

## 研究ノート ガラスレーザーの高出力化

加藤 義章\*

### 1. はじめに

レーザー核融合研究センターでは、慣性閉じ込め核融合 (Inertial Confinement Fusion: ICF) の研究を行っている。慣性核融合といってもなじみの少ない方もおられると思われるので、先ず簡単な説明をさせていただく。説明の都合上太陽を例にとって話を始めたい。

太陽は良く知られているように、巨大な熱核融合炉であり、その発生エネルギーで我々は生存をしている。太陽の中心部は太陽を構成する物質の重力により、約  $4 \times 10^{11}$  気圧という非常に高い圧力を受けている。太陽中心では水素が核融合反応を起こし、その反応エネルギーで温度が約 1,400 万度、密度が約  $100 \text{ g/cm}^3$  の高温・高密度のプラズマ状態となっている。太陽は生誕後約 50 億年たち、人間の年齢にすると 30 才台にあたる。太陽は約 50 億年後には、核融合燃焼の灰として生成されるヘリウム原子の蓄積により温度が上昇し、炭素・窒素等の重い原子核が燃えるようになる。すると燃焼速度は急激に速くなり、太陽は一気に膨脹し、その後再び縮小して低温の老年期へと入る。このような太陽の一生は、重力による収縮と核融合反応エネルギーによる膨脹という、相反する 2 つの過程で支配されている。

さて慣性核融合は、太陽の一生に相当する過程を極く小規模に且つ短時間に起こし、そこで発生するエネルギーを制御しつつ利用しようとするものである。このために必要なことは、核融合燃料を高密度に圧縮し、次いでこれを効率良く燃焼させることである。太陽では重力により燃料が高密度に圧縮されているのであるが、

慣性核融合では、高出力のレーザー光或いはイオンビームにより高い圧力を発生させ、燃料の圧縮を行う。(ここでイオンビームとは、水素等の軽原子或いはウラン等の重原子のイオンを高エネルギーに加速し、且つ指向性を良くしたものである。) レーザー光を用いた慣性核融合方式を、レーザー核融合と呼んでいる。燃料を内部に含む直径が 1 mm 程度の小球(これをターゲットと呼ぶ)に、短パルス・高出力のレーザー光或いはイオンビームを照射すると、表面物質が加熱されてプラズマ状態となり、外側へ高速度で噴出する。この噴出運動の反作用としてターゲットは中心方向へ加速され、内部の燃料を球対称に圧縮することができる。

太陽の中心部ではプラズマ圧力が重力による圧力と平衡状態を保っているのであるが、地上で太陽中心に匹敵する圧力を作ることは困難である。そこでわれわれは圧縮過程でのプラズマ圧力を小さくするため、燃料の予備加熱を抑えできるだけ低い温度に保ったまま、圧縮を行う。すると約  $10^7$  気圧により  $200 \text{ g/cm}^3$  程度の高密度を得ることができる。こうして燃料を先ず低温・高密度状態にし、次いでその中心部だけを約 5,000 万度に瞬間的に加熱する。すると中心部で核融合反応の点火が起こり、一旦点火した後は反応生成物の  $\alpha$  粒子 ( $^4\text{He}$  の原子核) の衝突により燃料が自己加熱されて、燃焼が燃料全体に一気に広がる。燃焼時間は約 10 ps (1 ps は  $10^{-12}$  秒) と非常に短い。

### 2. ガラスレーザーの高出力化

慣性核融合研究にもっとも広く用いられ、且つ多くの成果を出しているエネルギードライバーは、ネオジウムガラスレーザーである。ガラスレーザーは、反転分布という形でその内部に蓄わえ得るエネルギー密度が大きく、大口径化

