

レビュー論文

連続ターゲットインジェクションによる 高繰返しレーザー核融合実験および運用

Repetitive Laser Fusion Experiment and Operation Using a Target Injection System

西村靖彦¹⁾, 米田 修²⁾, 森 芳孝, 石井勝弘, 花山良平, 北川米喜,
関根尊史³⁾, 佐藤伸弘³⁾, 高木 勝³⁾, 竹内康樹³⁾, 栗田隆史³⁾, 加藤義則³⁾,
栗田典夫³⁾, 川嶋利幸³⁾, 日置辰視⁴⁾, 元廣友美^{4,5)}, 東 博純⁶⁾, 砂原 淳⁷⁾,
千徳靖彦⁸⁾, 三浦永祐⁹⁾, 岩本晃史¹⁰⁾, 坂上仁志¹⁰⁾

NISHIMURA Yasuhiko¹⁾, KOMEDA Osamu²⁾, MORI Yoshitaka, ISHII Katsuhiko, HANAYAMA Ryohei,
KITAGAWA Yoneyoshi, SEKINE Takashi³⁾, SATO Nakahiro³⁾, TAKAGI Masaru³⁾, TAKEUCHI Yasuki³⁾,
KURITA Takashi³⁾, KATO Yoshinori³⁾, KURITA Norio³⁾, KAWASHIMA Toshiyuki³⁾, HIOKI Tatsumi⁴⁾,
MOTOHIRO Tomoyoshi^{4,5)}, AZUMA Hirozumi⁶⁾, SUNAHARA Atsushi⁷⁾, SENTOKU Yasuhiko⁸⁾,
MIURA Eisuke⁹⁾, IWAMOTO Akifumi¹⁰⁾ and SAKAGAMI Hitoshi¹⁰⁾

光産業創成大学院大学, ¹⁾トヨタテクニカルディベロップメント株式会社, ²⁾トヨタ自動車株式会社先端材料技術部,

³⁾浜松ホトニクス株式会社, ⁴⁾名古屋大学未来社会創造機構, ⁵⁾株式会社豊田中央研究所,

⁶⁾あいちシンクロトロン光センター, ⁷⁾レーザー技術総合研究所, ⁸⁾大阪大学レーザー科学研究所,

⁹⁾産業技術総合研究所, ¹⁰⁾核融合科学研究所

(原稿受付: 2017年2月9日 / 原稿受理: 2017年7月26日)

2008年より、繰返しレーザーを用いた高速点火方式によるレーザー核融合開発共同研究プロジェクトを複数の共同研究機関と共に実施している。同プロジェクトにおいて核融合炉ドライバーとして有力な候補の一つである半導体励起固体レーザー (DPSSL) を使い、世界に先駆けて繰返し爆縮高速加熱 HAMA レーザードライバーを開発した。そして2012年に、1 Hz で直径 1 mm の CD 中実球ターゲットを自由落下させるターゲットインジェクションシステムを開発した。開発したレーザーとインジェクションシステムを統合し、将来のレーザー核融合炉に必須技術である投入するターゲットにレーザーを命中させ、連続的に核融合反応を起こすことに世界に先駆けて成功した。繰返しレーザー核融合実験を実現するには、安定したレーザーとターゲットの同期制御とターゲット位置計測技術が不可欠である。

Keywords:

inertial-confinement fusion, fast-heating, DPSSL, target injection, measurement & control technique

1. はじめに

レーザー核融合による発電は、10 Hz 程度の繰返しパルス動作による核融合出力を定常的に取り出すことで成立する。同発電を実証・実現をするためには、メガジュールレーザー、冷却トリチウム・重水素燃料ペレット射出と照射制御、炉心物理、そして核融合反応エネルギーを取り出すブランケット技術などを確立していくことが求められる。

これまで、炉心プラズマ物理の理解と科学的ブレークイーブンをめざして、米国 NIF (National Ignition Facility) や大阪大学レーザー科学研究所 (旧: 大阪大学レーザーエネルギー学研究所) などで研究が行われている [1-5]。それらの研究施設では、パルスエネルギーがキロジュールないしメガジュールの大出力レーザー光を用い、静止させたターゲットに対して、いわゆる“シングル

ショット”による高密度爆縮、高効率の中性子発生などが行われてきた。そこで用いるレーザーシステムは、フラッシュランプでレーザー媒質であるレーザーガラスを励起する方式のため、レーザーガラスの熱の問題により、ショット率が1日あたり数ショットに制限されている。

レーザー核融合発電の実現に向けた連続したターゲット供給技術と制御技術について、海外並びに日本において多くの研究がなされている [6-19]。それら多くの研究では、サボーと呼ばれる金属製の容器にシェルターゲットを装填し、ガスガンを用いてターゲットを数百メートル毎秒に加速して反応容器に射出する方式などが検討されている [6-11]。また射出されたターゲットを追尾するための計測技術や、追尾したターゲットにレーザーを照射するステアリング技術などについて研究がなされている [12-19]。これら研究開発されたターゲット供給技術やターゲット追尾技

The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries, Hamamatsu, SHIZUOKA 431-1202, Japan

corresponding authors': yasuhiko2460@gpi.ac.jp, yasuhiko.nishimura@mail.toyota-td.jp

