ガラスレーザー「激光Ⅻ号」の初期成果

(大阪大学レーザー核融合研究センター) 山中千代衛, 加藤義章

大阪大学レーザー核融合研究センターのガラスレーザー「激光Ⅻ号」が、1983年11月末より稼働を開始した。同年12月に実施した「激光Ⅻ号」立ち上げ実験において、レーザー出力47.5 TW、核融合中性子数 4.0×10^{10} とともに世界最高値を記録した。

1984年より実施する本格的爆縮実験とその成果に、世界の核融合研究者から大きな期待が寄せられている。

I. はじめに

ガラスレーザー「激光Ⅻ号」は、大阪大学レーザー核融合研究センターにおいて1980年より建設をすすめてきた、世界最大のガラスレーザー装置である。「激光Ⅻ号」の早期稼働をめざし、研究センター全員の努力を傾注してきた結果、1983年11月23日より核融合ターゲット照射試験を開始するに至った。連日レーザーの出力増強を行いつつ、ターゲット爆縮実験を実施し、12月14日にレーザー出力47.5 TW、核融合中性子数 4.0×10^{10} とともに世界最高値を達成した。また、中性子飛行時間計測より核融合反応部の温度を求め、最高10 keVの値を得た。

この一連の実験において、「激光Ⅻ号」の基本的な性能が確認され、今後の出力増強試験のための重要なデータが得られた。大阪大学の考案にかかる各種キャノンボールターゲットおよび直接照射型ターゲットを試験した結果、キャノンボールターゲットの有効性が実証された。また、AI放射化カウンタ法による中性子計測を初め多くのプラズマ計測器を使用し、今後の実験に対する使用条件等が明確化された。

本稿では、1983年11月23日から12月末日にかけて実施した立ち上げ実験を中心として、最近得られた「激光Ⅻ号」の初期成果について述べる。

II. ガラスレーザー「激光Ⅻ号」

ガラスレーザー「激光Ⅻ号」の構成と主な性能について簡単な説明をしよう。「激光Ⅻ号」(第1図)は慣性核融合実験を行うことを目的とした装置であり、12ビームの強力なパルスレーザー光を発射し、核融合ターゲットを正確に照射する。「激光Ⅻ号」は大別してレーザー装置、集光照射装置および慣性核融合実験棟より構成される。これらの主要性能を第1表に示す。

「激光Ⅻ号」の第1の特徴は、長パルスにおける出力エネルギーおよび短パルスにおけるピーク出力が大きいことである。パルス幅1 nsにおける出力エネルギーは動作値20 kJであるが、実際には25~30 kJ得られるよう設計されており、世界最高性能のレーザー装置といえる。第2の特徴は、1組のレーザー装置に対し2組のターゲット照射装置を備え、かつこれらが異なる照射配置を有している点である。非線形光学結晶によりレーザー光の波長を短波長に変換できるので、これら2つのターゲット照射装置を用いると、異なるターゲット構造、照射配置、レーザー波長の組合せによる多様な実験を、効率良く実施することが可能となる。第3の特徴は、装置全体の安定性が極めて良いことであり、これは慣性核融合実験棟の建築・設備に負うところが大きい。建屋全体の震動・変形、温度安定性、除塵、実験遂行に必要な附帯設備などの面で多くの配慮がなされている。

レーザー装置は、レーザー室、レーザー発振器室(レーザー室下)、電源室(同)に設置されている。十分制御されたエネルギー、パルス幅のレーザー光をレーザー発振器室で作成し、レーザー室に送り出す。レーザー室ではこれをレーザー室の一端(第1図の左端)で12ビームに分割し、次いで各ビームを主増幅器列で増幅し、強力なレーザー光として発射する。発振器におけるレーザー光は、ビーム径2 mm、エネルギー10 μ Jであるが、レーザー出力部においては、ビーム直径が各ビーム32 cm、全エネルギー20 kJとなっている。

レーザー室には3組の鉄骨トラスが設置され、そのおのにおに4ビームの主増幅器列が取り付けられてい

Initial Results of "GEKKO XII" Glass Laser System on Inertial Fusion: Chiyo YAMANAKA, Yoshiaki KATO.

