T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	高速点火核融合研究の進展ー高速点火実証ターゲット,ペタワットレーザー LFEXー
Title	Current Status of Laser Fusion by Fast Ignition -Target for FIREX and PW laserLFEX-
著者(和文)	乗松孝好, 長井圭治, 岩本晃史, 河仲準二, 中田 芳樹
Authors	Takayoshi Norimatsu, Keiji Nagai, Akifumi Iwamoto, Junji Kawanaka, Yoshiki Nakata
出典 / Citation	プラズマ・核融合学会誌, Vol. 85, No. 11, pp. 755-761
Citation(English)	J. Plasma Fusion Res., Vol. 85, No. 11, pp. 755-761
発行日 / Pub. date	2009, 11
URL	http://www.jspf.or.jp/
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権はプラズマ・核融合学会に帰属します。 Copyright (c) 2009 Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research.

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

J. Plasma Fusion Res. Vol.85, No.11 (2009) 755-761

解説

高速点火核融合研究の進展
ー高速点火実証ターゲット，ペタワットレーザー LFEXー

乗松孝好，長井圭治[1)]，岩本晃史[2)]，河仲準二，中田芳樹
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター，[1)]東京工業大学資源化学研究所，[2)]自然科学研究機構核融合科学研究所

（原稿受付：2009年8月19日）

高速点火実証実験で不可欠なターゲットの開発，追加熱に用いるペタワットレーザー LFEX（Laser for First Ignition Experiment）の現状について示した．ターゲットでは新設計，非球対称なコーンつきターゲット内部に中空固体燃料層を形成する技術，低密度フォーム材料の現状を示した．LFEX レーザーでは本体が完成し，パルスを短くする回折格子を用いた圧縮器の建設が進められている．

Keywords:
laser fusion, fast ignition, cryogenic target, low density foam, PW laser LFEX

1．初めに

慣性核融合の分野では点火燃焼の実証が現実的なものになり，発電プラントへのロードマップの作成等の活動が急速に進展している．米国ローレンスリバモア国立研究所（LLNL）では10年前に建設を開始した NIF（National Ignition Facility）[1]が完成し，5月に完成披露が行われた．建設開始時のキーワードは「ナショナルセキュリティ」であったが，完成披露式のそれは「星のエネルギーを地上に」であった．来年にかけ，調整ショットを行い，2013年までには間接照射，中心点火方式での点火燃焼の実証，利得 $Q=10$（入力レーザーエネルギーに対する出力核融合エネルギーの比）を実現しようとしている．また，フランスでも数年遅れのペースで同様の施設 LMJ（Laser Mega Joule）の建設が進められている．これらはいずれも単ショットベースであるが，レーザーの出力は将来のレーザー核融合発電所の1ショットと同等である．簡単に言ってしまうと後は利得を高める（$Q>100$）とともに高繰り返し（～10 Hz）で高効率（電気→レーザー 10％）なレーザー，高繰り返し照射の技術を開発すれば，レーザー核融合発電所は実現することになる．

さらに LLNL では核融合と核分裂を併用し，2030年代までに送電線に電力を供給するという野心的な LIFE（Laser Inertial fusion/Fission Energy）プロジェクトが提案され，アメリカ合衆国エネルギー省（DOE）のヒアリングを済ませている．この計画は核融合単独では炉につながらない間接照射方式でも電力供給ができるシナリオで，オバマ大統領のグリーンニューディール政策にうまく乗れば，急速な進展を見せる可能性がある．

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターでは爆縮プラズマを高速点火方式で5 keV にまで加熱することを目標とする FIREX-1 プロジェクトが進められている．高速点火方式は中心点火方式の～1/5 程度の出力のレーザーで点火燃焼を実現しようとするもので，今までの実験結果として，極短パルスペタワットレーザー[2]で千倍の中性子の増大と 20％程度の加熱効率が実証されている[3]．FIREX-I の成否はターゲットとレーザーの開発にかかっていて，ここではターゲットとレーザー開発の現状について述べる．

2．高速点火用ターゲット燃料容器

本プロジェクトで使用が予定されている改良ターゲットを**図1**に示す．この球対称性のない固体燃料層の球殻化は，低密度フォームへ液体重水素を含浸させ，固化することにより作られる．LFEX レーザーの照射を高 Z コーンを通して行い，爆縮プラズマを加熱させる．このデザインは最近若干修正され，プロジェクトスタート時に比べ，1）