術は、将来の発電炉スケールを想定したものであり、現状のレーザーシステムを活用した核融合反応を伴うレーザー核融合実証実験への展開は図られてこなかった。

私たちの研究グループは、早期のレーザー核融合発電を実現するために、他に先んじてレーザードライバー、ターゲット供給技術、ターゲット計測技術を有した統合実験・装置開発を推進することが必要と考えている。この研究により、レーザー核融合発電の実現に向けた統合システムにおける課題を明確にするためにも重要である。

そこで2008年より、複数の共同研究機関と共に繰返しレーザーを用いた高速点火方式によるレーザー核融合開発共同研究プロジェクトを実施している。このプロジェクトでは、まず、将来のレーザー核融合炉ドライバーとして最有力候補である半導体励起固体レーザーである KURE-I レーザー[20-23]を励起用光源とした、1 Hz の繰返しレーザー (HAMA レーザードライバー) を開発した[24-26]。その HAMA レーザードライバーを用い、対向照射による高速点火方式を用いたレーザー核融合実証実験を行ってきた[27-29]。

更に2012年から、直径 1 mm の重水素化ポリスチレン (C₈D₈) の中実球ターゲットを 1 Hz で自由落下させるターゲットインジェクションシステムを開発した。2013年に、開発してきた 1 Hz の繰返しレーザーおよび連続ターゲットインジェクションシステムを統合し、いわゆる”連続ショット”による統合システム実験を開始した。その統合システム実験装置を用い、将来のレーザー核融合炉に必須技術である投入するターゲットにレーザーを命中させることで核融合反応を起こすことに世界に先駆けて成功した

[30-33]。

本報では、研究グループで研究開発を行ってきた高繰返しレーザードライバーを用い、1 Hz で自由落下させるターゲットインジェクションシステムによるターゲット投入、制御ならびに自由落下するターゲットの計測など、高繰返しレーザー核融合実験の運用現状について報告する。

2. 繰返し実験を可能にした主要技術

高繰返しレーザー核融合実験の実現には、高繰返しレーザードライバーとターゲットインジェクション技術が必要である。本章では、研究グループで開発してきた高繰返しレーザー核融合実験を可能にした HAMA レーザードライバーと繰返し照射実験装置、そしてターゲットインジェクションシステムについて述べる。

2.1 HAMA レーザードライバーと照射実験装置

図 1 に研究グループで開発した HAMA レーザードライバーの構成と繰返し照射実験装置構成図を示す。HAMA レーザードライバーは、レーザー増幅器、ビーム伝送およびパルス圧縮、集光照射系から構成される。ドライバーポンプ光源としてグリーン光出力の半導体励起固体レーザー (DPSSL: Diode Pumped Solid State Laser) KURE-I を用いるチタンサファイアレーザーである[24-26]。HAMA レーザードライバーのシード光は BEAT レーザーから供給される。

シード光である BEAT レーザーは、ビート波レーザープラズマ加速[34]を目的として開発されたものである[35-37]。BEAT レーザーのシード光は、中心波長 810 nm、帯域 14 nm、パルス幅 80 fs である。このシード光をパルス伸

