

# 高パルスエネルギー Yb 添加バルク固体レーザー

河 仲 準 二

## Recent Status of Yb-Doped High Power Laser and Its Prospect

Junji KAWANAKA

Both high pulse energy and high average power have been required for the advanced high power laser applications such as neutron source, laser lightening and so on. A fusion reactor laser development has driven advanced laser technologies so far. Diode-pumped solid-state lasers are a reliable laser system for these applications and ytterbium-doped material is the most promising laser material due to its high energy storage capability and suitable spectrum for high power laser diodes. "GENBU"-laser has been conceptually designed for not only a reactor driver development but also the advanced application fields with high power lasers. New technologies of a cryogenic Yb:YAG laser material and an active mirror amplification increased a reliability of "GENBU"-laser. The recent status of 1-J, 100-Hz laser system with liquid-nitrogen-cooled Yb:YAG has been shown.

**Key words:** ytterbium-doped material, high power laser, diode-pump, solid-state laser, cryogenic material

核融合炉用レーザーには高パルスエネルギーと繰り返し動作が必要であり、いわゆる高出力レーザーの基盤技術開発を牽引してきた。多数のモジュールによってメガジュール級のパルスエネルギーを発生するため、1 kJ, 10 Hz のレーザーシステムの構築がマイルストーンであった。ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) や大阪大学では半導体レーザー (LD) 励起による固体レーザーが最も有力な候補として Mercury レーザーおよび HALNA レーザーをそれぞれ開発し、65 J, 20 J を 10 Hz で達成している<sup>1,2)</sup>。

近年、ピコ秒～フェムト秒の超短パルスレーザーの進歩によって数ジュールのパルスエネルギーで  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup> を超えるようなレーザー集光強度が得られるようになり、トンネルイオン化、自己位相変調、クーロン爆発、レーザー加速など、新しい物理現象が次々と明らかにされてきた。さらに高いピーク出力を得ることにより、荷電粒子による相対論検証や真空からの電子対生成など興味ある物理現象が予測されている。物理研究以外にも、超短パルスレーザ

ーによる高エネルギーの荷電粒子や中性子ビームを使ったがん治療などの医療応用<sup>3-5)</sup>、レーザー駆動  $\gamma$  線による核変換<sup>6-8)</sup> を利用した高レベル放射性廃棄物処理などの産業利用が期待できるようになった。超短パルスレーザーの主役はチタンサファイアレーザーや、近年簡易な光学系で広い増幅利得帯域が得られる光パラメトリックチャープパルス増幅 (OPCPA) であり<sup>9)</sup>、さらなるパルスエネルギーの増大によってピーク強度の増加が試みられるようになっている。一般的にチタンサファイアレーザーや OPCPA の励起源には Nd (ネオジウム) 系レーザーの二倍高調波が用いられ、ジュール級までは Nd:YAG を、それ以上のパルスエネルギーに対しては Nd ガラスをレーザー材料としたフラッシュランプ励起レーザーを使用している。したがって、繰り返し動作はそれぞれ 10 Hz, 単一ショットに制限されている。将来の物理研究や産業応用では、高いパルスエネルギーによるレーザーピーク強度の増加と高繰り返し動作が期待されるため、パワーソースとして高パルス

