

# レーザー核融合と新型ハイパワー固体レーザーの進歩

Laser Fusion Research and Progress of High Power Solid-state Laser

中塚正大\*・中井貞雄\*\*  
Masahiro Nakatsuka, Sadao Nakai

## 1. はじめに

従来、エネルギー資源の概念は主として熱的、化学的なマクロな態様で考えられ、最終利用形態も電氣的、機械的、熱的なものが多く取り扱われてきた。光エネルギーの利用は比較的新しいものであるが、古くは太陽エネルギーの熱的利用や特殊には紫外光源の化学における利用などがあった。高度エネルギー源なる概念の「高度」は極めて豊富なものを内に含め得ると言える。光を取り扱う分野も、レーザー技術の進展とその応用分野の広がりにつれて、いわゆるハイテク領域で確固とした地歩を築きつつある。光のエネルギー利用においても、光自体の有するエネルギーを利用する分野と新しいエネルギーを生み出す分野で研究が進みつつある。いずれにしても高エネルギー出力レーザーが応用分野へ大きな波及効果を及ぼしつつあり、特にここ2～3年は固体レーザーのルネッサンスと呼ばれている。

光を情報キャリアとして用いる場合には、大きなエネルギー量は不要で、光（周波数は100THzを超える）の高速度変調性（光通信、光情報処理など）、高集束性（CD、光リソグラフィなど）、高精度波面性（微細計測、情報処理など）が重要視される。一般にレーザー光と言えども、出射エネルギーが増すにつれてこれらの特性（時間的、空間的可干渉性）は悪化する。光エネルギー応用は最初は熱加工（切断、穿孔、焼き入れ、医用など）に始まり、レーザーエネルギーの増強と、高集束性の向上と共に、レーザー核融合、レーザープラズマ応用、X線リソグラフィ、X線顕微鏡、レーザー表面改質、新合金生成など新技術の開発に向かっている。

レーザー核融合研究<sup>1)</sup>は大出力レーザーシステムに

\*大阪大学レーザー核融合研究センター、助教授  
\* 教授、センター長  
〒565 吹田市山田丘2番6号

よる超高出力レーザー光を微量な核融合燃料ターゲットに集光照射し、核融合条件（重水素と三重水素融合反応で温度1億度、原子数密度と核融合反応時間の積 $10^{14}$  sec/cm<sup>3</sup>）を達成しようとするものである。レーザー核融合研究については本誌論説に詳細に述べられているので、最近の進展について概説した後、高出力ガラスレーザーシステム、高平均出力固体レーザー、半導体レーザー励起新型レーザーの現状について述べる。

## 2. レーザー核融合

核融合反応自体については良く知られた知識である。質量の軽い（たとえば水素）原子核を融合させ、より重い原子核に変換する際、質量欠損に相当するエネルギーを発生させることができる。核反応を有効に生じさせるためには、核燃料（たとえばD, T原子）を一定以上の温度（1億度）に保ち、高温プラズマを生成するために必要なエネルギーに相当する融合エネルギーが発生する程度の間、温度、密度を保持（閉じ込め）せねばならない。閉じ込めの条件はプラズマ密度と閉じ込め時間の積で与えられる。強力な磁場による閉じ込め方式とは全く異なる慣性閉じ込め方式核融合が良好な実験結果を出しつつあり<sup>2)</sup>脚光をあびている。この方式では真空中に置かれた微量な燃料ペレットを強力なレーザー光で照射し、その際にペレット表面から球対称的に噴出するプラズマの反作用で内部燃料を断熱圧縮することで、高温高密度化を達成しようとするものである。これを爆縮過程という。核融合で発生するエネルギーは、爆縮により燃料密度の2乗に比例して増加するため、反応に必要な時間を高温プラズマの有限の膨張時間より短くすることができる。慣性閉じ込めとは、何ら積極的な閉じ込めは行わない方式といえる。

慣性核融合研究は次の点で重要である。エネルギーを投射するドライバー（たとえばレーザー光）と核反

応装置は隔離して設置可能であり、炉建設の設計の自由度が極めて高い。プラズマの閉じ込めに強力な磁場を用いないため、炉内壁に液体金属流を設置でき、核反応生成物（中性子、 $\alpha$ 粒子、X線など）に対する第一炉壁への材料物性的要請を緩和できる。炉開発に必要な技術ベースとして高出力レーザードライバー、燃料ターゲット微細加工、高温高密度プラズマの極限分解診断、高温プラズマ物理を含む高速シミュレーションなど、他の産業分野への転用可能な波及効果の高いものが準備される。新しい物理学の領域として、高エネルギー輻射と物質との相互作用、高密度物質物理から宇宙現象まで極限状態を地上に生起できる。

現在、レーザー核融合研究は1983年に完成したレーザーシステム激光X II号（25kJ / 1 ns, 55TW / 0.1

ns）を用い、着実な進展を示している。図-1に核融合反応で発生した1ショット当たりの中性子数（核反応数に比例）と、固体密度で規格化した核燃料密度を示す。核融合反応は、レーザー光の短波長化（ $1.05\mu\text{m} \rightarrow 0.53\mu\text{m}$ ）、燃料ペレットの設計・製作技術の向上、レーザービームやターゲットの均一性の向上につれて増大し、中性子数では83年当初の1万倍、燃料密度で当初200倍に圧縮可能となった。中性子発生数 $10^{10}$ 個より核反応出力エネルギーは約30Jとなるが、レーザー照射エネルギー（約13kJ）の約5%が爆縮コアに与えられているため、コアプラズマ利得で4%、ペレット利得で0.2%が得られていることになる。爆縮密度はD/Tを含むプラスチックシェルターゲットによる実験より、最大値で600g/ccに達していることが判明している。球対称プラズマの爆縮シミュレーションより、 $0.35\mu\text{m}$ 光100kJ投射で、ブレークイーブン（照射エネルギーと核反応出力の比=1）が達成できることが予測されている。図-2に赤色、緑色、青色レーザー出力に対する中性子出力計算値を実験値と共に示した。