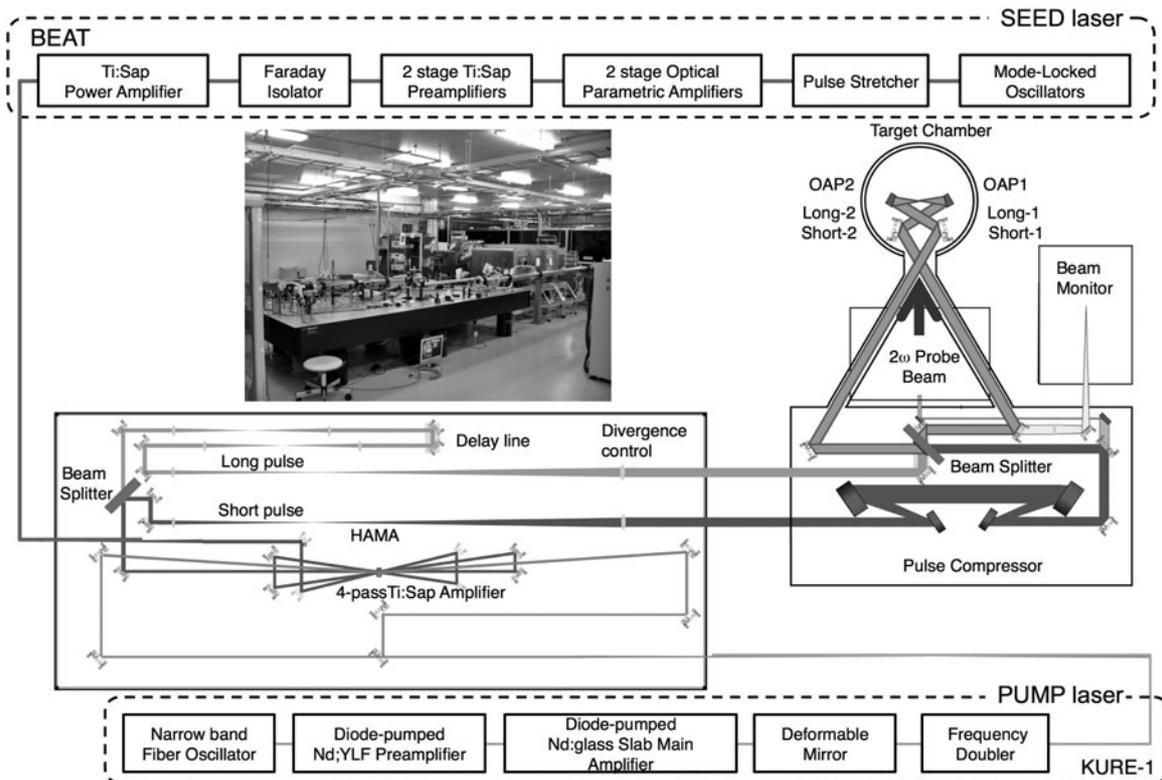


図 1 開発した HAMA レーザードライバーの構成と繰返し照射実験装置構成図。

張器でパルス幅を 400 ps に伸張し、その後、増幅器へ導き前段増幅器である光パラメトリックチャープパルス増幅器 (Optical Parametric Chirped Pulse Amplification) [38] で、パルスエネルギーを 1 nJ から 0.1 mJ まで増幅する。そして、3 段 (2 つのプリアンプと 1 つのパワーアンプ) から成るチタンサファイアマルチパス増幅器を経て、出力 1 J/400 ps まで増幅される。

ポンプ光源である KURE-I レーザーは、半導体レーザー励起による全固体化されたナノ秒のパルス幅を有したレーザーである。同レーザーは、基本波 (波長 1053 nm)、20 J を 10 Hz で出力する世界で唯一稼動している 10 J クラスの半導体レーザー励起 Nd:glass レーザー装置である。この KURE-I レーザーは、研究グループにおいて核融合研究やレーザー駆動衝撃波による材料表面改質 [39, 40] など各種実験のポンプ光源として使用されている。そして稼働実績 10^7 ショット以上になった現在においても、励起用半導体レーザーの交換等の大掛かりなメンテナンス無しで且つ、出力の低下もなく運転している。

KURE-I レーザー基本波は、可変鏡による波面補正機構と非線形光学結晶 ($\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$) によりエネルギー 8 J のグリーンパルス光 (波長 527 nm) に変換され、HAMA レーザードライバに伝送される。BEAT レーザーから伝送された 1 ジュールのシード光は、グリーンパルス光をポンプ光源とし、チタンサファイア結晶をレーザー媒質とした水冷 4 パスマルチ増幅により 3.8 J まで増幅された HAMA レーザー光となる。

その後 HAMA レーザー光は、ビームスプリッターにより爆縮用と加熱用の 2 ビームに分割される。爆縮用ビームはパルス幅が 400 ps のまま伝送され、もう一つの加熱用ビームは 4 枚の回折格子から成るパルス圧縮器によりパルス幅が 110 fs に圧縮される。爆縮用と加熱用の 2 ビームは、パルス圧縮容器に配置したビームコンバイナーとビームスプリッターにより更にそれぞれ 2 ビーム (合計 4 ビーム) に分割し、照射容器に伝送される。分割された 2 ビームは、軸外し放物面鏡 (OAP: Off-Axis Parabolic mirror) により直径 10 μm に集光され、照射容器中心に向かって同軸対向照射される。爆縮用ビームと加熱用ビームの時間遅延は、HAMA レーザードライバ内の光ディレイ光学系 (光路調整器) により任意に調整することが可能である。なお、本インジェクション実験では、加熱用ビームのみを用いている。

2.2 ターゲットインジェクション装置

図 2 に研究グループで開発した 1 Hz で駆動するターゲットインジェクション装置を示す。この装置は、高繰返しレーザー核融合実験を実施するために、直径 1 mm の重水素化ポリスチレン (C_8D_8) の中実球ターゲット (CD ターゲット) を 1 Hz で自由落下させるターゲットインジェクション装置である [30, 31]。同図に示す装置は、前述した照射容器内に配置することができる非常にコンパクトな装置である。

