

2. 高繰り返しレーザー核融合ドライバー HAMA

2. High-Repetition Laser Fusion Driver HAMA

森 芳 孝¹⁾,関 根 尊 史²⁾,川 嶋 利 幸²⁾ MORI Yoshitaka¹⁾, SEKINE Takashi²⁾ and KAWASHIMA Toshiyuki²⁾ ¹⁾光産業創成大学院大学,²⁾浜松ホトニクス株式会社産業開発研究所

(原稿受付:2015年5月21日)

慣性核融合炉ドライバーの有力候補の一つである半導体励起固体レーザー(DPSSL)を用いた高繰り返し レーザー核融合ドライバー HAMA の現状について紹介する. HAMA レーザーは, 10ジュール出力のグリーン光 半導体励起固体レーザー KURE-I を励起光源としたチタンサファイアレーザーであり, 1 Hz で動作する. 爆縮 レーザーエネルギー6ジュール,加熱レーザーエネルギー0.8 ジュールを有する同軸対向照射型の爆縮高速加熱 レーザーシステムであり,爆縮レーザーのパルス波形はフットパルスとメインパルスからなるテーラードパルス を採用している.単発運転の大型レーザーによるレーザー核融合研究が炉心プラズマの科学的ブレークイーブン をめざしているの対し,高繰り返し運転のレーザー核融合システムは,ターゲットインジェクションシステム, 炉システムを取り込みながら統合装置としての核融合炉開発を志向している.

Keywords:

inertial confinement fusion, laser fusion, DPSSL, Ti-sapphire laser, ultra-intense laser, Fast-heating

2.1 はじめに

慣性閉じ込め核融合のドライバーとしてレーザー光を用 いるレーザー核融合研究は,Basovらによる核融合反応の 発生を皮切りに,単発動作のパルス出力メガジュールを有 するレーザー建設を経て,最近,アルファ粒子による燃料 の自己加熱に至った[1,2].さらに,半導体励起固体レー ザーの進展により,繰り返し動作の炉用ドライバー開発が 加速しつつある.

ここでは、核融合炉という観点から、これまで開発され てきたレーザー核融合ドライバーの経緯を振り返りつつ、 我々の構築した繰り返しレーザー核融合ドライバー HAMAの現状を紹介する.尚、HAMAレーザーの詳細に ついては、参考文献[3,4]にまとめているのでそちらを参 照されたい.

2.2 レーザー核融合ドライバー開発の経緯

レーザー核融合炉は、パルス炉である.反応炉の中心部へ、 繰り返し1Hz以上で燃料ペレットとレーザーを投入し、慣 性閉じ込めによる核融合反応を連続で発生させながら、炉 壁でその放出エネルギーを回収する[5].レーザー核融合 炉のドライバーに求められる性能指標として、主に以下の 4点が挙げられる.すなわち、(指標1)モジュールあたり キロジュール以上の大エネルギーパルス出力、(指標2) 5%以上の燃料コアへのエネルギー結合効率、(指標3) 10Hz程度の繰り返し動作、(指標4)10%以上の電気-レーザー光変換効率である.上記目標値は、炉設計のコン セプトにより変動するが、概ねこの値のようである.

これまで、ネオジウムドープガラス固体レーザー、CO₂ ガスレーザー、KrF エキシマガスレーザーなどが開発さ れ、慣性核融合の炉心プラズマ研究に供されてきた.中で も、ガラス固体レーザーは精力的に開発が進められてお り、その理由は、制御性が高く大エネルギーであること (指標1)、及び波長変換素子等によりレーザー波長を短く でき燃料コアへの結合性がよいこと(指標2)が総合的に 判断された結果のようである[6].

図1に示すのは、レーザー核融合研究のために開発され



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

2) Hamamatsu Photonics, K.K.

authors' e-mail: ymori@gpi.ac.jp, t-sekine@crl.hpk.co.jp, kawashima@crl.hpk.co.jp

Y. Mori et al.

Special Topic Article

た固体レーザーシステムの経緯である[7].1960年のレー ザー発明からまもなくして, Levedev 研の Basov らが核融 合反応生成に用いたレーザーは,フラッシュランプで励起 する出力20ジュール,波長1µmの赤外光を放出するネオ ジウムドープガラスレーザーであった[8].その後, Nuckolls らによる1972年の爆縮概念の公表[9]を契機として レーザー開発が加速し,一日数発の単発運転で,パルスエ ネルギーを増大することを第一としたドライバー開発の流 れが生まれた.