(1984年 2月4日 受理)

第1図 ガラスレーザー「激光Ⅷ号」

第1表 ガラスレーザー「激光Ⅷ号」の主要性能

1. レーザー装置	
(1) レーザー光波長	1.052 μm
(2) 出力エネルギー	20 kJ
(3) ピーク出力	40 TW
(4) 出力安定度	$\pm 5\%$ 以内
(5) エネルギーバランス	$\pm 3\%$ 以内
(6) プリパルス比	10^{-10} 以下
(7) レーザー光自動アライメント	
① 光軸中心精度	口径の0.5%以内
② 光軸偏角精度	10 μrad 以内
③ ビンホール位置設定	ピンホール径の3%以内
2. 集光装置	
(1) ターゲット照射切換え所要時間	15 s
(2) レーザー光集光スポット径	20 μm
(3) レーザー光エネルギー伝達率	
バランス	$\pm 1.85\%$ 以内
(4) ビーム同期精度	10 ps
(5) ターゲットアライメント	
① コンピュータ制御	自動
② 横方向アライメント精度	$\pm 10 \mu\text{m}$ 以内
③ 縦方向位置精度	$\pm 30 \mu\text{m}$ 以内
3. 慣性核融合実験棟	
(1) クリーン度	
① レーザー室・ギヤ室・ターゲット室	クラス1,000
② 組立洗浄室	クラス20
(2) 振動	$\pm 0.8 \mu\text{m}$ 以下
(3) 室間の相対変位	5×10^{-8} rad 以下
(4) 温度安定性	$\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以下

る。レーザー室をレーザー光出力側からビーム分割部へ向って見た様子を写真1に示す。ガラスレーザーからできるだけ大きな出力エネルギーを得るには、レーザー光により光学素子が損傷を受けないように設計を行うことが最も重要である。レーザー損傷は局所的なレーザー光の光束(単位面積当りのエネルギー)で決まるので、「激光Ⅷ号」ではレーザー光強度の空間分布をできるだけ均一にするように、コンポーネントの配置、開口径の大きさなどを最適化している。また「激光Ⅷ号」に使用している光学素子には、長年にわたって大阪大学が製造会社と協力して改良研究をすすめてきた多くの成果が集約されている。

集光照射装置は、レーザー装置より発射された12本のレーザービームをターゲット上に集光する装置で、ギヤ室、第1ターゲット室、第2ターゲット室に設置されている。ギヤ室には各ビームごとに2枚の反射鏡を設け、第2反射鏡を一定角度回転させることにより、レーザー光を第1あるいは第2ターゲット室へ送る。第1ターゲット室の照射配置は、正12面体の面心方向からターゲットを照射する一様照射型であり、第2ターゲット室は6ビームのレーザー光を1束と考え、2つの方向からターゲットを照射する2方向照射型である。

第1ターゲット室を写真2に示す。ターゲットチェ

写真 1 ガラスレーザー「激光Ⅷ号」のレーザー室

写真 2 ガラスレーザー「激光Ⅷ号」の第1ターゲット室

ンバー(写真中央)は、高精度の機械加工を施した直径1.7 m, 肉厚8 cmのステンレス鋼球で、その内部はクライオポンプで 5×10^{-8} Torr 以下の高真空中に保たれる。ターゲットチェンバに至るレーザー光路はすべて金属パイプでおおい、空気擾乱によるレーザー光波面収差の発生、光学素子へのほこり付着、レーザー光の人体への影響を防止している。

レーザー光はターゲットチェンバのポートに取り付けた焦点距離1 mの大口徑非球面レンズにより集光される。集光位置におけるレーザー光のスポット径は直径 $20 \mu\text{m}$ であり、これはレーザー光の拡がり角にして $20 \mu\text{rad}$ に相当する。レーザー光の指向性は、自動アライメント装置により $10 \mu\text{rad}$ の精度で一定方向に保たれ、ターゲット上には $10 \mu\text{m}$ の位置精度で集光される*。12ビームのレーザーパルスは10 psの精度で同時にターゲットを照射する必要がある、これは光路長にして3 mm以内の精度にあたる。このためレーザー

室、ギヤー室、ターゲット室のすべての架台、光学素子は絶対位置で3 mm以内の精度で設置され、誤差はレーザー室内ビーム分割部の光路長で調整する。

ターゲット室の側壁は、厚さがそれぞれ1 mの外壁・内壁の2重構造をなし、振動伝達を切り離れた内壁にレーザー光路用大口徑反射鏡を取り付けている。ターゲット室の天井も厚さ1 mのコンクリートで、約 10^{17} 個の中性子発生を伴うブレイクイーブン実験も、このターゲット室で実施可能である。レーザー室、ギヤー室、ターゲット室はそれぞれ厚さ1 mのコンクリート床で、室間の相対的な変位角は 5×10^{-8} rad 以内と計測されている(第1表)。各室の温度安定性は 0.1°C 以内に保たれ、日ごとのレーザー光の指向性の変化は $30 \mu\text{rad}$ 以内に抑えられている。