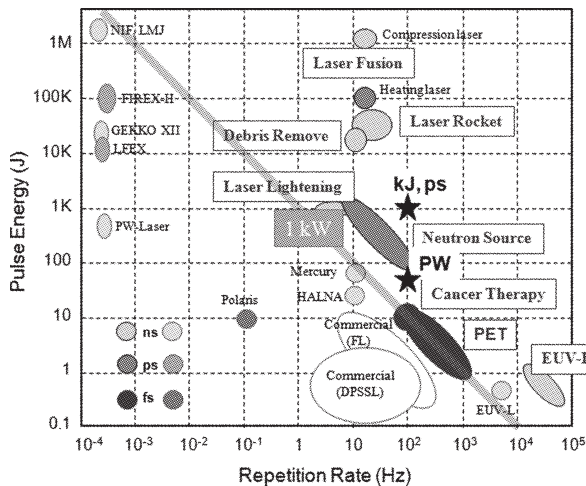


図1 高出力レーザーの現状と将来期待される応用研究。

エネルギーと高平均出力を両立する次世代高出力レーザーの基盤技術がますます重要になると考えられる。これらの基盤技術は炉用レーザーのものと基本的に同一である。

上述の背景のもとに、IFE フォーラム/レーザー核融合技術振興会では大出力レーザー開発委員会（平成 18 年 1 月～平成 19 年 5 月）を設立し、大出力レーザーの応用研究に関する調査（図 1 参照）と大出力レーザーの将来技術のあり方が議論された<sup>8)</sup>。その結果、将来期待される物理研究や産業応用に求められるレーザーとして、“玄武（GENBU, Generation of ENergetic Beam Ultimate）”レーザーが提案された。これはピコ秒大出力レーザーと超短パルスレーザーを融合しており、炉用レーザーにつながる次世代大出力レーザーの基盤技術を確認するものとして期待している。本稿では、“玄武”レーザーの概略と、ピコ秒大出力部を構成する主レーザーについて紹介する。

### 1. 玄武（GENBU）レーザー

炉用ドライバーを将来の目標とし、同時に、きわめて近い将来の種々の産業応用に供する次世代高出力レーザーの基盤技術を確認するため 2 つの開発目標を設定した（図 2 参照）。

- (1) 主レーザー：パルスエネルギー 1 kJ, パルス幅 50~100 ps, 繰り返し 16~100 Hz.
- (2) 超高強度レーザー：パルスエネルギー 30 J, パルス幅 5~10 fs, 繰り返し 16~100 Hz, ピーク出力 > 1 PW, 集光強度 >  $2 \times 10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>.

これらの 2 つのレーザーを結合したシステムを、“玄武”レーザーとして概念設計を行った（図 2）。主レーザーは小型、高効率、長寿命、簡易操作、簡易メンテナンスを実現するため LD 励起固体レーザーとした。主レーザーはピコ秒パルスであり、ピコ秒パルスの増幅にはそのまま増幅する直接増幅と、時間的にナノ秒に伸ばし増幅後にピコ秒に時間圧縮するチャープパルス増幅（CPA）が考えられる。最近の高耐力回折格子の実現や新規分散素子の開発など、将来の大出力レーザーの基盤技術開発の観点から CPA を採用した。主レーザーは超高強度レーザーで用いる数サイクルパルスの広帯域の OPCPA の励起源としても利用するため、増幅器の構成を 2 段とした。初段増幅器の出力を OPCPA の励起源として利用するとともに、2 段目増幅器を経てキロジュール出力を得る。このエネルギー増幅部のレーザー材料として、次章で述べる低温冷却型 Yb:YAG セラミクスを使用する。一方、超高強度レーザーの増幅には、チタンサファイアと光パラメトリック増幅（OPA）が候補として挙げられる。広い増幅帯域、低い熱発生量、高いコントラスト、簡易な光学構成の観点から OPA とした。励起レーザーとシード光との時間同期は出

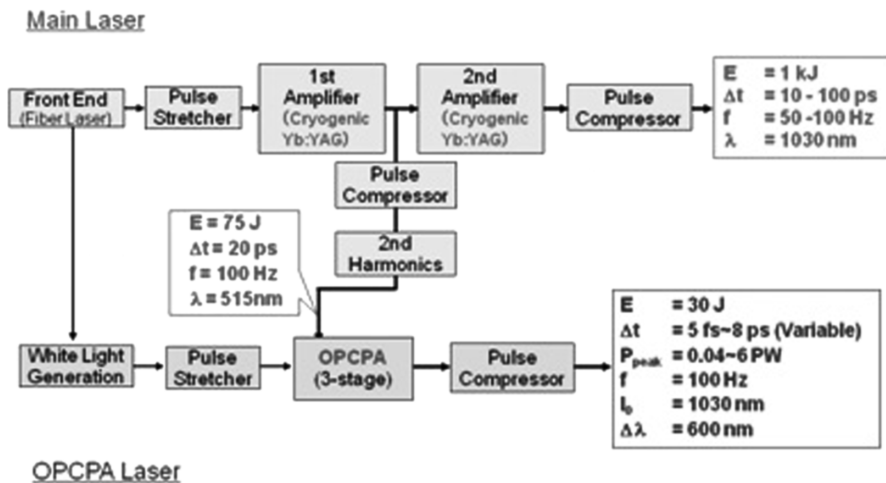


図2 “玄武”レーザーの構成。

力安定性における大きな課題のひとつである。ピコ秒パルスの同期を電気光学素子などの能動光学素子で行うことはきわめて難しいことから、“玄武”レーザーでは主レーザーとOPCPAレーザーのフロントエンドを共用することにした。OPCPAレーザーでは600 nmの広帯域のスペクトルが要求されるため、フロントエンドからのフェムト秒パルスをサファイアガラスなどに照射して発生する白色コヒーレント光をシード光として用いる。3段のOPCPAの増幅後に、パルス圧縮器により最大ピーク出力6 PWを目指す。