以上のことより、今後100kJ級レーザーの建設により慣性核融合の実現性の科学的実証が可能であることがわかる。実用炉に向けての開発要素のドライバー（レーザー又は粒子ビーム）における課題は、高繰返し（ $\sim 1\text{Hz}$ ）、高効率（ $\sim 5\%$ ）の実現にある。

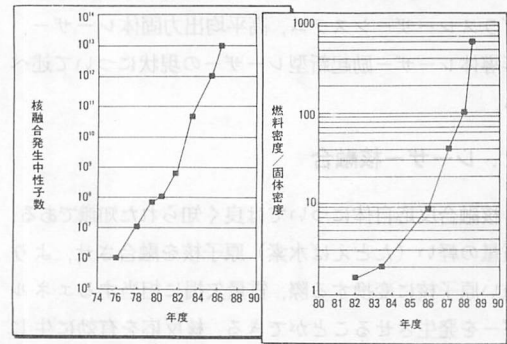


図-1 激光X II号レーザーにより達成された核反応プラズマパラメーターの変遷

### 3. 核融合用レーザー技術

#### 3.1 核融合用レーザー研究の進展

大型核融合用レーザーの研究開発はレーザー媒質の大型化の実現と歩調を合わせて進められた。とりわけガラス（硅酸系 $\text{SiO}_2$ 、リン酸系 $\text{P}_2\text{O}_5$ など）材料は光学的均質性に富み、大型化が可能で、高強度レーザー光に対する非線形屈折率も小さいため、核融合用レーザーに最適であった。波長は $1.05\mu\text{m}$ で従来の可視領域光学材料が使用可能である。70年代以降、急速に進んだレーザー開発の様子を図-3に示す。

70年代初の10J / 1GWクラスから、大口径ディスクガラス増幅器、高性能リン酸ガラス開発、スペシャルフィルターを用いた長距離像転送概念の発明、大口径波長変換結晶（KDP、第二リン酸カリウム）の育成の成功などにより現在100kJ / 100TW級のシステムが稼働している。大阪大学では75年より大型化に着手し、世界初のリン酸ガラスレーザーシステム激光IV号、M II号の開発に成功し、83年には12ビーム、26kJ（1 ns）、57TW（0.1ns）システム激光X II号が完成した。

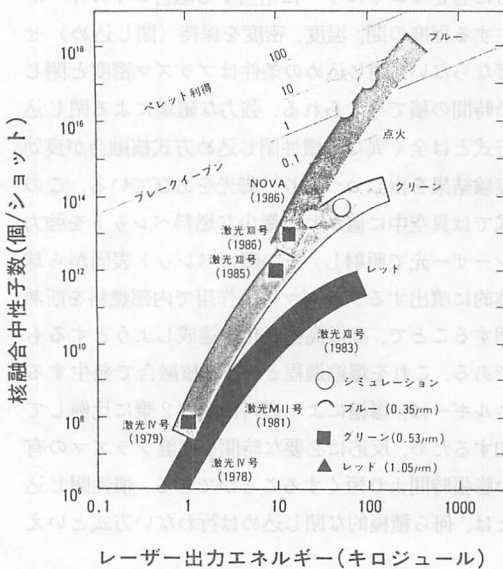


図-2 レーザー核融合出力（発生中性子数）の入射エネルギー依存性

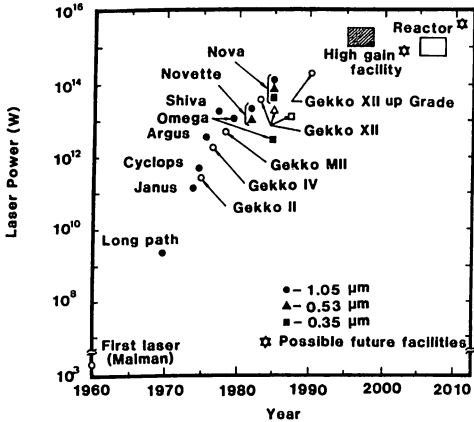


図-3 核融合研究用大型ガラスレーザー開発の歴史

核融合研究は同時に着実な進展を見せ、83年に世界最大級の核融合反応中性子量  $4 \times 10^{10}$  個/ショットを得、85年には世界最大級のKDP単結晶 (36cm) による第2高調波発生 (0.53  $\mu\text{m}$  光, 変換率80%以上) が可能となり、 $1.3 \times 10^{12}$  個/ショットに反応量が增大した。86年にはレーザー光の12ビームバランスと高アスペクト比大型ターゲットを最適レーザー波形で照射し、反応量  $10^{13}$  個/ショットを実現し、IAEA国際会議ではスーパーショットと呼ばれた。88年には激光X II号の第2ターゲット室に第3高調波発生 (0.35  $\mu\text{m}$  光, 変換率70%) 装置が完成し、大阪大学発明のX線変換照射型キャノンボールターゲットの実験や、X線レーザーの研究が進められている。レーザー爆縮燃料密度の増大も年を追って急速に増加している。圧縮密度レ

