

JAERI-Tech  
2004-062



JP0450796



高繰り返し軟X線レーザー開発用ドライバーレーザーの設計と  
要素性能の評価

2004年11月

越智 義浩・長谷川 登・鈴木 庸氏・助川 綱太\*  
河内 哲哉・岸本 牧・永島 圭介

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村)あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

# 高繰り返し軟 X 線レーザー開発用ドライバーレーザーの設計と 要素性能の評価

日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センター  
越智 義浩・長谷川 登・鈴木 庸氏・助川 鋼太\*  
河内 哲哉・岸本 牧・永島 圭介

(2004年9月9日受理)

繰り返し頻度 0.1 Hz で動作する軟 X 線レーザー装置のドライバーレーザーとして、高繰り返しチャープパルスレーザーシステムの設計を行った。前段増幅部としてパルスコントラストの制御性にすぐれた光パラメトリック増幅器 (OPCPA) を用いた。主増幅部にはレーザーガラスを用いるため、優れた放熱効果にすぐれたジグザグスラブ型増幅器を採用した。ジグザグスラブ型増幅器では小さいビームサイズでマルチパス増幅させた後、ダブルパス増幅を行う二段階増幅を行うことによりシステムのコンパクト化を図った。また、像転送系をシステム全体に組み込むことで増幅レーザー光の空間強度分布の均一化を図った。本報告では、各部分について試作器を製作して行った増幅特性評価の結果と、それを基に決定したシステムの最終仕様について報告する。

Design of Chirp-pulse Amplification Laser System  
and Test Results of Key Elements  
for High-repetition Rate Soft X-ray Lasers

Advanced Photon Research Center  
Kansai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Kizu-cho, Souraku-gun, Kyoto

Yoshihiro OCHI, Noboru HASEGAWA, Youji SUZUKI, Kouta SUKEGAWA\*,  
Tetsuya KAWACHI, Maki KISHIMOTO and Keisuke NAGASHIMA

(Received September 9, 2004)

We have designed a new chirp-pulse amplification (CPA) laser system as a driver laser for a 0.1 Hz repetition rate soft x-ray laser system. We adopted an optical parametric chirped pulse amplifier (OPCPA) for a pre-amplifier from the point of view of pulse contrast controllability. For a main-amplifier, we decided to use a zigzag-slab amplifier from the points of view of heat radiation ability and compactness. In order to obtain homogeneous spatial profile of amplified laser beam, the image of the incident laser light created by a serrated aperture is transferred by use of an image relay system. This paper reports the preliminary results of each amplifier characteristics in a prototype system and details of the final system design.

**Keywords:** Soft X-ray Laser, 0.1 Hz, OPCPA, Zigzag-slab Amplifier

---

\* Cooperative Staff

## 目次

|         |                       |    |
|---------|-----------------------|----|
| 1.      | 緒論                    | 1  |
| 2.      | OPCPA の試作と増幅性能評価      | 6  |
| 2. 1    | OPCPA の設計             | 6  |
| 2. 2    | OPCPA 増幅性能の評価         | 7  |
| 2. 3    | まとめ                   | 7  |
| 3.      | ジグザグスラブ型増幅器の試作と増幅性能評価 | 11 |
| 3. 1    | レーザー媒質の選定             | 11 |
| 3. 2    | Nd ドープ量、及びスラブ厚みの決定    | 11 |
| 3. 3    | ジグザグスラブの幾何学的設計        | 12 |
| 3. 4    | フラッシュランプ、及び電源         | 13 |
| 3. 5    | シングルパスでの増幅性能評価        | 14 |
| 3. 6    | マルチパスでの増幅試験           | 15 |
| 3. 7    | まとめ                   | 16 |
| 4.      | 高繰り返しチャープパルスレーザーの設計   | 24 |
| 4. 1    | システム構成                | 24 |
| 4. 2    | 前段増幅部 (OPCPA)         | 24 |
| 4. 3    | 主増幅部                  | 25 |
| 4. 3. 1 | システム概要                | 25 |
| 4. 3. 2 | ジグザグスラブ               | 25 |
| 4. 3. 3 | フラッシュランプ              | 26 |
| 4. 3. 4 | ハウジング                 | 26 |
| 4. 4    | パルス圧縮器                | 26 |
| 4. 5    | まとめ                   | 27 |
| 5.      | 結論                    | 32 |
|         | 謝辞                    | 32 |

## Contents

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 1.      | Introduction   | 1   |
| 2.      | Preliminary Design and Amplification Test of OPCPA                 | 6   |
| 2. 1    | Design   | 6   |
| 2. 2    | Amplification Test   | 7   |
| 2. 3    | Summary  | 7   |
| 3.      | Preliminary Design and Amplification Test of Zigzag-slab Amplifier | 1 1 |
| 3. 1    | Laser Material   | 1 1 |
| 3. 2    | Nd Dope Density and Slab Thickness                                 | 1 1 |
| 3. 3    | Geometrical Design of Zigzag-slab                                  | 1 2 |
| 3. 4    | Design of Flash Lamp and Power Supply                              | 1 3 |
| 3. 5    | Amplification Test - Single-pass                                   | 1 4 |
| 3. 6    | Amplification Test - Multi-pass                                    | 1 5 |
| 3. 7    | Summary  | 1 6 |
| 4.      | System Design of High-repetition Rate CPA Laser                    | 2 4 |
| 4. 1    | System Configuration   | 2 4 |
| 4. 2    | Pre-amplifier (OPCPA)  | 2 4 |
| 4. 3    | Main Amplifier   | 2 5 |
| 4. 3. 1 | System Configuration   | 2 5 |
| 4. 3. 2 | Zigzag-slab  | 2 5 |
| 4. 3. 3 | Flash Lamp   | 2 6 |
| 4. 3. 4 | Housing  | 2 6 |
| 4. 4    | Pulse Compressor   | 2 6 |
| 4. 5    | Summary  | 2 7 |
| 5.      | Conclusion   | 3 2 |
|         | Acknowledgement  | 3 2 |

## 1. 緒論

平成9年より進めてきた原研における軟 X 線レーザー開発研究は、平成11年度に X 線レーザー発生用ドライバーとしてチャープパルス増幅(Chirp-Pulse Amplification : CPA) レーザーを整備したことで順調な成果をあげてきた。これまでに過渡利得電子衝突励起方式による X 線レーザーにおいて、波長 13.9 nm 及び 12.0 nm の飽和増幅 [1]、8.8 nm までの強い増幅の確認 [2]、そして波長 13.9nm において非常に高い空間コヒーレンス (ビーム発散角が小さい) を持った X 線レーザービームの発生に成功している [3]。空間コヒーレンスが高いことに加え、X 線レーザーはパルス幅 10 ps 程度の短パルスであり [4]、パルスあたりの光子数が  $10^{11}$  個程度得られることから、ピーク輝度は  $10^{27}$  photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW に及ぶ。このような高輝度軟 X 線光源は現段階では他に存在しない。この特徴を活かした X 線レーザーの利用・応用研究も開始しており、強誘電体表面の高時間分解観測 [5, 6]、ロイズミラーを用いた固体表面の微粒子の干渉計測 [7]、そしてレーザー生成プラズマの電子密度空間分布の干渉計測 [8] など、さまざまな成果をあげている。今後、X 線レーザーの特徴を活かした利用・応用範囲が急速に広がっていくのは確実である。

現在の X 線レーザー発生用ドライバーである CPA レーザーは、主増幅部にガラスロッド型増幅器を採用し、パルス幅 1 ps、最大出力エネルギーはパルス圧縮後 20 J 程度である。ガラスロッド型増幅器は既に確立された技術であり、性能維持が比較的容易であると同時にビーム径を大きくすることで大きな出力エネルギーを取り出し易いという長所があり、過渡利得電子衝突励起方式の X 線レーザーの原理実証実験、及びその発振条件の最適化といった基礎研究の目的にかなっている。しかしながら放熱効率は悪く、仮に高い繰返し数で使用すれば増幅器内部の熱レンズ効果によりレーザー波面の歪みを生じ、集光性能が劣化したり光学素子の損傷を引き起こす可能性があることから、ドライバーレーザーの繰返し数は実質 15～20 分に 1 ショットであり、X 線レーザーの発生回数は一日 30 ショット程度が限界である。X 線レーザーの利用・応用研究を念頭においた場合、ポンプ&プローブ法により物質やプラズマの動的過程をピコ秒オーダーの高時間分解観察したり、走査型顕微測定でナノメートルオーダーの高空間分解観察を行うためには、最低でも 1000 ショット程度が必要となることから、現状の低い繰返し数では対応ができない。従って X 線レーザーの利用・応用研究を強力に推し進めるにあたり、繰返し頻度の高いドライバーレーザーの開発を早急に行う必要がある。高繰返しドライバーレーザーへ要求される性能を列挙すれば、以下ようになる。

- 1) 出力エネルギーが 15 J 程度、パルス幅が数 ps～数 10ps の範囲で可変のパルスを 2 ビーム出せること

これまでの波長 13.9 nm の X 線レーザー発振の最適化研究から、強い X 線レーザー発生

には少なくともターゲット上で 10 J 程度の励起エネルギーが必要であることが明らかになっている。パルス圧縮器（回折格子）の透過効率が 70 %程度であることから、増幅器からの出力エネルギーは 15 J 程度必要となる。また、完全な空間コヒーレンスを持った X 線レーザー発生時の実験配置（ダブルターゲット実験 [9]）においては、X 線レーザー発振器としての第 1 ターゲットと X 線増幅器としての第 2 ターゲットの励起レーザー光照射条件がパルス幅を含めて異なるため、2 つの励起レーザー光の調整が独立に行えるような CPA レーザーである必要がある。

## 2) パルスのコントラストを上げること

パルスのコントラストは、X 線レーザーの高効率発振には特に重要である。過渡利得電子衝突励起方式の X 線レーザーでは、プリパルスによって生成した電子温度の低い予備プラズマにメインパルスを照射することで一気に電子温度を上昇させ反転分布を生成する [10]。ここでもしもメインパルスに大きなペDESTAL やプリパルスがあれば、メインパルスが来る前に電子温度が徐々に上がってしまい、X 線レーザーの発振に最適な条件が壊れてしまう可能性がある。予備プラズマの電子温度を極端に上昇させないためにはペDESTAL レベルを集光強度で  $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> 以下に抑える必要があり、メインパルス（集光強度  $\sim 10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>）に対するコントラストとして 3 桁以上が必要となる。現在のドライバーレーザーの前段増幅部に使用している再生増幅器は小型で増幅率が高い優れた増幅器であるが、利得飽和領域で使用するためにプリパルス及び寄生発振に起因するペDESTAL の出力が比較的大きく、結果として増幅媒質のプラズマ条件がその影響を受けて X 線レーザー出力の不安定性につながっている。従って、新たに開発するドライバーレーザーにおいては、プリパルス、及びペDESTAL を低く抑えるための新しい前段増幅器を開発する必要がある。

## 3) システム全体の繰返し数を 0.1 Hz 以上とすること

現状での X 線レーザーは 1 パルス当たりの光子数では他の光源よりも数桁大きい、繰返し数が低いために単位時間当たりの平均エネルギー（または平均光子数）では、同じくレーザーを光源とする高次高調波の方が大きくなる（図 1.1 参照）。0.1 Hz の繰返し数は、X 線レーザーの単位時間当たりの平均エネルギーが高次高調波と比較して、同等以上になる目安である。また、この場合に一日（8 時間運転時）でのショット数は 2000 ショット以上となり、利用・応用研究の領域を広げる事ができるものと思われる。

## 4) レーザービームの集光位置や線集光幅を安定させること

ダブルターゲット方式による X 線レーザーのビーム発散角は 0.2 mrad であり、指向性において極めて優れている。従って、X 線レーザーを利用する際には X 線レーザー自身のビームポジショニングが極めて重要となる。X 線レーザーのビームポジショニングを安定させるためには、ドライバーレーザーの集光位置や線集光幅を安定させることが必要であり、



ターゲット上での集光位置精度  $10\ \mu\text{m}$ 、線集光幅  $20\ \mu\text{m}$  が要求される。集光性能はレーザービームの空間強度分布に依存するため、均一な空間強度分布を得ることが重要となる。上記の要求性能の一覧を表 1 にまとめる。