## 2. 高出力レーザー材料としての低温冷却型 Yb:YAG セラミクス

高パルスエネルギーと高繰り返し動作を両立できるパワースourceとなるような次世代の高出力レーザーシステムでは、特にレーザー媒質内で発生する多量の熱発生が大きな問題となることから、効率のよい半導体レーザー励起固体レーザーが有力な候補である。これに適したレーザー材料に求められる条件を考えてみると、

- ① エネルギー蓄積能力が高い（誘導放出断面積が小さい）こと
- ② 熱耐力が高いこと
- ③ 口径の大きな材料が作れること
- ④ 高出力LDの発光帯域である近赤外域に吸収を有すること

が主として考えられる。従来、炉用ドライバーのような極端に大きなパルスエネルギーを必要とする場合に③が必要条件であるため、Ndガラスがレーザー材料として利用されてきた。近年のYAG結晶については、レーザーで使用できるような高い光学品質のセラミクスが利用できることから、②および③の両立の可能性が出てきた。最近研究が盛んなイッテルビウム系レーザー材料は①および④を満たしているため、Yb:YAGセラミクスは上記の条件をほぼ満足している。これまでも、同材料を用いて数多くのレーザー開発がなされてきた<sup>10-14)</sup>。しかし、特にパルス動作時のパルスエネルギーなどの諸特性はNd系材料と大きな違いはなく、現状では同材料の特徴を十分に引き出せていない。これは、Yb系材料の誘導放出断面積はNd系材料に比べて1桁程度低く、エネルギー引き出しの指標とされる飽和フルーエンス ( $U_{sat} = h\nu/\sigma$ ,  $h$ : プランク定数,  $\nu$ : レーザー周波数,  $\sigma$ : 誘導放出断面積,  $U_{sat}$  はレーザー材料に蓄積されたエネルギーを効率よく引き出すために必要な入射レーザー光のエネルギーフルーエンスの指標)が高すぎることで、例えばARコートなどの代表的なダメージ

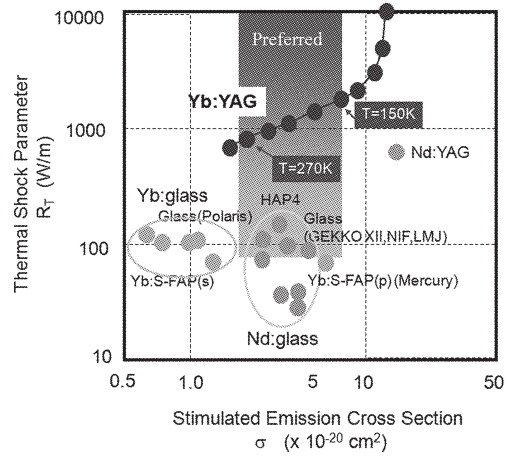


図3 レーザー材料の誘導放出断面積と熱衝撃係数。

シ閾値 (1 ns パルスに対して  $10 \text{ J/cm}^2$ ) よりも高いことが原因のひとつである。したがって、高いストークス効率 ( $h\nu_{\text{laser}}/h\nu_{\text{pump}} > 0.9$ ) にもかかわらず、光学系ダメージの制限を受けて増幅器のエネルギー引き出し効率を上げるのは難しい。そこでマルチパス増幅などにより、実効的なエネルギーフルーエンスを上げる工夫が必要である。また、Yb系材料は準三準位系レーザー材料であるので、レーザー利得を得るためにはレーザー下準位を吸収飽和させることが前提条件であり、十分な利得を得るためには数十〜数百  $\text{kW/cm}^2$  の強励起が必要である。同時に、下準位のシユタルク分裂幅が室温程度であることから、レーザー材料の温度によってレーザー下準位の分布が敏感に影響するため、温度の上昇は利得の低下につながる。したがって、Yb系材料は高出力レーザーに適しているが、本来有する特徴を十分に発揮するために、次に述べるような開発項目が重要となる。

- ① 光学系を破壊しない条件下でのエネルギー引き出し方法 (高耐力の薄膜技術の確立, マルチパス増幅など)
- ② 基底状態を吸収飽和させる強い光強度をもった励起装置
- ③ 下準位の熱励起を避ける効果的な冷却方法

