

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19206103

研究課題名（和文） 短パルス自由電子レーザーによる非熱ナノ加工の基礎研究

研究課題名（英文） Fundamental research of non-thermal process using free electron laser with short pulses

研究代表者

堀池 寛 (HORIIKE HIROSHI)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：20252611

研究成果の概要（和文）：

本研究では、ピコ秒パルスを持った高輝度の自由電子レーザーを利用して、原子炉や燃料集合体等の大型構造体の非熱解体技術への適用性を実験的に調べた。軽水炉用燃料被覆管材料であるジルカロイ 4 等を用いて、市販最新鋭レーザーと切削形状を比較した結果、これら原子炉材料の効率的（狭切削幅）非熱プロセスが実現可能であることを示した。また、ナノ秒パルスレーザーを用い、加工切削形状へ与える基礎的な条件を確認し、厚肉構造材を加工するために必要なレーザー光および導光のための光学系が備えるべき条件を実験的に確認した。

研究成果の概要（英文）：

An experimental research was performed on the non-thermal processing of heavy and thick structure materials like a nuclear reactor vessel and nuclear fuel assembly, with using highly coherent and intense free electron laser (FEL) of pico-second pulses. Zircaloy4 alloy plates, which is material of fuel tube were tried and cut with FEL, and a state-of-art commercially available laser. The comparison of these showed that with FEL, very narrow-width efficient non-thermal processing is possible for those structure materials. Fundamental conditions for narrow processing or cutting were verified with using a nano-second pulse laser. As a result, technical specifications of laser lights and of optical systems for light guiding, were revealed and confirmed experimentally.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2008 年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2009 年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2010 年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
年度			
総計	36,200,000	10,860,000	47,060,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：自由電子レーザー、原子力、加速器、非熱加工、焦点深度、レーザープラズマ

1. 研究開始当初の背景

日本にある 53 基の発電用原子炉は 2030 年以降、順次寿命を迎え、廃止・解体の段階に至

る。それらの廃止措置については昭和 60 年の総合エネルギー調査会原子力部会報告にて廃止措置の標準工程が示され、運転使命を

終了した原子力発電所は、解体撤去するとともに、敷地の有効利用を図ることが望ましいとされている。解体撤去に採用される解体技術は、既存の技術またはその改良により十分に対応可能と考えられるが、放射能レベルの高い金属廃棄物の解体では、近年のレーザー技術を用いた高度な技術開発により、金属ドロスを減容し、より一層の作業者の安全を確保し、流動性の高レベル放射性廃棄物の減容を図ることが重要である。レーザー切断において、高い熱的エネルギーを局所的に集中させる方法としては、炭酸ガス、YAG などのレーザーによる切断技術が研究され、既に YAG レーザーを用いて 50 mm の厚板切断の試験が行われたが、安定性が悪く、また切断幅も広い浮遊物やドロスの発生量も多く、今後の改良が必要とされる。一般にレーザー切断はレーザーを熱源としてのみ利用し、圧縮空気や酸素ガス等を吹き付けて溶解し、排除する、レーザーは 1 点には集光できるが、その先では散光するので、厚板では切断幅が広くなり、高レベル放射性金属酸化物（ドロス）と浮遊物の大量発生が避けられない。そのため、高汚染高放射化した大型構造物の切断において、放射性物質の飛散抑制と二次生成物の極限までの低減を可能とする新しい切断加工技術の開発が必要である。

2. 研究の目的

自由電子レーザー(FEL)は、電子加速器ベースのレーザー光発生装置であり、電子ビームのエネルギーと収束性をあげることで、媒質による従来方式のレーザーでは得られない、非常に強力で高品質な光を生成することができ、焦点深度を深くとることも可能である。原理的に新規な方法として、FEL による高強度で高品質なレーザー光を照射して、構造材料を表面から昇華蒸発させることにより、幅狭く且つ深い加工、切断する技術を研究する。従来のレーザー切断では、マルチモードの大電力光を使用することになり、光の収束性が悪く、パルス幅も長いこと、材料のバルク温度が上昇し、熔融による切断になる。これに対し、高輝度でパルス幅が温度拡散時間より短い高性能光を照射することにより、表面から昇華消耗させることができれば、細く絞ったビーム径で加工することが可能となる。このために必要な研究として、光を深い焦点深度に絞り込むこと、それを材料表面に当てて深く昇華消耗させるために適した条件を探る。本研究では、高密度高出力レーザー