ターゲット射出部は、CD ターゲットを充填するターゲットローダー、そのターゲットを射出位置へ運ぶための

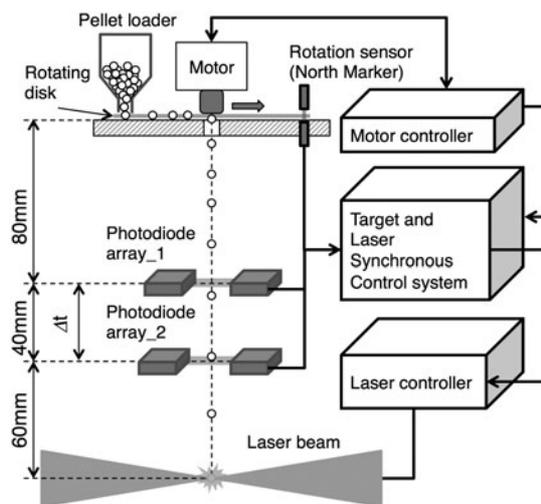


図 2 開発した 1 Hz で駆動するターゲットインジェクション装置ブロック図。

回転ディスクとそのディスクを動かすためのモーター、回転ディスクを一定回転させるための回転検知センサー、そして自由落下するターゲットの通過検知をする 2 つの Photodiode array_1 と_2 (光電センサー 1 と 2) で構成されている。ターゲットローダーに装填できる CD ターゲットは 10,000 個程度 (通常試験運転時は 500~1,000 個程度) 装填が可能である。詳細に図示しないがターゲットローダーの下部にシャッターが設けられており、ローダーから回転ディスクに一つずつターゲットが連続的に供給される。回転ディスクは一定周期で回転制御され、そのディスクによって運ばれる CD ターゲットが射出孔に到達すると CD ターゲットが自由落下する。

ここで、自由落下する CD ターゲットと照射する HAMA レーザー光を同期する方法について述べる。前述した回転ディスクを動かすためのモーターは、ステッピングモーターを採用し、エンコーダーパルスにより一定速度で運転される。回転検知センサーは回転ディスク自体の回転を検知し、ディスクで搬送する CD ターゲットと同期した 1 Hz のパルス信号を出力する。エンコーダーパルスと搬送する CD ターゲットに同期した 1 Hz のパルス信号は、ターゲットとレーザー同期装置 (シンクロコントローラー) に伝送される。

シンクロコントローラー内部では、内部発振器により 80 MHz と 10 Hz パルス信号を発振する。それら 80 MHz と 10 Hz のパルス信号は、シンクロコントローラーに伝送されるエンコーダーパルスと搬送する CD ターゲットに同期した 1 Hz パルス信号に対して同期制御が行われる。同期した 80 MHz と 10 Hz のパルスは、HAMA レーザードライバのシード光である BEAT レーザーの発振及び増幅制御、ポンプ光源である KURE-I レーザーの前段増幅制御信号に使われる。これにより、BEAT レーザーと KURE-I レーザーは 10 Hz で同期運転する。

HAMA レーザー光照射タイミングは、以下に記す処理により制御される。CD ターゲットの通過を検知する 2 つの光電センサーからの出力はシンクロコントローラーに伝

送される。図2に示すように、CDターゲット射出孔から光電センサー1までの距離が80 mm、光電センサー1から光電センサー2までの距離が40 mmそして、光電センサー2からHAMAレーザー光照射位置までの距離は60 mmになるように設計（配置）している。

使用した光電センサーは透過型であり、自由落下するCDターゲットの下端がセンサー光を遮蔽したときに検知するように設定している。2つの光電センサーの配置条件と出力時間差 Δt から自由落下するCDターゲットの平均速度の演算と、そのCDターゲットがHAMAレーザー光照射位置（照射容器中心）に到達する時間が演算される。この演算処理は、自由落下するCDターゲット毎に行われHAMAレーザー光が照射される。

ここで、図3に前述した制御タイミングチャートを示す。このタイミングチャートは、BEATレーザーとKURE-Iレーザーの10 Hz同期信号、回転検知センサーからの1 Hzのパルス信号、CDターゲットの通過検知する2つの光電センサーの出力との関係を示したものである。同図に示すようにシンクロコントローラーでは、演算されるHAMAレーザー光の照射タイミング（1 Hz）とBEATレーザーとKURE-Iレーザー（10 Hz）との位相同期制御が行われる。照射位置に自由落下するCDターゲット毎に位相同期することにより、繰返してHAMAレーザー光が自由落下するCDターゲットに照射可能となる。

3. 繰返し実験を可能にするターゲット計測と制御技術

高繰返しレーザー核融合実験を実現するためには、前章で記したHAMAレーザードライバーやターゲットインジェクションシステムだけでなく計測・制御技術無しでは実現することが困難である。ここで、1 Hzで自由落下するCDターゲットの計測システムについて詳細に述べる。

3.1 3次元ターゲット位置計測システム

図4に研究グループで導入した3次元ターゲット位置計測システムの構成図[41]を記す。この計測システムは、HAMAレーザー光を伝送するミラーの透過光をプローブ光として利用することにより、照射するHAMAレーザー光と光同期することが可能な計測システムである。

照射容器に伝送されたプローブ光は、ビームスプリッ

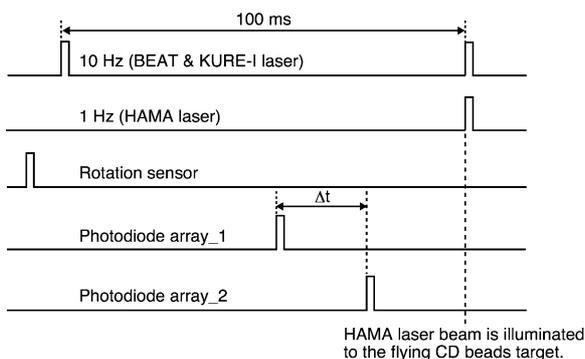


図3 HAMAレーザー光照射タイミングチャート。

ターにより2つのビームに分割される。一つは、対向照射されるHAMAレーザー光に直交する方向（Camera_1側：OAP1とOAP2と直交する方向）に、もう一つは、HAMAレーザー光と同軸方向（Camera_2側：OAP2側）に伝送される。それぞれのプローブ光は、照射位置に自由落下するCDターゲットにHAMAレーザー光が照射されるタイミングでバックライトされる。これにより、CDターゲットにHAMAレーザー光が照射されるタイミングで同期したシャドウイメージがCamera_1とCamera_2（ゲート付CCDカメラ）で画像が計測される。