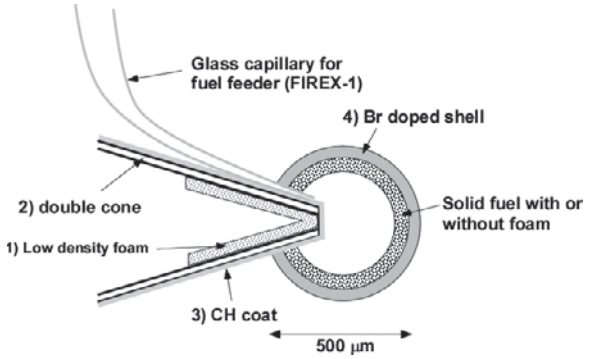

図1　改良型 FIREX-I 用ターゲット．

Current Status of Laser Fusion by Fast Ignition- Target for FIREX and PW Laser LFEX-
NORIMATSU Takayoshi, NAGAI Keiji, IWAMOTO Akifumi, KAWANAKA Jyunji and NAKATA Yoshiki

corresponding author's e-mail: norimats@ile.osaka-u.ac.jp

©2009 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

コーン内面へ低密度フォーム材料を配置，2）ダブルコーン構造の採用，3）コーン外面を低Z材料でコーティング，4）Br添加アブレータの採用等を行い，加熱レーザーによる爆縮されたコアの加熱効率を高めようとしている．1）は加熱レーザーが吸収される領域の電子密度に関係する．密度が低すぎる場合，電子温度が高くなりすぎ，爆縮コアの中で吸収しきれなくなり，高すぎる場合は相互作用をする領域が狭くなりすぎ，同様に電子温度が高くなりすぎるためである．フォーム層の厚さは60～70 μm程度，密度は20～30 mg/ccのものが期待されている．2）は強力なレーザーにより加速された電子を有効に前方に収束させ，爆縮コアを加熱するためのものである．シングルコーンの場合，コーンの外側は爆縮，あるいはその途中のプラズマで満たされている．この場合，加熱レーザーにより加速された電子はそのまま周辺プラズマの中に浸透していく．コーンを二重にし，その間を真空絶縁にしておくと，チャージアップにより電子はコーンの方に引き戻され，磁場との関係で前方に収束する．シミュレーションではコーンの間隔20 μm程度で十分な効果が期待される．3）は爆縮途中のプラズマがコーンを構成する高Z材料と混ざり，冷却され，爆縮速度が遅くなる現象を回避するためのものである．CHの厚さは1 μm程度で十分である．4）は0.3 atmic%のBrをアブレータの中に入れると，生成したBrの特性X線により，2段圧縮が発生し，流体力学的不安定性の成長抑制をねらったものである．このアブレータの採否はX線による燃料や，コーン先端部のプリヒートのことを考慮しながら判断する必要がある．

これらに加え，当初から提案されていた燃料層支持用の低密度フォームシェルの開発（FIREX-Iでは密度100 mg/ccで透明であること，最終的には10 mg/ccであるが，燃料充填技術確立の条件で，不透明でも可とする），固体燃料層充填技術の開発が肝要である．シミュレーションによればFIREX-Iクラスのターゲットの爆縮に要する時間は2.5 nsであり，高密度を維持している時間は100 psである．爆縮タイミングと追加熱レーザーの照射タイミングは，どちらも同じ発振器を用いて，そこからのパルスを増幅する形で行うため，同期精度の再現性はきわめて高い．しかし，その時間はレーザー照射前に設定されるもので，ターゲットの方が設計どおり製作されていなければ，加熱の効果は上がらない．単純なモデルでもターゲットの質量に影響する厚さ，密度などのパラメータは1/20以下の精度で制御されなければならない．実用炉クラスではさらに厳しい条件となる．

燃料を含浸させる媒体となるプラスチックフォームの製造方法はいくつかが知られているが[4]，空隙サイズがレーザー波長，レーザースポットサイズより十分に小さくなければならないことから，微細構造を与えるエアロゲル法が主に用いられている．ゲルとは，液体を大量に含んだ擬固体状態であるが，これから液体を体積収縮させずに取り除くと気体を大量に含んだ擬固体となる．これをエアロゲルと呼ぶ．一般にはシリカエアロゲルが知られるが，有機高分子のエアロゲルも開発が進められている．

エアロゲル材料の一つであるレゾルシノール・ホルムアルデヒド重合体（RF）はレゾルシノールとホルマリンを塩基性で重合させ，可溶性オリゴマ（分子量数百～数千の重合体）とした後に，酸触媒により，オリゴマ側鎖間の架橋反応によってゲル化（不溶化）させるフェノール樹脂の一種である．多孔質構造が小さいため（～100 nm）可視光が散乱されず透明である．ゲル化前の前駆体溶液は水溶性だが有機溶媒には不溶なので，オイル／水／オイル（O/W/O）エマルジョンとして，カプセル化することが可能である[5]．カプセルの直径と厚みを制御すると同時に，エマルジョン製造装置と組み合わせることにより，千個以上のカプセルが単分散サイズで得られる[6]．ゲル化反応速度を加熱によっても加速することができるが，水の密度の温度依存性は有機溶媒に比べてやや大きく，室温における密度整合が60℃付近では水相が浮力を受けてしまい，エマルジョンの密度整合が崩れてしまうという問題点があった．この問題はO相のシリコーンオイルに触媒を加え，相間移動触媒として作用させてゲル化速度を加速することにより解決された[7]．相間移動触媒に関しては，予想外に100 nm程度の薄膜がエアロゲルの外表面に形成されることが見いだされた．最近では相間移動触媒の種類を替えることでその平滑性を高められることも明らかとなっている[8]．アブレータ層の平滑性を高める観点からも有用な方法となり得よう．

密度整合をより厳密に保つためには，エマルジョンのオイル相，とくに外側のオイル相は不揮発性であることが好ましい．以前は揮発性かつ可燃性もしくは有毒性の有機溶媒が用いられてきたが，不揮発性のシリコーンオイルを混合して密度整合を保てるようになっている[9]．