による新しい非熱切断の開発と革新的な原子炉解体技術の創出を目的として、光学系、光と材料表面との相互作用の両面から研究を進めた。

3. 研究の方法

非熱切断方法では、急速な蒸発または昇華により材料の表面を深く掘り込み、切断させるが、種々の加工に適用するには、材料試験体との相互作用など、基礎研究を行う必要がある。実験は、大阪大学自由電子レーザー装置、日本原子力研究開発機構のレーザーおよび既存のナノ秒パルス Nd-YAG レーザーを利用して実験を進めた。

(1) 大阪大学の装置において、直線加速器の高周波伝送系と制御タイミングの改良など加速器系の最適化を図り、より大電流、高強度で短パルスの光を得るように改良する。

(2) 光学系を製作し、現状技術で焦点深度の出来るだけ深いビームを作成し、SUS、ジルカロイ、炭素鋼の平板にレーザーを照射し、表面分析により昇華損耗、加工幅とレーザービーム径との関係を調べる。

(3) 世界最高強度の光を生成する米国ジェフアーソン研究所の FEL 装置等を利用して強度的な依存性を確認する。

4. 研究成果

(1) 大阪大学 FEL の出力向上

大阪大学の FEL は、パルス幅が 5 ps と非常に短く、先頭値が高く、波長可変性に優れており、非熱加工に適した特性を有する。本研究では、材料切断のために FEL の高出力化を行った。大阪大学 FEL は、グリッドパルス駆動熱陰極電子銃により電子ビームを発生させる。基本的な熱電子引き出し電圧の繰り返し周波数は、22MHz であるが、88MHz に変更した。その結果、電子銃の出力であるエミッション値が 14 μA から 42 μA と約 3 倍程度増え、最終的な FEL の最大出力は 50 mW から 250 mW に増幅された。

(2) FEL によるジルカロイ 4 切断実験結果

ジルカロイ 4 は原子炉の燃料被覆管に用いられているジルコニウムの合金である。ここでは、燃料切断にむけて、FEL によるジルカロイ 4 切断実験を行った。波長 $8 \mu\text{m}$ の FEL を ZnSe レンズ (焦点距離 280 mm) により集光し、ジルカロイ 4 の表面に照射した。マイクロメータに取り付けたジルカロイ 4 を $81 \mu\text{m/s}$ の速度で移動させ切断を行った。また、切断時に発生する材料表面の熱を高速放射



図 1 ジルカロイ 4 の切断結果

温度計を用いて測定した。

図 1 は、ジルカロイ 4 の切断結果を示す。同図より、切り口は機械的に切断したような鋭さであることが分かる。

(3) FEL と Nd:YAG レーザーによるジルカロイ 4 の切断形状の比較

ここでは、FEL による非熱効果を評価するため汎用化されている高出力 Nd:YAG レーザーによる照射効果の比較を行った。FEL および Nd:YAG レーザーは、それぞれレンズ (焦点距離 280 mm 、 90 mm) を用いて集光し、厚さ 0.6 mm のジルカロイ 4 のプレートに照射した。マイクロメータに取り付けたジルカロイ 4 を移動させ、ジルカロイ 4 のレーザー切断を行った。FEL および Nd:YAG レーザーの照射パラメータを表に示す。

表 レーザー照射パラメータ

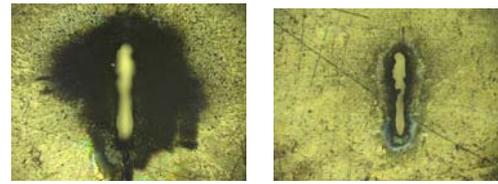
	FEL	Nd:YAG
波長	$8 \mu\text{m}$	532 nm
パルス幅	5 ps	10 ns
平均出力	180 mW	3000 mW
照射径	$150 \times 200 \mu\text{m}$	$76 \times 76 \mu\text{m}$
切断速度	$81 \mu\text{m/s}$	$7 \mu\text{m/s}$