本報告では、以上の要求を踏まえた軟 X 線レーザー励起用の高繰り返しドライバーレーザーシステムの設計について述べる。レーザーシステムの構成は、発振器、パルス伸長器、前段増幅部、主増幅部、パルス圧縮器、そして全システムを通じてレーザーの空間強度分布を揃えるイメージ転送系からなる。発振器、パルス伸長器、及びパルス圧縮器部分は既存のドライバーレーザーとほぼ共通仕様とするが、前段増幅部は、これまでの再生増幅器ではなく光パラメトリック増幅(Optical Parametric Chirped Pulse Amplification: OPCPA)を用いる。OPCPA は再生増幅器のように増幅過程にキャビティーを含まないため、原理的に再生増幅器で問題になったプリパルスの発生を防ぎ、ペDESTAL を低く抑える事ができる。また、OPCPA の採用により増幅時の周波数帯域の狭帯域化を極力防ぐことができる。チャープパルスは周波数成分を時間的に再配置したものであるため、周波数帯域が保存されることは入射パルスの時間幅が前段増幅時に保存される事を意味し、主増幅部で出力エネルギーを取り出しやすくなる。主増幅部は肉厚 15 ミリ程度のジグザグスラブ型増幅器とすることで、放熱効率の増加とともに、増幅光の熱歪み効果の低減を図る。更に、マルチパス増幅系を用いることでシステムのコンパクト化を図る。また、システム全体に像転送系を組み込むことで均一な空間強度分布を持ったレーザー波面の保存とレーザー光の位置安定性の向上を図る。

高繰り返し軟 X 線レーザー発振用の新型ドライバーレーザーの最終的な設計を行う前に、特に開発要素の高い OPCPA を用いた前段増幅部、及びジグザグスラブ型増幅器に関しては、それぞれ試作器を製作し、それらの増幅特性の事前評価と種々の問題点の洗い出しを行った。以下にそれぞれの試作器の設計の詳細と、それを用いた増幅性能評価の結果について報告し、それを基にした新型ドライバーレーザーの最終仕様についての詳細を述べる。

#### 参考文献

- [1] T. Kawachi, et al., Phys. Rev. A **66**, 033815-1 (2002).
- [2] T. Kawachi, et al., Phys. Rev. A **69**, 033815-1 (2003).
- [3] M. Nishikino, et al., Phys. Rev. A **68**, 061802(R) (2003).
- [4] Y. Ochi, et al., Appl. Phys. B **78**, 961 (2004).
- [5] R. Tai, et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 257602 (2002).
- [6] R. Tai et al., to appear in Phys. Rev. Lett.

- [7] Rus et al., proceedings of XRL2002
- [8] G. Jamelot et al., to appear in proceedings of XRL2004
- [9] M. Tanaka et al., Opt. Lett. 28, 1680 (2003).
- [10] 田中 桃子、河内 哲哉、核融合学会誌 79 号、386 (2003)

表1 高繰り返しX線レーザードライバーシステムへの要求性能

| 項目             | 既存ドライバー                 | 新型ドライバー                                   | 備考   |
|----------------|-------------------------|---|--|
| 出力<br>(パルス圧縮前) | 30 J×2ビーム               | 15 J×2ビーム                                 | これまでの最適化実験により、パルス圧縮後 10 J で                    |
| パルス幅           | 1ps - 30 ps (可変)        | 1ps - 30ps (可変)                           | 13.9nm の増幅が可能                                  |
| コントラスト         | 再生増幅器に起因する意図しないプリパルスが存在 | 10 <sup>9</sup> 以上のコントラストで意図しないプリパルスが無いこと | 再生増幅器を用いずに、原理的にプリパルスが発生しない OPCPA の開発が必要        |
| 繰返し数           | 15-20 分に1ショット           | 10 秒に 1 ショット (0.1Hz)                      | 放熱効率が悪く、熱歪み効果の出やすいロッド型増幅器に替わるジグザグスラブ型増幅器の開発が必要 |
| 位置安定性          | ターゲット上で 10 μm           | ターゲット上で 10 μm                             | 像転送系による対応                                      |
| 空間強度分布         | 線集光幅 20 μm              | 線集光幅 20 μm                                |  |

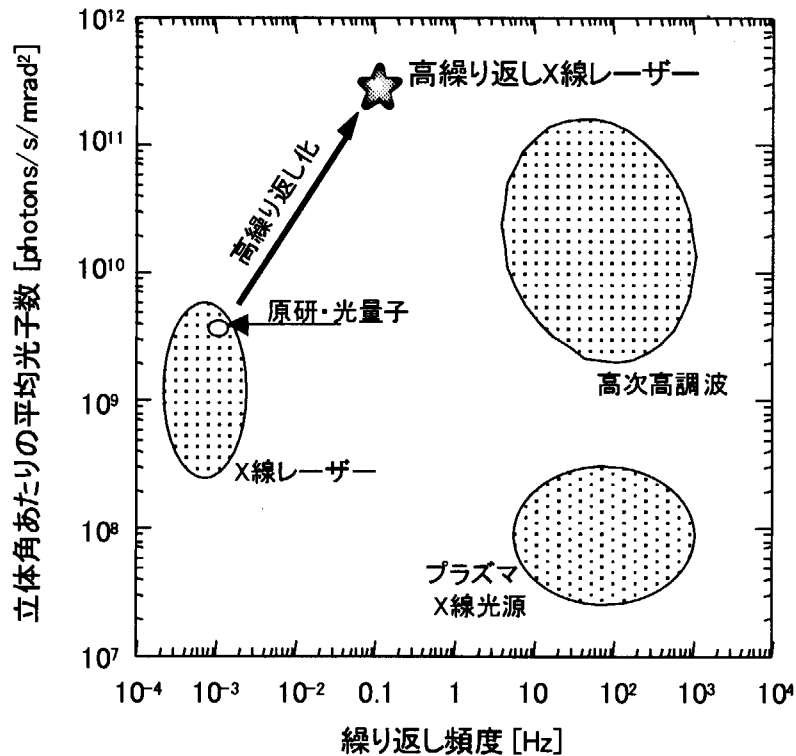


図 1.1 レーザー励起軟 X 線光源の単位立体角あたりの平均光子数の比較

## 2. OPCPA の試作と増幅性能評価

OPCPA (Optical Parametric Chirped Pulse Amplification) は、チャープされた光パルス、BBO などの非線形結晶による光パラメトリック増幅現象を使って増幅する光増幅器である [1、2]。光パラメトリック増幅 (Optical Parametric Amplification : OPA) とは、非線形結晶中に信号光とそれより波長の短い励起光を同時に入射した際に、励起光から信号光へエネルギー移動が生じて信号光が増幅される現象である。OPCPA では通常の反転分布を生成した媒質中を通過させるレーザー増幅方法と異なり反転分布を利用しないため、励起光のパルス幅と同程度にゲインを発生する時間幅を設定できる。従って、励起光にナノ秒程度の短パルスを用いる事で、再生増幅器の欠点であった光学的ノイズの発生を抑える事が可能である。また、利得周波数帯域が広いためスペクトルの狭帯域化が起こりにくいことから、後段の主増幅器における増幅効率の向上が期待される。本章では、BBO 結晶を用いた OPCPA 試作器の設計と、それを用いて行った増幅性能評価の結果について報告する。

## 2. 1 OPCPA の設計

非線形結晶の複屈折を利用した OPCPA による増幅の概念図を図 2.1 に示す。高い周波数の光を非線形結晶に入射した場合、光は位相整合条件を満たした二種類の低い周波数の光に波長変換される。従って、高い周波数の励起光 (角周波数:  $\omega_p$ ) と低い周波数の信号光 ( $\omega_s$ ) を非線形結晶中に位相整合条件を満たした角度で同時に入射した場合、励起光から信号光 ( $\omega_s$ ) とアイドラー光と呼ばれる信号光以外の光 ( $\omega_i$ ) へのエネルギー移動が起こり、信号光が増幅される。位相整合条件は次式で与えられる。

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (2.1)$$

$$n_o(\omega_p, \theta_p) \omega_p = n_o(\omega_s) \omega_s + n_o(\omega_i) \omega_i \quad (2.2)$$

ここで、 $n_o(\omega)$  と  $n_e(\omega, \theta)$  はそれぞれ角周波数  $\omega$ 、結晶の光学軸に対する伝搬方向  $\theta$  での非線形結晶中での常光線 (結晶の光学軸に対して垂直な偏光面の光)、異常光線 (常光線に対して垂直な偏光面の光) に対する屈折率を示している。また、異常光線に対する屈折率  $n_e(\omega, \theta)$  は次式で表される。

$$n_e(\omega_p, \theta) = n_o(\omega_p) n_e(\omega_p) / \{n_o(\omega_p)^2 \sin^2 \theta + n_e(\omega_p)^2 \cos^2 \theta\}^{1/2} \quad (2.3)$$

従って、伝搬方向  $\theta$  を適切に設定する事で異なる周波数で位相整合条件を満たす事が可能である。実際には伝搬方向  $\theta$  は入射角により決まるため、入射光の光軸に対する非線形結晶のカット角を制御する。

ここでは、非線形結晶として結晶点群 3m に属する三方晶一軸性負結晶 BBO を採用した。BBO 結晶の波長  $\lambda$  ( $= 2\pi c / \omega$ ;  $c$  は光速) における常光線と異常光線に対する屈折率  $n_o(\lambda)$ 、 $n_e(\lambda)$  はセルマイヤー分散式により次式のように求まる。

$$n_o(\lambda)^2 = 2.7359 + 0.01878 / (\lambda^2 - 0.01822) - 0.01354 \lambda^2 \quad (2.4)$$

$$n_e(\lambda)^2 = 2.3753 + 0.01878 / (\lambda^2 - 0.01667) - 0.01516 \lambda^2 \quad (2.5)$$

図 2.2 に励起光として YAG レーザーの 2 倍高調波 ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) を使用した場合の信号光波長と位相整合角の関係を示す。ガラスレーザーの波長 1053 nm 近辺において位相整合角がほぼ均一 ( $22.9^\circ$ ) であることから、OPCPA がこの波長領域において広い増幅帯域を持つ事がわかる。以上から、位相整合角を  $22.9^\circ$  と設定して BBO 結晶を用いた OPCPA システムの試作を行った。

## 2. 2 OPCPA 増幅性能の評価

前節で設計した BBO 結晶 [3] を用いた OPCPA の増幅性能評価を行った。入力光は既存の X 線レーザー研究用ガラスレーザー装置の前段部 (発振器～再生増幅器) からの出力の一部 (波長 1053 nm、波長幅 1.8 nm、エネルギー 150 nJ) を切り出して使用した。励起光として、波長 532 nm、パルス幅 9 ns、ビームサイズ  $\phi 9 \text{ mm}$ 、最大出力エネルギー 800 mJ の YAG レーザーの 2 倍高調波を使用した。励起光の偏光面は信号光と垂直とし、信号光と同軸で結晶に入射した。

図 2.3 に入力光エネルギー 0.15  $\mu\text{J}$  を固定とし、励起光エネルギーを変化させた際の増幅率の測定結果を示す。増幅率は励起光エネルギー約 80 mJ まで励起光の増大とともに指数関数的に増幅率が増加しており、励起光エネルギー約 80 mJ において約 1500 (増幅光エネルギー約 220  $\mu\text{J}$ ) であった。増幅光エネルギーは励起光エネルギーに対して十分小さい領域で用いていることから、後段に更にもう一段結晶を配置する事で既存の再生増幅器の増幅率  $10^\circ$  を上回る事が可能であると考えられる。

図 2.4 に励起光エネルギー 80 mJ の場合の増幅前後の信号光スペクトルを示す。増幅後のスペクトルにおいて波長 1076 nm 近傍に見えるピークがアイドラー光である。増幅前のスペクトル幅 (全値半幅: FWHM) は 1.6 nm、増幅後のスペクトル幅は 1.8 nm であった。測定に使用した分光器の最小分解能が 0.3 nm であることを考慮すると、増幅前後でのスペクトル幅は同等であるといえる。この結果から、増幅に伴うスペクトルの狭帯域化が起きていない事を確認した。

図 2.5 に励起光に対する信号光の非線形結晶への入射タイミングを変化させた場合の増幅率の時間変化を励起光のパルス波形とともに示す。この際、励起光エネルギーは 80 mJ に固定した。励起光のパルス幅が 9 ns (FWHM) なのに対し、増幅が得られる時間は励起光のピークを中心に 2.8 ns (FWHM) と非常に短時間であることがわかる。これは、その時間幅の中にある光は増幅されないことを意味し、従って、OPCPA を用いることによりコントラストの高いレーザーパルスが得られることが期待できる。

## 2. 3 まとめ

X 線レーザー発振に必要なコントラストの高い光パルスを生成するための前段増幅器として BBO 結晶を用いた OPCPA の設計を行い、増幅性能評価を行った。結果、励起光エネルギー 80 mJ に対して増幅率 1500 が得られること、増幅前後でのスペクトルの狭帯域化が

生じていないこと、またコントラストの高いレーザーパルスが得られることを確認した。以上より、OPCPA は高繰り返し軟 X 線レーザーのドライバーレーザーの前段増幅部に適していると結論することができる。

#### 参考文献

- [1] I. N. Ross, et al., CLF Annual Report, 201 (1998/99).
- [2] H. Yoshida, et al., Technical Digest of CLEO/Pacific Rim Vol. 1, 80 (2001).
- [3] V. G. Dmitriev, et al., Handbook of Nonlinear Optical Crystals, Springer (1995).