ーザー照射均一性に強く影響されるが、大阪大学で発明されたランダム位相板の利用によりこの報告の時点で600g/ccが実現されていることは既に述べた。

### 3.2 高出力レーザーシステム

現在高出力ガラスレーザー装置では、発振器からのレーザー光を多段の増幅器により増幅していく方式が採られている。このようなレーザー装置の出力エネルギー及び出力パワーを制限している物理要因としては、(1)増幅の飽和、(2)非線形光学効果によるビームブレイクアップ、(3)レーザー光による光学素子の損傷がある。レーザー光密度は、パルス幅1 ns程度では、光損傷と増幅の飽和で制限され約  $10\text{J}/\text{cm}^2$  ( $10\text{GW}/\text{cm}^2$ ) で、100psでは光の自己集束効果で制限され約  $1.5\text{J}/\text{cm}^2$  ( $15\text{GW}/\text{cm}^2$ ) となっている。

図-4に示す激光X II号を例として高出力レーザーシステムの構成をみてみよう。激光X II号は発振器、前置増幅器列、および12ビームの主増幅器列より構成され、最終ビーム口径は35cmである(レーザーシステムの写真は本誌論説記事に掲載されている)。増幅器は口径25mmロッド増幅器3台、口径50mmロッド増幅器26台、200mmディスク増幅器36台で、電源蓄積エネルギーは22MJである。スペシャルフィルタによりターゲットチャンバーまで完全像転送方式を採用している。ターゲットチャンバー前には波長変換用結晶、波面位相制御板などが設置され、大口径非球面

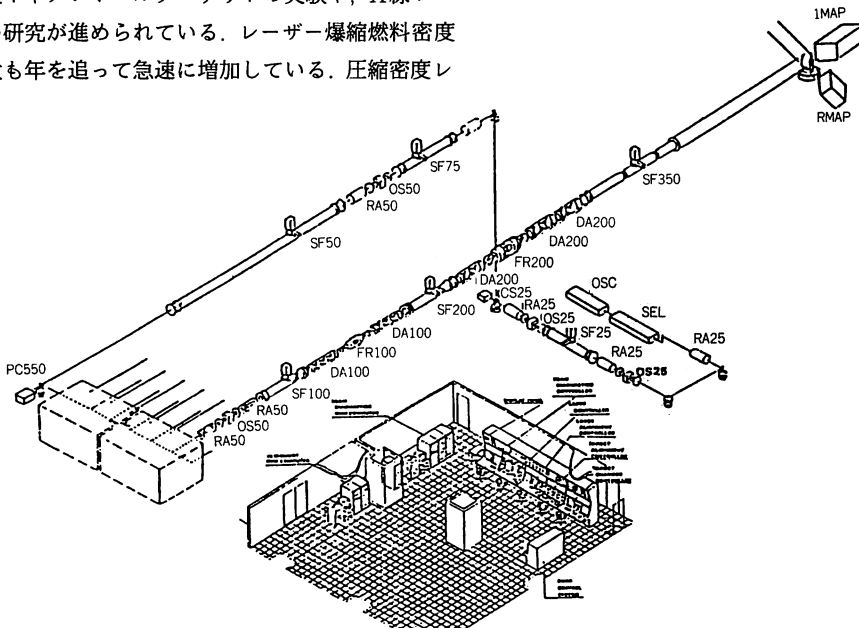


図-4 激光X II号ガラスレーザーシステムレーザー部鳥瞰図

レンズで球型ターゲット上にレーザー光が集光照射される。

核融合研究用の高出力レーザーはその設計と実現において、エネルギー効率、パルスレーザー運転の繰り返し速度は重要視されないワンショット設計の装置である。現状では1時間に1ショット、エネルギー効率0.1%である。高出力を実現する際の主な開発要素とその進歩について述べる。

#### (a)大口径ディスク増幅器

増幅されたレーザー光強度が増すにつれて、光学素子の光破壊が問題となる。一般に物質の屈折率 $n$ は光強度 $I$ に関係し、 $n = n_0 + n_2 I$ と書ける。非線形屈折率 $n_2$ は小さな量であるが、レーザー強度の増大につれて無視できなくなる。例えば、 $10\text{GW}/\text{cm}^2$ の光を10cmのレーザーガラス(LHG 8)に通すと、等価的に屈折率は1.8倍に増大する。レーザー強度の大きい場所の屈折率が上昇するため、媒質は凸レンズの様な作用を生じ、光は集束され、ますます光強度が増す。これを光の自己集束効果という。この結果ついに光学材料の破壊に至る。

高出力増幅器の出力は光損傷を避けるため光ビーム口径を大きくし、光強度を下げねばならない。通常固体レーザーで用いられるロッド状のレーザー媒質では、光励起の一様性の確保や、自己集束を避けるための増幅媒質長を短くする点で、不利となる。図-7に示される様な板ガラス状のレーザーガラスを用い、ディスクレーザーと呼ばれる増幅装置が用いられる。

レーザーガラスの光耐力は約 $12\text{J}/\text{cm}^2/1\text{ns}$ であるのでビームの一様性も考慮し、 $2\text{kJ}$ レベルの出力を得るにはビーム径は約20cmとなる。レーザーガラスは反射損失をゼロとするためのブリュスター角で

