記事

廃止措置実証へ拠点 地元企業の参入促す 原子力機構、敦賀に開設

原子力
機構
技術実証拠点の
外観

開所したふくいスマートデモ施設
技術実証拠点の外観



日本原子力研究開発機構が敦賀市内に整備した「ふくいスマートデモ施設」の開所が、およそ半年が経過した。福井県内の廃止措置が本格化することを見据え、地元企業が廃止措置に参画することを支援する役割を担う。これまで約500人が施設見学を訪れ、

若狭湾エネルギー研究センターによる廃止措置セミナーの視察や企業が開発した工具の性能試験を行うなど、様々な用途で活用が進みつつある。

同実証拠点での事業

は文部科学省の「地域科学技術実証拠点整備事業」に採択され、2017年5月に敦賀市内で整備を開始した。整備費用は約7億5千万円。拠点内には、用途ごとに3つの設備を整備し、「廃止措置システム」を導入。レーザー照射条件を事前に評価できるようにする「廃止措置モックアップ試験フィールド」のため、レーザー溶解「レーザー加工高度化フィールド」をそれぞれ設置した。施設を活用して、廃止措置をリードする企業群を育成し、地域経済へ貢献することを狙いとしている。

廃止措置解体技術検証フィールドは、複合現実感（MR）システムを通じて、新型転換炉「ふげん」のプラント内を実物大の臨場感

平成31年2月13日（日）付 電気新聞 7面

(令和元年11月15日 一般財団法人 日本電気協会新聞部より許諾済)

3.6.4. 令和元年6月14日付電気新聞掲載記事

廃炉進捗は「計画通り」

関電、原電、原子力機構 福井県に報告

関西電力、日本原子力発電、日本原子力研究開発機構は13日、福井県に廃止措置の進捗状況と今後の計画を報告した。それぞれが2016年2月に県と取り交わした廃止措置協定に基づくもの。3者はいずれも県内立地原

子力施設の廃止措置が計画通り進むことや、地元企業への業務発注が拡大していることを説明した。県からは安全確保や工事遂行などについて、あらためて最善を尽くすよう要請が出された。関電は森中郁雄営業



清水部長（左）に廃止措置進捗と今後の計画を説明する森中本部長代理

執行役員・原子力事業本部長代理らが美浜発電所1、2号機、原電は前川芳士常務・敦賀事業本部長らが敦賀発電所1号機、原子力機構は伊藤肇理事らが新型転換炉原型炉「ふげん」について、それぞれ取り組み状況などを報告。福井県は安全環境部の清水英男部長が対応した。3者とも協定締結以来、工程がおおむね計画通りに進んでいることや地元企業への発注拡大の進展を報告。今後3年について、関電は蒸気タービンや復水器など大型機器の解体に進むことなどを説明。原電は屋外設備の解体を開始することなどを解説した。また、原子力機構は昨年6月に開設した「ふくいスマートデコミニッシュニング技術実証拠点」の活用を進める方針を示した。

清水部長は3者に共通して①現場作業員の安全確保②発生廃棄物の低減などの環境保全③地元雇用の拡大・企業発展への貢献④使用済み燃料対策——について、一層の取り組み強化を要請した。関電に対しては、美浜3号機の安全対策工事がサイト内で並行して行われることに対する留意や、国との連携による使用済み燃料対策を要請。原子力機構に対しては、複数年度にまたがる業務の一括発注検討を促した。

令和元年6月14日（金）付 電気新聞 2面

（令和元年11月15日 一般財団法人 日本電気協会新聞部より許諾済）

4. 研究発表等リスト

- 論文発表（平成 30 年 11 月 1 日～令和元年 10 月 31 日）…1 件

No	タイトルおよび掲載資料名	発行年月	著者
1	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 スマートプロセス学会誌 Vol. 8, No1, p4-8(2019)	2019 年 1 月	村松 壽晴

- 会議等における論文発表（平成 30 年 11 月 1 日～令和元年 10 月 31 日）…5 件

No	タイトルおよび掲載資料名	発表年月	発表者
1	計算科学シミュレーションコード SPLICE によるレーザーコーティングのための CPS の構築 日本機械学会 生産システム部門研究発表講演会 2019	2019 年 3 月	佐藤 雄二
2	高輝度 X 線を用いたレーザー照射時の粉末粒子の溶融挙動観察とスパッタレス SLM 法の開発 2019 年 第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019 年 3 月	佐藤 雄二
3	レーザー加工における計算科学シミュレーションコード SPLICE による CPS 設計空間の検証と改訂 日本機械学会 2019 年度年次大会	2019 年 9 月	村松 壽晴
4	同種材料・異種材料レーザー溶接における残留応力の空間分布特性 第 13 回生産加工・工作機械部門講演会 日本機械学会	2019 年 10 月	村松 壽晴
5	計算科学シミュレーションコード SPLICE による異種材料レーザー溶接プロセスの数値解析 第 13 回生産加工・工作機械部門講演会 日本機械学会	2019 年 10 月	村松 壽晴