一般に、材料の物性値は温度に多かれ少なかれ依存する。いくつかのレーザー材料の誘導放出断面積と熱ショックパラメーターを図3に示す。Yb:YAGについては温度依存性も示した。Yb:YAGのレーザー発振波長における誘導放出断面積のピーク値は100 K以下で7倍に増加し、結果として飽和フルーエンスも7分の1 ( $1.5 \text{ J/cm}^2$ ) と光学系のダメージ閾値以下に低減されることから、高効率なエネルギー引き出し動作が期待できる。吸収スペクトル幅

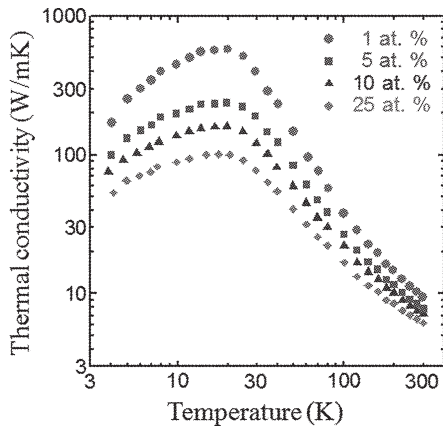


図4 Yb:YAGの熱伝導率の温度依存性.

は若干狭くなるが、LDの高精度温度制御の必要がないほど十分に広い。一方で、わずかながらも吸収断面積が増加することで結晶厚を薄くでき、冷却による温度上昇を低減できる。さらに、低温時には熱伝導率は大幅に向上し(図4)<sup>15,16)</sup>、それに伴う熱ショックパラメータの増加も期待できる。Yb<sup>3+</sup>イオンのドーピング量によって違いがあるものの、50 K程度までは冷却するほど熱伝導率は向上する。再吸収についても次のように改善される。シュタルク分裂したレーザー下準位の熱的な分布の中心は、マクスウェル・ボルツマン分布に従い温度の低下とともに最下準位に近づく。Yb:YAGでは100 K以下に冷却することでレーザー下準位の分布がほぼゼロとみなせるようになり、理想的な四準位レーザー材料となる<sup>17)</sup>。低温冷却には真空が必要であり、レーザーシステムとして複雑になるように思われるが、室温時における前述の開発項目を達成するための工夫や装置、結果として得られるレーザーの安定性などを考慮すると、次に述べるように低温冷却による性能向上は際立っている。

前述のように、低温冷却によってYb:YAGの物性値は

室温時とは全く異なる新しい結晶といえるほどに変化し、大出力レーザー材料として室温時に比べて格段にすぐれた特性を示す。最近のわれわれの成果では、サファイア板でサンドイッチしたYb:YAGディスクにより106 Wの励起入力に対して75 Wのレーザー出力を<sup>18)</sup>、また、Ripinらが冷却Yb:YAGロッドにより215 W入力に対して165 W出力を<sup>19)</sup>、ともにTEM<sub>00</sub>モードで得ている。

### 3. 低温冷却型Yb:YAG増幅器—主レーザーの概念設計

#### 3.1 構成

主レーザーの構成を図5に示す。フロントエンドには、高い安定性が求められるためファイバーレーザーシステムを採用した。パルス幅30 fsのファイバー発振器の出力を、パルスピッカーによって100 Hzに繰り返しを低減し、さらに、ファイバーパルス伸張器により1 ns程度に伸張した後にファイバー増幅器により2 mJ出力を得る。この後、パルスエネルギーの増力を行うために、低温冷却型Yb:YAGセラミクスを用いた増幅を行う。グレーティングペアによるパルス伸張器によって3 nsに再度伸張し、前置増幅器、主増幅器によりパルスエネルギーを200 Jに増力する。OPCPAの励起源として利用する場合、この時点で取り出してグレーティングペアによってパルス圧縮、二倍高調波変換し75 Jのピコ秒パルスを得る。最終的にはさらに増幅し、2 kJ出力を得る。

#### 3.2 高出力増幅器

主レーザーはOPCPAの励起源など実用的な応用が主目的であることから、100 Hzの繰り返し動作で発生する熱問題を解決すると同時に、良質なビーム品質を得ることが重要である。アクティブミラー型増幅方式は光学系を簡単にでき、比較的高い熱除去能力とエネルギースケーリングの容易さの観点から、主レーザーの増幅方法として採用