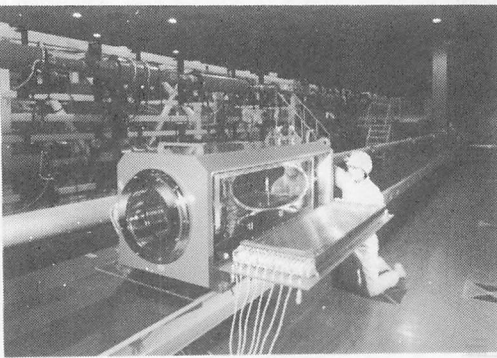


図-5 次世代レーザーシステム用35cm口径ディスク増幅器

設置し、フラッシュランプで囲む構造となる。阪大レーザー研で開発済みの世界最大の単一ディスクガラス( $694 \times 380 \times 45\text{mm}$ )を用いた口径35cmのディスク増幅器を図-5に示す。箱型構造で高い励起効率(0.5%)で単体(2枚のディスクガラス)で $2\text{kJ}$ のエネルギー蓄積が可能である。

#### (b)リン酸レーザーガラス

高出力レーザー用ガラスとして硅酸系ガラスに代わり、大きな増幅係数(誘導放出係数)、小さな非線形屈折率と光路差温度係数を有するリン酸系ガラスが開発された。大阪大学では世界に先がけて、リン酸ガラス(HOYA社LHG 5)を激光IV号に採用し、同一口径で2倍以上の高出力化に成功した。また激光X II号では同社のLHG 8を採用している。同様のものにSchott社LG650、Kigre社Q88などがある。非線形屈折率は弗酸系ガラスや弗素ベリレート系ガラスで更に低下するが大型素子の製造面やレーザー耐力で問題があり、世界的に採用されていない。

#### (c)反射防止膜

光学素子材料(BK 7ガラス、石英ガラス、その他)自体に比べ、ミラーや反射防止膜のような誘電体多層膜の耐光損傷は比較的弱い。主な損傷要因は、蒸着多層膜と基板材料との界面近傍での光電界強度が極端に強くなるためである。従って、ミラーにおいては光電界が基板にまで達しにくいいため約 $10\text{J}/\text{cm}^2(1\text{ns})$ が容易に得られるものの、無反射膜は $5\text{J}/\text{cm}^2$ 程度となりレーザーシステム設計上の隘路であった。

近年、無反射膜を作成する方式に種々の発明工夫がなされた。例えばBK 7などのソーダ系ガラスでは、素材中のNa原子を化学的処理により除去し、ガラス表面に多孔性膜を膜厚制御しつつ作成することができる。また石英ガラスなどでも、水溶性物質と $\text{SiO}_2$ との共蒸着後、水洗をすることでやはり多孔性 $\text{SiO}_2$ 膜が作成可能であり、これらは約 $15\text{J}/\text{cm}^2$ の強度を有する反射防止膜として有効である。

米国ではゾルゲル法によりKDP結晶や石英材料上に多孔性膜(除染に弱い)を作成して利用している。図-6に最近の無反射膜作成技術の進歩を示す。

これらの技術開発以外にも、レーザー増幅システムはレーザー光の長距離伝播が必要なため、伝播中のフレネル回折や、非線形屈折率に起因するレーザー光波面の乱れ、更に素子上又は円部部分的に生じているバラストやダメージによる強度、位相の乱れを除去することが肝要であった。スペシャルフィルター(共焦点

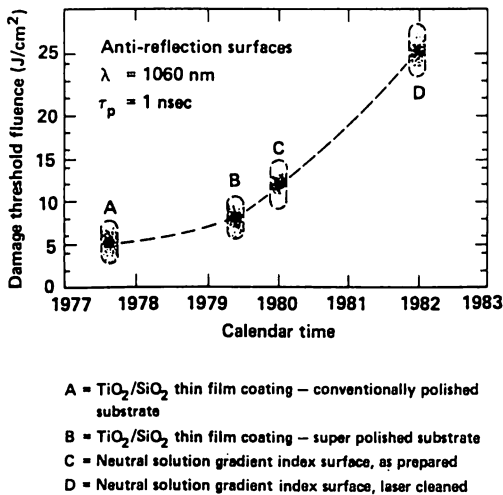


図-6 無反射防止膜のレーザー耐力増強の変遷

に設置された2枚の凸レンズと焦点上のダイヤモンドピンホールスリットより成る)によりビームの平行成分のみの伝送, また像転送により回折効果の軽減が可能となった. ビームパターンはピーク値と平均値の比が0.8~0.6で極めてフラットである. 像転送によりレーザー出力は光損傷なしに2倍に増強できる.

現有の激光X II号12ビームシステムに, 前述した35cm級ディスク増幅器を24ビーム, 各6台接続することで, 2nsパルス幅においてレーザー出力(基本波長 $1.054 \mu\text{m}$ )で180kJ, 3倍高調波光( $0.35 \mu\text{m}$ )で100kJを得ることが可能である.

#### 4. 高平均出力レーザーの進歩

各種レーザーの中で, ピーク出力の大きいものはガラスレーザー, 平均出力の大きなものは炭酸ガスレーザーというのが常識であったが, 最近, 固体レーザーの高出力化の努力がなされている. その基礎となっているのはジグザグスラブレーザーなど新しい形のレーザー方式の発展, 固体レーザーの効率の改善, 高ピーク出力の応用へのニーズ, 半導体レーザーの高出力化が急速に進んでいることなどである.

高平均出力レーザーの開発にあたり, レーザー効率(光出力の入力エネルギーに対する割合)が極端に大きくなれない限り, 大入力に耐える光学装置を考えねばならない. 従ってレーザー材料への熱負荷が大きくなり, 温度上昇が激しい. 高熱入力, レーザー媒質の熱破壊以外にも, 光路長の変化によるレーザー共振器のずれ, 熱的複屈折効果による偏光レーザー光の透過率の

低減, 屈折率の空間的变化や熱膨張による凸レンズ効果など, 数多くの問題が発生する.