「激光Ⅷ号」装置全体の運転は、ギヤー室地下のレーザー制御室で集中的になされる。また、プラズマ計測用の各種計測器の電気信号はレーザー制御室の隣りの計測制御室に送られて測定、記録される。現在「激光Ⅷ号」はコンピュータ制御が完了していないため、実験においてはレーザー室、ギヤー室等に多数の作業者が分散して仕事を行う。レーザー制御室では、これらの作業状況をモニタテレビ、通信装置によりモニタしつつ、実験の進行を管理している。

Ⅲ. 「激光Ⅷ号」立ち上げ実験とその成果

慣性核融合実験棟は、ギヤー室、ターゲット室を除き1982年9月に完成し、10月よりレーザー装置の搬入・据付が開始された。またギヤー室、ターゲット室は1983

* レーザー光はこのように指向性が良く拡がり角も小さいので、核融合炉においては内径を10 m以上大きくし、最終反射集光鏡も炉心より10 m以上離すことができる。

年3月に完成し、4月より集光照射装置の搬入・据付・調整が急ピッチで実施された。「激光Ⅷ号」実験用の各種プラズマ計測器は、研究センターのメンバーが分担して設計・製作を行なった。またターゲット設計は、研究センター全員がアイデアを出し合ったのち、理論・シミュレーショングループが代表的なターゲットに対してパラメータ・サーベイを行い、ターゲットの最適化をし、実験で得られる爆縮パラメータの予測を行なった。このようにして選ばれたターゲットを製作すべく、ターゲットグループは技術開発を行いつつ使用ターゲットの製作をすすめた。1983年初めに、12月8日をZ-dayと定め、この日に照準を合わせてスケジュールを作成し実行した。

レーザー装置、集光照射装置、プラズマ計測器、ターゲットの準備がほぼ整った11月23日より、1ビームを用いたターゲット照射実験を開始した。各種装置の動作状態を確認しつつ、日を追ってビーム数とレーザー出力を増加させ、これと並行して爆縮実験を継続した。実験に使用したのは第1ターゲット室である。立ち上げ実験は11月23日より12月末日までの期間継続して実施された。

この間のレーザー装置の全出力エネルギーとピーク出力の増強の様子を第2図に示す。レーザー光のパルス幅は12月12日までが114 ps、12月13日以降は100 ps

第2図 「激光Ⅷ号」の出力エネルギーとピーク出力(下図)およびエネルギーバランス(上図)(横軸は月日)

である。12月14日にはピーク出力 47.5 TW を記録した。この間各増幅器列の増幅特性の差を補正しつつ12ビーム出力エネルギーのバランス調整を実施した。この結果第2図上半分に示すようにエネルギーバランスを±6%(平均値に対し、最も大きくずれたエネルギー値の割合)以内に保つことができた。短パルス動作におけるレーザー光の空間パターンは、写真3に示すように極めて均一で、空間分布一様性(平均強度とピーク強度の比)は64%に達している。47 TW 動作においても、レーザー光の自己収束効果によるパターンの低下(ビームブレイクアップ)はほとんど観測されていない。これはレーザー動作に関するシミュレーション計算と一致し、今後の出力上昇を保証するものである。

写真3 「激光Ⅷ号」出力レーザー光の空間パターン

なお本年1月9日から、レーザー部の一部配置換えを含めてアラインメントの微細調整を行い、1月15日からパルス幅500 psでレーザー増幅試験を実施した。1月21日には全出力エネルギー10.2 kJ、ピーク出力20 TWを得、エネルギーバランスは±2%以内に調整された。空間パターンも写真3と同様に極めて良好である。1982年11月～84年1月のデータは「激光Ⅷ号」を安全運転しながら得たものであり、例えば10 kJ/500 psのショットでは最終増幅器を動作させていない。現在のデータは既に米国 Lawrence Livermore 国立研究所の20ビームガラスレーザー装置「SHIVA」の最高性能を上回っているのであるが、近いうちに実施する出力上昇試験において、パルス幅1 ns、出力エネルギー20 kJの値を達成する予定である。