\* 加藤義章 (Yoshiaki KATO), 大阪大学, レーザー核融合研究センター, 助教授, 工学博士, 量子エレクトロニクス, 核融合工学

することが容易で、且つ大口径にしても寄生発振を生じ難い。また波長が1.05ミクロンと近赤外域にあるため、光学材料及び光学技術の点で非常に取り扱い易い。KDP等の非線形結晶を用いて2倍波(0.53ミクロン)、3倍波(0.35ミクロン)等の高調波光へ高い効率で変換することもできる。現在のガラスレーザーは効率が低く、繰り返し時間も約30分と長いので将来の核融合炉にはこのままでは使えないが、現段階では短パルス・高出力レーザーとして最も高い性能を有している。

このようなガラスレーザーの特性に着目し、大阪大学では山中千代衛教授(工学部電気工学科教授、レーザー核融合研究センター長)が、1967年より高出力化に関する本格的な研究を開始した。筆者は1975年に大阪大学に着任したのであるが、その時には出力口径8cm、2ビームのガラスレーザー装置「激光Ⅱ号」が完成し稼動試験が行われていた。同年激光Ⅱ号に続く「激光Ⅳ号」装置の開発が開始されており、筆者はそのレーザー部の設計及び製作にあたることになった。その当時のガラスレーザー装置に関する問題点を検討した結果、励起光源用大入力キセノン放電管の耐力向上、大口径増幅器の性能向上、モード同期発振器の安定化等を、重点的な技術開発項目として採り上げた。

また物理的な問題として、レーザー光の自己収束効果によるレーザーガラス等の光学素子の光破壊という問題があった。自己収束効果とは、誘電体の屈折率が光電界によって大きくなり凸レンズとして作用する結果、レーザー光が自分自身の電界で集束していく現象である。自己収束効果をできるだけ小さく抑えるためには、第1にレーザー光が通過する誘電体の光路長を短くする必要がある。ガラスレーザーの場合、レーザーガラスが主な誘電体であるので、これを短くするには増幅器の利得を大きくすれば良い。第2の方法は、自己収束効果の起き難いレーザー材料を使うことである。当時のガラスレーザーは激光Ⅱ号を含め全て、珪酸塩ガラスを母体としたレーザーガラスが使用されていた。これに対し磷酸塩ガラスを母体とするレーザーガラスが1975年に保谷硝子で試作された。

われわれは磷酸塩系レーザーガラスの非線形屈折率(自己収束効果の起こり易さ)が小さく、誘導放出断面積(利得係数に比例する)が大きい点に着目し、激光Ⅳ号に使用した場合の性能指数の評価を行った。この結果、珪酸塩系レーザーガラスを使用した場合より約2倍の出力が得られるとの結論を得て磷酸レーザーガラスの採用に踏み切った。その頃米国では国立リバモア研究所で出力エネルギー10kJのガラスレーザー「SHIVA」の設計が進められていたが、磷酸ガラスに関するデータが不十分とのことで、その採用は見送られた。

激光Ⅳ号は1978年3月に完成し、出力口径11cm、4ビームでピーク出力4TWと、設計開始時の目標をほぼ4倍上まわる性能が得られた。激光Ⅳ号に続いて出力エネルギー10kJ級の「激光Ⅶ号」装置の開発計画が開始されたが、これは2段階に分けて行われることになり、先ず第1段階として「激光Ⅶ号モジュール(激光MⅡ号)」の開発が認められた。われわれは激光MⅡ号装置開発の重点を、磷酸ガラスレーザーの大口径化、及び全レーザー装置の計算機制御の2項目とした。1980年に装置が完成し、出力ビーム径20cmでピーク出力3.4TWを得た。これは1978年末より運転を開始していたSHIVA装置(ビーム径20cm、20ビーム)の1ビーム当りの出力をほぼ3倍上まわる性能である。

われわれは現在激光Ⅶ号計画の第2段階として、激光Ⅶ号装置の建設を行っている。装置全体の概念図を図1に示す。装置は大別して、レーザー装置及びターゲット集光照射装置に分けられ、建設期間はそれぞれ、1980～82年度及び1981～83年度である。レーザー装置は12ビーム、出力ビーム径35cmであり、エネルギー20kJ(パルス幅1ns)及びピーク出力40TW(同0.1ns)の性能を予定している。実験の稼動率を上げるために2つのターゲットチェンバーを備え、レーザー出力光を反射鏡によりどちらのチェンバーにも導けるよう設計がなされている。建屋は激光Ⅶ号装置の一部との考えから、振動・温度・除塵・接地・配管等多くの面で細かい注意が払われている。本年11月に建屋の大部分が完成し、レーザー装置の搬入が開始され