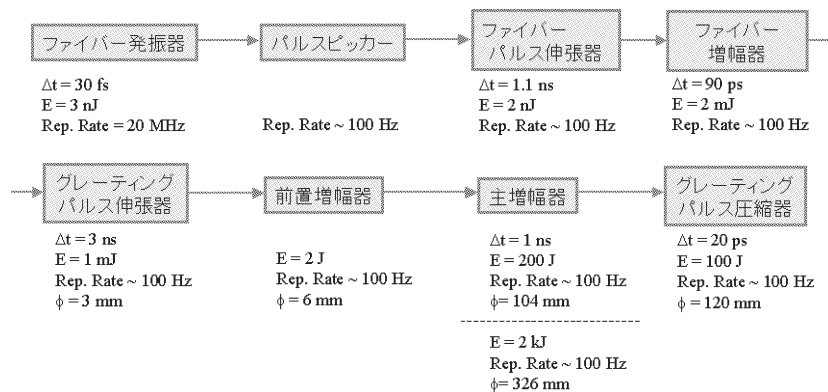


図5 主レーザーの構成.

表1 200 Jおよび2 kJの主増幅器の使用.

|               | 200 J-system           | 2 kJ-system             |
|---------------|------------------------|-------------------------|
| ヒートシンクの温度     | 50 K                   | 50 K                    |
| ビーム径          | 10.4 cm                | 32.6 cm                 |
| ディスクの厚さ       | 2 cm                   | 4 cm                    |
| 最小ディスク数       | 4 disks                | 7 disks                 |
| 小信号利得係数 $g_0$ | $0.29 \text{ cm}^{-1}$ | $0.092 \text{ cm}^{-1}$ |
| 蓄積エネルギー       | 74 J/disk              | 461 J/disk              |
| 引き出しエネルギー     | 41 J/disk              | 258 J/disk              |
| 励起強度          | $1.7 \text{ kW/cm}^2$  | $2.1 \text{ kW/cm}^2$   |
| 必要な LD 出力     | 140 kW/disk            | 920 kW/disk             |

した。レーザー材料表面におけるレーザー光の干渉によるダメージ閾値の低下の点で劣るが、低温冷却型 Yb:YAG による飽和フルーエンスの低減により、高効率のエネルギー引き出しが実現可能な範囲である。

アクティブミラー表面でのレーザー光の干渉を考慮して、レーザー材料の光学ダメージ閾値を  $2 \text{ J/cm}^2$  と低く見積もった場合、200 J、2 kJ の 2 つの主増幅器のディスクサイズと枚数を表1にまとめる。寄生発振閾値条件を  $g_0 L < 3$ 、引き出し効率を 0.56 と仮定した ( $g_0$ : 小信号利得係数,  $L$ : 利得長)。200 J、2 kJ 出力に必要なビーム口径およびアクティブミラーの枚数は、それぞれ最低で 10.4 cm、4 枚、32.6 cm、7 枚である。これまでの実験データから、必要な励起強度は  $2 \text{ kW/cm}^2$  程度と、室温で利用される Yb 系材料に比べれば 1 桁以上低い。現在の商用 LD アレイの平均発光面強度と同程度であることから、LD の占める面積は Yb:YAG セラミクスと同程度である。Yb:YAG の冷却温度は、飽和フルーエンスとダメージ閾値とのバランスで決まるため 100 K 以下に冷却する。また、100 Hz 動作時の熱による影響を見積もるためアクティブミラー内温度上昇を計算すると、例えば、励起強度  $1.7 \text{ kW/cm}^2$  でヒートシンク温度 50 K であれば、厚さ 20 mm までのアクティブミラーは四準位動作を維持できる 100 K 以下で動作できる。図6は 200 J 級主増幅器の構成を示す。光学系の大きさは  $1 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$  とコンパクトであり、2 kJ 級においても同方式で実現可能である。電源部などを除いたレーザーシステム全体の光学系サイズは 1 kJ、ピコ秒システムで  $12 \text{ m} \times 6 \text{ m}$  と実験室サイズである。

1 kJ のピコ秒レーザーシステムに必要な主増幅器の全電力は 1.7 MW、レーザー光への変換効率は 5.8% と見積もられた。従来のキロジュール級レーザーに比べて、2 桁以上高いことがわかる。所要電力は主増幅器の電気入力的大部分であり、レーザー材料の冷却と LD の冷却にはほぼ同程度の電力が必要である。コストについては、LD などのように発注量によって低コスト化が図れるものが多い