また，液滴形成装置でエマルジョン化させた場合，カプセル厚を制御するにはRF溶液の粘性を高める必要があり，ある程度の重合度が必要となる．しかしRFオリゴマの分子量を高めると，ゲル化が起きてしまい，液滴製造装置のノズル詰まりを起こす．これを避けるために，レゾルシノールに代えて，phloroglucinol carboxylic acidとホルムアルデヒドを重合させ（PF），これとRFオリゴマを混合した水溶液を液滴製造装置でエマルジョン化させた[10]．**図2**はターゲット化したエアロゲルカプセルの例である．

フォーム密度を10mg/cm^{3}以下の極低密度とすることは容易でないが，ポリ（4-メチル-1-ペンテン）（PMP）ではそれが得られている．ゲル溶媒をアルコール，特に密度の近いブタノールやヘキサノールでゲル化させ，それをエアロゲル化させることにより，2－3mg/cm^{3}の極低密度エアロゲルをサブミクロン構造で得られる[11]．また，その構造サイズはアルコールの種類を変えることで制御できる．このエアロゲルは，まだカプセル化には課題が多いが，その極微構造，極低密度フォームを利用して極短パルスレーザーのターゲットとして応用されている．

エアロゲルはナノサイズの空孔を有するが，そのサイズが小さければ小さいほど表面平滑性も高めることができる．空隙サイズ制御法に関する研究は，主にテンプレートを用いた方法に限られてきた．ナノテンプレートの存在

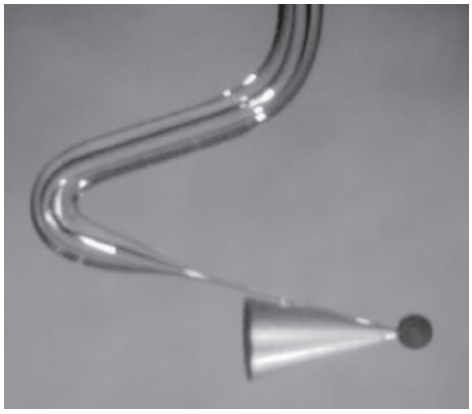

図2　RF-PF エアロゲルカプセル燃料シェルを有する FIREX-I 用ターゲット．

は，エマルジョンの安定性に悪影響を与える場合が多く，ナノ微粒子テンプレートでは中実球はできるが中空球は未だ得られていない[12]．PMP フォームは，空隙制御に関して，前駆体オリゴマーの側鎖と溶媒の親和性が大きく関わることを示しているが，根本らはさらに，ポリスチレン側鎖に開環反応性の架橋基を割合を変えて合成，導入し，そのナノ空孔サイズ制御性に関して系統的に研究した[13]．その結果によれば，架橋密度が高く，ゲル化が素早く起こるほど空孔サイズが小さくなり，その逆に架橋密度が低かったり，ゲル化が遅い場合には空孔サイズが大きくなることが明らかとなった．架橋反応を起こさない側鎖については，溶媒との親和性が高いと，空孔サイズを大きくしてしまう．前述した PF はベンゼンのすべての炭素が水素結合能を有する-OH 基と-COOH 基で占められており，きわめて側鎖の架橋基密度が高い．これを RF と混合せずに単独で用いてゲル化，さらにエアロゲル化させると，その空孔は 50 nm にまで小さくなる [14]．この現象も，上に述べたメカニズムと矛盾なく説明することが可能である．架橋基密度は高イオンの配位結合によっても導入することができるが，これによっても空孔サイズを数十 nm に制御できる．この場合はさらに，密度も低く抑えることが可能である[15]．

ペタワットレーザー導入コーンはレーザー光を高速電子又は高速イオンに変換する．高い原子番号の金などが高い変換効率を与える．高エネルギー粒子が高密度圧縮された主燃料を加熱する．低密度材料は，レーザーの吸収効率が高くなるため，これをペタワットレーザー導入コーンに応用すると，レーザーから高速電子の変換効率が増加する．内面に低密度の金（Au）を被覆する場合は，ナノ粒子テンプレートと電気化学的メッキ法を併用されている．この方法では主に密度がバルク比 20 %で単分散に制御された空孔とともに得られる．厚みの制御は電気化学メッキのクーロン数の制御によって行うことができる[16]．最近この低密度層の元素組成，厚み，密度に関する再設計がなされているが，低 Z の低密度層は前述のプラスチックエアロゲルの被覆によって行うことができる．

臭素（Br）ドープアブレータはレーザー照射により X 線を発生させる．このため，レーザー照射下流側にでその X 線が吸収され，もう一つのアブレーション面が準定常的に生じる．その二段アブレーションのために，レイリーテイラー不安定性が抑制される．とりわけ，衝撃点火方式のインパクターではその有用性が唱えられている．この臭素ドープとともに高精度なターゲット製作を行うことは技術的にさほど困難ではないが，研究段階での製作はきわめて高価となるため，その低コスト化が図られている[17]．