- 解説・特集記事など（平成 30 年 11 月 1 日～令和元年 10 月 31 日）…1 件

No	タイトルおよび掲載資料名	発表年月	発表者
1	HPL2019 ショート速報[高出力レーザ] 国際会議速報, 2019-No. 7(インターネット)	2019 年 6 月	佐藤 雄二

- 口頭発表（平成 30 年 11 月 1 日～令和元年 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
1	レーザー溶断適応制御機能の高度化に関する研究開発；溶融金属が発する光信号を利用したレーザー溶断制御方法の検討 関西原子力懇談会平成 30 年度研究発表・国際学会発表支援	2019 年 1 月	水谷 春樹
2	「環境負荷低減を目指した革新的レーザー切断技術」 第 13 回真空紫外光源およびレーザーアブレーションに関するワークショップ	2019 年 3 月	佐藤 雄二

3	Derivation of a design space for laser coating processes with a thermohydraulics simulation code SPLICE for construction of a CPS system <i>The 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing</i>	2019年 5月	佐藤 雄二
4	Development of an adaptive control system for laser cutting of fuel debris and structural components for the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant <i>4th International Forum on the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station</i>	2019年 8月	猿田 晃一

● 研究開発報告書類…1件

No	タイトル	発行年月	著者
1	JAEA-Research 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 の整備 (2019-008)	2019年 12月	村松 壽晴

● SPLICE コード外部利用リスト…14件

No	会社名	件名	実施期間
1	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29年5月～
2	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29年5月～
3	株式会社松浦機械製作所、 福井県工業技術センター	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29年6月～ 平成30年3月
4	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29年6月～
5	国立大学法人九州工業大学	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10月～
6	作州機工株式会社、 独立行政法人国立高等専門学校機構津山高等専門学校	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29年10月～
7	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29年12月～ 平成30年3月
8	国立大学法人茨城大学	計算科学シミュレーションによるレーザー切断時のスパッタ低減策の検討	平成30年11月～ 平成31年3月
9	沖縄工業高等専門学校	高温となる彎曲金属表面上に形成されるガスジェット流れと熔融現象の物理メカニズム解明	令和元年6月
10	学校法人片柳学園東京工科大学	レーザーによる金属積層造形に関する数値解析的研究	令和元年8月～

11	株式会社 NESI	レーザー溶接におけるスパッタ軽減等	令和元年 9 月
12	株式会社ナノプロセス	レーザー加工におけるパルス幅の影響	令和元年 10 月
13	矢崎総業株式会社	レーザー照射時における温度分布比較	令和元年 11 月
14	浜名湖電装株式会社	レーザー樹脂溶接プロセス評価	令和元年 11 月

● 令和元年度共同研究リスト…5 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 (H31 年度)	平成 31 年 4 月 ～ 令和 2 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 31 年 4 月 ～ 令和 2 年 3 月	村松壽晴
国立大学法人福井大学	3次元画像計測による対象物認識技術に係る研究開発	令和元年 8 月 ～ 令和 2 年 1 月	亀井直光
国立大学法人九州工業大学	金属光造形プロセスの定量化に向けた数値解析的研究	令和元年 8 月 ～ 令和 2 年 3 月	村松壽晴
学校法人片柳学園東京工科大学	レーザーによる金属積層造形に関する数値解析的研究	令和元年 8 月 ～ 令和 2 年 3 月	村松壽晴