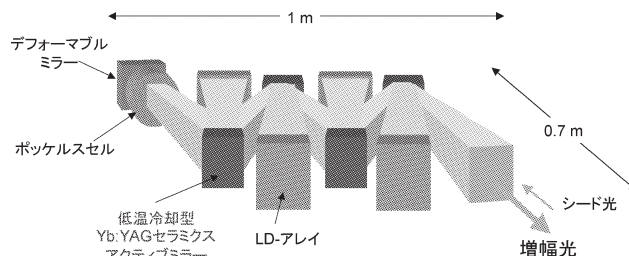


図6 200 J主増幅器の構造.

ため高い精度で見積もることは難しいが、おおむね 20 億円である。

### 3.3 技術開発の問題点

“玄武”レーザーは高パルスエネルギーと高繰り返しの高平均出力に比べ 2 桁、商用レーザーに比べて 4 桁程度大きい。したがって、その実現にはさまざまな基盤技術開発が必要である。高耐力の光学薄膜技術の開発は、Yb 系材料にとって最も必要な基盤技術開発のひとつである。これによりエネルギーフルーエンスを高くでき、アクティブミラーはいっそう効率よく動作できる。レーザー材料に薄膜を用いる場合には、低温下での膜特性の解明も重要である。半導体レーザーの高輝度化は、従来より Yb 系の高強度励起のために強く必要とされてきた。加えて、本設計では半導体レーザーの省スペース化による広い設計の自由度と、そこから生まれる小型化・高安定化を目標としている。具体的には、200 W 以上のバーによる 1 mm 間隔のスタックおよび対応するマイクロレンズが実現できれば、従来の 5 倍の輝度が得られ、ビーム口径の縮小化やより高い温度での効率よいレーザー動作が期待され、装置の小型化・高効率化が図れる。ビーム口径の縮小化により、ファラデー素子やポッケルスセル、可変形鏡、グレーティングなどの能動光学素子の大きさも縮小できる。さらに、これらの光学系に対しても、高平均出力化による熱問題の検討が必要である。また、低温冷却に必要なエネルギーを含めた全エネルギー変換効率を極端に改善することは現在では難しく、高効率の冷却装置の開発も期待したい。

### 4. 低温冷却型 Yb:YAG による 1 J, 100 Hz レーザーシステムの開発

低温冷却型 Yb:YAG の高エネルギーフルーエンス動作を実証するため、1 J, 100 Hz のナノ秒レーザーシステムを開発中である。システム構成は図7に示すように、縦単一モードファイバー発振器の CW 出力からパルス成形器を使って 10 ns、10 pJ のパルスを切り出し、再生増幅器