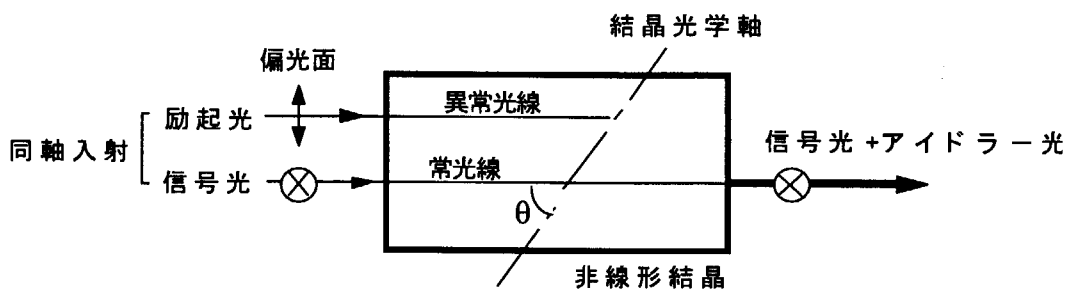


図 2.1 OPCPA 概念図

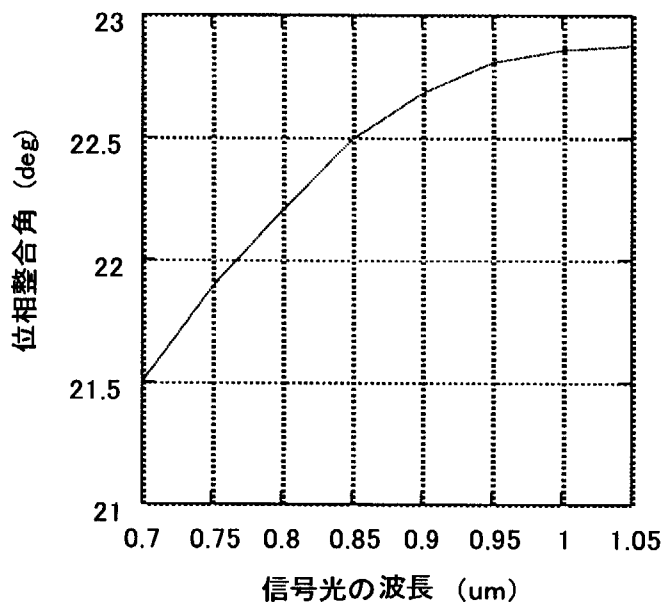


図 2.2 信号光の波長に対する位相整合角

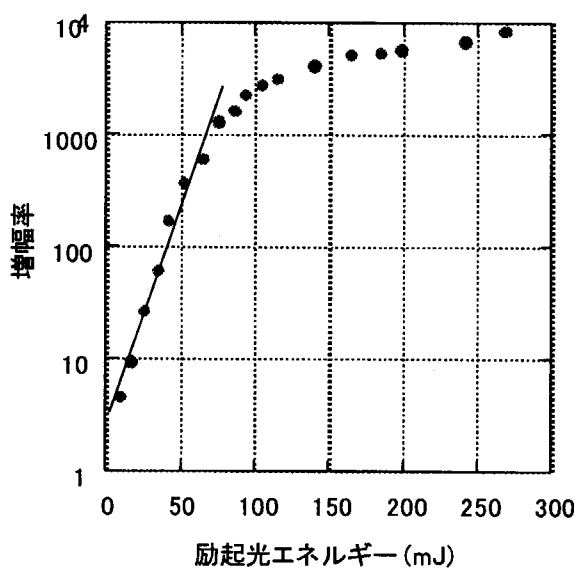


図 2.3 励起光エネルギーに対する増幅率

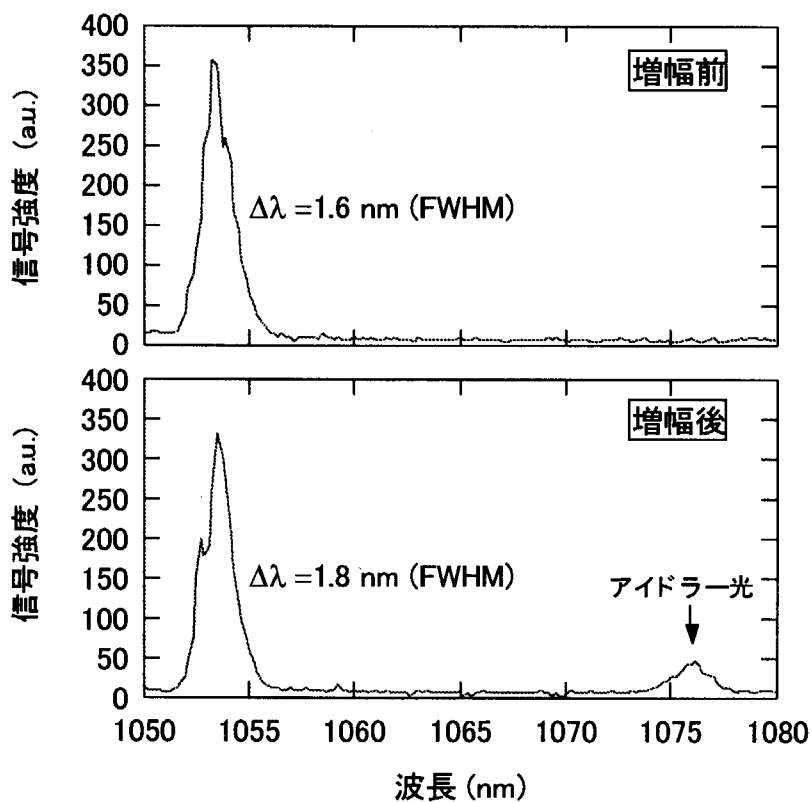


図 2.4 増幅前(上段)、後(下段)の入力光スペクトル  
 励起光エネルギー: 80 mJ、増幅率: 1500

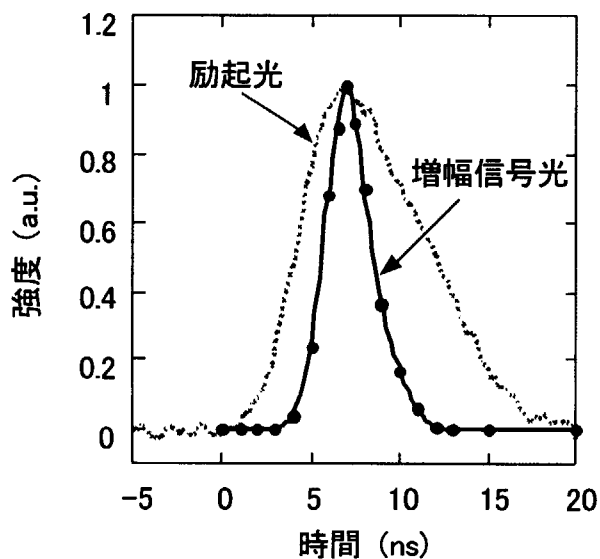


図 2.5 入射タイミングに対する増幅光強度  
 励起光エネルギー: 80 mJ、増幅率: 1500



### 3. ジグザグスラブ型増幅器の試作と増幅性能評価

軟 X 線レーザーを 0.1 Hz で高繰り返し発振させる為には、その繰り返し数に対応できる高出力の固体ドライバーレーザーが必要となる。高出力固体レーザーの繰り返し数を制限する最も大きな要因は、励起の際に発生する熱が固体内部に残留することにより生じる熱レンズ効果によるレーザー光の波面歪みである。現在、光量子科学研究センターに於いて X 線レーザー研究に使用しているガラスレーザー装置では最大で直径 50 mm のガラスロッド型増幅器を使用しており、残留熱による影響を除去するためにレーザーショット間隔を 15 ~ 20 分程度にしなければならない。そこで我々は、繰り返し数 0.1 Hz での軟 X 線レーザー発振を実現するためにドライバーレーザーの主増幅部にジグザグスラブ型増幅器を想定し検討を行った。ジグザグスラブ型増幅器では増幅媒質中をレーザー光が全反射を繰り返しながらジグザグに進むことにより、残留熱による熱分布の影響が相殺され熱レンズ効果を抑えることが可能である。加えて、被冷却面を大きくとることができ放熱能力にも優れていることから高繰り返し動作に適している。更にマルチパス増幅を行うことにより一台のジグザグスラブ型増幅器で主増幅を行うことでシステムのコンパクト化を図る。本章ではジグザグスラブ型増幅器を試作し、シングルパス、およびマルチパスで増幅性能評価を行った結果について報告する。

#### 3. 1 レーザー媒質の選定

今回開発を目指す高繰り返し軟 X 線レーザー励起用固体レーザーのレーザー媒質（母材）には以下の要請が課される。

- 高出力を得るために大型のものが製作可能であること
- 安定した高繰り返し動作を実現するためには水による直接冷却が最も効果的であり、従って耐水性があること
- 飽和フルエンスが光学素子の損傷しきい値よりも小さくなるよう、誘導放出断面積が大きいこと
- 熱破壊を生じないよう、熱ショック係数が大きいこと

以上の条件を満たす Schott 社製のシリカーリン酸塩系ガラス「APG-1」を、ジグザグスラブ型増幅器試作器のレーザー媒質として採用した。APG-1 の諸特性を表 3.1 にまとめる。

#### 3. 2 Nd ドープ量、及びスラブ厚みの決定

ここでは、スラブガラス両側からフラッシュランプによる励起を行うとして励起効率と励起の一様性の観点から Nd ドープ量とスラブの厚みを決定する。フラッシュランプからの励起光はスラブに対して垂直に入射すると仮定し、スラブの厚み方向を x 軸にとると、スラブ内部での励起光強度  $\Phi(x)$  [W/cm<sup>2</sup>] は次式で表される。

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\beta x) \quad (3.1)$$

ここで、 $\Phi_0$  は初期光強度 [ $W/cm^2$ ]、 $\beta$  は単位長さ辺りの吸収係数 [ $cm^{-1}$ ] で吸収断面積  $\sigma_a$  [ $cm^2$ ] と Nd ドープ密度  $n_0$  [ $cm^{-3}$ ] の積、 $\beta = \sigma_a n_0$  で表される。スラブの厚みを  $d$  [ $cm$ ] とすると吸収効率  $\eta_a (= \frac{\Phi_0 - \Phi(d)}{\Phi_0})$  は次式で表される。

$$\eta_a = 1 - \exp(-\sigma_a n_0 d) \quad (3.2)$$

$\sigma_a = 2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  としてスラブ厚みが 1.0 cm、1.5 cm、2.0 cm の場合の吸収効率を図 3.1 に示す。ここで横軸は Nd ドープ密度を Nd の重量パーセント [wt%] で置き換えている。また、図 3.2 にスラブ中心部と表面での励起密度の比を Nd ドープ量 1.0 wt%、2.0 wt%、3.0 wt% の場合について示す。図 3.1 より吸収効率の観点からは Nd ドープ量を大きくし、スラブ厚みを厚くするほど有利であることがわかるが、一方でスラブ表面での吸収割合が大きくなり寄生発振が発生しやすくなるというデメリットがある (図 3.2)。これらの効果を考慮し、ここでは吸収効率 95% を目安として、Nd ドープ量を 1.0 wt%、スラブ厚みを 1.5 cm に決定した。