● 外部資金の取得状況…3 件

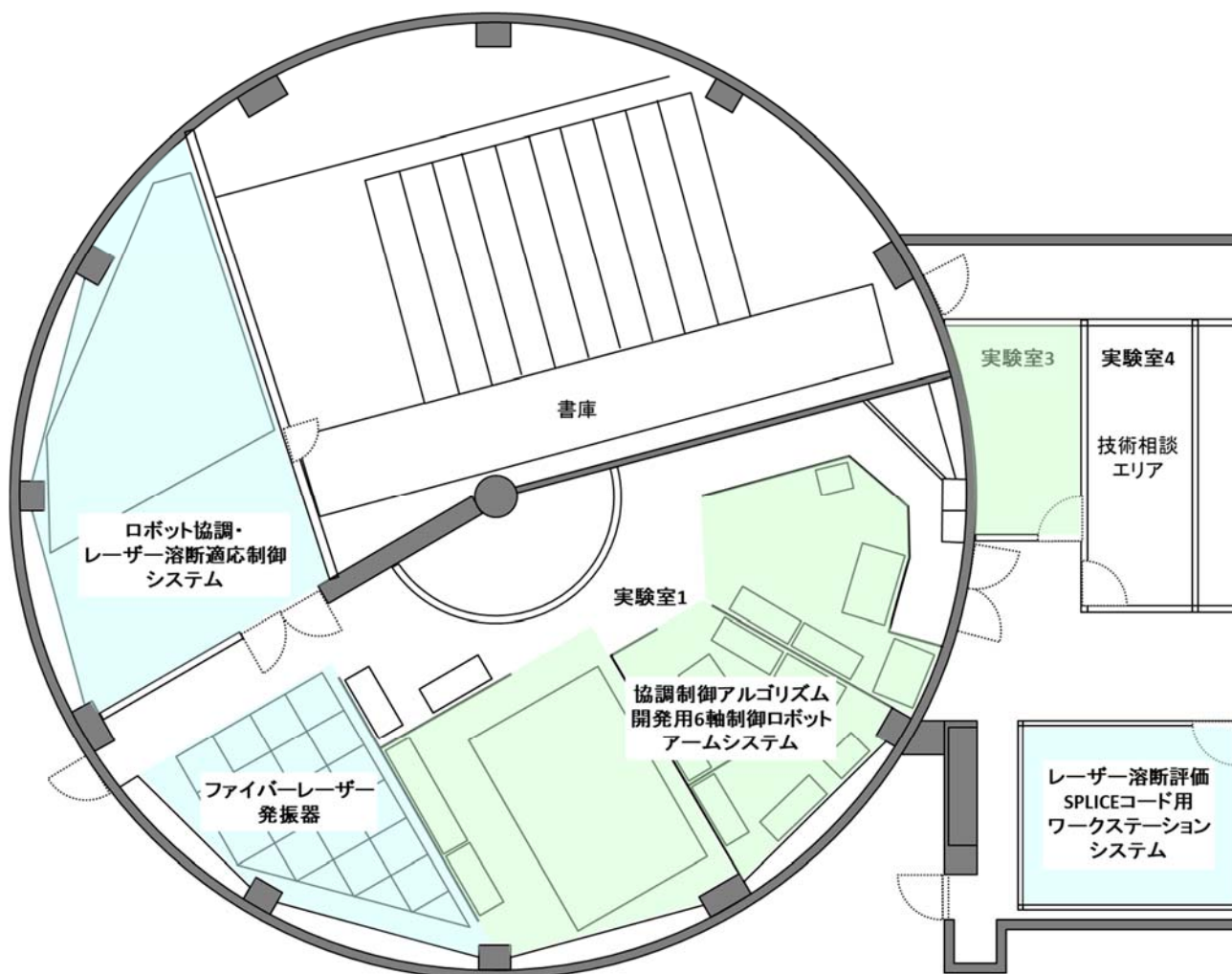
No	研究題名	実施期間	担当者
1	「ワンチップ光制御デバイスによる革新的オプト産業の創出」 <i>地域イノベーション・エコシステム形成プログラム, 文部科学省</i>	平成 30 年 ～	村松壽晴 寺内 誠
2	「異種材料溶接加工における残留応力等の低減に向けた研究開発」 <i>公募研究, 中部電力株式会社 原子力安全技術研究所</i>	平成 30 年 ～ 平成 31 年	村松壽晴 亀井直光 菖蒲敬久
3	「残留応力を低減する自律型レーザー溶接システムに関する研究開発」 <i>原子力機構理事長裁量経費, 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構</i>	平成 31 年	佐藤 雄二 菖蒲 敬久 中桐 俊男

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ング技術実証拠点整備」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。

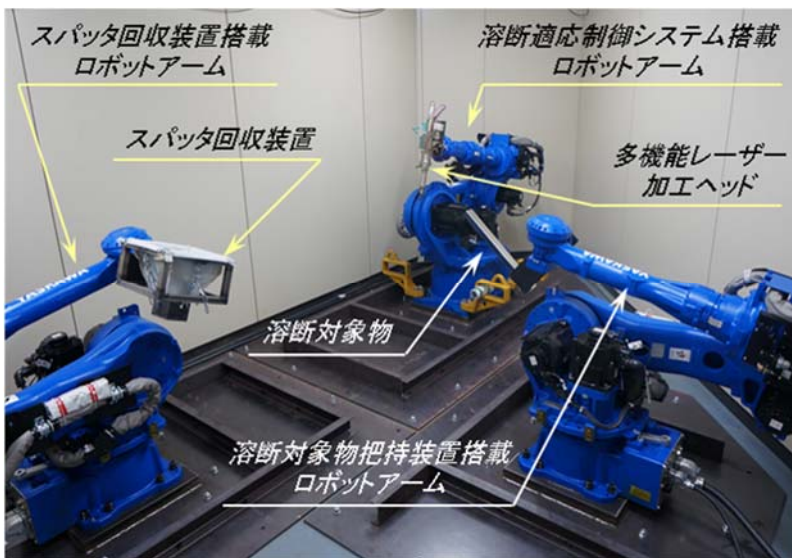
ーレーザー加工高度化フィールドー

- 1) ロボット協調・レーザー溶断適応制御システム
- 2) 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
- 3) 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