1983年末の「激光Ⅷ号」立ち上げ実験において、本格

的なターゲット爆縮実験は12月2日より開始した。実験に使用したターゲットは、直接照射型ターゲットおよびキャノンボールターゲットである。前者は、D-T燃料を含むガラス小球を12ビームのレーザー光で直接照射するものである。キャノンボールターゲットはこのような燃料球の外側を、レーザー光導入穴を有する

タンパーでおおった2重殻ターゲットである。第3図に示すように、2つの球殻の間の空間に閉じ込められたレーザー光のエネルギーはプラズマおよび輻射へと変換され、内部の燃料球を爆縮する。今回の実験では、レーザー光の導入穴が2個、4個、12個の3種類のキャノンボールターゲットを試験した。

第3図 キャノンボールターゲット爆縮の概念図

2穴キャノンボールターゲットを「激光Ⅷ号」で照射する場合は、写真4に示すように、5ビームずつを1束として2方向より照射する。この場合、穴の中心方向の2ビームは使用しないので10ビーム照射となる。4穴キャノンは写真5に示すように、正四面体の面心方向に4つの穴を有し、レーザー光を3ビームずつキャビティ内に導入する。2穴キャノン、4穴キャノンボールターゲットとともに、レーザー光と内球に当てないよ

うに斜め入射させるが、12穴キャノンボールターゲットでは12ビームのレーザー光を直接内球に照射する。この場合、外側のタンパーには、内球で反射・屈折されたレーザー光を再び内球に反射させ、有効利用する機能を意図している。いずれの場合も、レーザー光をターゲット中心からずれた穴に、 $10\mu\text{m}$ 程度の精度で正確に集光する必要がある、非常に高度のアライメント方法が要求される。実際の実験ではこれらのターゲ

写真4 「激光Ⅷ号」による2穴キャノンボールターゲットの照射(第1ターゲット室使用の場合)

写真5 4穴キャノンボールターゲット

ット構造に加え、大きさ(直径, 厚さ), 材質(ターゲット表面への各種コーティング), D-T燃料圧力, レーザー光集光条件などをパラメータとし, 種々の条件でレーザー照射を行なった。

今回の実験における計測項目を第2表に示す。レーザー装置ではレーザー部の動作状態を把握すると同時に, ターゲットから反射されてくるレーザー光のエネルギー・パターンを計測する。集光照射部ではターゲッ

第2表 「激光Ⅷ号」ターゲット照射実験の計測項目

1. レーザー部	
(1) パルス幅	
(2) エネルギー(52点)	
(3) 近視野像(12点)	
(4) 遠視野像(12点)	
(5) ターゲット反射光エネルギー	
(6) ターゲット反射光パターン	
2. ターゲット集光部	
(1) ターゲットパラメータ	
①燃料球	直径, 厚さ, コーティング材・厚さ, 燃料圧力
②タンパー	直径, 厚さ, レーザー光導入穴座標
(2) レーザー光照射条件	集光位置
3. プラズマ計測	
(1) X線計測	ピンホールカメラ, 結晶分光器, X線ストリークカメラ, フィルタ・蛍光分光器(高エネルギーX線用)
(2) カロリメトリ	光カロリメータ, プラズマカロリメータ, チャージコレクタ
(3) 中性子計測	Al放射化カウンタ, 銀放射化カウンタ(2台) プラスチックシンチレータ(中性子飛行時間計測, 飛行距離43m) NE102A シンチレータ(2台)
(4) α 粒子計測	CR39 トラック検出器

トグループが計測したターゲットの大きさ, レーザー光導入穴の位置(座標)をもとに, それを確認しつつレーザー光の位置設定を行う。プラズマ計測器に関しては, X線ピンホールカメラにより爆縮の全体像を把握し, 爆縮の時間変化をX線ストリークカメラで観測する。レーザー光をターゲットに照射した場合のエネルギーバランスを求めるために, カロリメトリが非常に重要である。

今回の実験においては, 中性子計測が最も重要なパラメータである。発生中性子数を正確に測定するために, 大阪大学中性子源「OKTAVIAN」で校正したAl放射化カウンタを使用し, さらにクロスチェックのために銀放射化カウンタを2台併用した。Al放射化計測法とは, 薄いAlの円筒をターゲットチェンバのすぐ外側におき, ターゲットより発生した中性子によりこれを放射化させる方法である。放射化したAlが発生する β 線と γ 線を計測して発生中性子数の絶対値を高い確度で決定できる。放射化Alの半減期は4.2 min と短いので, Al円筒はショット後直ちにエア・シュータで爆縮計測室に送り, そこで放射線カウンタにかける。