### 3. 3 ジグザグスラブの幾何学的設計

まず初めにジグザグスラブ型増幅器へのレーザー光の入射について検討する。入射方法としては入射面に AR (Anti-Reflection: 無反射) コーティングを施し垂直入射させる場合と、ブリュースター角 (P 偏光成分の反射率がゼロになる入射角) を利用して P 偏光のレーザー光を入射させる場合の 2 通りが考えられる。AR コーティングを利用した垂直入射の場合には入射時の反射が極めて小さいこと、また入射レーザー光に偏光特性が要求されないことが利点としてあげられる。これは理想的ではあるが、大型のレーザーガラスに対する AR コーティングは技術的に困難であり、かなりのコストを要することから現実的には難しい。また、入射レーザー光の光軸とジグザグスラブの軸が異なるため、必要な空間サイズが大きくなる上、アラインメントも困難になる。従って、ここでは入射レーザー光とスラブガラスが同軸上に配置され、ブリュースター角を利用して入射させる方法を基にしたジグザグスラブの幾何学的設計を行う。この場合、入射レーザー光は P 偏光である必要がある。屈折率  $n_1$  の媒質から屈折率  $n_2$  の媒質へ入射する場合のブリュースター角  $\theta_B$  は、

$$\theta_B = \tan^{-1}(n_2/n_1) \quad (3.3)$$

で与えられ、空気中 ( $n_{air} = 1.000$ ) から APG-1 ( $n_{APG} = 1.526$ ) への入射を考えた場合、 $\theta_B = 56.76^\circ$  である。

図 3.3 にスラブガラスと入射レーザー光の幾何学的関係を示す。 $\theta_i$  は入射角、 $\psi$  は屈折角、 $\theta_r$  は反射角、 $\gamma$  はスラブ端面のカット角である。入射レーザー光は空気中から APG-1 に入射し、APG-1 と水 ( $n_{water} = 1.333$ ) との界面で反射を繰返しジグザグに伝播する。ここで、反射時のロスをなくすために反射角  $\theta_r$  は全反射角よりも大きくとる必要がある。APG-1 と水の界面での全反射条件は  $\sin(\theta_r) = n_{water}/n_{APG}$  であるから、ここでは  $\theta_r > 60.9^\circ$  が要請される。また、入射角  $\theta_i$  と反射角  $\theta_r$  は幾何学的に  $\theta_i = \pi/2 + \psi - \theta_r$  の関係にある。ここで、入

射角 $\theta_i$ と屈折角 $\psi$ の間にはスネルの法則、

$$n_{air} \cdot \sin(\theta_i) = n_{APG} \cdot \sin(\psi) \quad (3.4)$$

が成り立つことから、全反射条件を満たすためには入射角 $\theta_i < 64^\circ$  でなければならない。一方で端面の機械的強度やシール部分に対するクリアランスを考えた場合、カット角 $\gamma$ をできるだけ大きくとることが望ましい。これは入射角 $\theta_i$ とカット角 $\gamma$ の間には幾何学的に

$$\theta_i + \gamma = \pi/2$$

が成り立つことから、入射角 $\theta_i$ はできるだけ小さくする必要があることを意味する。図 3.4 に入射角 $\theta_i$ に対する P 偏光成分の透過率を示す。ここでは透過率 99% (反射ロス 1%) を目安とし、入射角 $\theta_i = 45^\circ$ 、カット角 $\gamma = 45^\circ$  として設計を行うことを決めた。これにより、屈折角 $\psi$ は  $27.6^\circ$ 、反射角 $\theta_r$ は  $72.6^\circ$  となる。

スラブガラス内での反射回数  $N_{ref}$  は、スラブガラス中での熱分布による影響を相殺するという観点から偶数回数である必要がある。ここでは  $N_{ref} = 4$  として設計を行った。図 3.5 に今回設計したジグザグスラブ型増幅器の仕様を示す。図中には幅 10 mm のレーザービームが入射した場合の光路を併せて示している。ここで、A、A'、B、B' の各面には面精度  $\lambda/10$  以下の光学研磨を施し、また A-A' 面は 20 秒以下の、B-B' 面は 5 秒以下の平行度となるよう研磨を行った。スラブガラス中での光路長  $L_{slab}$  はスラブ厚み  $d$  と反射角 $\theta_r$ 、及び反射回数  $N_{ref}$  により幾何学的に決まり、

$$L_{slab} = N_{ref} \cdot d / \cos\theta_r \quad (3.5)$$

となる。今回の設計では  $L_{slab} = 200.6$  mm である。

### 3.4 フラッシュランプ、及び電源

ジグザグスラブ型増幅器の励起用光源としてはキセノンガスを内封したフラッシュランプ (ヘレウス社製) を採用し、ガス圧 450 Torr、アーク長 110 mm、ボア径 10 mm、全長 200 mm のものを使用した。キセノンは Nd の吸収スペクトルの存在する波長 800 nm 付近に強い発光スペクトルがあることからレーザー媒質の励起に適しており、励起光源として広く利用されている。ここでは壁材に 1 mm 厚のセリウムドープコーティングを用いることにより、レーザー発振に寄与しない波長 400 nm 以下の発光をカットすることでスラブガラスの余分な発熱を防いでいる。

フラッシュランプ用電源はコンデンサー、インダクタンス、トリガーパルス発生用の昇圧トランスで構成される LC 回路である。図 3.6 にフラッシュランプ電源の等価回路を示す。昇圧トランスで生じるトリガーパルスによりフラッシュランプ内で予備放電が起こると回路としてのインピーダンスが下がり、コンデンサー内に蓄えられたエネルギーはインダクタンスを通過してフラッシュランプで放電される。今回用いた電源はコンデンサー容量 100  $\mu$ F、インダクタンス 100  $\mu$ H に対し最大出力電力が 1 kW のものであり、20~30 kV のトリガー電圧 (可変)、4~8 kV のランプ電圧 (可変) を供給可能である。図 3.7 にフラッシュランプ両端でモニタした入力電圧、及び PIN フォトダイオードで計測したフラッシュラ

ランプ発光のオシロスコープ波形を示す。フラッシュランプの発光はトリガー電圧入力と同時に立ち上がり、ランプ入力電圧波形に追従する形で半値幅約 400  $\mu\text{s}$  で発光していることがわかる。

スラブガラスに対するフラッシュランプの配置は、励起エネルギーをできるだけ大きく取れるように、機械設計の許容する範囲で最も密になるように設計した。図 3.8 にスラブガラスに対するフラッシュランプの配置図を示す。フラッシュランプはスラブガラス両面から 14 mm の位置にスラブガラス軸に沿って 20 mm 間隔で 8 本配置し、更にランプの間隔を補うように 18 mm 離れた位置に 10 mm ずらしてもう 1 系統配置した。全体としては 32 本 (8 本  $\times$  4 系統) のフラッシュランプを使用した。図 3.9 に今回試作したジグザグスラブ型増幅器の写真を示す。

### 3. 5 シングルパスでの増幅性能評価

本節では、今回試作したジグザグスラブ型増幅器を用いて行ったシングルパスでの増幅性能試験の結果について報告する。入力レーザー光は、既存の X 線レーザー研究用ガラスレーザー装置フロントエンド部 (発振器～再生増幅器) の出力光 (波長 1053 nm、エネルギー約 1 mJ、パルス幅 1 ns、P 偏光の直径約 5 mm のガウシアンビーム) をフリッパーにより分岐し利用した。実験セットアップを図 3.10 に示す。入力光はビームスプリッターで分割し、一方は入力エネルギーモニタとして PIN フォトダイオード A で測定し、他方はジグザグスラブ型増幅器へ導入し増幅した後 PIN フォトダイオード B で測定した。この際、フラッシュランプ励起を行わなかった場合の非増幅光を PIN フォトダイオード B で測定することにより、PIN フォトダイオード A、B 間の相対関係を予め明らかにしておいた。

まず初めに、フラッシュランプへの印加電圧を 5 kV で固定し、入力光のジグザグスラブ型増幅器への入射時刻を 100  $\mu\text{s}$  ずつ変化させた場合の増幅特性を調べた。(ただし、実際の実験では入力光のタイミングは固定で、フラッシュランプへの電圧印加時刻の方を変化させている。) 図 3.11 にフラッシュランプの発光波形と入力光が入射した時刻における増幅率 (小信号利得) の結果を示す。ここで、時刻 0  $\mu\text{s}$  はフラッシュランプへのトリガー電圧印加時刻、即ちフラッシュランプの発光が立ち上がる時刻に対応している。この結果より、フラッシュランプ発光がピークとなる時刻 (300  $\mu\text{s}$ ) にレーザー光を入射させた場合に最もよい小信号利得 ( $\sim 2.8$ ) が得られることがわかった。

次に、入力光の入射時刻を 300  $\mu\text{s}$  に固定し、フラッシュランプへの印加電圧を 4~6 kV で変化させた場合の小信号利得を測定した。結果を表 3.2 にまとめる。印加電圧を増加させることにより小信号利得が増加していき、印加電圧 5 kV で約 2.3 倍、6 kV で約 3 倍の増幅が得られることを確認した。小信号利得  $G$  は小信号利得係数  $g$  [ $\text{cm}^{-1}$ ] とスラブガラス中での光路長  $L_{slab}$  [cm] により次式で表される。

$$G = \exp(g \cdot L_{slab}) \quad (3.6)$$

ここで、小信号利得係数  $g$  は誘導放出断面積  $\sigma_{stim}$  [ $\text{cm}^2$ ] と反転分布密度  $\Delta N$  [ $\text{cm}^{-3}$ ] の積、

$$g = \sigma_{stim} \cdot \Delta N \quad (3.7)$$

である。一方、スラブガラス中での蓄積エネルギー密度  $E_{st}$  [J/cm<sup>3</sup>]は放出されるレーザー光の光子エネルギー  $h\nu$  [J]と反転分布密度  $\Delta N$ により次式で表される。

$$E_{st} = h\nu \cdot \Delta N \quad (3.8)$$

3.6～3.8式より、蓄積エネルギー密度  $E_{st}$ と小信号利得  $G$ の間に次の関係が導かれる。

$$E_{st} = h\nu \cdot \ln(G) / (\sigma_{stim} \cdot L_{slab}) \quad (3.9)$$

ここで、 $h\nu \sim 1.89 \times 10^{-19}$  J、 $\sigma_{stim} = 3.5 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup>、 $L_{slab} \sim 20$  cmと得られた小信号利得の値を用いて蓄積エネルギー密度を評価した結果を図3.12に示す。ここではフラッシュランプの発光エネルギーは印加電圧の2乗に比例すると仮定し、横軸にはフラッシュランプへの印加電圧の2乗をとった。印加電圧5kVの場合の蓄積エネルギー密度は0.22 J/cm<sup>3</sup>であった。この結果から、1 cm x 1 cmのレーザー光を用いた場合、レーザー光が通過する体積中には約3.5 Jのエネルギーが蓄えられていることになり、50%の抽出効率が得られるとすると約1.7 Jのエネルギーを取り出すことが可能であることがわかる。同様に、1 cm x 9 cmのレーザー光を用いることにより、15 Jのエネルギーが得られることが予測される。従って、今回試作したジグザグスラブ型増幅器の仕様は、高繰り返し軟 X 線レーザーのドライバレーザーの主増幅部へ適用可能である。

### 3.6 マルチパスでの増幅試験

前節で、今回試作したフラッシュランプ励起ジグザグスラブ型増幅器中には十分なエネルギーが蓄えられていることを確認した。そのエネルギーを取り出すためには、スラブガラス内を複数回往復させて入力レーザー光を順次増幅していく必要がある。その際、大型の光学素子の使用を極力抑えるため、初めには小さいビームサイズ (1 cm x 1 cm) でマルチパスさせ数 J まで増幅し、その後ビームサイズを大きくして (1 cm x 9 cm) 更にダブルパスで 15 J まで増幅するとする。本節では、ポッケルスセルと偏光子を用いた偏光制御により、レーザー光がスラブガラス中をマルチパスする光学系を組み増幅試験を行った結果について報告する。