ここで、この計測システムで計測した一例として、図5にシャドウイメージを示す。図5(a)はX-Z座標、図5(b)はX-Y座標におけるシャドウイメージである。それぞれの画像のほぼ中央の丸い影は、自由落下するCDターゲットである。図5(a)において、CDターゲットの（X軸に沿った）両側に小さな突起（膨れた影）が観察された。これは、HAMAレーザー光照射によりその表面に密度の高いプラズマが生成されたものである。図5(b)において、OAP2側照射されたHAMAレーザー光による自発光が観察された。このように計測したシャドウイメージから、HAMAレーザー光照射毎のCDターゲットの位置や照射状態を3

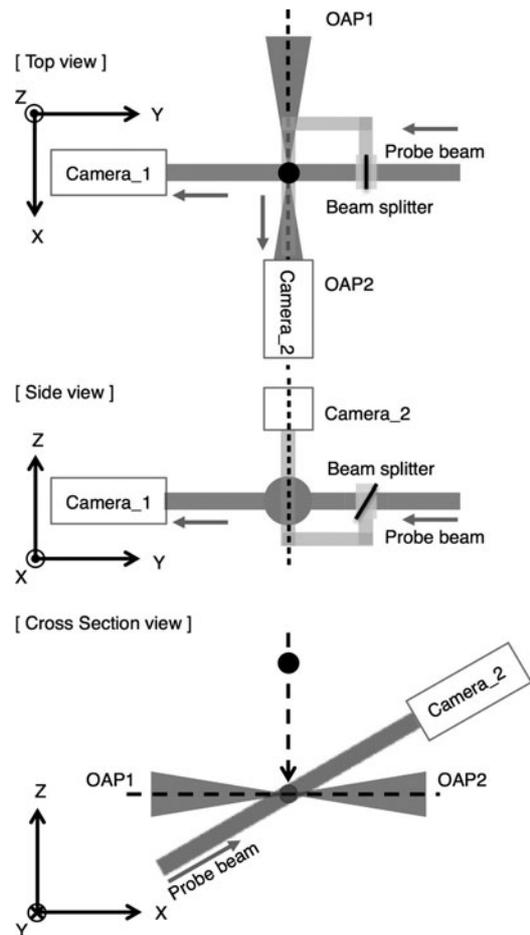


図4 3次元ターゲット位置計測システム。レーザー照射位置を直交するようにHAMAレーザー光に同期したレーザー光を用い自由落下するCDターゲットをバックライト計測するシステムである。なお図中の黒丸は、自由落下するCDターゲットを模擬した。

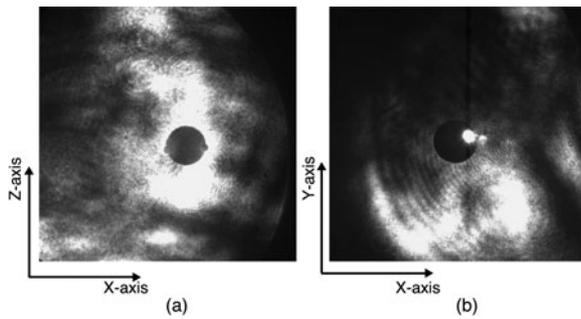


図5 HAMAレーザー光照射時の同レーザー光照射位置における自由落下するCDターゲットのシャドウイメージ。(a)はX-Z座標、(c)はX-Y座標におけるシャドウイメージ。

次元情報として取得することが可能となった。

3.2 時間制御と空間位置の最適化

開発したHAMAレーザードライバと1 Hzで駆動するターゲットインジェクションシステム、そして前述した3次元ターゲット位置計測システムを用いて、繰返しレーザー核融合実験システムの最適化を行った。この実験では、CDターゲットを45個自由落下させた。図6に、自由落下するCDターゲットの落下方向(Z軸)における同ターゲットの挙動を3次元ターゲット位置計測システムで計測した画像を解析した結果を示す。同図中の白丸はシンクロコントローラーで時間制御(HAMAレーザー光の照射処理)を行っていないときであり、黒丸は時間制御を行ったときのZ軸方向におけるCDターゲットの挙動を示したものである。

時間制御を行わない場合、自由落下するCDターゲットはZ軸方向におけるHAMAレーザー光照射位置($Z=0$ mm位置)に対して、おおよそ ± 2 mmの位置変位が発生していた。これは、回転ディスクの速度変動により自由落下するCDターゲットの射出タイミングに変動が生じるためである。一方、時間制御を行うと自由落下する同ターゲットのZ軸方向の位置変位は ± 0.2 mm以内に制御される。これ