レーザー材料の面から進展をみる. レーザー材料に用いられる物質としては結晶性のものと, ガラスのような固溶体に分類できる. レーザー元素として稀土類(Nd, Tm, Ho, Erなど)や遷移金属(Ti, V, Crなど)に限り, 主な結晶母材を説明する. 分子式 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ で示されるイットリウムアルミニウムガーネット(略してYAG, ヤーグ)は最も良く知られている. その特長は可視域から赤外域にわたって光学的損失が小さく, 熱伝導率の大きいことである. 機械的強度も大きく, 実用的である. 唯一の欠点は融点( $1950^\circ\text{C}$ )が高く, 結晶育成の際に結晶中心部に光学的に不均質なコアが出来るため, 大型レーザー結晶がとれないことである. また育成時の偏析係数の制限によりNd濃度1.2重量%が限度で高濃度材料は期待できない. レーザー動作の点からみると, 1064nm波長で約70W/ccの出力が取り出される. ロッド状や後述するスラブ(板)状の結晶が用いられている. 効率は3%に達する.

YAGよりレーザー利得の高いものに $\text{LiYF}_4$ (略称YLF, イルフ)結晶がある. 硬さや熱伝導率でYAGに劣るものの, 紫外域の吸収が少なく, レーザー光に耐える強度( $20\text{GW}/\text{cm}^2$ , YAGの倍)も高く, 何よりもNdレーザーガラスの利得波長( $1052\text{nm}$ )に近い $1054\text{nm}$ で発振するため, ガラスレーザーとの整合性が良いことが特長である. 非線形屈折率もYAGより低く, 高強度レーザーに適している.

宝石の種類であるアレキサンドライトやサファイア, ガーネット系結晶もレーザー材料として優れている. レーザー動作をする元素としてはTi, V, Crなどの遷移金属が効率が良い.

アレキサンドライト( $\text{BeAl}_2\text{O}_4 : \text{Cr}^{3+}$ )はクロムを添加したクリソベリルであり,  $700\sim 820\text{nm}$ 帯で同調可能である. 一般にCrイオンは励起光の吸収帯幅が極めて広く, フラッシュランプ励起で高効率利得動作が期待できる. 波長可変で, 高温動作良効, 高エネルギー蓄積, 中間的利得を有するホノン終準位レーザーで, YAGとルビーの長所を合わせ持つレーザーと言える.

チタンクリソベリル( $\text{BeAl}_2\text{O}_4 : \text{Ti}^{3+}$ ), チタンサファイア( $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$ )は蛍光寿命が数 $\mu\text{s}$ と短いものの, 波長可変範囲は前者で $730\sim 950\text{nm}$ , 後者では $660\sim 1100\text{nm}$ と極めて広く, 従来の多種色素レーザ

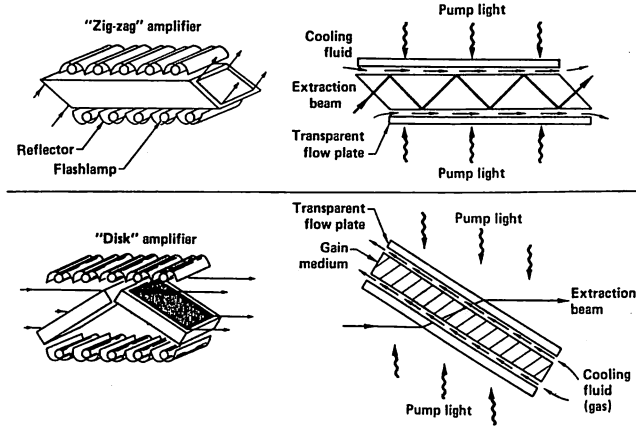


図-7 高出力用スラブレザーの基本構成

ーによる周波数可変同調用レーザーに完全に置換るものとして有望視されており、Arイオンレーザー励起で10Wを超える出力が得られる。

ガーネット結晶は一般に $C_3A_2D_3O_{12}$ の形を取る。各サイトに入る構成元素は多種あり、C: Y, Gd, Lu, La, A: Sc, Ga, D: Ga, Alで、具体的にはGGG ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ )、GSGG ( $Gd_3Sc_2Ga_3O_{12}$ )、YSGG、GSAGその他多数の研究が進められている。レーザー元素としては主にCrで、Ndの同時ドーピングも可能である。発振波長は、Crでは750~790nm、Ndでは1.06  $\mu\text{m}$ であり、数百W級のスラブレザーが開発されている。

高平均出力レーザー用レーザー材料の形状は、熱的特性を改善するため、ロッド状の他に板状(スラブ)のものが用いられる。材料内を端面全反射で光が進むものをジグザグスラブレザー、板を横切って進むものをディスクレーザーという。図-7に示す。

高平均出力を得る場合の最大の問題点は、高い熱耐力をもったレーザー媒質の開発と、レーザー媒質内で発生する熱量の高速除去法の開発にある。レーザー媒質を強く励起した場合、温度上昇による熱歪で破壊する限界は、ロッド型レーザーでは長さあたり $8\pi\sigma_m$  M<sub>0</sub>。(ここで $\sigma_m$ は破壊応力、M<sub>0</sub>は材料指数= $(1-\nu)k/\alpha E$ 、 $\nu$ はポアソン比、kは熱伝導率、 $\alpha$ は線膨張係数、Eはヤング率を示す)で与えられる。スラブ型では、 $12\sigma_m M_0 (w/t)$ となる(wはスラブの幅、tは厚さを示す)。従って、M<sub>0</sub>の大きな材料を用い、 $\sigma_m$ が材料限界になるように、マイクロクラックのない精細な研磨、エッチング、化学強化などを施す。 $\sigma_m M_0$ を