図3.13に今回組んだマルチパス光学系の概要を示す。入力光は前節同様、既存のガラスレーザー装置フロントエンド部から取り出した P 偏光のガウシアンビームである。入力光は P 偏光であるため偏光子 1 (PL-1) を透過し、その後に配置されたファラデー回転子 (FR) と  $\lambda/2$  波長板 ( $\lambda/2$ -WP) を通過することにより S 偏光へと変換される。この際、偏光子 1 表面で反射される成分を入力参照光として PIN フォトダイオード A でモニタした。S 偏光に変換された入力光はミラー 1 (M-1)、及び偏光子 2 (PL-2) で反射され、ミラー 2～ミラー 3 (M-2～M-3) 間で構成されるマルチパスキャビティへと導入される。偏光子 2 で反射された入力光はミラー 1 で折り返され、 $\lambda/4$  波長板 ( $\lambda/4$ -WP) を往復することにより P 偏光に変換される。この際、ポッケルスセル (PC) は駆動しない。P 偏光に変換された光は偏光子 2 を透過し、ジグザグスラブ型増幅器を通りミラー 3 で折り返される。このタイミングでポッケルスセルに

$\lambda/4$  電圧を印加すると、戻ってきた光は $\lambda/4$  波長板とポッケルスセルを往復するため偏光特性は P 偏光が維持され、再び偏光子 2 を透過してジグザグスラブ型増幅器へ入射する。これを繰り返すことにより、ポッケルスセルに電圧を印加している時間中、入力光はキャビティー中をマルチパスする。(ポッケルスセルを駆動しなければ 1 往復でキャビティー外へ取り出される。) 回折により増幅されたレーザー光の波面が崩れるのを防ぐ目的で、偏光子 2 とジグザグスラブ型増幅器の間で 2 枚の凸レンズによるミラー 2、ミラー 3 を像点とした像転送を行っている。この際、集光点近傍にはブレイクダウンを防ぐため真空容器を設置した。所定回数往復した後、ポッケルスセルへの印加電圧を立ち下げることにより増幅された光は再び S 偏光へと変換され、偏光子 2 によりキャビティー外へ取り出される。取り出された増幅光は、入力時と同じパスを逆行し、最終的に偏光子 1 で反射させ PIN フォトダイオード B でモニタした。

フラッシュランプへの印加電圧を 5 kV とし、1 往復の場合と 2 往復の場合について小信号利得を測定した結果、1 往復の場合に  $G = 12.9$ 、2 往復の場合に  $G = 171$  が得られた。ここで、2 往復の場合の小信号利得は 1 往復の場合のほぼ 2 乗になっており適当であると考えられるが、これらの値は前節で得られたシングルパス (0.5 往復) の場合の小信号利得 ( $G = 2.3$ ) から予測される値よりもかなり大きくなっている。原因については現在調査中であり、今後追試を行う予定にしている。更に、PIN フォトダイオード B を校正されたカロリメータに置き換え、4 往復させた後の増幅光エネルギーを測定した結果、ビームサイズ 5 mm x 8 mm で約 200 mJ が得られていることを確認した。これらの結果から、ビームサイズを 1 cm x 1 cm、往復回数を 5~6 回とすることでマルチパスとしての目標出力エネルギーである数 J が得られると考えられる。

### 3. 7 まとめ

高繰り返し軟 X 線レーザーのドライバーレーザーの主増幅部として放熱効率の高いジグザグスラブ型増幅器の設計を行い、試作器を製作して増幅性能評価を行った。レーザーガラスには Schott 社製「APG-1」を採用し、Nd ドープ量 1.0 wt%、スラブ厚み 1.5 cm で端面は 45° のブリュースターカットとした。シングルパスによる増幅試験の結果、フラッシュランプへの印加電圧 5 kV で小信号利得 2.3 が得られることを明らかにした。この結果から評価したスラブガラス中の蓄積エネルギー密度は約 0.2 J/cm<sup>3</sup> であり、1 cm x 9 cm のレーザー光を用いることで軟 X 線レーザーの励起に必要な 15 J のエネルギーが取り出すことが可能であると考えられる。また、ジグザグスラブ中を複数回往復させた場合の増幅性能を評価した結果、1 往復で 12.9 倍、2 往復で 171 倍の増幅が得られることを確認した。更に、4 往復させた場合にビームサイズ 5 mm x 8 mm で出力エネルギーが約 200 mJ 得られたことから、ビームサイズを 1 cm x 1 cm、往復回数を 5~6 回とすることで数 J まで増幅することが可能であると考えられる。以上より、今回試作したジグザグスラブ型増幅器が高繰り返し軟 X 線レーザーのドライバーレーザーの主増幅部に適していると結論できる。

表 3.1 APG-1 の特性

|        |                     | 略号               | 単位                               |               |
|--------|---------------------|------------------|----------------------------------|---------------|
| レーザー特性 | 発振波長                | $\lambda_L$      | nm                               | 1053.9        |
|        | 発振波長幅               | $\Delta\lambda$  | nm                               | 23.0          |
|        | 誘導放出断面積             | $\sigma_{stim}$  | $10^{-20} \text{ cm}^2$          | 3.5           |
|        | 励起波長                | $\lambda_{pump}$ | nm                               | 803           |
|        | 蛍光寿命                | $\tau$           | $\mu\text{s}$                    | 370           |
| 光学特性   | 屈折率 @1053 nm        | n                | —                                | 1.526         |
|        | 非線形屈折率              | $n_2$            | $10^{-13} \text{ esu}$           | 1.13          |
|        | 反射率の温度係数 (20-40 °C) | $dn/dT$          | $10^{-6} / \text{K}$             | 1.2           |
|        | 光路長の温度係数            | W                | $10^{-6} / \text{K}$             | 5.2           |
|        | 減衰係数@1053 nm        | $\beta$          | $\text{cm}^{-1}$                 | $\leq 0.0015$ |
|        | ブリュースター角 (vs air)   | $\theta_B$       | deg                              | 56.76         |
| 物理的特性  | 密度                  | $\rho$           | $\text{g}/\text{cm}^3$           | 2.633         |
|        | 熱伝導度 @ 25°C         | $\kappa$         | $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ | 0.78          |
|        | ヤング率                | E                | $10^3 \text{ N}/\text{mm}^2$     | 71            |
|        | ポアソン比               | $\nu$            | —                                | 0.238         |
|        | 比熱                  | $C_p$            | $\text{J}/\text{g}\cdot\text{K}$ | 0.84          |
|        | 熱ショック係数 (20-40 °C)  | R                | $\text{W}/\text{m}$              | 111           |
|        | 線膨張係数               | $\alpha$         | $10^{-6} / \text{K}$             | 7.6           |
|        | 転移温度                | $T_g$            | °C                               | 450           |

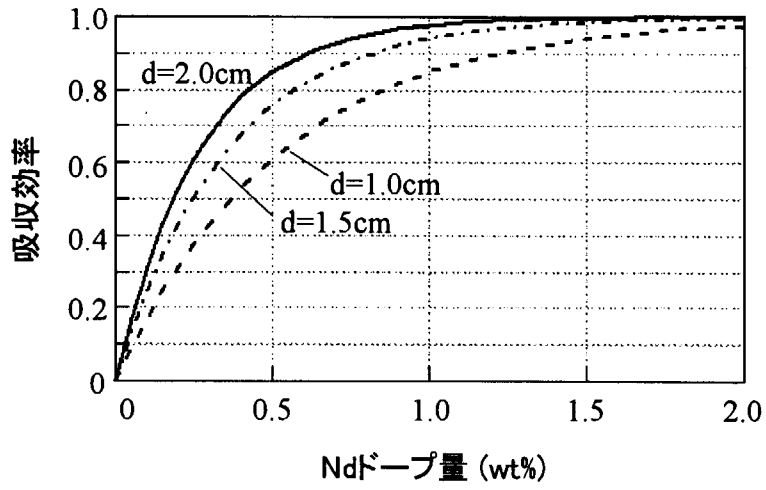


図 3.1 励起光の吸収効率

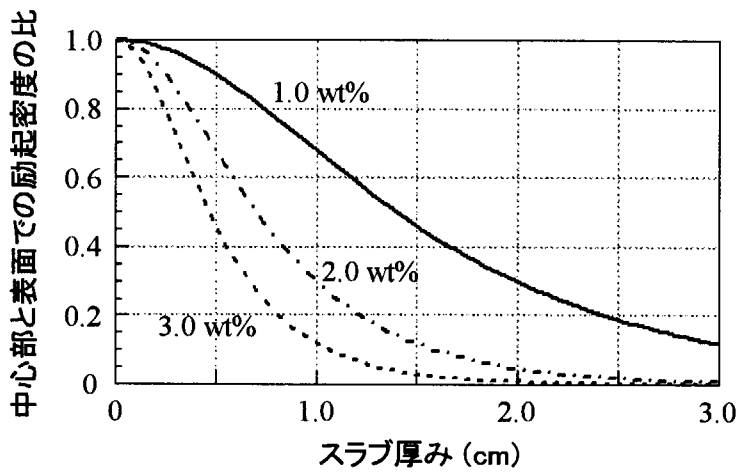


図 3.2 スラブ中心部と表面での励起密度の比



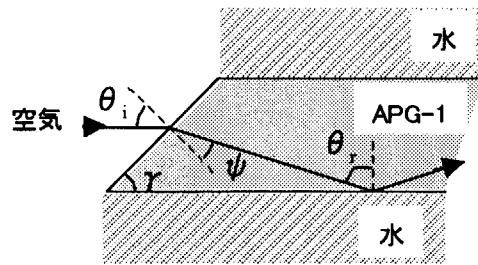


図 3.3 ジグザグスラブと入射レーザー光の幾何学的関係：  
 $\theta_i$ : 入射角、 $\psi$ : 屈折角、 $\theta_r$ : 反射角、 $\gamma$ : カット角

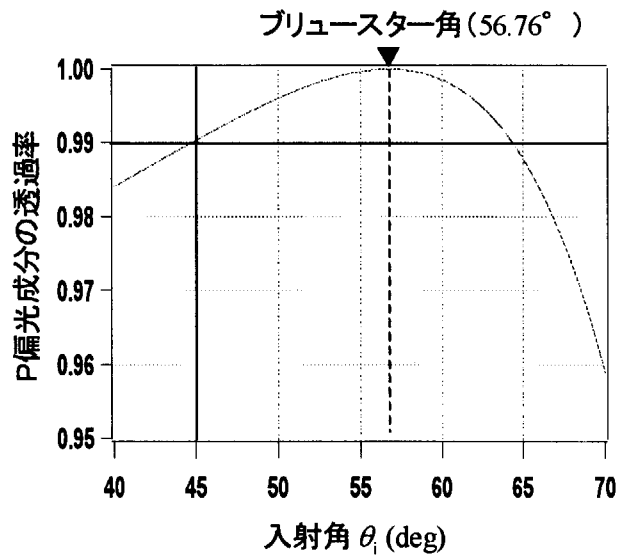


図 3.4 入射角  $\theta_i$  に対する P 偏光成分の透過率

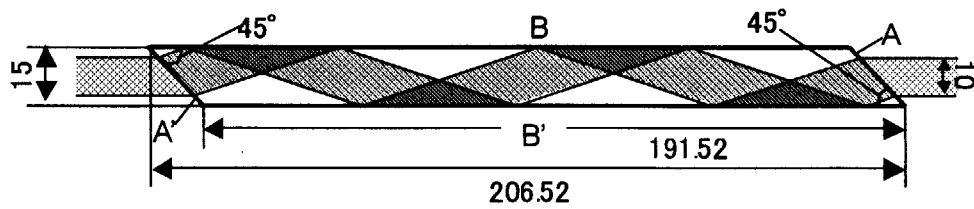


図 3.5 ジグザグスラブの仕様(単位は mm)