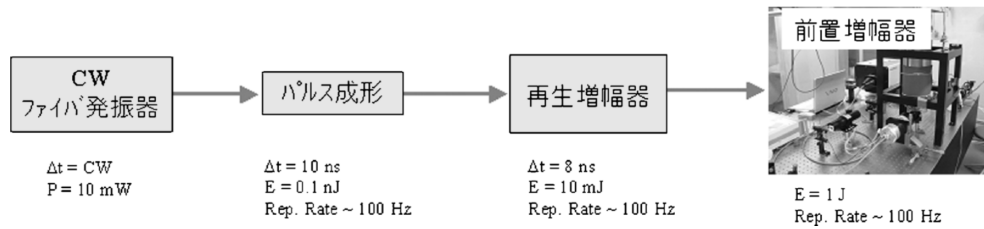


図7 1 J, 100 Hz レーザーのシステム構成。

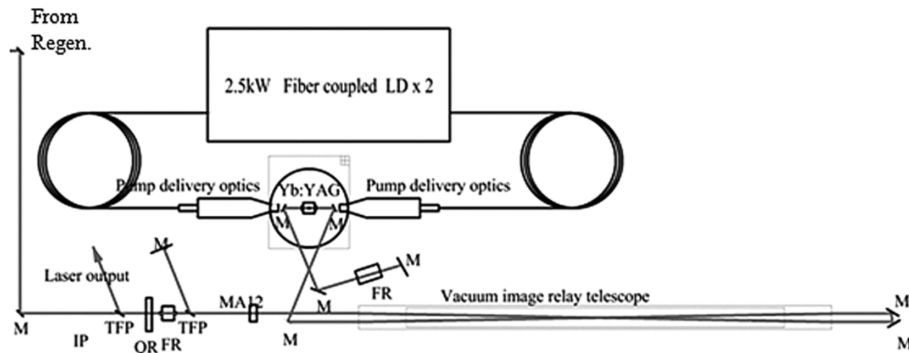


図8 1 J, 100 Hz システムの4パス主増幅器。

のシード光とする。再生増幅器では、150 W のファイバ結合型 LD を励起源として用いた。レーザー材料は厚さ 2 mm、ドープ濃度 10 at.% のアクティブミラー型で、インジウムにより同ホルダーに固定して、液体窒素で熱伝導冷却した。励起時間 1 ms、繰り返し 100 Hz で、最大 4.5 mJ のパルスエネルギーが得られた。ビーム形状はガウシアンで、 $M^2 \sim 1.1$  を達成している。主増幅器は、図 8 に示すように 4 パス増幅器である。励起源には、ピーク出力 2.5 kW のファイバ結合型 LD を 2 台用いている。レーザー材料は直径 12 mm、長さ 6.6 mm、ドープ濃度 5 at.% の Yb:YAG ロッドであり、これを銅ホルダーで挟み込み液体窒素により熱伝導冷却している。励起時間を変化させたときのパルスエネルギーを図 9 に示す。最大 144 mJ を 100 Hz で得た。それ以上の励起に対しては、自然放出光の増幅による損失 (ASE 損失) により出力飽和している。光-光変換効率およびスロープ効率の最大値はおのおの 30%、44% と高かった。レーザーロッドの増加により ASE を抑制することで、1 J 以上の出力増加が見込まれる。

レーザー核融合炉用ドライバーと次世代大出力レーザーに必要な要素技術開発を目的に、レーザーの仕様目標として 1 kJ の高パルスエネルギーと 6 PW の超高ピーク強度を 100 Hz の繰り返しで実現する“玄武 (GENBU)”レ

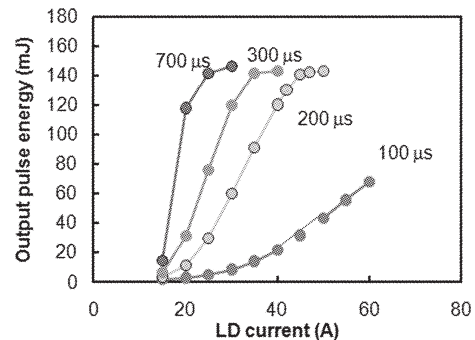


図9 1 J, 100 Hz MOPA システムの出力。

ザーを提案した。特に、1 kJ, 100 Hz の主レーザーシステムの概念設計を紹介した。現実的なレーザーの概念設計ができるまでになった基盤技術として、Yb系セラミクス技術の確立と高出力半導体レーザーの高出力化が挙げられる。技術的なブレークスルーは、低温冷却によるレーザー材料の物性値制御である。現在、1 J, 100 Hz の低温冷却型 Yb:YAG レーザーシステムを実証実験として開発中であり、本年度の実現を目指している。“玄武”レーザー実現のためには、薄膜技術の高度化や半導体レーザーの高輝度化、アクティブミラー型高出力増幅器の実証など多くの重要課題が残されているが、近い将来に解決できるものと期待している。本レーザーの実用化によって新しい産業応用が実現でき、さらに、その延長上には炉用レーザーの実