3．燃料充填と可視化技術

米国などでは中心点火方式による点火燃焼実験に向けて固体水素（同位体）ターゲットの開発が最終段階になっている[18, 19]．一方，日本などで実証を行っている高速点火方式では中心点火方式とは異なるターゲット構成となっており，独自の開発を行うとともに将来の核融合炉をも視野に入れた将来的には大量生産可能な燃料充填技術の開発を行っている．典型的なターゲットの例は**図 1** に示されているが，現在提案しているこのフォームシェルターゲットは燃料を吸収・支持するフォームシェル，そのシェルに燃料を直接注入するための燃料導入管，加熱用レーザーを導入するためのコーンガイドから構成されている．このフォーム層に形成された燃料層は高い真球度と数ミクロン以下の凹凸で仕上げることが要求されるが，現状では高速点火方式用のターゲットでは中心点火方式のそれと比較して，低精度でも許容されると考えられている．この手法はフォーム法と呼ばれ多孔質低密度フォーム材の特性を最大限に利用した燃料層形成手法であり，燃料注入時には毛細管現象により液体状の燃料を必要な仕様に合わせて製作されたフォーム材に均一に吸収させ，その後，その液体状燃料を固化する．原理的にはこの状態で必要な仕様を満たした中空球殻状の固体燃料層を形成することができる．このようにフォーム法は燃料層の自己形成能力を持つため，個々のターゲットに対して温度制御などが必要な体積加熱を利用した手法と比較すると大量生産に適した手法であると考えられる．この原理を利用したターゲットは1980年代に米国の研究者により提案され現在も研究が続けられているが，後述の課題を解決するには至っていない[20-22]．そのため米国等ではフォームシェルを用いない体積加熱法：ベータ線加熱法[23]や赤外線加熱法[24]（燃料であるトリチウムから発生する β 線や外部からの赤外線によって燃料層体積加熱を行い，燃料層内に温度差を発生させ，その温度差に従い燃料を再配分させることで理想的な燃料層を形成する手法）も同時に開発を行い，既にそれらの手法によるターゲットの製造に成功している．

フォーム法の利点については既に述べたとおりであるが，フォーム法によるターゲット実現のためにはいくつかの課題がある．まず一つは，フォームシェル自体を高精度で作成することが必要である．また，そのシェルは内部に保有している燃料層の検査が可能な性質をもたなければならない．このフォームシェル開発については前章においてすでに述べられている．次にフォーム材の構造に起因する課題が存在する．フォーム材は隣り合ったサブミクロン

オーダの空間が小さな流路を介して繋がっている空間の集合体である．液体状の燃料をそのフォーム材にしみ込ませた後に固化させた場合，それぞれの空間毎またはいくつかの空間の集合内で個別に固化が完結する可能性がある．この場合，液体と固体の密度差による体積減少からフォーム材内に飽和蒸気圧の気泡が残存することになる．これまでの研究ではフォーム材料内に気泡が残存していないという実験結果はない．フォーム法を使用した燃料層形成を実現するためにはこれらの課題について検討する必要がある．

フォームターゲットに対する燃料の充填やその状態の検査に関する研究開発は大阪大学レーザーエネルギー学研究センター（ILE）と核融合科学研究所（NIFS）の双方向型共同研究により進められている．燃料の充填については，NIFSにおいてターゲット冷却試験装置を製作し，フォームシェルターゲットへの燃料充填試験を行っている．その液体状燃料の充填試験の例を**図3**に示す．空のシェルとほぼ100%充填のシェルについてはその差が非常にわかり難いが，さらに液体状の燃料を充填するとシェル内にメニスカスを観測することができる．実験でも確認できたように毛細管現象を利用した場合，燃料はフォーム材内へほぼ均一に吸収され，直接観測では100%充填を超えるまで充填量の評価は困難である．そこで，干渉計測により燃料の充填率に従った屈折率の変化を測定することで，フォーム内部の燃料充填量を評価する手法の開発を行っている．**図3**の液体状燃料充填状態に対応する干渉パターンを**図4**に示す．これらの干渉パターンを解析した結果，フォームシェルターゲットを使用したこれまでの実験では100%充填を10%程度の誤差範囲で評価が可能であった．実用ターゲットでは数%程度の誤差で充填量評価が可能な手法が必要であるが，光源の波長を最適化した干渉計測やフォームと燃料の複合状態での屈折率など評価に必要な物性値の精度向上により充填率評価の精度を向上させることが可能であると考えている．

さて，これまで述べてきた評価では液体状の燃料の状態を平均的に把握できたが，先に述べたようなフォーム材を構成している微小空間内の固体燃料の状態を評価することはできない．レーザーによる燃料層の高密度圧縮およびその後の点火燃焼を実現するためには，フォーム材内に気泡が残存するか？残存する場合はその寸法について評価し，燃料圧縮への影響について評価することが必要である．極低温に冷却されているターゲット内部は離れた場所からのみ観察が可能であり，顕微鏡などによる直接観測は不可能である．そこで，液体から固体へ相変化する時の密度差を利用した干渉計測により，ある範囲の情報を平均化して固体層内に存在する気泡の有無の評価を試みている．気泡が存在しない場合は完全な固体の密度になるため，液体から固体へと相転移したときに固相部分の干渉パターンの変化を観測することができるはずである．