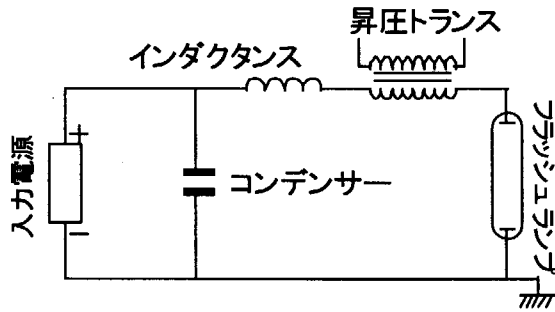


図 3.6 フラッシュランプ用電源の等価 LC 回路

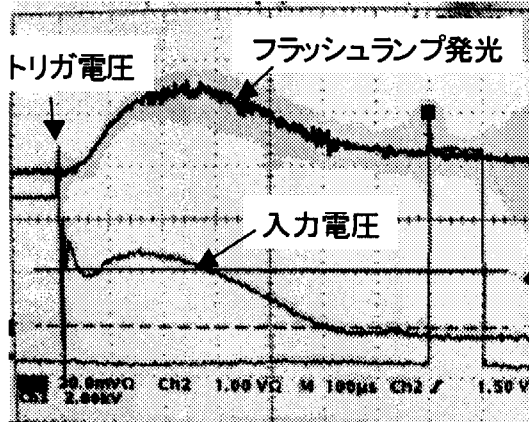


図 3.7 入力電圧とフラッシュランプ発光  
のオシロスコープ波形 (100  $\mu$ s/div)

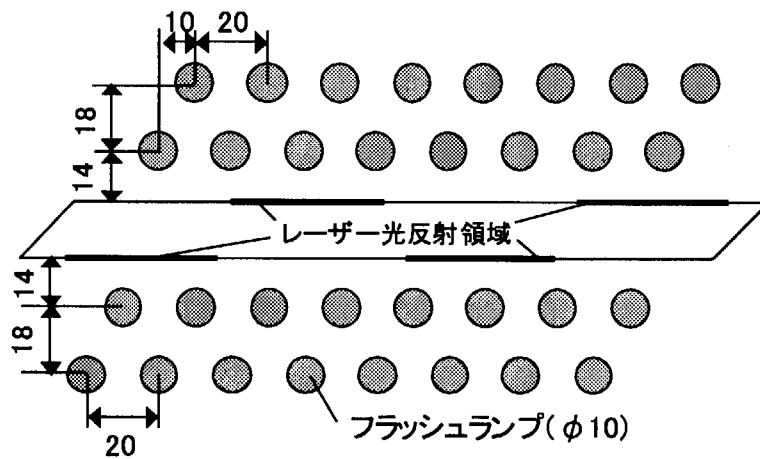


図 3.8 スラブガラスに対するフラッシュランプ配置 (単位は mm)

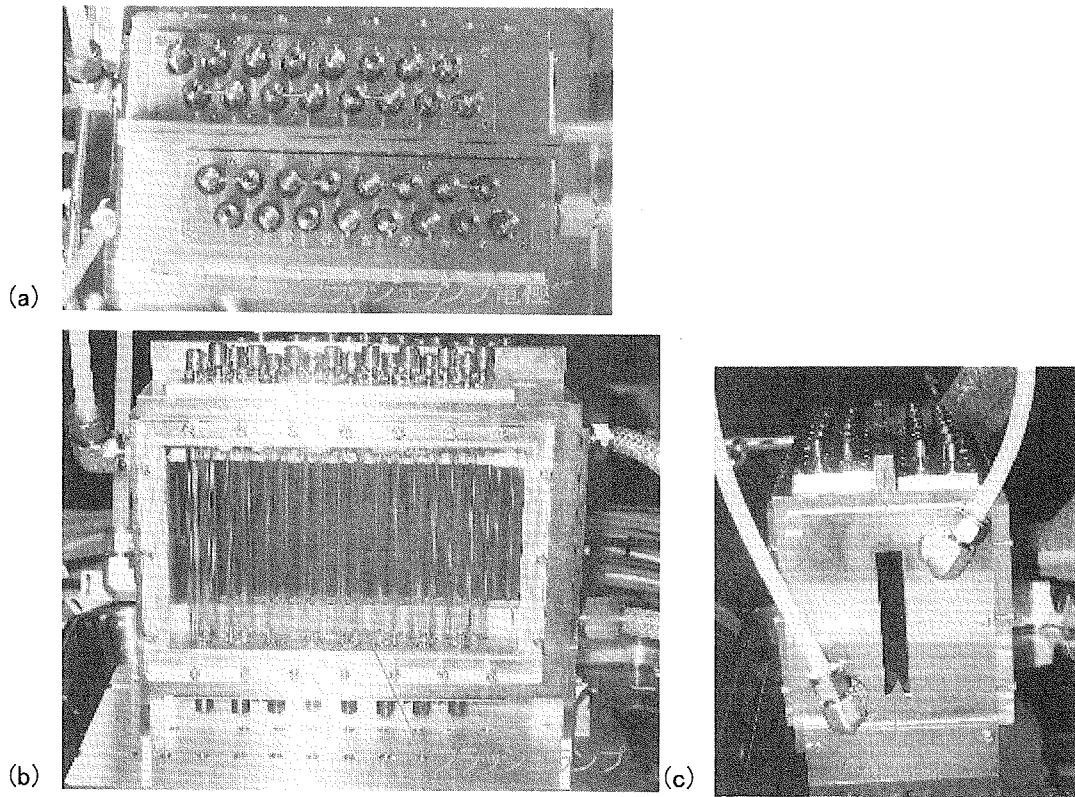


図 3.9 今回製作したジグザグスラブ型増幅器の試作器  
(a) 天より、(b) 側面より、(c) レーザー光入射面より

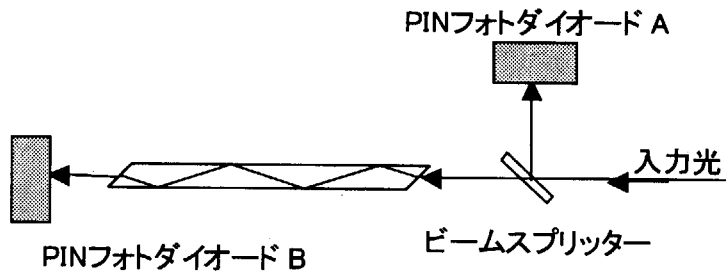


図 3.10 シングルパスでの増幅試験セットアップ

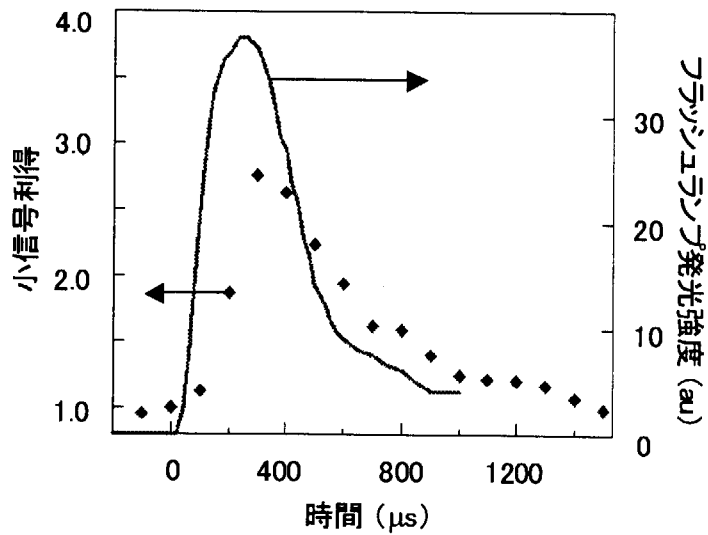


図 3.11 ジグザグスラブ型増幅器への入射時刻を変化させた場合の増幅特性: フラッシュランプ入力電圧 5kV

表 3.2 フラッシュランプ印加電圧に対する小信号利得

| 印加電圧 (kV) | 小信号利得     |
|-----------|-----------|
| 4.0       | 1.7 ± 0.1 |
| 4.5       | 1.8 ± 0.1 |
| 5.0       | 2.3 ± 0.1 |
| 5.5       | 2.9 ± 0.1 |
| 6.0       | 3.0 ± 0.1 |

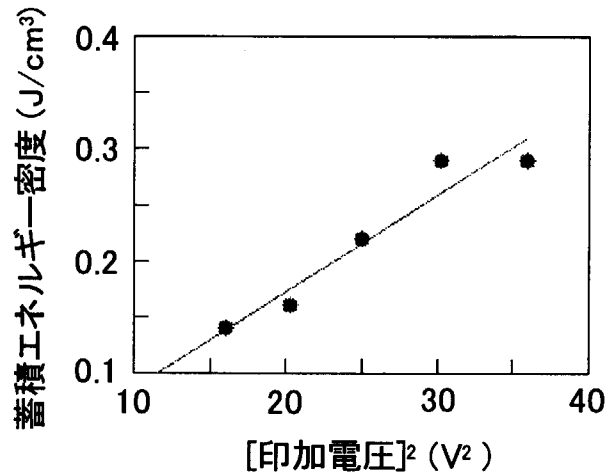


図 3.12 蓄積エネルギー密度とフラッシュランプ印加電圧の関係

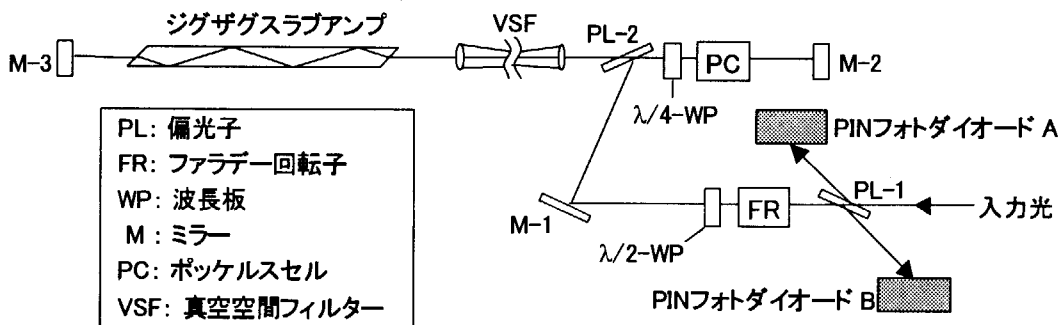


図 3.13 マルチパス増幅試験に用いた光学系

#### 4. 高繰り返しチャープパルスレーザーの設計

2章において、1個の非線形結晶(BBO)を用いたOPCPAにより $10^3$ 以上の増幅が得られることを示した。また3章では、Schott社製シリカーリン酸塩系ガラス「APG-1」を用いたジグザグスラブ型増幅器が軟X線レーザーの励起に必要なエネルギー15 Jを取り出す能力を有していることを示した。これらをうけて本章では、前置増幅部にOPCPA、主増幅部にジグザグスラブ型増幅器を用いた高繰り返しチャープパルスレーザーシステムの設計を行った結果について報告する。

##### 4. 1 システム構成

高繰り返しチャープパルスレーザーシステムは、(1)発振器、(2)パルス伸長器、(3)前段増幅部、(4)主増幅部、(5)パルス圧縮器で構成される。このうち、発振器、パルス伸長器は既存のガラスレーザー装置と同等の仕様のものを用いるとする。前段増幅部には既存の装置では再生増幅器を用いているが、本システムではより効率的な増幅を行うためOPCPAを採用する。OPCPAの利点として、レーザーパルスの狭帯域化を生じない、寄生発振が起こらない、高いコントラストが得られプリパルスやペDESTALが発生しないことが挙げられる。主増幅部には従来のガラスロッド型増幅器にかわり、試作器を用いて性能を確認したジグザグスラブ型増幅器を採用する。スラブ型増幅器は熱レンズ効果の影響が抑えられ、かつ放熱効率に優れている上、マルチパス増幅を行うことでシステムをコンパクトにすることができることから高繰り返しレーザーの増幅器として適している。また、パルス圧縮器では最終段の回折格子のみを真空容器中に配置することで更なるシステムのコンパクト化を図る。

今後展開を図る利用・応用実験はダブルターゲット方式により生成する極めて高い空間コヒーレンスをもった軟X線レーザービームを利用することから、ドライバーレーザーは2系統必要となる。本システムでは、発振器～前段増幅部までは共通仕様(1系統)とし、前段増幅部から出力されるレーザー光を2系統に分岐してそれぞれ独立に増幅を行うこととする。従って、主増幅部、パルス圧縮器は2系統必要となる。各部に要求される性能に関しては表. 1を参照されたい。

##### 4. 2 前段増幅部(OPCPA)

前段増幅部(OPCPA)では発振器からの数 nJ の入力光エネルギーを数 mJ まで増幅(増幅率:  $10^6$ )することを目標とする。2章で述べた基礎実験において、1つの非線形結晶(増幅媒質)で1500倍の増幅を確認していることから、本システムでは2つの非線形結晶を配し2段階の増幅を行うこととする。図4.1にOPCPAシステム構成図を示す。励起光にはYAGレーザーの2倍高調波(波長: 532 nm)を用い、ビームスプリッターにより分割しそれぞれ100 mJ程度のエネルギーとして結晶に導入する。非線形結晶は前段に三方晶一軸性負結