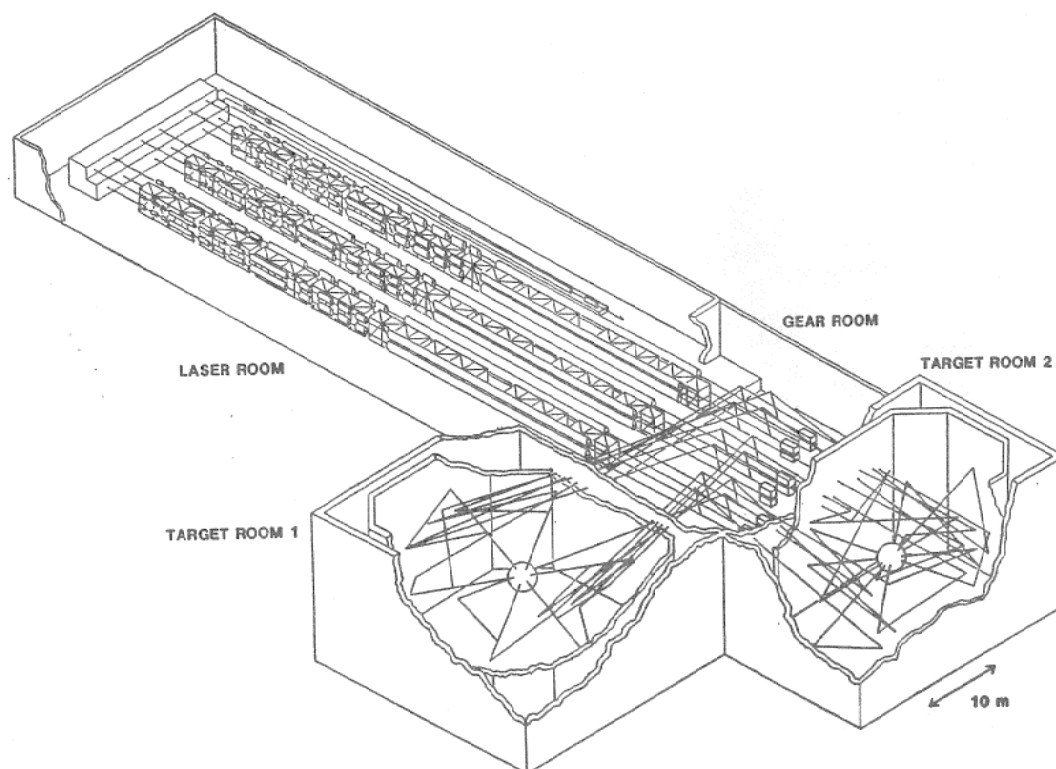


図1 ガラスレーザー激光 XII 号装置

る。激光XII号が運転を開始すると世界で最大出力のレーザー装置となり、その成果が各方面で注目されている。

一般に新しい装置を設計して性能向上を計る場合、設計思想そのものを変革するか、或いは基本設計は同じだが構成部品の性能向上を狙うかの2つのアプローチがある。前者のアプローチが望ましいが、大型装置に全く新しい概念を導入することは通常困難である。ガラスレーザー装置で性能向上を計るためには、光学材料及びその加工に関し改良を行うことが重要となる。われわれは長年に亘り国内光学関係企業と共同開発の形で、大口径光学素子の製造、研磨（平面研磨、球面・非球面研磨）、蒸着等に取り組み、レーザー装置の大型化及び信頼性の向上に役立てて来た。またこれらの技術は最近の電子部品製造用光学システムの高精度化、大口径化にも役立てられている。現在残っている最大の問題は、短波長レーザー光に対する光学素子の耐力向上であり、ソラリゼーション及び光損傷を受けない光学素子の開発が急務となっている。