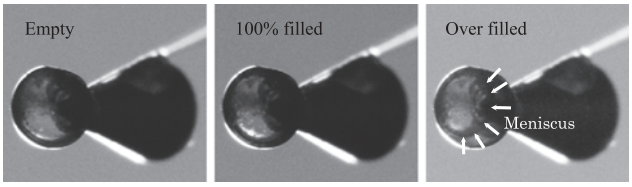

図3　液体状燃料の充填試験例．

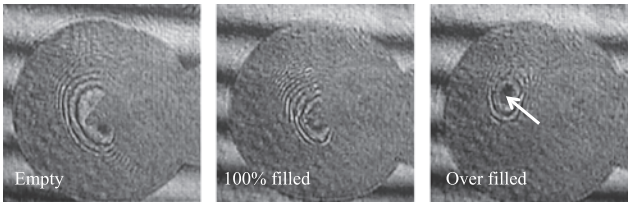

図4　充填例に対応した干渉計測結果．

以上のように米国などで開発が行われている中心点火用ターゲットとは異なる仕様を持つ高速点火用ターゲットをILEとNIFSの共同で開発している．仕様が異なるため米国などで開発されたターゲット技術を利用することはできず，独自のアイデアにより開発が進行している．現状，残された課題は多いが，ターゲット製造に関して冷却試験による実証段階までたどり着くことができた．また，本稿では述べなかったがフォームシェル法以外の燃料充填手法の検討も同時に行っており，固体水素ターゲットを使用した実験が開始される予定の数年以内には何れかの手法によりターゲットの供給が可能になるよう研究を行っている．

4．LFEX レーザーの基本仕様とシステム概要

加熱レーザーとしては出力 10 kJ/10 ps の LFEX（Laser for Fast Ignition Experiment）[25]が完成し，現在パルス圧縮装置の組み立てが進められている．合わせて爆縮／加熱実験が順次出力エネルギーを高め，2010年までに標記目標を達成しようとしている．LFEX はピコ秒パルスを回折格子でナノ秒まで引き延ばし，広帯域増幅器で 10 kJ にまで増幅した後，大型の回折格子で再びピコ秒にまで圧縮する．パルス圧縮器は 40 cm×90 cm の大型回折格子 8 枚で構成され，これらがあたかも一つの巨大な回折格子であるかのように制御する特殊な技術が導入されている．本レーザーの開発には，従来にない 10 kJ 級の大パルスエネルギーで PW ピーク出力を有する大エネルギー超短パルスレーザーの開発を世界に先駆けて挑戦するとともに，第2期計画につながる高効率・コンパクトな増幅技術も重要な開発要素となっている．

LFEX レーザーの基本仕様は以下のとおりである．

①パルスエネルギー　～10 kJ
②パルス幅　～10 ps
③パルス立ち上がり時間　＜2 ps
④集光スポット直径　～30μm

パルス幅～10 ps の高エネルギーパルスの増幅では光学系の損傷が大きな課題であるため，数ナノ秒程度のパルス幅に時間的に伸長して増幅するチャープパルス増幅（CPA）法を用いる．システム構成はフロントエンド，前置増幅器，4－パス主増幅器，ファラデー回転子，パルス圧縮器からなる．

【フロントエンド】フロントエンドはフェムト秒発振器，回

折格子対を用いたパルス伸長器，光パラメトリックチャープパルス増幅（OPCPA）器からなる．10^7〜10^8におよぶ高利得増幅時のパルスコントラスト比を改善するため再生増幅器の代わりに3段のOPCPAを行い，>40 mJのパルスエネルギーが得られる．パルス圧縮後に<2 psの立ち上がり時間を実現するためにフロントエンドでは6 nm程度のスペクトル幅を得る．

【前置増幅器】前置増幅器では直列につないだ2台のロッドガラス増幅器(φ50 mm)を用いた4－パス増幅により10 J程度にパルスエネルギーを増大し，その後，ビームを4つに分割する．各ビームはさらに2台のロッドガラス増幅器によりそれぞれ増幅され，4－パス主増幅器へ送られる．