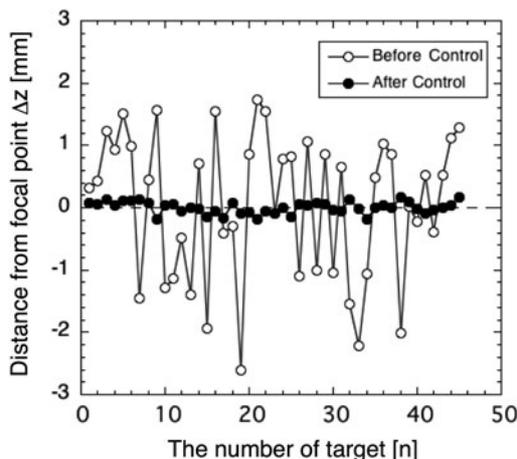


図6 シンクロコントローラーによる時間制御による自由落下するCDターゲットの落下(Z軸)方向の挙動解析結果。白丸は時間制御(HAMAレーザー光の照射タイミング処理)を行っていないとき、黒丸は時間制御を行ったときのZ軸方向におけるCDターゲットの挙動挙動。

は、同ターゲットの射出タイミングと落下速度をシンクロコントローラーにて演算することにより、HAMAレーザー光が照射されるタイミングが制御されたからである。

次に、HAMAレーザー光が照射される平面座標(X-Y座標)における自由落下するCDターゲットの分布を図7に示す。図7(a)はCDターゲットの大きさを直径 $1\text{ mm} \pm 0.02\text{ mm}$ 以内に揃えたときの分布であり、図7(b)はCDターゲットの大きさを直径 $1\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 以内に揃えたときの分布である。なおX軸は、マイナス側からプラス側に向かって回転ディスクが回転する方向である。

図7(a), (b)に示すように、CDターゲットの直径を $1\text{ mm} \pm 0.02\text{ mm}$ 以内に揃えたときは、ターゲットの大きさを照射容器中心(座標: $X=Y=0$)とするX-Y平面に自由落下するCDターゲットは、X軸方向に $-2.9 \sim 0.4\text{ mm}$ 、Y軸方向に $-1 \sim 0.6\text{ mm}$ の分布であった。一方、CDターゲットの直径を $1\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 以内に揃えたときは、X-Y平面における自由落下するCDターゲットの分布がX軸方向に $-2.8 \sim 1.6\text{ mm}$ 、Y軸方向に $-2.3 \sim 1.6\text{ mm}$ の分布であった。

この結果から、繰返しレーザー核融合実験を実現するには、ターゲットインジェクションシステムの最適化だけでなく、ターゲットの大きさも重要であることがわかった。開発したターゲットインジェクションシステムにおけるX軸方向の位置変位は、回転ディスクの速度変動に伴う変位がある。Y軸方向の位置変位は、これまでの適合実験から

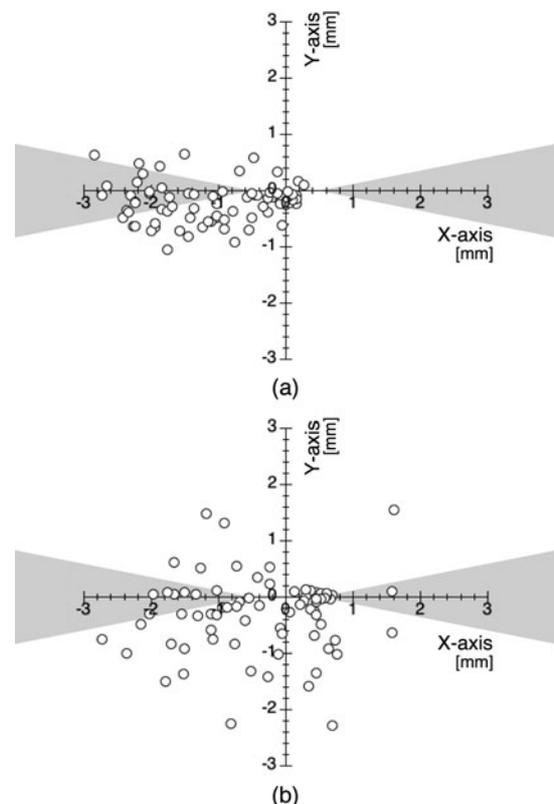


図7 HAMAレーザー光が照射される平面座標(X-Y座標)における自由落下するCDターゲットの分布。(a)CDターゲットの大きさを直径 $1\text{ mm} \pm 0.02\text{ mm}$ 以内に揃えたときの分布、(b)CDターゲットの大きさを直径 $1\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 以内に揃えたときの分布。

ターゲット形状の不揃い（バラつき）、回転ディスクの偏心、そして回転ディスクに設けられているターゲット搬送孔からターゲットが自由落下を開始する（離れるときの Y 軸方向）位置の変動が複合して発生したものであると、それぞれ推論した。

3.3 最近の繰返しレーザー核融合実験の状況

前述に記した実験システムの最適化を行い、現在、定常の繰返しレーザー核融合実験は600ショット（1 Hz で10分間）連続実施している。ターゲットインジェクションシステムを自由落下する CD ターゲットが照射容器中心に落下するように照射容器内に設置し、ターゲットがチェンバー中心に到達したときにターゲット表面に、超高強度レーザー（HAMA レーザー）光が照射されるようにした。なお、対向の HAMA レーザー光の集光照射位置は、照射容器中心から 500 μm 集光光学系側にそれぞれ引いている。