晶 BBO (結晶点群 3m) を使用し、後段にはより損傷しきい値の高い斜方晶二軸性負結晶 LBO (結晶点群 mm2) を用いる。

#### 4. 3 主増幅部

##### 4. 3. 1 システム概要

主増幅部ではフラッシュランプ励起のジグザグスラブ型増幅器により、前置増幅部 (OPCPA) より出力される数 mJ のレーザー光を 15 J まで増幅することを目標とする。増幅過程では、コストの大きな大型の偏光素子 (ポッケルスセル、波長板等) の使用を避けるため、まずビームサイズを 1 cm x 1 cm としてマルチパス増幅を行う。この過程で数 J まで増幅したレーザー光をポッケルスセルによる偏光制御により取り出し、シリンドリカルレンズにより 1 cm x 9 cm のビームに拡大して、再びジグザグスラブ型増幅器に導入しダブルパス (1 往復) させて 15 J までエネルギーを増幅させる。ここでスラブガラスは 3. 3 節で示した設計と同じ設計とし、前段のマルチパス増幅と後段のダブルパス増幅は上下方向に空間を変えて 1 台のジグザグスラブ型増幅器により行うこととする。また、後段ダブルパスにおいても偏光素子の使用を避けるため、スラブガラスへの入射角をずらすことにより往路と復路で光軸をかえて使用する。主増幅部のシステム全体概要と必要となる光学素子の一覧を図 4. 2 に示す。入力光をまず平凹-平凸レンズペア (図中番号: 1, 2) により拡大し、周辺をのこぎり状に切り取ったアパーチャ (serrated aperture) (3) により 1 cm 角に切り出す。アパーチャ (3) での像 (像点 A) はマルチパスキャビティー (13~16) 内のエンドミラー (13, 像点 B) へ VSF1 により像転送し、更にマルチパスの間は VSF2 により両端のエンドミラー (13, 16) を像点 (C) として像転送を繰り返すことにより、回折による波面の崩れを防ぐ。マルチパス増幅し取り出したレーザー光は像点 D に像転送され、ペリスコープ (19) により上下方向の高さを変えた後、平凸シリンドリカルレンズペア (20, 21) により 1 cm x 9 cm に拡大する。ここでも VSF3 により像点 E へ像転送を行いつつ、再びジグザグスラブ型増幅器上段に導入する。この際入射角を 31. 2° としスラブ内で 6 回反射させる。出射したビームはミラー (26, 27) により折り返し、今度は入射角 45° でジグザグスラブ型増幅器へ入射させて出力する。フラッシュランプの配線等に必要な空間的なクリアランスを考慮し、前段マルチパスは光学定盤から 178 mm (~7 インチ) の高さを、後段ダブルパスは 238 mm の高さをそれぞれ中心とする。

##### 4. 3. 2 ジグザグスラブ

本システムで使用するジグザグスラブには 3. 3 節で行った、端面 45° カットのブリュースター仕様の設計を適用する。この設計ではスラブ軸と同軸 (入射角 45°) でレーザー光を入射した場合、スラブ中で 4 回反射し出射する (図 3. 5 参照)。また、入射角を 31. 2° とすることによりスラブ中で 6 回反射させることができる。前段マルチパス増幅 (1 cm x 1 cm) と後段ダブルパス増幅 (1 cm x 9 cm) の復路は 45° 入射を用い、後段の往路は 31. 2°

入射を利用する（図 4.2 参照）。前段、後段を 1 台のスラブ型増幅器で行うため、上下、及びビーム間に 10 mm のクリアランスを設けるとしてスラブガラスの高さは 130 mm とする。図 4.3 にスラブガラスの仕様を示す。図中には幅 1 cm のレーザー光が 6 回反射する場合の光路を併せて示している。（4 回反射の場合は図 3.5 参照）

#### 4. 3. 3 フラッシュランプ

フラッシュランプは、試作器同様キセノン圧 450 Torr のものを使用するとする。ここで、高さ 130 mm のスラブガラスを一様に照射するためアーク長を 150 mm とする。これに伴い、試作器でもちいたフラッシュランプとインピーダンスを揃えるためにボア径は 12 mm とする。壁材には紫外線吸収効果のあるセリウムドープクォーツを採用し、レーザーガラスの余分な発熱を抑える。また、電源は 0.1 Hz 動作に対応できるよう最大出力電力 10 kW のものが必要となる。

#### 4. 3. 4 ハウジング

スラブガラス、及びフラッシュランプを保持する水冷式ハウジングの設計図を図 4.4 に示す。フラッシュランプまでを含めたサイズは約 15 cm (W) x 27 cm (L) x 36 cm (H) である。スラブガラス保持部とフラッシュランプ保持部は独立な構造とし、フラッシュランプ保持部を交換することにより、フラッシュランプの配置が変更できるよう工夫している。また、ハウジング内部に冷却水の淀み点が生じることでスラブの冷却能率が落ちることのないように、スラブの両側の冷却水路は完全な別系統としている。更に、フラッシュランプ用高圧ケーブルとハウジングは電氣的に独立させ、またハウジングと光学定盤の間にも絶縁体を配することで安全面に配慮している。

#### 4. 4 パルス圧縮器

主増幅部より出力された 1 cm x 9 cm のレーザービームはシリンドリカルレンズを組み合わせた像転送系により 3 cm x 3 cm に整形しパルス圧縮器まで像転送を行う。回折格子の損傷しきい値を考慮し、8 cm x 8 cm へビームサイズを拡大した上でパルス圧縮器へ入力し、パルス幅 1~30 ps にパルス圧縮した後、軸外し放物面鏡によりターゲット上に線集光する。パルス圧縮器では回折格子上を 4 回反射させてパルス圧縮を行う。回折格子は既存のパルス圧縮器と同等のグルーブ数 1740 本/mm のものを使用する。ここで既存のパルス圧縮器では回折格子を全て真空容器中に保持しているのに対し、今回のシステムではパルス圧縮によりレーザー強度（単位：W/cm<sup>2</sup>）の高くなる最終段のみを真空容器中におくことでシステムのコンパクト化を図る。OPCPA、及びジグザグスラブ型増幅器により増幅されたレーザー光を用いたパルス圧縮性能、及び集光性能の評価が今後明らかにすべき課題である。



#### 4.5 まとめ

高繰り返し軟X線レーザー用のドライバーレーザーとして、前段増幅部に OPCPA、主増幅部にジグザグスラブ型増幅器を採用したシステムの設計を行った。このシステムにより、出力 15 J のコントラストの高いレーザー光を 0.1 Hz の繰り返しで発生させることができる。また、パルス圧縮器では最終段の回折格子のみを真空容器中に保持することでシステムのコンパクト化を図る。これにより、従来 20 分に 1 ショット程度しか発生させられなかった軟X線レーザーを 0.1 Hz で発生させられる上、システム全体がコンパクトになることから、軟X線レーザーの利用・応用実験を強力に推し進めることができると期待される。

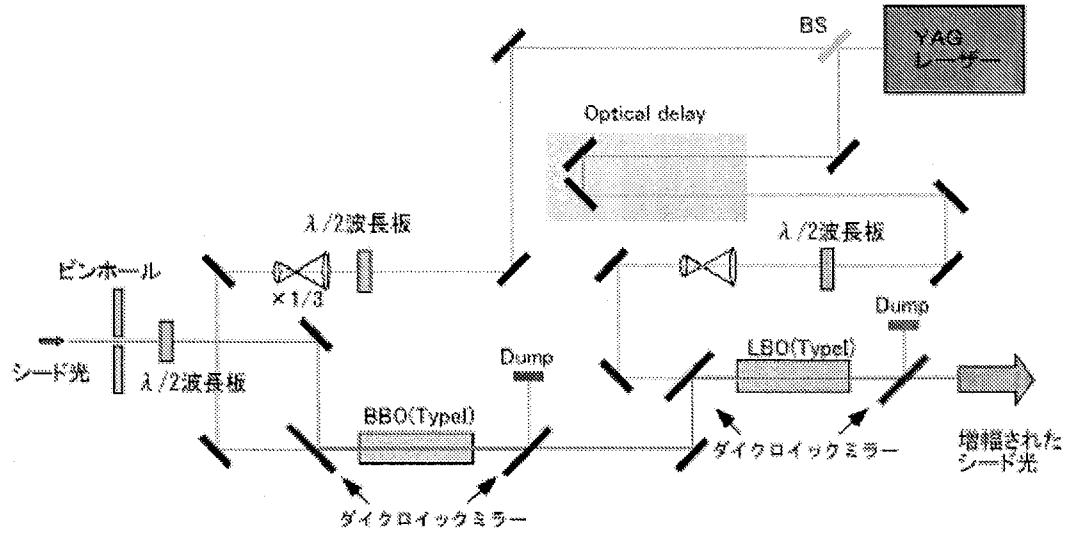
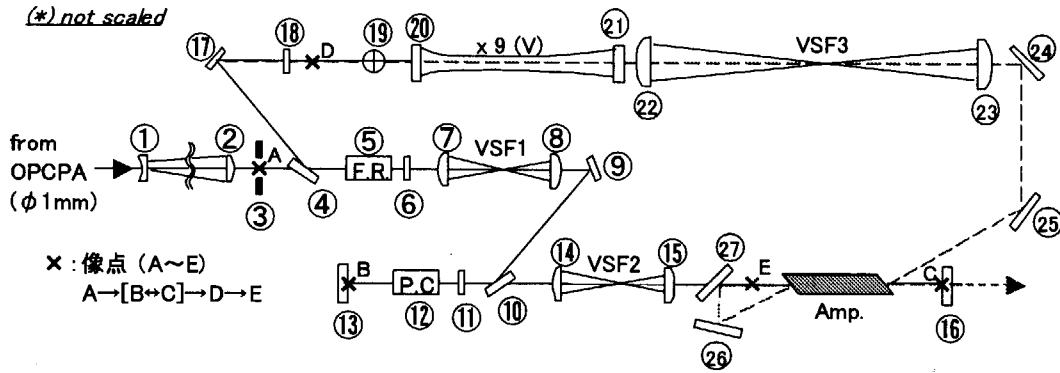


図 4.1 OPCPA システム構成



|    |                        |    |                          |
|----|------------------------|----|--------------------------|
| 1  | 平凹レンズ (f=-100)         | 16 | ミラー (0° 入射)              |
| 2  | 平凸レンズ (f=1500)         | 17 | ミラー (34° 入射, S偏光)        |
| 3  | ソフトアパーチャー (1 cm x1 cm) | 18 | λ/2波長板                   |
| 4  | 偏光子                    | 19 | ペリスコープ                   |
| 5  | ファラデー回転子               | 20 | 平凸シリンドリカルレンズ (f=130)     |
| 6  | λ/2波長板                 | 21 | 平凸シリンドリカルレンズ (f=1170)    |
| 7  | 平凸レンズ (f=750)          | 22 | 平凸シリンドリカルレンズ (f=1500)    |
| 8  | 平凸レンズ (f=750)          | 23 | 平凸シリンドリカルレンズ (f=1500)    |
| 9  | ミラー (34° 入射, S偏光)      | 24 | 25x120 ミラー (45° 入射, P偏光) |
| 10 | 偏光子                    | 25 | 25x120 ミラー (52° 入射, P偏光) |
| 11 | λ/4波長板                 | 26 | 25x120 ミラー (38° 入射, P偏光) |
| 12 | ポッケルスセル                | 27 | 25x120 ミラー (45° 入射, P偏光) |
| 13 | ミラー (0° 入射)            |    |                          |
| 14 | 平凸レンズ (f=750)          |    |                          |
| 15 | 平凸レンズ (f=750)          |    |                          |