【主増幅器】主増幅器の目標出力は4 kJ／ビーム，出力スペクトル幅3 nmである．ビーム口径は最大35 cm×35 cmであり，レーザー媒質として46 cm×81 cm×4 cmのガラススラブ（LHG）を1ビームあたり8枚直列で使用している．励起効率向上のため4ビームを2×2のアレイ構造とし3列のフラッシュランプ列で励起する．取り出し効率向上のために4パス増幅を行う．また，レーザーガラスの冷却時間短縮のためにガラス表面に窒素ガスを吹きつけながら上下運動するワイパー冷却方式を採用した．チャープパルスの出力パルス幅はB積分値の抑制とパルス圧縮器の小型化の観点から2.25 nsと設計している．1ビームの4パス増幅の光路を**図5**に示す．ロッドガラスによる前置増幅の後，バイモルフ型可変形鏡で反射して主増幅器のスペーシャルフィルタの焦点近傍付近に入射する．レンズL_1でコリメートされたビームはガラススラブ群で増幅（1パス）され，反射鏡M_1で折り返されて再度，ガラススラブ群で増幅（2パス）される．ピックアップ鏡でスペーシャルフィルタ外部に取り出され，別のバイモルフ型可変形鏡M_2で折り返されスペーシャルフィルタ内に戻し同様に3パス，4パス増幅を行う．4パス後のビームはレンズL_2で並行光にしてファラデー回転子と薄膜偏光子でできた光アイソレータと全反射鏡を組み合わせてターゲットチャンバ室に送られる．ターゲットチャンバー室に設置されたパルス圧縮器によってピコ秒パルスに時間圧縮される．この主増幅部にはいくつかのカギとなる技術的試みが盛り込まれている．1つは，4パス構成であり，光軸に対して横方向の集光分離と光軸方向（縦方向）の集光分離を併用してピップアップ鏡のレーザー損傷を防いでいる．また，2つの可変形鏡による増幅器中での波面歪の補正は大口径の高エネルギーパルスレーザーでは不可欠な技術である．**図6**に増幅レーザー光の波面歪補正の様子を示す．前置増幅器直後の可変形鏡は主増幅器の共役面に配置されており，M_2付近の共役面に配置した波面センサとリアルタイムで連動し前置増幅器と主増幅の1パスおよび2パス光路での波面歪みを補正する．同様に，可変形鏡M_2はファラデー回転子の後方に置かれた波面センサと連動し，ポッケルスセルスイッチと主増幅の3パスおよび4パス光路での波面歪みを補正する．

【パルス圧縮器】LFEXのパルス圧縮器（リアエンド）・集光装置の全体図を**図7**(a)に示す．フロントエンドからの37 cm×37 cm×4本の2×2アレイ状ビームを縦4段に再構築し，**図7**(b)のダイヤモンド型パルス圧縮器に入射する．グレーティングへの入射角が72°で波長分散による広がりも加わるため，42 cm×92 cmの大型回折格子（1740 g/mm）を2枚用いた組み合わせ回折格子（**図8**）を用いている．阪大と岡本光学，PGL社の共同開発による回折格子は改良が進み，回折効率が最大で98％に達している．組み合わせ回折格子間の面内回転誤差はポインティングずれに影響するため，ピエゾ素子による駆動を新たに導入した．本装置は組み合わせ回折格子を両側から使う像反転型であるため，素子やアライメントに起因する様々な誤差が自動的にキャンセルされる[26]．パルス圧縮されたビームは2×2アレイ状に再構築され，OAP（軸外し放物面鏡，89 cm×104 cm，F/〜5）で集光する．2008年2月にFirst lightを得たのち，2009年6月からGXIIとLFEXを用いた高速点火実験を行っているが，LFEX全体のパルス圧縮性能として6 ps前後のパルス幅が安定的に得られている．