国内では1970年代後半から80年代前半にかけて激光シ リーズが開発され、出力20キロジュールの激光12号 (GXII) が建設された[10]. 同時期に、米国では、出力5 キロジュールの OMEGA および100キロジュールの NOVA が建設されている[11]. その後、これら赤外光を放出する 大型レーザーには、燃料プラズマへの結合効率向上のた め, 波長変換素子が導入され, 2 倍高調波 (グリーン光) 若 しくは3倍高調波(ブルー光)での運用が標準となってい る. 1990年代に入り、米国はさらなるレーザーエネルギー の増強を推し進め、OMEGA のブルー光出力30キロジュー ルヘのアップグレード[11]及び NOVA のシャットダウン 経て、2009年完成のブルー光出力1.8メガジュールレー ザー NIF (National Ignition Facility) に至っている[12,13]. 一方,繰り返し運転(指標3),及び電気-光変換効率の 向上(指標4)をめざした炉用レーザードライバー開発 は、1980年代より紫外光出力のKrFガスレーザーを中心に 進められてきたようであるが[14-17],近年の半導体技術 の進展にともない、フラッシュランプにかわり半導体レー ザーダイオードで運用実績の豊富な固体レーザー媒質を励 起する方式,いわゆる DPSSL (Diode Pumped Solid State Laser)が炉用ドライバーとして注目をあつめるように なった[18,19]. 国内では、繰り返し10Hz, エネルギー出 力21ジュールが達成され、その際の半導体レーザー光から 増幅レーザー光への変換効率は11.7%である[20].現 在,電気から半導体レーザーへの電気-光変換効率は60% 以上を達成しており、レーザーとしての電気-光変換効率 は10%を見通すことができるところにいる. DPSSL は, 将 来の炉用ドライバーとして世界各国の炉設計でその使用が 想定されている[5,21-23]. 最近の開発動向については, 参 考文献[24,25]に紹介されている.この DPSSL を,世界に 先駆けて、レーザー核融合研究に取り入れたのが HAMA であり、参考文献[26]にその位置づけが紹介されている. HAMAは,2008年にターゲット上での出力1ジュールで運 転を開始し,現在は出力7ジュールで運用中である.一方, 将来の高繰り返しレーザー核融合発電の基礎研究にむけ て、出力100ジュールの DPSSL が構築されつつあり [27], キロジュールの DPSSL は研究開発の緒についている.

図1に示すように、単発レーザーを用いたレーザー核融 合研究は、慣性閉じ込め核融合物理の解明に主眼をおき、 核融合反応エネルギーがレーザー投入エネルギーを超える 科学的ブレークイーブンを達成することを目標として進展 してきた.一方、繰り返しレーザーを用いた核融合研究で は、ターゲット導入技術、炉工学をとりこみながら、核融 合発電炉システムが見通せる統合システムとして成長して いくことを想定している.最近の繰り返しレーザードライ バーの開発スピードは,40年前に核融合ソサイエティが経 験した単発レーザー開発のそれと類似しており,大変興味 深い.

2.3 レーザーシステム

2.3.1 設計思想

繰り返しレーザー核融合システムを構築するにあたり, 現有の半導体励起固体レーザー(DPSSL)を活用すること を第一条件とした.当時稼働中のDPSSLの仕様を検討し た結果,固体レーザーの一種で超短パルス運転が可能なチ タンサファイアレーザー[28]を励起する光源として DPSSLを活用する方式を採用した.

レーザー核融合では、さまざまなレーザーの照射方式、 及び点火方式が提案されている[29].ここでは、照射方式 としてレーザー光を直接核融合燃料へ照射する直接照射方 式を、点火方式はコンパクト化が期待される高速点火方式 [30-38]を採用した.対向ビームで燃料を圧縮し、さらに超 短パルスを同軸で重畳して高速点火に用いる.対向かつ対 称な照射系で燃料圧縮と加熱を同軸で行うことが特徴であ る.