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》

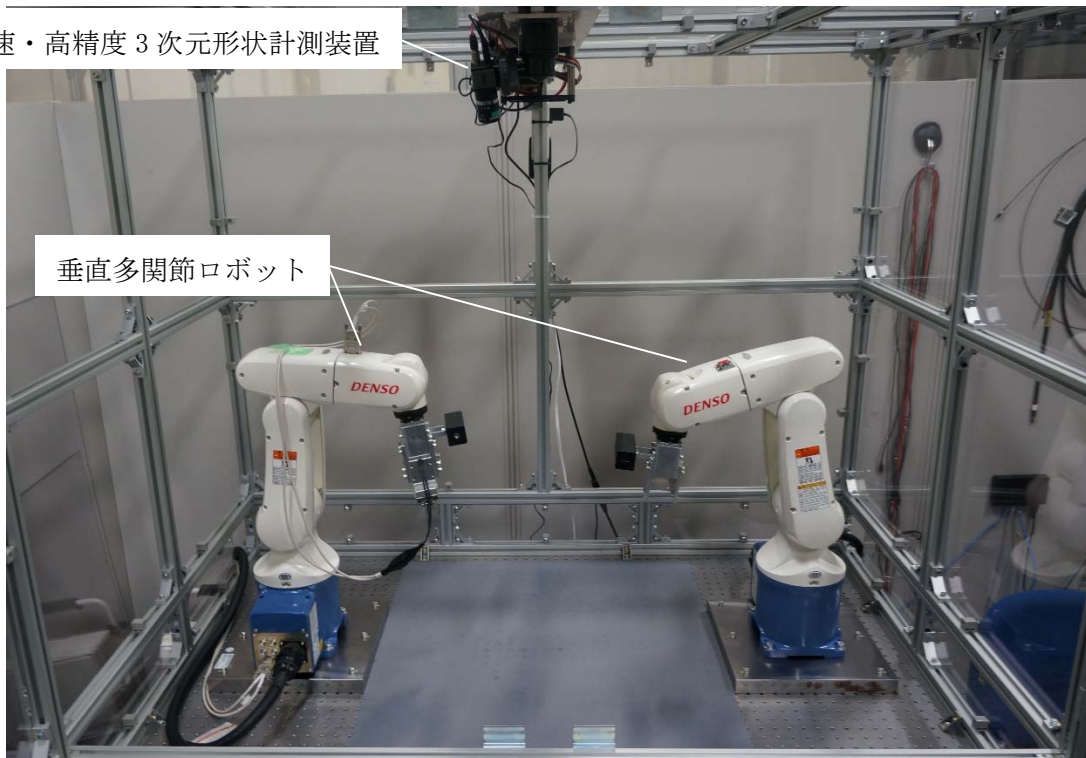
- 10kW ファイバーレーザー発振器
- 高軌跡精度ロボット 1台
- 汎用性多関節ロボット 2台
- 多機能レーザー加工ヘッド
- 適応制御システム
- スパッタ回収装置

2) 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

原子力発電所の廃止措置では、放射性物質によって汚染された施設に対して安全を確保するため、汚染の程度に応じて、さまざまな対策を講じて工事が実施されている。安全確保対策の項目として「被ばく低減対策」が設けられており、その中には「遠隔操作による解体技術の採用」が求められている。令和元年度には新たに 6 軸制御が可能なロボットアーム 2 台を導入し、ロボットによる自動解体技術に必要な協調制御アルゴリズムの開発に向けて研究を行っている。

また、令和元年度は国立大学法人 福井大学と共同研究「3 次元画像計測による対象物認識技術に係る研究開発」を締結し、藤垣元治教授の開発した高速・高精度 3 次元形状計測装置と組み合わせる事でロボットが稼働する環境情報及び物体認識の 3 次元情報化を目指す。

高速・高精度 3 次元形状計測装置



垂直多関節ロボット



高速・高精度 3 次元形状計測装置(拡大写真)

《構成》

- 垂直多関節ロボット 2 台
- 高速・高精度 3 次元形状計測装置

3) 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。



《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

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>