図 2 (a) (b) は、FEL を照射したジルカロイ 4 の入射面と出射面のデジタルマイクロスコップの観察画像を示す。切断溝の幅は、入射面では $421.5 \mu\text{m}$ 、出射面では $409.8 \mu\text{m}$ であり、ほぼ平行に切断されていることがわかる。また、切断面にドロスはほとんど観測されず、材料の熱的影響もほとんど見られない。



(a) 入射面 (b) 出射面

図 2 FEL による切断形状



(a) 入射面 (b) 出射面

図 3 Nd:YAG レーザーによる切断形状

図 3 (a) (b) は、Nd:YAG レーザーを照射したジルカロイ 4 の入射面と出射面のデジタルマイクロスコップの観察画像を示す。切断溝の幅は、入射面では $228.8 \mu\text{m}$ 、出射面では $137.2 \mu\text{m}$ であり、集光したビーム径が小さいために細く切断されているが、出射面での溝幅はかなり狭くなっており、円錐状に切断されていることがわかる。また、FEL 照射では見られなかった、照射点周りに広がる熱的影響が幅広く見られる。

FEL は Nd:YAG レーザーと比較してパルス幅が短いため、熱影響の少ない加工が行われたと考えられる。レーザー照射により電子が受け取ったエネルギーが、格子振動のエネルギーに転換するために必要な時間は、一般的に数ピコ秒とされており、当初の検討どおり、FEL は熱拡散が起こる前に加工がなされることが示された。

(4) 非熱プロセス効果の評価

非熱プロセス効果を評価するため、Nd:YAG レーザーを用いてレーザー照射点における材料の温度変化およびレーザー誘起による衝撃波を計測し、レーザー照射時の材料表面の現象について考察した。レーザー照射時の材料表面の温度変化は、放射温度計を用いて計測した。図 4 は、ジルカロイ 4 に波長 1064 nm のレーザーを照射した時のエネルギー密度の変化と最高温度の関係を示す。

80 J/cm^2 を超えると材料の表面は沸点を超える。同図中、領域 (B) から領域 (A) に移る時、温度上昇率が小さい。これは、領域 (A) において顕熱に対して蒸発熱として使われていることが考えられる。

(5) ビーム収束による掘削の評価

光学系が切断面に与える効果を更に詳しく調べるため、Nd:YAG レーザーを用いて、光を絞るためにレンズ系と表面熱負荷の影響を

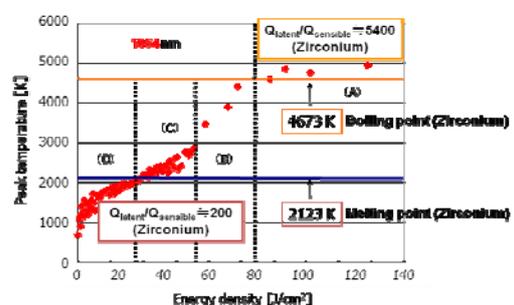


図 4 エネルギー密度と最高温度の関係

検討した。図5は、アルミニウムのプレートに波長532nmのNd:YAGレーザーを照射した後の切削形状を示す。この時、用いたレンズの焦点距離は50mmである。エネルギーが増加することにより、深く掘削されていることが分かる。

これらの実験からレンズの焦点距離を長く取ることにより、表面からの切削加工断面が狭く且深く掘削加工出来ることが実験的に確認された。しかしながら光を収束すると電界強度が上がることにより大気圧プラズ

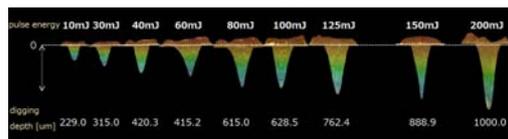


図5 アルミニウムにレーザーを照射したときのパルスエネルギーと掘削形状

マが生成され、プラズマの屈折によりレーザー光が散逸されるため、プラズマ生成を避ける必要があることが実験的に確認できた。持続時間と電界強度で決まり、その点での短パルスレーザーの優位性が示された。図6は焦点距離400mmのレンズを用いた時に発生したプラズマの画像を示す。