2.3.2 レーザー概要

HAMA レーザーは、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 KURE-I[3]を用いるチタンサ ファイアレーザーであり、シード光はBEAT レーザーより 供給される.図2にHAMA が設置されている実験室の外 観を示す.HAMA レーザー増幅器、ビーム伝送およびパル ス圧縮、集光照射系の様子である.

2.3.3 シード光源:BEAT

BEAT レーザーは、ビート波レーザープラズマ加速[39] を目的として開発されたものである[40-42]. 発振器から でたシード光は、中心波長 810 nm、帯域 14 nm、パルス幅 80 fs であり、まず、パルス伸張器でパルス幅を 400 ps へ伸 張する. 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)[43]で、パルスエネルギーを 1 nJ から 0.1 mJ まで増幅する.引き続き、チタンサファイ アマルチパス増幅器を 3 段経て、出力 1 ジュール/400 ps を得る.



図 2 HAMA レーザーの外観.

Journal of Plasma and Fusion Research Vol.91, No.8 August 2015

2.3.4 ポンプ光源:KURE-I

KURE-I レーザーは,超高出力半導体レーザー(LD)励 起による全固体化され,ナノ秒パルスで20ジュールを 10 Hzで出力する世界で唯一稼動中のLD励起Nd:glassレー ザー装置である[20,44-46].2008年から浜松ホトニクス株 式会社産業開発研究所にて運用を開始し,可変鏡による波 面補正機構と非線形光学結晶(CsLiB₆O₁₀)による波長変換 器を導入するアップグレードを行った[47].現在までに, 励起用 LD の交換等のメインテナンスなしに,核融合研究 をはじめとしたプラズマ実験に供しており,出力の低下も なく順調に稼働実績(現在10⁷ショット)を伸ばしている. 本システムを導入するにあたり,KURE-I からの波長 527 nm のグリーンパルス光をHAMA レーザーに伝送する ラインと,KURE-I の波長変換部を透過した基本波 (1053 nm)の赤外パルス光をターゲット照射に用いるため の遅延光学系を具備した伝送ラインを新たに構築した.

2.3.5 HAMA レーザー

HAMA レーザーは, 直径 5 cm, 厚み 2.5 cm のチタンサ 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 システムである. KURE-I から伝送された波長 527 nm, エ ネルギー 8 ジュールのグリーンパルス光を 2 ビームに分割 し結晶を両側から励起する. BEAT レーザーから伝送され たエネルギー1ジュールのシード光を3.8ジュールまで増幅 する.

2.3.6 パルス伝送系と照射系

パルス伝送は、固体ターゲットと超高強度レーザーの相 互作用による核融合発生を目的とした超短パルス1ビーム 運転[48]から、爆縮加熱を目的とした4ビーム対向爆縮加 熱配置[49,50],そして爆縮性能の向上のため6ビームに よるテーラードパルス爆縮加熱配置へと進展した.現在の パルス伝送配置を図3(a)に示す. HAMA レーザーで増幅 したビームの一部はそのままで"L"パルス,一部は圧縮し て"S"パルスとする. "K"パルスは, KURE-I でグリーン光 に変換されなかった赤外光を直接とってくる.これら3つ のパルスは、伝送系の中のビームコンバイナー及びビーム スプリッターを経由することで、"K-L-S"と同軸直列に並 び,かつ2ビームに分割され,同軸対向照射配置をなす. ビームの波形を図3(b)に示す. "K-L"が燃料圧縮に, "S" が燃料加熱に寄与する."K"と"L"パルスの時間遅延は電 気同期で調整し、"L"と"S"の時間遅延は、光路長を調整す ることで達成する光同期である.

真空照射容器内で、レーザービームを球殻ターゲットへ 対向2方向照射し、焦点距離16cmの軸外し放物面集光鏡 で球殻表面及び中心に集光する.図3(c)に球型ターゲッ トへのレーザー照射レイアウトを示す.集光F値は2.5であ り、焦点位置は、それぞれのパルス"K"、"L"、"S"のビー ム発散角を調整することで、制御可能である.

2.3.7 球殻ターゲットへの対向照射

ここでは、HAMA レーザーで直径 500 µm, 厚み7µm の重水素化ポリスチレン (C₈D₈) 球殻を圧縮し加熱する様 子を述べる. 燃料が圧縮する様子は、平板体系における輻 射流体一次元コード STAR1D[51]で追跡した結果を拠り







図4 HAMAレーザーによる C₈D₈ 球殻の爆縮加熱: (a)レーザー
出力時間分布, (b) 流体シミュレーションによる空間時間
ダイアグラムおよび(c) X線ストリークカメラによる X線発光像.