現があるものと考えている。

本解説でご紹介した冷却型光学素子の概念は、電気通信大学レーザー新世代研究センターの西岡一先生との共同研究のところに着想に至った。また、浜松ホトニクス(株)の管博文博士、川嶋利幸博士、安原亮博士、京都大学化学研究所の時田茂樹先生には実証実験による基本的なデータベースの構築や、1Jシステムの構築に多大な貢献をいただいた。日本原子力研究開発機構の山川考一博士にはOPCPAの基本設計を行っていただいた。そのほか数多くの方々のご協力をいただいた。ここに深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) A. Bayramian, J. Armstrong, G. Beer, R. Campbell, B. Chai, R. Cross, A. Erlandson, Y. Fei, B. Freitas, R. Kent, J. Menapace, W. Molander, K. Schaffers, C. Siders, S. Sutton, J. Tassano, S. Telford, C. Ebbers, J. Caird and C. Barty: "High-average-power femto-petawatt laser pumped by the Mercury laser facility," *J. Opt. Soc. Am. B*, **25** (2008) B57-B61.
- 2) T. Kawashima, T. Ikegawa, J. Kawanaka, N. Miyanaga, M. Nakatsuka, Y. Izawa, O. Matsumoto, R. Yasuhara, T. Kurita, T. Sekine, M. Miyamoto, H. Kan, H. Furukawa, S. Motokoshi and T. Kanabe: "The HALNA project: Diode-pumped solid-state laser for inertial fusion energy," *J. Physique IV*, **133** (2006) 615-620.
- 3) 山田 聡: "加速器によるがん治療の最前線", *日本物理学会誌*, **61** (2006) 401-407.
- 4) レーザー学会編: 39章 "治療", *レーザーハンドブック*, 第2版 (オーム社, 2005) p. 981.
- 5) 今崎一夫: "レーザー光子-電子散乱による高エネルギー放射光とその利用", *レーザー研究*, **27** (1999) 14-19.
- 6) K. W. D. Ledingham, J. Magill, P. McKenna, J. Yang, J. Galy, R. Schenkel, J. Rebizant, T. McCanny, S. Shimizu, L. Robson, R. P. Singhal, M. S. Wet, S. P. D. Mangles, P. Nilson, K. Krushelnick, R. J. Clarke and P. A. Norreys: "Laser-driven photo-transmutation of  $^{129}\text{I}$ —A long-lived nuclear waste product," *J. Phys. D, Appl. Phys.*, **36** (2003) L79-L82.
- 7) F. Tavella, A. Marcinkevicius and F. Krausz: "90mJ par-  
ametric chirped pulse amplification of 10 fs pulses," *Opt. Exp.*, **14** (2006) 12822-12827.
- 8) 「新産業基盤の創生をめざす次世代大出力レーザー開発計画」大出力レーザー開発委員会報告書 (IFE フォーラム/レーザー核融合技術振興会, 2007年5月).
- 9) T. Jitsuno *et al.*: *Fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications* (IFSA 2007), TuO3.3 (2007).
- 10) E. C. Honea, R. J. Beach, S. C. Mitchell, J. A. Skidmore, M. A. Emanuel, S. B. Sutton and S. A. Payne: "High-power dual-rod Yb:YAG laser," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 805-807.
- 11) T. Taira, W. M. Tulloch and R. L. Byer: "Modeling of quasi-three-level lasers and operation of cw Yb:YAG lasers," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 1867-1874.
- 12) E. Innerhofer, T. Sudmeyer, F. Brunner, R. Haring, A. Aschwanden, R. Paschotta, C. Honninger, M. Kumkar and U. Keller: "60-W average power in 810-fs pulses from a thin-disk Yb:YAG laser," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 367-369.
- 13) C. Bibeau, R. J. Beach, S. C. Mitchell, M. A. Emanuel, J. Skidmore, C. A. Ebbers, S. B. Sutton and K. S. Jancaitis: "High-average-power 1- $\mu\text{m}$  performance and frequency conversion of a diode-end-pumped Yb:YAG laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, **34** (1998) 2010-2019.
- 14) W. F. Krupke: "Ytterbium solid-state lasers. The first decade," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (2000) 1287-1296.
- 15) D. N. Nikogosyan: *Properties of Optical and Laser-Related Materials: A Handbook* (John Wiley & Sons, Chichester, 1997) p. 20.
- 16) F. D. Patel, E. C. Honea, J. Speth, S. A. Payne, R. Hutcheson and R. Equall: "Laser demonstration of  $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (YbAG) and materials properties of highly doped Yb:YAG," *J. Quantum Electron.*, **37** (2001) 135-144.
- 17) J. Kawanaka, S. Tokita, H. Nishioka, M. Fujita, K. Yamakawa, K. Ueda and Y. Izawa: "Dramatically improved laser characteristics of diode-pumped Yb-doped materials at low temperature," *Laser Phys.*, **15** (2005) 1306-1312.
- 18) S. Tokita, J. Kawanaka, M. Fujita, T. Kawashima and Y. Izawa: *Advanced Solid-State Photonics 2005* (ASSP 2005, OSA Topical Meeting) MF45 TOPS, **98** (2005) 628-632.
- 19) D. J. Ripin, J. R. Ochoa, R. L. Aggarwal and T. Y. Fan: "165-W cryogenically cooled Yb:YAG laser," *Opt. Lett.*, **29** (2004) 2154-2156.

(2008年12月1日受理)