図 8 に、3 次元ターゲット位置計測システムで取得した画像データの解析結果と HAMA レーザー光照射毎に発生する γ 線との関係について示す。なお、 γ 線の発生はエネルギー 100 keV 以上の高速電子によるものであり、加熱レーザーが相対論的強度でターゲットに照射された結果である。発生する γ 線の計測は、飛行時間（TOF: Time of flight）中性子シンチレーター[33]を用いて計測した。

同図に示すように、シンクロコントローラーにより時間制御とターゲットインジェクションシステムの安定化により、自由落下する CD ターゲットの殆どを 3 次元ターゲット位置計測システムで捕捉することができた。取得した画

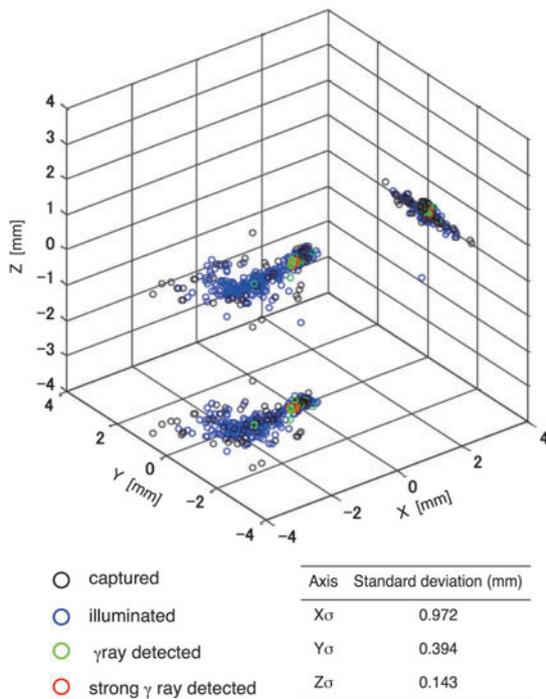


図 8 HAMA レーザー光照射毎に発生する γ 線とターゲットの位置関係。図中の黒丸は 3 次元ターゲット位置計測システムに写ったが HAMA レーザー光が照射されない（かすらない）とき、青丸は HAMA レーザー光が照射もしくはかすったとき、緑丸は γ 線の発生したとき、そして赤丸は強い γ 線が発生したときである。

像データの解析結果から、自由落下する CD ターゲットの位置変位（標準偏差： σ ）は、それぞれ、 $X\sigma=0.972$ mm, $Y\sigma=0.394$ mm, $Z\sigma=0.143$ mm であった。また、HAMA レーザー光照射毎に発生する γ 線と同ターゲットとの関係は、図中の緑丸や赤丸に示されるように、照射容器中心座標に同ターゲットが落下したときに発生していることがわかった。

図 9 に繰返しレーザー核融合実験における自由落下する CD のターゲットへの HAMA レーザー光の当たる状況推移を示す。同図に示すように、3 次元ターゲット位置計測システムの導入以前は不安定な照射確率であった。システム導入後は、自由落下するターゲットの位置情報を正確に得ることが可能となり、同ターゲットに HAMA レーザー光が照射できる確率が向上した。このように HAMA レーザー光の照射確率は最大 9 割、安定して 6 割以上の確率で繰返しレーザー核融合実験ができるようになった。

同図に示す状況より更に、強い γ 線の発生確率を向上させた繰返しレーザー核融合実験を行うためには、自由落下する CD ターゲットの位置精度向上が必要である。具体的には、回転ディスクを駆動するモーター制御をより高度化（フィードバックパラメータを増やすなど）することにより改善が見込まれる。研究グループでは更なる装置の改善を進めるとともに、現在、直径 500 μm の CD シェルターゲットインジェクションによる小型レーザー核融合発電実証装置の開発を進めている。

4. まとめ

本論において、開発してきた 1 Hz の繰返しレーザーおよび連続ターゲットインジェクションシステムを統合した研究成果の一例を報告した。ターゲットインジェクション装置を代表とする統合装置を用いた研究を推進することが、レーザー核融合による発電実証・実現が近づくと考えられる。高繰返しレーザー核融合実験および運用するためには、安定したレーザーとターゲットの同期制御とターゲット位置計測技術が不可欠である。特に、3 次元ターゲット位置計測システムと組み合わせることにより、ターゲットインジェクション装置の射出精度を向上させるだけでなく、自由落下するターゲットの位置と発生する γ 線や中性