熱衝撃係数といい、R<sub>t</sub>で表す。いくつかの材料特性を表1に示した。

ロッド型レーザーでは、従来よりYAGロッド(約8mm $\phi$ ×150mm)を用いて、単一ヘッドで350W程度の出力が得られていた。出力は高励起時の熱歪による凸レンズ効果と偏光解消で制限されている。共振器内に多数のヘッドを縦続配置することにより、出力ビームの特性を変えることなく高出力を得ることができる。熱レンズ効果をキャンセルするために、最適なヘッドの配置と共振器形状が設計されるので、このシステムから調整なしに任意の出力を取り出すことは困難である。しかし産業用として考えると、安定した固体レーザー技術により、6ヘッドで2kW程度(効率は約3%)の出力が得られるため、有用である。多数のヘッドの利得結合により寄生発振が生じるので、出力の限界は、10ヘッド、即ち3~4kWとなると思われる。

ジグザグスラブレザーでは、レーザー光路が温度分布勾配を横切って進むため、平均化作用が働き、熱レンズ効果、偏光解消とともに極めて小さくなる。連続出力では、GGG結晶を用いた場合830W、YAG結晶により500Wが最高値である。YAGではロッド型と同様に約70W/cc、GGGでは約10W/ccが目安となる(効率2~3%)。ガラススラブレザーではムービングスラブ方式による実験例で連続パルス動作380W(約2W/cc、効率3%)のデータがある。レーザーガラスの温度計測などにより1kW出力の可能性が確認されている。これらのレーザーの最高出力時には、発振モードは多モード動作であるため、ビーム広がり10~30mradと極めて大きく、集光性に欠ける。金属その他の切断、熱加工には利用できる。

高いピーク出力を得るには、Qスイッチ技術が用いられる。大阪大学でのスラブレーザーの実験では、GGGにより30MW (30ns, 50pps, 平均50W), りん酸ガラスLHG5によって500MW (20ns, 0.2pps, 平均2W) が得られた。特に後者は集光性に優れ、約 $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>におよぶ光強度が達成され、X線リソグラフィの実験に供されている。大型スラブガラスレーザー装置で発振器・増幅器システムの試作報告では、3GW (10ns, 0.25pps, 平均7.5W) の例もある。

レーザー媒質の冷却方式は、結晶では直接水冷が主で、ガラスではガス冷却、特殊液冷却および薄いヘリウム層を中間に持つ間接水冷が採用されている。レー

ザー媒質の熱効果を考慮に入れた高効率冷却方式の発案が要請される。現在得られるレーザー出力の例を表2に示した。

5. 半導体レーザー-励起固体レーザーの進歩

近年、半導体レーザー (LD) の高出力はめざましいものがあり、ここ2年ほどの間にLD励起固体レーザーが新世代レーザーとして見直されている。従来、高出力固体レーザーの励起源としては、専らフラッシュランプが使用されてきた。ランプは電気・光変換効率は50~70%と高いものの高入力時には放射光に紫外線成分が多く、固体レーザーの励起吸収スペクトル

表1 レーザー材料の基礎的パラメーター

|                                       | YLF                           | YAC   | Glass(LHG5) | GSGG  | GGG  | Alexandrite | GSAG  |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------|-------------|-------|------|-------------|-------|
| Index (1.60 μm)                       | 1.45                          | 1.82  | 1.54        | 1.94  | 1.94 | 1.77        | 1.89  |
| dn/dt (×10 <sup>-6</sup> )            | $\pi - 4.3$<br>$\sigma - 2.0$ | 7.3   | 0.0         | 10.9  | 15.0 | 1.2         | 11.6  |
| Specific heat(J/g·k)                  |                               | 0.68  | 0.7118      | 0.403 | 0.44 |             | 0.456 |
| Heat conduction coefficient(W/cmK)    | 0.06                          | 0.12  | 0.0077      | 0.06  | 0.09 | 0.23        | 0.10  |
| Expansion rate (10 <sup>-6</sup> /K)  | 10.0                          | 6.9   | 9.8         | 7.5   | 9.5  | 6.5         | 7.2   |
| Melting point (°C)                    | 819                           | 1950  | 505         | 1890  | 1750 | 1870        | 1810  |
| Density (g/cm <sup>3</sup> )          | 3.99                          | 4.55  | 2.68        | 6.495 | 7.09 | 3.69        | 5.822 |
| Hardness (Mohs)                       | 4~5                           | 8.5   |             | 7.06  | 7.5  |             | 7.56  |
| Poisson ratio                         | 0.33                          |       | 0.184       | 0.15  |      |             | 0.12  |
| Young modulus(kg/mm <sup>2</sup> )    | 7650                          | 31725 | 6910        | 21000 |      | 35230       |       |
| Fragile strength(kg/mm <sup>2</sup> ) | 3.4                           | 20    | 7.4         | 17    |      | 60          |       |
| Thermal shock (W/cm)                  | 1.8                           | 7.9   | 0.73        | 7.0   |      | 100         |       |