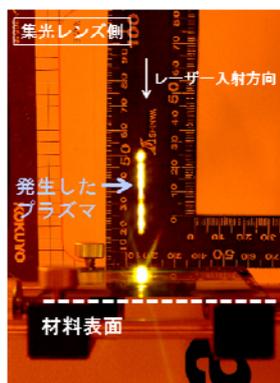


図6 レーザー収束時に発生したプラズマ

(6) 米国ジェファーソン研究所のFELを利用した構造体の切断

米国ジェファーソン研究所(JLAB)は世界最強度の光を生成するFEL装置を有する。本研究では、JLABのFELを利用してステンレス構造体の切断を行った。実験で用いたFELのピークエネルギーはGWレベル、平均パワー1kWであり、アシストガスは利用していない。図7は、FEL照射中と照射後の画像を示す。同図より厚肉の構造体がドロスを生成するこ

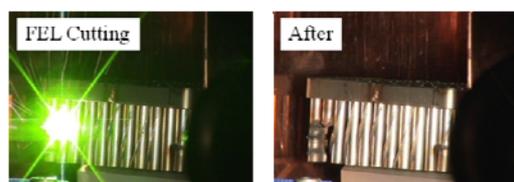


図7 ジェファーソン研究所におけるレーザー切断実験

となく切断された事が分かる。

将来への展望

以上の結果より、FELからのレーザー光を細く焦点距離を深く絞りこむことによって、原子炉圧力容器の様な厚みのある構造材や燃料集合体のような構造材に対しても、非熱加工が可能であることが実験的に示された。レーザー光は遠隔制御により、離れた所から照射し走査することが容易であり、安全で効率的な切断加工の可能性を示すことができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- (1) 杉浦寛和、金村卓治、鈴木幸子、近藤浩夫、堀池寛他、Experimental study on wave propagation behavior on free surface of Lithium flow for IFMIF, Journal of Nuclear Science and Technology, 2011 (in press), 査読あり
- (2) 鈴木幸子、杉浦寛和、帆足英二、堀池寛他、Overview: Free surface measurement with renewed nozzle of Osaka Li loop, Fusion Engineering and Design, 2011 (in press), 査読あり
- (3) 杉浦寛和、金村卓治、鈴木幸子、近藤浩夫、堀池寛他、Measurement of wavy surface oscillations on liquid metal lithium jet for IFMIF target, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010 (in Press), 査読あり
- (4) 近藤浩夫、金村卓治、顧和平、山岡信夫、堀池寛他、IFMIF 液体金属リチウムターゲット流に関する基礎実験、Journal of Plasma and Fusion Research, 84, 600-605, 2008, 査読あり
- (5) 金井大造、鈴木幸子、栗津邦男、Free electron laser induced shock-wave control and mechanistic analysis using pulse control, Applied Optics 47(33), 5862-5870(2008), 査読あり

[学会発表] (計4件)

- (1) 峰原英介、FEL やその他のレーザーを用いた原子炉構造材と周辺機器の除染、日本原子力学会「2009年秋の年会」、2009.9.16、宮城
- (2) 峰原英介、水噴流導光レーザーによる放射性汚染物の除染技術の開発、日本原子力学会「2009年春の年会」、2009.3.23、東京
- (3) 峰原英介、静電加速器の応用とアウトリーチ活動、第5回加速器学会年会・リニ

- アック技術研究会、2008. 8. 7、広島
(4) 峰原英介、ERL FEL 等の極短パルスレーザーを用いた炉構造物表面除染、第 10 回応用加速器・関連技術研究シンポジウム、2008. 6. 12、東京

[その他]

ホームページ等

<http://www.fel.eng.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀池 寛 (HORIIKE HIROSHI)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：20252611

(2) 研究分担者

福田 武司 (FUKUDA TAKESHI)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：50354585

鈴木 幸子 (SUZUKI SACHIKO)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：20403157

山岡 信夫 (YAMAOKA NOBUO)

大阪大学・工学研究科・技術専門員

研究者番号：80444561

(3) 連携研究者

峰原 英介 (MINEHARA EISUKE)

(独) 日本原子力研究開発機構・主任研究員

研究者番号：00354910

宮本 斉児 (MIYAMOTO SEIJI)

(独) 日本原子力研究開発機構・研究員

研究者番号：50294046

近藤 浩夫 (KONDO HIROO)

(独) 日本原子力研究開発機構・研究員

研究者番号：40403159