また核融合反応時の燃料の温度は, 中性子の飛行時間計測により求められる。中性子のエネルギーは燃料の温度に対応した広がりをもっており, 燃焼時間は10 ps程度と短く, 飛行時間に比べ無視できる。今回は43 mの距離にプラスチックシンチレータをおき, その発光を高速光電子増倍管で計測した。そのオシロスコープトレースを写真6に示す。散乱中性子の寄与を含まないように, トレースの立ち上り部分でイオン温度の

イオン温度 4.6 keV

イオン温度 10.4 keV

写真6 中性子飛行時間法によるイオン温度の計測

決定を行う。この写真からもわかるように、ショット条件でイオン温度は大きく変化し、最高 10.4 keV の値が12穴キャノンボールターゲットにおいて得られた。

今回の実験で得られた核融合中性子数をレーザー出力に対してプロットした結果を第4図に示す。この図にはターゲット構造、ショット番号も記入されている。前に述べたようにターゲットパラメータはいろいろ変化させたのであるが、全体としてはレーザー出力と一定の関係にあることがわかる。最高の中性子数は 4.0×10^{10} であり、これは Livermore 研究所「SHIVA」装置の 2.7×10^{10} 、Rochester 大学レーザーエネルギー研究所「OMEGA」装置の 1.35×10^{10} を上回る値である。中性子発生数に関しては、今回の実験条件ではキャノンボールターゲットと直接照射型ターゲットではほぼ同等の結果が得られているが、キャノンボールターゲット(大阪大学の発明にかかる新型構造の2重殻ターゲットで、均一圧縮と高効率圧縮で定評がある)の方が燃料が高密度に圧縮されるので、核融合ターゲットとして優れた特性を有している。

第4図 「激光Ⅻ号」実験におけるD-T核融合中性子発生数

実際の実験の様子を少し紹介しよう。ショット用ターゲットは前日にターゲットチェンバ上部に収納され、プラズマ計測器もすべて前日に取り付けて調整を

行う。ショット日は午前6時にレーザー発振器がタイマーにより自動立ち上げされる。午前8時からレーザーグループアラインメント班がレーザー装置のアラインメントを開始し、午前10時半に全12ビームを終了する。午前10時から集光照射装置アラインメント班がターゲット上への集光アラインメントを開始する。この間レーザー制御室ではあらかじめ作成された日程表に従い、レーザーグループ、集光アラインメントグループ、プラズマ計測グループの作業内容、進行状況を把握して各作業班に連絡を行う。各作業者は分担している機器が正常動作しているかを点検しつつ待機する。レーザー制御室より各作業班に対し最終確認を行なった後、本ショットに移る。警報音が鳴り渡る中、秒読みを行い、「ファイア」の合図でレーザーが発射される。ターゲットショット後、プラズマ計測グループは直ちに結果の収集、放射化計測、写真の現像などを行う。この作業は3~4hかかる。

このような作業を1日に数回繰り返すことになる。本年3月には、レーザー装置と集光照射装置の自動制御が完成するので、4月からはアラインメントに要する時間を大幅に短縮でき、実験効率が格段に上がるものと期待されている。

Ⅳ. おわりに

ガラスレーザー「激光Ⅻ号」が無事稼働を開始し、その立ち上げ実験において多くの成果が得られた。1984年より実施される本格的な実験シリーズにおいて、慣性核融合に関する多くのプラズマ物理過程が解明され、また核融合パラメータに関し新しい記録データが得られるものと期待される。X線レーザー、粒子加速高密度プラズマ物性など、関連分野の実験を行うことも計画されている。「激光Ⅻ号」は現在第1ターゲットチェンバを用いて実験を開始しているが、本年10月にはレーザー光の波長を第2高調波に変換し、かつ第2ターゲットチェンバが使用可能となる。

わが国の核融合研究は公開を原則としている。これは、ターゲット構造の一部しか公表できない米国の国立研究機関と大きく異なる。1983年11月14~17日に神戸で開催された「第6回IAEA慣性核融合技術会議」において、米国Rochester大学、カナダ、中国、イスラエル等6ヶ国から、協同研究実施の申込みが大阪大学に対して行われた。今後は「激光Ⅻ号」の性能向上、計測技術の開発を進めること、および国際的研究交流をどのように実施するかが、重要な課題となろう。