表2 高平均出力固体レーザーの研究開発例

| Type          | Material                       | Size                                      | Performance                       |                            |
|---------------|--------------------------------|---|-----------------------------------|----------------------------|
| Rod Laser     | Nd : YAG                       | 8 φ × 4                                   | 1800W<br>1800W                    | Toshiba Corp.<br>NEC Corp. |
| Slab Laser    | Nd : GGG                       | 201 × 55 × 9.5                            | 830W<br>5ms 3pps                  | Sumitomo M.M               |
|               |                                | 132 × 35 × 7                              | 170W<br>0.4ms 100pps              | Mitsubishi E               |
|               |                                | 167 × 18 × 10                             | 440W<br>70pps                     | Osaka Univ.                |
|               |                                | 100 × 10 × 6(osc)<br>+ 167 × 18 × 10(amp) | 50W Q <sub>sw</sub><br>30ns 50pps | Osaka univ.                |
|               | Nd : YAG                       | 154 × 16.4 × 5.6                          | 500W<br>10ms 27pps                | Fuji E<br>(Quantronix)     |
|               |                                | 118 × 12 × 4.5                            | 120W                              | Toshiba                    |
|               | Glass LHG 5<br>LHG 5<br>LSG91H | 300 × 150 × 6                             | 360W 10Hz<br>Moving Slab          | HOYA                       |
|               |                                | 225 × 65 × 5                              | 100J 0.1Hz<br>45W 3Hz             | Osaka Univ.                |
| Active Mirror | Nd : YAG<br>Cr : Nd : GSGG     | 100 φ × 14<br>38 × 6.4                    | 15W 25Hz<br>65W<br>(stored)       | Mary Land Univ.<br>LLE     |



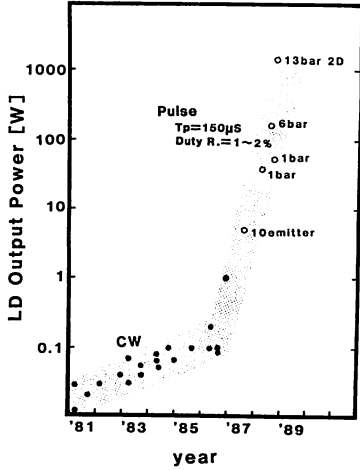


図-8 半導体レーザー(0.8μm帯)の出力の変遷

(例えばNd:ガラス)との整合性を考慮すると、効率は実効的に20%程度である。レーザー媒質への熱負荷も大きく、強い紫外光は使用するレーザー媒質を制限する。一方、LD(GaAlAs)系出力は800nm帯で鋭い方向性を持ち、電気光変換効率も10~30%に及び、50%級も開発段階にある。レーザー媒質の選択的励起は、熱負荷を軽減し、レーザーシステムとしての熱的(冷却)問題もLDの冷却にかかってくる。LDの指向性は結合率の向上となり、また設計の自由度を増す。

半導体レーザーは従来より、光通信用として光ファイバーの低損失域1.2~1.5μm帯での高出力化、高速化がはかられてきた。一方、その高寿命、小型化、高信頼性は光ディスク、プリンター等への民生応用として注目され、出力増強と短波長化が進められ、GaAlAs系LD(0.78μm帯、10~20mW)の大量生産、低コスト化につながった。レーザー励起用や強い集光性能を要しないエネルギー応用には、出力のコヒーレン

表3 1MJガラスレーザーシステムの効率

|  | フラッシュランプ励起 | 半導体レーザー励起 |
|--|------------|-----------|
| 励起光源の発光効率                              | 70%        | 55%       |
| 光源からレーザー媒質への伝達効率                       | 35%        | 90%       |
| 吸収効率                                   | 50%        | 95%       |
| 量子効率                                   | 40%        | 75%       |
| 遷移効率                                   | 70%        | 70%       |
| 再生増幅器の抽出効率                             | 60%        | 60%       |
| 波長変換効率( $\omega \rightarrow 3\omega$ ) | 70%        | 70%       |
| 総合効率                                   | 1.4%       | 10.4%     |

スを少々欠いても高出力性が開発の対象となる。

図-8にここ10年程の半導体レーザー出力の増強の変遷を示す。87年以降、量子井戸構造の採用と、ワイドストライプその他の接合幅の拡張やマルチストライプを一次的に単一チップに構成する手法、また一次元配置マルチレーザーを積層する2次元配列技術によりピーク出力(パルス幅150μs)1kWを超えるものが出現した。チップからの出力密度は4.5kW/cm<sup>2</sup>程度となり、フラッシュランプからの広帯域(UVから紫外まで)放射の積分パワー密度30kW/cm<sup>2</sup>に近づきつつある。今後、半導体チップからの熱除去技術の改良により更に1桁高い出力が期待される。

LD出力は単一波長の為、レーザー材料に不要な熱負荷を加えずにすむ。従来ランプ励起では熱の問題で放置された材料が復活しつつある。Ndレーザー結晶ではYAG, YLF, YALO, YVOの報告がある。YVOは励起帯域幅、誘導放出断面積が大きく、LD励起で53%のスロープ効率が得られるなど注目されている。