所とした. 図4(a)に示すような出力波形を有するパルス を球殻へ照射したときの空間時間流線図は図4(b)のよう になる. まず"K"パルスが25 nsの長いフットパルスを形成 し, 徐々にペレットを中心へ駆動する. その後, パルス幅 400 ps の"L"パルスがメインパルスとして、中心まで球殻 を押し込んで、カットオフ密度の20倍以上の圧縮コアプラ ズマを形成する.燃料圧縮にもちいるレーザーエネルギー は、ビームあたり"K"パルスが 2.4 ジュール、"L"パルスが 0.5 ジュールである. 球殻表面でのスポットサイズは、"K" パルスが230 um, "L"パルスが100 umであり、レーザー強 度は、それぞれ 3×10^{11} W/cm²、 2×10^{13} W/cm² である. こ の"K-L"パルスの組み合わせによる爆縮過程は、結果的に レーザーパルスの波形を整形したテーラードパルスとなっ ている.フットパルス"K"の球殻ターゲット表面での集光 強度を変更することで、圧縮コア密度を調整することが可 能である.37 ns あたりで最大圧縮となるが、この瞬間にパ ルス幅100 fsの超高強度レーザー"S"パルスを照射して、コ アを高速電子等で加熱する.加熱ビームのエネルギーは

Special Topic Article

ビームあたり 0.4 ジュール,集光径は 1/e² 強度で 10 µm であり,集光中心における集光強度は 6×10¹⁸ W/cm² である.

図4(c)に示すのは、X線ストリークカメラでとらえた 実際の対向爆縮高速加熱の様子である.爆縮ビームにより ターゲット中心に形成された圧縮コアが、加熱レーザー照 射の瞬間に高温となりX線発光強度が増大したことを示し ている.

2.3.8 HAMA の運用状況

HAMA レーザーは, 2008年のファーストライトより, 核 融合反応の実証[48],連続爆縮加熱[49,50],そして,新 規開発したターゲットインジェクションシステムの導入 [52] を経て,フライングターゲットによる繰り返し1 Hz の連続核融合反応を達成してきた[53].インジェクション 実験で用いているターゲットは中身の詰まった重水素化ポ リスチレン中実球であり,加熱パルスのみを対向照射して いる.インジェクションターゲットは,将来的には慣性閉 じ込め核融合ターゲットである球殻ターゲットへ移行して いく予定である.以上のように,繰り返しレーザーを用い て,核融合反応と身近に接しながら,核融合炉システムの 全体像を浮かび上がらせるための研究開発を継続中であ る.

2.4 まとめ

レーザー核融合炉ドライバーの開発経緯を振り返りつ つ、半導体励起固体レーザーを励起光源とした高繰返し爆 縮高速加熱レーザードライバーHAMAの現状を紹介した. レーザーは発明から50年を経過したが、その技術は未だ発 展途上にある.1980年代のチャープパルス増幅技術の発 明、1990年代のチタンサファイア結晶の開発により、従来 よりも小規模なレーザーで、連続レーザー核融合研究が可 能となった.従来の科学的ブレークイーブンをめざした単 発レーザーによる研究開発に加えて、核融合炉開発を志向 した繰り返しレーザーによるあらたなレーザー核融合研究 の流れが生まれつつある.

謝 辞

HAMA レーザーは、光産業創成大学院大学、浜松ホトニ クス、トヨタ自動車を中心とする共同研究プロジェクトで 構築された.また、HAMA レーザーの運用にあたり、 KURE-I 運転に協力いただいた浜松ホトニクス株式会社竹 内康樹博士、幡野佑真氏に感謝の意を表す.

参考文献

- [1] O.A. Hurricane *et al.*, Nature **506**, 343 (2014).
- [2] B.A. Remington: プラズマ·核融合学会誌 90,228(2014).
- [3] Y. Mori *et al.*, Nucl. Fusion **53**, 073011 (2013).
- [4] 森芳孝 他:レーザー研究 42,154 (2014).