5．まとめ

ターゲット開発では密度10 mg/ccの均一性の良い透明な

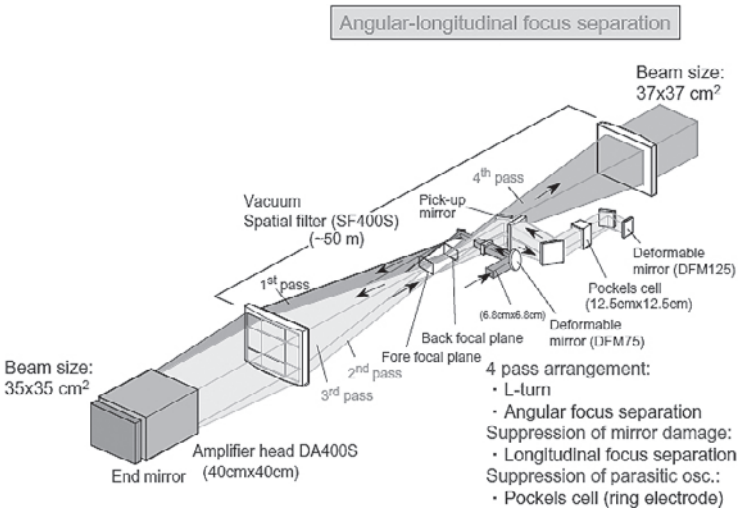

図5　4パス主増幅器の構成（1ビーム）．

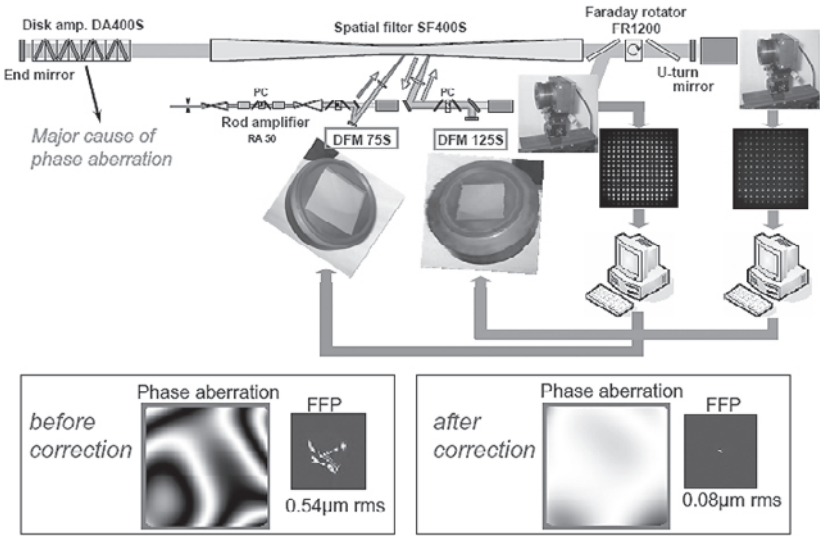

図６　可変鏡による波面補正．

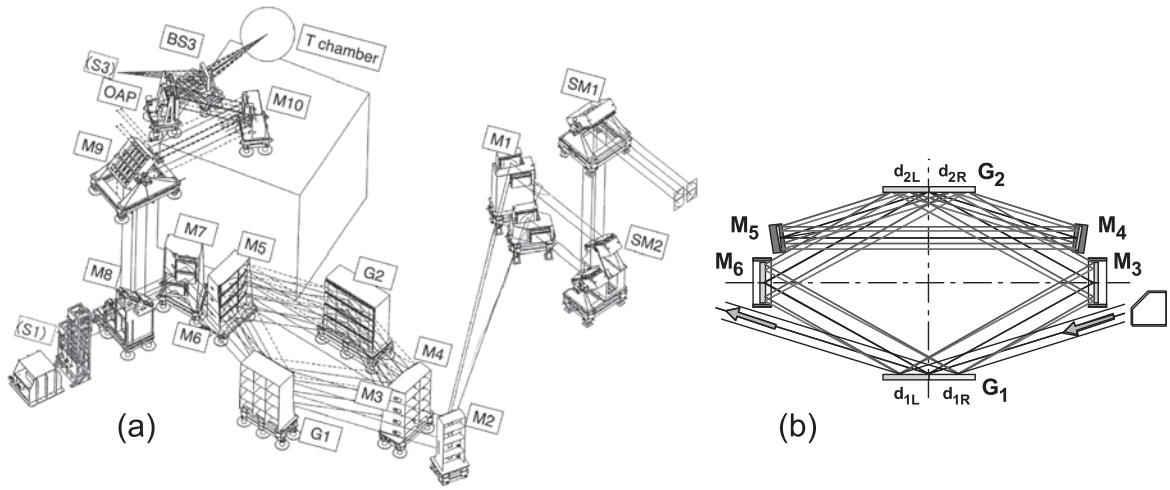

図７　(a)LFEXのパルス圧縮器・集光装置の構成．(b)パルス圧縮器のレイアウト．G：グレーティング，M：ミラー，SM：ステアミラー，OAP：軸外し放物面鏡ミラー，S：センサ．

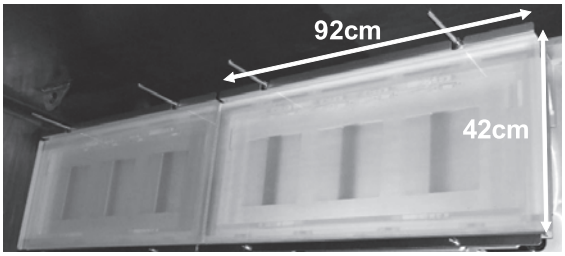

図８　組み合わせ回折格子．

フォームを開発するのが理想であるが，技術的にはかなり厳しい条件である．妥協策として，FIREX-I では密度 100 mg/cc で透明なフォームを用い，燃料充填技術を確立したうえで，点火燃焼をめざす FIREX-II では密度 10 mg/cc で不透明なフォームを選択するのが適切と思われる．この選択であれば現在の技術の延長上にゴールを見いだすことができる．なお，ターゲット材料一般に関しては，プラズマ・核融合学会から出版されている Plasma and Fusion Research 誌のspecialissueが2009年に発刊されたところである[27]．

レーザーに関しては，高速点火核融合実証実験計画 FIREXの第１期として燃料の5～10 keVへの高効率加熱を実証するため，LFEX レーザーを建設した．10kJ，10ps，1PW の高エネルギーと超短パルス，高ピーク強度を同時に実現する初のレーザー実現のために，高コントラスト広帯域前置増幅器として３段の OPCPA，また，主増幅器における３次元集光分離型の大型スペーシャルフィルタや２台の波面補正用可変形鏡，大型ファラデー回転子，さらに，圧縮器におけるダイヤモンド型圧縮法や組み合わせ回折格子，誘電体多層膜大型回折格子など最先端技術を世界に先駆けて導入した．2009年からは GXII との同時ショットによる高速点火実験を開始し，徐々に本格的な運用を開始していく予定である．

本研究の一部は，科研費基盤研究（B）(19360414）および阪大レーザー研－核融合科学研究所共同研究（NIFS09 KUGK031）の補助を受けて行われたものである．