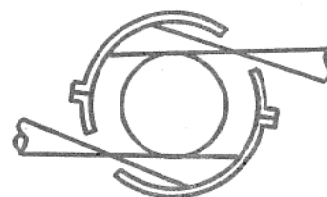


図2 キャノンボールターゲットの概念図

### 3. 高出力レーザーの利用

先ずターゲット圧縮実験の例として、最近われわれがテストを行っている「キャノンボールターゲット」を紹介しよう。このターゲットは図2に示すような2重構造をなし、燃料を含む球状ターゲットの外側のもう1つ球殻に小さな穴を明け、そこを通してレーザー光を2つの球殻の間の空間に導入する。レーザー光はこの空間に閉じ込められ、そのエネルギーは粒子運動及び輻射のエネルギーへと変換されて、内球を圧縮する。このターゲットの特徴は空間内でレーザー光が走り回るため球対称に近い圧縮が得られること、及び外殻の質量を大きくすることにより投入エネルギーを高い効率で内球の圧縮運動

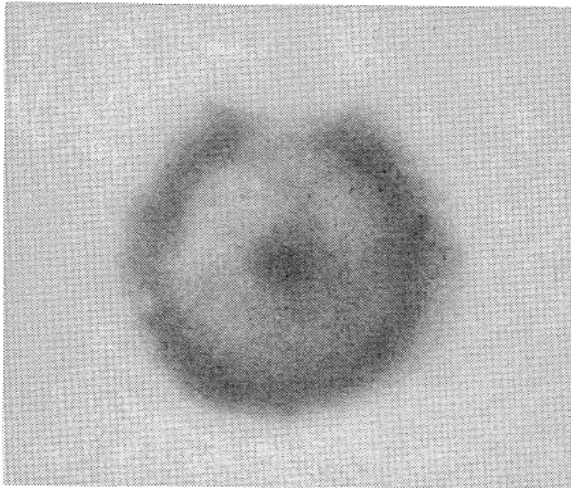


図3 キャノンボールターゲットのX線発光像

に変換できることである。図3は前述の激光MⅡ号により400 Jのレーザー光でキャノンボールターゲットを照射したときのX線発光のピンホール写真像である。このときのターゲットは、外殻は内径400ミクロンのプラスチック球、内球は直径220ミクロンのガラス球（肉厚1ミクロン）で、その内側に重水素—三重水素の燃料とネオン気体（X線計測用）が充填されている。このX線像で外側の円は圧縮する前の内球表面の発光であり、中心の円は内球が圧縮されて充填気体が高温になったときのネオンのX線発光によるものである。なお外殻のプラスチック球のX線発光は弱いので図3には写って

いない。F/2.75という比較的暗い光学系を用いた2ビーム照射にもかかわらず、非常に球対称性の良い圧縮が行われていることがこのX線像よりわかる。このとき熱核融合反応による $2 \times 10^8$ 個の中性子の発生が観測されている。このようなキャビティターゲットの圧縮実験は今迄に報告例が無いが、高密度、球対称圧縮に適した構造であると評価されよう。

われわれが研究対象とする高密度プラズマは天体プラズマに近いパラメーター領域にある。高密度プラズマの物性に関しては多くの理論的取り扱いがなされているが、今後実験室で直接観測を行うことが可能となろう。またレーザー生成プラズマから発生するパルスX線を固体物性・生体観測等に応用すること、或いはX線レーザー発振を起こさせること等の提案もなされており、今後高出力レーザーの応用範囲が広がることを期待したい。

ここで紹介した研究は山中千代衛教授の指導により、筆者がレーザー核融合研究センター、電気工学科第3講座、及び電磁エネルギー工学専攻レーザー工学講座の諸先生と協力して行ったものである。なお、ガラスレーザーの開発段階で、特に計算機制御に関し適切な御助言をいただいた電気工学科の諸先生に深謝する。