- [5] 北川米喜他:核融合研究 68 別冊, 335 (1992).
- [6] 白神宏之, 疇地 宏: レーザー研究 41,217 (2013).
- [7] 藤田尚徳: プラズマ・核融合学会誌 75,105 (1998).
- [8] N.G. Basov et al., IEEE J. Quant. Electron. 4, 864 (1968).
- [9] J. Nuckolls *et al.*, Nature **239**, 139 (1972).
- [10] 山中千代衛:レーザー研究 11,586 (1983).
- [11] 白神宏之他:プラズマ・核融合学会誌 73,1207 (1997).
- [12] E.I. Moses, Nucl. Fusion 49, 104022 (2009).
- [13] E.I. Moses 他: プラズマ·核融合学会誌 87, 295 (2011),
- [14] 植田憲一: 核融合研究 58,464 (1987).
- [15] 大和田野芳郎他: プラズマ・核融合学会誌 70,1238 (1994).
- [16] 宮永憲明他:プラズマ·核融合学会誌 81 増刊,48 (2005).
- [17] M.W. Wolford et al., Plasma Fusion Res. 8, 3404044 (2013).
- [18] C.D. Orth et al., Nucl. Fusion 36, 75 (1996).
- [19] 井澤靖和:プラズマ・核融合学会誌 75 増刊, 19 (1999).
- [20] R. Yasuhara *et al.*, Opt. Lett. **33**, 1711 (2008).
- [21] 神前康次他:プラズマ・核融合学会誌 82,819 (2006).
- [22] H.-C. Chanteloup *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. 244, 012010 (2010).
- [23] A.J.Bayramian et al., J.Phys.:Conf.Ser. 244,032016 (2010).
- [24] 河仲準二:オプトロニクス 369, 16 (2012).
- [25] 河仲準二: プラズマ・核融合学会誌 90,440 (2014).
- [26] D.E. Hinkel, Nucl. Fusion 53 104027 (2013).
- [27] http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/news/ 2014_11_06.pdf
- [28] 阪部周二: プラズマ・核融合学会誌 75 増刊, 23 (1999).
- [29] 疇地宏: プラズマ・核融合学会誌 81 増刊, 2 (2005).
- [30] N.G. Basov et al., J. Sov. Laser Res. 13, 396 (1992).
- [31] M. Tabak et al., Phys. Plasmas 1, 1626 (1994).
- [32] 加藤義章: プラズマ・核融合学会誌 74,316 (1998).
- [33] R. Kodama et al., Nature 412, 798 (2001).
- [34] R. Kodama et al., Nature 418, 933 (2002).
- [35] 北川米喜他:プラズマ・核融合学会誌 81,384 (2005)
- [36] W. Theobald et al., Phys. Plasmas 18, 056305 (2011).
- [37] S. Fujioka *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 54, 124042 (2012).
- [38] Y. Kitagawa et al., Phys. Rev. Lett. 114, 195002 (2015).
- [39] 北川米喜:プラズマ・核融合学会誌 73, 1087 (1997).
- [40] Y. Mori et al., Int. J. Mod. Phys. B 21, 572 (2007).
- [41] Y. Mori, and Y. Kitagawa, Phys. Plasmas 19,053106 (2012).
- [42] Y. Mori, and Y. Kitagawa, Appl. Phys. B 110, 57 (2013).
- [43] 岡田大他:プラズマ・核融合学会誌 85,384 (2009).
- [44] T. Kawashima et al., Jpn. J. Appl. Phys. 40, 6415 (2001).
- [45] T. Kurita *et al.*, in Conference on Lasers and Electro-Optics (Optical Society of America, 2005), paper CMJ5.
- [46] T. Sekine et al., Opt. Express 18, 13927 (2010).
- [47] T. Sekine et al., Opt. Exp. 21, 8393 (2013).
- [48] Y. Kitagawa et al., Plasma Fusion Res. 6, 1306006 (2011).
- [49] Y. Kitagawa et al., Phys. Rev. Lett. 108, 155001 (2012).
- [50] Y. Kitagawa et al., Plasma Fusion Res. 8, 3404047 (2013).
- [51] A. Sunahara et al., Plasma Fusion Res. 3, 043 (2008).
- [52] O. Komeda et al., Plasma Fusion Res. 8, 1205020 (2013).
- [53] O. Komeda et al., Sci. Reports 3, 2561 (2013).