Erレーザーは0.79μm励起1.73μm, 2.07μmの

表4 レーザー核融合炉への道筋

| 装置       | 激光XII増力装置<br>100KJレーザー  | 金剛, Athena<br>MJレーザー  | 高平均出力ドライバー<br>MWレーザー  | 実証炉→実験炉  |
|----------|---|---|---|--|
| 年代       | 1990  | 2000  | 2010  | 2020~2030  |
| 主要研究開発課題 | <ul style="list-style-type: none"> <li>臨界プラズマ条件の達成</li> <li>ベレット製造技術</li> <li>核融合炉設計研究</li> <li>高出力ドライバー</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>高利得爆縮Q~100</li> <li>ベレット製造及び誘導技術</li> <li>液体金属ブランケットの技術開発</li> <li>高効率ドライバー</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>連続ベレット照射</li> <li>ベレット量産技術</li> <li>ベレット誘導照射技術</li> <li>液体金属ブランケット炉チャンパー</li> <li>高出力、高効率、高繰り返しドライバー</li> <li>MJ/10nsec</li> <li>1~10Hz</li> <li>効率5~10%</li> <li>波長0.3~0.5μm</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>長寿命安定性</li> <li>環境保全</li> <li>安全性</li> <li>経済性</li> </ul> |
|          | (科学的実証)   |   | (工学的実証)   | (経済的実証)  |



Eye-Safe帯で発振する。レーザー媒質として、YALO, YLF, 弗化ジルコンガラスが使われる。Erファイバーレーザーは光ファイバー結合もよく、破断点検出用としての提案がある。

Tmで増感されたHoレーザーは2.1 $\mu$ m発振をする。励起はTmの0.79 $\mu$ m吸収を介する共鳴過程であり、理論的には量子効率79%となる。実験ではアレキサンドライトレーザー励起でスロープ効率65.8%が得られている。

これらの小、中出力の工業応用から核融合の実現へ目を向けると、炉用レーザー仕様としては、1~10 Hzの高繰り返しのパルスレーザーであり、パルス当たり数MJ、パルス幅10ns、ブルー光(波長0.35 $\mu$ m)、総合効率10%の仕様を有することが要請されている。さらに、炉用レーザーとしては長寿命(10Hzの繰り返しで数年間)で、かつ建設コスト、ランニングコストについても経済性からの要請が課せられるのは当然である。これは当然である。これは、LDの高出力化(パルス動作で4.5kW/cm<sup>2</sup>)と長寿命化(CWで10<sup>5</sup>時間以上、パルス動作で10<sup>9</sup>ショット以上)が急速に発展したことで、極めて実現性の高いものとなってきた。

現在の発振器—増幅器方式より再生増幅システムへの転換で、ディスク増幅器よりのエネルギー取り出し効率を3倍程度増強できる。1MJ級レーザーシステムの設計が進められつつあるが、効率の計算結果を表3に示した。

現在のガラスレーザーシステムを基礎として、励起用光源をフラッシュランプからLDへ、増幅方式を再生増幅方式へと移行することにより、炉用レーザーとして要求される10%以上の高効率達成されることがわかる。システム構成例を図-9に示す。

## 6. おわりに

レーザー核融合関連を中心に高出力レーザーの進歩についてみてきた。新エネルギーの生産の研究は長いリードタイムが必要である。その科学的実証(ブレークイーブンの達成)は目前に迫っている。その先にある工学的実証(零出力炉)や経済的実証のために高繰り返し高効率レーザーの開発が不可欠である。表4にはこれらの道筋に要求される技術課題を示した。

レーザー光エネルギーの高度利用の観点よりすると工学的実証用レーザー開発は、産業における工学的利用レーザーの開発課題のほぼすべてを包含するものと考えられ、経済的技術開発の牽引車となるものである。現状でも高平均出力レーザーの開発は熱加工的なエネルギー利用のみでなく、レーザープラズマX線エネルギー源による0.1ミクロンリソグラフィ、X線レーザー開発によるサブミクロン生体有機体観察の可能性、超高速冷却による新合成物質の製造、超高密度物質の地上での実現その他、諸々の技術的新ターゲットを手中にさせるものであると考えられる。

## 参考文献

- 1) 中井貞雄: 核融合の開発, エネルギー・資源, 9巻, 4号 (1988)
- 2) 山中千代衛: レーザー核融合研究の進歩, 電子情報通信学会誌, 71巻, 7号 (1988)
- 3) 金辺忠, 中塚正大: 固体レーザーの高出力化, レーザー研究, 15巻, 6号 (1987)

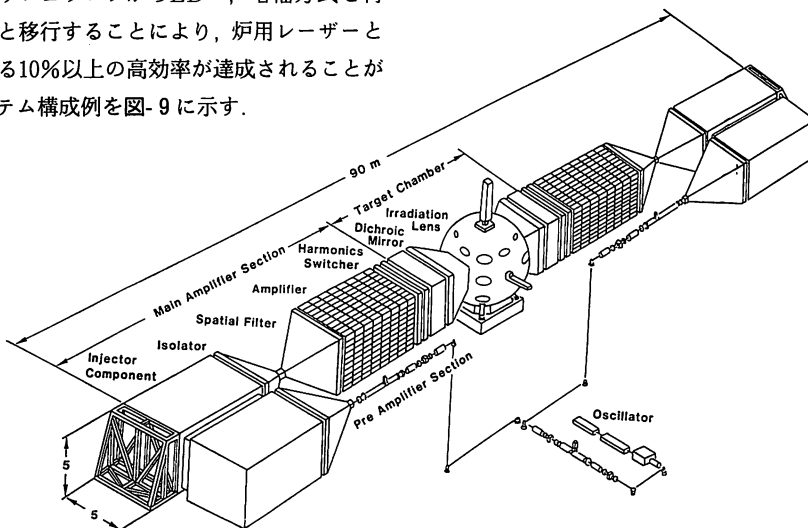


図-9 再生増幅器型1MJレーザーシステムの概念図