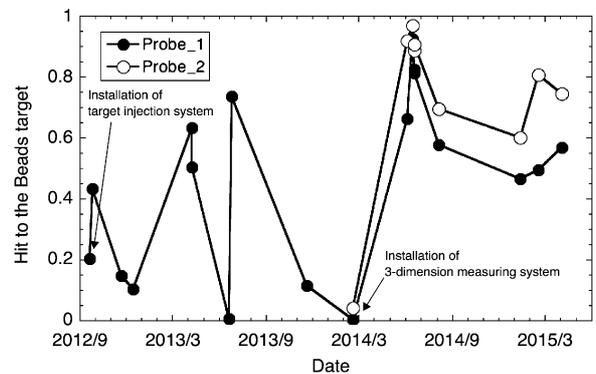


図 9 繰返しレーザー核融合実験における自由落下する CD のターゲットへの HAMA レーザー光の当たる状況推移。

子との相関を明らかにする手立てとなった。

近い将来、CD シェルターターゲットインジェクション装置の開発に成功すれば、高繰返しレーザー核融合発電の実証に向けた大きな一歩となる。

謝 辞

ターゲットインジェクションシステムの設計・製作に携わったトヨタテクニカルディベロップメント株式会社の設計・製作関係各位に心より謝意を申し上げます。本研究を遂行するにあたり、有益なご助言を賜りました藤根学氏、大木島純氏、近藤拓也氏、辻慎二氏、中村直樹氏、葛谷孝史氏、須藤裕之氏、梶野勉氏、掛布光孝氏、西 哲平氏、菅博文氏、中山師生氏、他、共同研究機関の関係各位に心より謝意を申し上げます。また実験準備など御協力を賜りました、光産業創成大学院大学吹田聡子氏に心より謝意を申し上げます。

参 考 文 献

- [1] M.J. Edwards *et al.*, Phys. Plasmas **20**, 070501 (2013).
 [2] O.A. Hurricane *et al.*, Nature **506**, 7488 (2014).
 [3] R. Kodama *et al.*, Nature **412**, 798 (2001).
 [4] Y. Kitagawa *et al.*, Phys. Rev. E **71**, 016403 (2005).
 [5] H. Shiraga *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **53**, 124029 (2011).
 [6] I.V. Aleksandrova *et al.*, Plasma Fusion Res. **8**, 3404052 (2013).
 [7] E.R. Koresheva *et al.*, J. Russian Laser Res. **35**, 2, March, 141-168, (2014).
 [8] E.R. Koresheva *et al.*, 3rd European Target Fabrication Workshop, 29 September-1 October, 2010, Oxford, UK.
 [9] R.W. Petzoldt, Fusion Technol. **34**, 831 (1998).
 [10] H. Yoshida and Y. Yamahira, Rev. Laser Eng. **32**, 343 (2004).
 [11] T. Norimatsu *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **82**, 829 (2006).
 [12] D.T. Goodin *et al.*, General Atomics Report GA-A23417 (2000).
 [13] L.C. Carlson *et al.*, Fusion Sci. Tech. **52**, 478 (2007).
 [14] L.C. Carlson *et al.*, J. Phys. Conference Series **112**, 032039 (2008).
 [15] L.C. Carlson *et al.*, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE **38**, 300 (2010).
 [16] H. Sakauchi and R. Tsuji, Plasma Fusion Res. **4**, S1012 (2009).
 [17] N. Kameyama and H. Yoshida, Plasma Fusion Res. **8**, 3404045 (2013).
 [18] N. Kameyama and H. Yoshida, Plasma Fusion Res. **9**, 4404102 (2014).
 [19] M. Kalal *et al.*, J. Korean Physical Society **56**, 184 (2010).
 [20] T. Kawashima *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, 6415 (2001).
 [21] T. Kurita *et al.*, in Conference on Lasers and Electro-Optics (Optical Society of America, 2005), paper CMJ5.
 [22] T. Sekine *et al.*, Opt. Express **18**, 13927-13934 (2010).
 [23] T. Sekine *et al.*, Opt. Express. **21**, 8393 (2013).
 [24] Y. Mori *et al.*, Nucl. Fusion **53**, 073011 (2013).
 [25] Y. Mori *et al.*, Rev. Laser Eng. **42**, 154 (2014).
 [26] Y. Mori *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **688**, 012070 (2016).
 [27] Y. Kitagawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 155001 (2012).
 [28] Y. Kitagawa *et al.*, Plasma Fusion Res. **8**, 3404047 (2013).
 [29] Y. Mori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 055001 (2016).
 [30] O. Komeda *et al.*, Scientific Reports **3**, 02561 (2013).
 [31] O. Komeda *et al.*, Plasma Fusion Res. **8**, 1205020 (2013).
 [32] 西村靖彦 他：プラズマ・核融合学会誌 **91**, 544 (2015).
 [33] R. Hanayama *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **688**, 012026 (2016).
 [34] 北川米喜：プラズマ・核融合学会誌 **73**, 1087 (1997).
 [35] Y. Mori *et al.*, Int. J. Mod. Phys. B **21**, 572 (2007).
 [36] Y. Mori and Y. Kitagawa, Phys. Plasmas **19**, 053106 (2012).
 [37] Y. Mori and Y. Kitagawa, Appl. Phys. B Lasers and Optics **110**, 57 (2013).
 [38] 岡田 大 他：プラズマ・核融合学会誌 **85**, 456 (2009).
 [39] Y. Nishimura *et al.*, J. Phys. D: App. Phys. **48**, 325305 (2015).
 [40] Y. Nishimura *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **717**, 012073 (2016).
 [41] K. Ishii *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **688**, 012036 (2016).