参考文献

[1] E. Moses, Fusion Sci. Technol. **54**, 361 (2008).
[2] Y. Kitagawa *et al.*, IEEE J. Quant. Electron. **40**, 281 (2004).
[3] R. Kodama *et al.*, Nature **418**, 933 (2002).
[4] K. Nagai *et al.*, Nucl. Fusion **45**, 1277 (2005).
[5] S.M. Lambert *et al.*, J. Appl. Polym. Sci. **65**, 2111 (1997).
[6] T. Norimatsu *et al.*, J. Moscow. Phys. Soc. **8**, 71 (1998), K. Nagai *et al.*, J. Polym. Sci. A Polym. Chem. **38**, 3412 (2000).
[7] F. Ito *et al.*, Macromol. Chem. Phys. **206**, 2171 (2005).
[8] F. Ito *et al.*, Fusion Sci. Technol. **55**, 465 (2009)
[9] F. Ito *et al.*, Fusion Sci. Technol. **49**, 663 (2006).
[10] F. Ito *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Part 2. **45**, L335 (2006).
[11] K. Nagai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Part 2. **41**, L431 (2002), K. Nagai *et al.*, Fusion Sci. Technol. **45**, 79 (2004).
[12] X. Zhao *et al.*, Angew. Chem. Internl. Ed. **45**, (2006).
[13] N. Nemoto *et al.*, Fusion Sci. Technol. **49**, 695 (2006), K. Yamanaka, Fusion Sci. Technol. **51**, 665 (2007).
[14] H. Yang *et al.*, Laser Particle Beam **26**, 449 (2008).
[15] F. Ito *et al.*, Plasma Fusion Res. **4**, S101 (2009).
[16] K. Nagai *et al.*, Fusion Sci. Technol. **49**, 686 (2006).
[17] K. Nagai *et al.*, Nucl. Fusion **49**, 095028 (2009).
[18] A.L. Jeffrey, J. Phys. Conf. Ser. **112**, 032063 (2008).
[19] J.D. Moody, B.J. Kozioziemski, E.R. Mapoles, J.D. Sater, E.L. Dewald, J.A. Koch *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. **112**, 032064 (2008).
[20] R.A. Sacks and D.H. Darling, Nucl. Fusion **27**, 447 (1987).
[21] J.K. Hoffer, J.D. Sheliak, D.A. Geller, D. Schroen and P.S. Ebey, Fusion Sci. Technol. **50**, 15 (2006).
[22] J.S. Bowers, P.R. Coronado, J.A. Emig and P.C. Souers, J. Nucl. Mater. **170**, 121 (1990).
[23] J.K. Hoffer, and L.R. Foreman, Phys. Rev. Lett. **60**, 1310 (1988).
[24] G.W. Collins, D.N. Bittner, E. Monsler, S. Letts, E.R. Mapoles, T.P. Bernat, J. Vac. Sci. Technol. **A 14**, 2897 (1996).
[25] N. Miyanaga, *et al.*, *Inertial Fusion Sciences and Applications 2003*, American Nuclear Society (2004) pp. 507.
[26] M.C. Rushford, J.A. Britten, C.P.J. Barty, T. Jitsuno, K. Kondo, N. Miyanaga, K.A. Tanaka and G. Xu, Opt. Lett. **33** 1902 (2008).
[27] Plasma Fusion Res. **4**, Special Issue 1 (2009) http://www.jspf.or.jp/PFR/PFR_articles/pfr2009s1.html

乗松孝好（のりまつたかよし）

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターレーザー核融合学研究部門教授．1952年生．1975年度大阪大学工学部電気工学科を卒業．同大学大学院に進学し，1979年に後期課程を中退して大阪大学レーザー核融合研究センターの助手に着任．レーザー核融合実験用の各種のターゲットの開発に従事する．1983年工学博士の学位取得．現在の研究範囲はターゲットの他にレーザー核融合炉工学，レーザーの各種応用研究にも従事している．

岩本晃史（いわもとあきふみ）

核融合科学研究所．主な研究分野：低温工学．国内の学会に参加しても私の発表に関心を持つ人は皆無です．研究内容が特殊だからなのか，つまらないのか，どちらなのだろうと考えさせられます．

中田芳樹（なかたよしき）

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター・准教授．1996年九州大学大学院システム情報科学研究科博士後期課程修了，工学博士．同年に同助手．2006年大阪大学レーザーエネルギー学研究センター准教授，現在に至る．LFEX 建設作業（パルス圧縮部）に従事．趣味は旅．

長井圭治（ながいけいじ）

2009年より東京工業大学資源化学研究所准教授　最近，朝礼の代わりに学生と光化学の教科書（N.J. Turro，Principles of Molecular Photochemistry）を読み始めました．図を一つ説明させるだけですが，学生も楽しんでいるようです．

河仲準二（かわなかじゅんじ）

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター．1993年電気通信大学大学院博士後期課程修了．レーザー冷却および極低温原子間衝突の研究にて学位取得．博士（理学）．1994年宮崎大学工学部助手．希ガスエキシマによる真空紫外光源の開発および真空紫外光による超微細加工の研究に従事．1999年日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）光量子科学研究センター研究員．Yb系固体レーザーの研究，特に低温冷却による物性値変化に着目した超短パルス・高出力レーザーの研究を行う．同研究所副主任研究員を経て，2004年大阪大学レーザーエネルギー学研究センター助教授．低温冷却型核融合炉用ドライバーの研究を始める．2007年より同准教授．現在は超短パルスパワーフォトニクスとこれを用いた応用研究に興味を持つ．