図 4.2 主増幅部(ジグザグスラブアンプ)のシステム概要

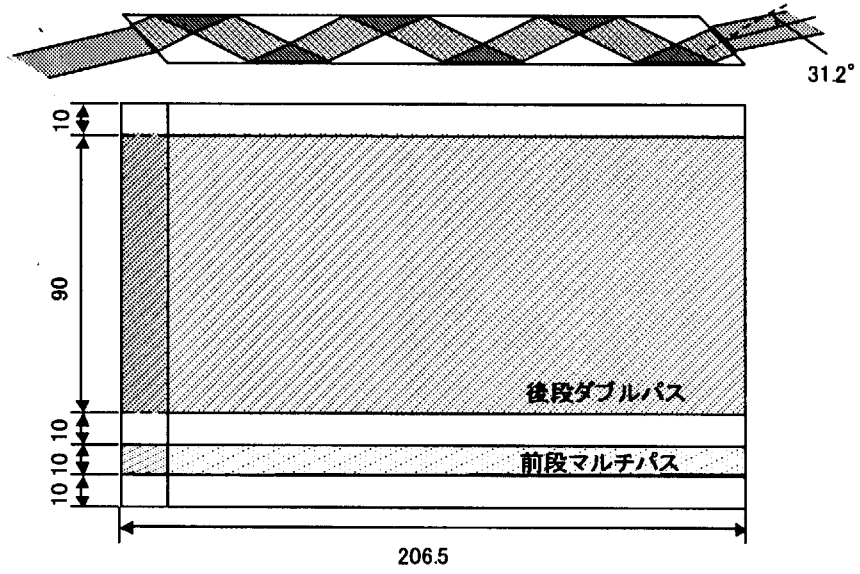


図 4.3 ジグザグスラブポンプの仕様 (単位は mm)

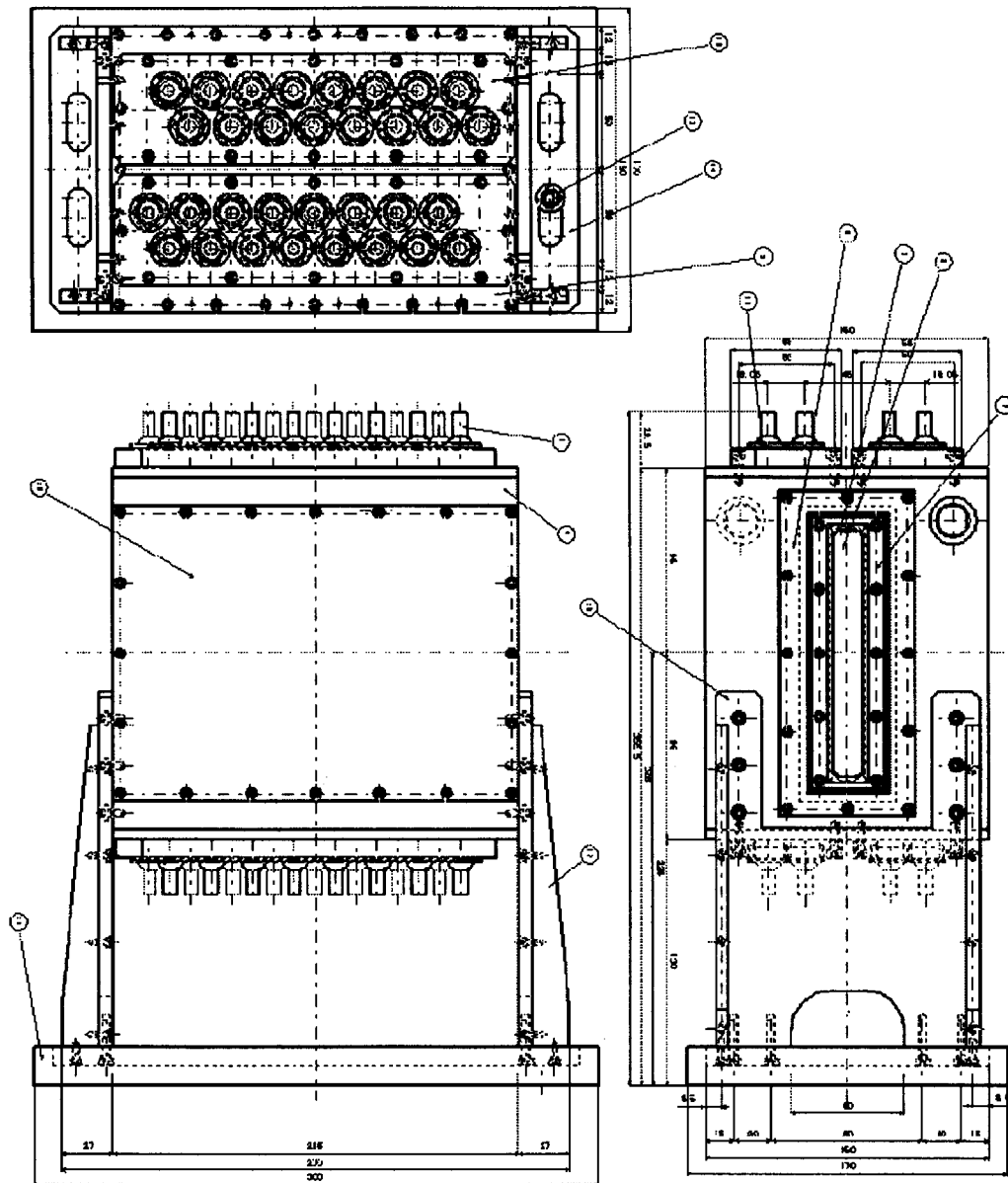


図 4.4 ジグザグスラブ型増幅器ハウジングの設計図

## 5. 結論

原研において開発に成功した軟X線レーザーの利用・応用研究への展開を図るため、繰返し頻度 0.1 Hz の高繰返しドライバーレーザーシステムの設計を行った。前段増幅部にはパルス制御性にすぐれた OPCPA を、また主増幅部には放熱効率にすぐれたジグザグスラブ型増幅器を採用した。それぞれについて試作器を製作し、増幅性能評価を行った。OPCPA では 1 個の非線形結晶 (BBO) により 1500 倍の増幅が得られることを明らかにした (2 章)。この結果から、2 個の非線形結晶を用い二段階の増幅を行うことにより  $10^6$  の増幅が見込まれ、数 nJ の入力光を数 mJ まで増幅することが可能である。更に、OPCPA を用いることによりコントラストの高い増幅レーザー光が得られることを明らかにした。また、ジグザグスラブ型増幅器ではシングルパスにおいて最大 3.0 倍、マルチパスにおいて 1 往復で 12.9 倍、2 往復で 171 倍の増幅を確認した。得られた小信号利得から、ジグザグスラブ中の蓄積エネルギー密度が  $0.2 \text{ J/cm}^2$  以上あり、軟X線レーザー発振に必要な励起エネルギー 15 J (パルス圧縮前) を取り出す能力を有していることを明らかにした (3 章)。以上の結果から、今回試作した OPCPA、及びジグザグスラブ型増幅器は軟X線レーザーの高繰返しドライバーレーザーに適していると結論し、システムの最終設計を行った (4 章)。このコンパクトな高繰返しドライバーレーザーを用いることにより、極めて空間コヒーレンスの高い軟X線レーザーを 0.1 Hz で発生させることが可能となり、軟X線レーザーを用いた利用・応用研究に新たな展開がもたらされることが期待できる。

## 謝 辞

今回試作した軟X線レーザー発生用の高繰返しドライバーレーザーの製作にあたり、(株) 浜松ホトニクス の川嶋 利幸 博士、松本 修 氏よりジグザグスラブ型増幅器の設計、製作に関して、また大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの吉田 英次 博士、石井 絵里奈 氏より OPCPA の設計、製作に関して有益な御助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。また本研究の遂行にあたり数々のサポートして頂いた田中 桃子 氏、錦野 将元 博士、川染 勇人 博士、並河 一道 教授、加藤 義章 原研理事、田島 俊樹 関西研究所長、木村 豊秋 光量子科学研究センター長、長島 章 光量子科学研究センター次長に感謝いたします。

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

| 量     | 名称     | 記号  |
|-------|--------|-----|
| 長さ    | メートル   | m   |
| 質量    | キログラム  | kg  |
| 時間    | 秒      | s   |
| 電流    | アンペア   | A   |
| 熱力学温度 | ケルビン   | K   |
| 物質質量  | モル     | mol |
| 光度    | カンデラ   | cd  |
| 平面角   | ラジアン   | rad |
| 立体角   | ステラジアン | sr  |

表3 固有の名称をもつSI組立単位

| 量             | 名称     | 記号 | 他のSI単位による表現         |
|---------------|--------|----|---------------------|
| 周波数           | ヘルツ    | Hz | s <sup>-1</sup>     |
| 力             | ニュートン  | N  | m·kg/s <sup>2</sup> |
| 圧力, 応力        | パスカル   | Pa | N/m <sup>2</sup>    |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | ジュール   | J  | N·m                 |
| 工率, 放射束       | ワット    | W  | J/s                 |
| 電気量, 電荷       | クーロン   | C  | A·s                 |
| 電位, 電圧, 起電力   | ボルト    | V  | W/A                 |
| 静電容量          | ファラド   | F  | C/V                 |
| 電気抵抗          | オーム    | Ω  | V/A                 |
| コンダクタンス       | ジーメン   | S  | A/V                 |
| 磁束            | ウェーバ   | Wb | V·s                 |
| 磁束密度          | テスラ    | T  | Wb/m <sup>2</sup>   |
| インダクタンス       | ヘンリー   | H  | Wb/A                |
| セルシウス温度       | セルシウス度 | °C |                     |
| 光度            | ルーメン   | lm | cd·sr               |
| 照射線量          | ベクレル   | Bq | s <sup>-1</sup>     |
| 吸収線量          | グレイ    | Gy | J/kg                |
| 線量当量          | シーベルト  | Sv | J/kg                |

表2 SIと併用される単位

| 名称      | 記号        |
|---------|-----------|
| 分, 時, 日 | min, h, d |
| 度, 分, 秒 | °, ', "   |
| リットル    | l, L      |
| トン      | t         |
| 電子ボルト   | eV        |
| 原子質量単位  | u         |

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

| 名称       | 記号  |
|----------|-----|
| オングストローム | Å   |
| バーン      | b   |
| バル       | bar |
| ガリ       | Gal |
| キュリー     | Ci  |
| レントゲン    | R   |
| ラド       | rad |
| レム       | rem |

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

| 倍数                | 接頭語  | 記号 |
|-------------------|------|----|
| 10 <sup>18</sup>  | エクサ  | E  |
| 10 <sup>15</sup>  | ペタ   | P  |
| 10 <sup>12</sup>  | テラ   | T  |
| 10 <sup>9</sup>   | ギガ   | G  |
| 10 <sup>6</sup>   | メガ   | M  |
| 10 <sup>3</sup>   | キロ   | k  |
| 10 <sup>2</sup>   | ヘクト  | h  |
| 10 <sup>1</sup>   | デカ   | da |
| 10 <sup>-1</sup>  | デシ   | d  |
| 10 <sup>-2</sup>  | センチ  | c  |
| 10 <sup>-3</sup>  | ミリ   | m  |
| 10 <sup>-6</sup>  | マイクロ | μ  |
| 10 <sup>-9</sup>  | ナノ   | n  |
| 10 <sup>-12</sup> | ピコ   | p  |
| 10 <sup>-15</sup> | フェムト | f  |
| 10 <sup>-18</sup> | アト   | a  |

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHg を表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

| 力 | N (=10 <sup>5</sup> dyn) | kgf      | lbf      |
|---|--------------------------|----------|----------|
|   | 1                        | 0.101972 | 0.224809 |
|   | 9.80665                  | 1        | 2.20462  |
|   | 4.44822                  | 0.453592 | 1        |

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

| 圧 | MPa (=10 bar)              | kgf/cm <sup>2</sup>        | atm                        | mmHg (Torr)               | lbf/in <sup>2</sup> (psi)  |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
|   | 1                          | 10.1972                    | 9.86923                    | 7.50062 × 10 <sup>3</sup> | 145.038                    |
| 力 | 0.0980665                  | 1                          | 0.967841                   | 735.559                   | 14.2233                    |
|   | 0.101325                   | 1.03323                    | 1                          | 760                       | 14.6959                    |
|   | 1.33322 × 10 <sup>-4</sup> | 1.35951 × 10 <sup>-3</sup> | 1.31579 × 10 <sup>-3</sup> | 1                         | 1.93368 × 10 <sup>-2</sup> |
|   | 6.89476 × 10 <sup>-3</sup> | 7.03070 × 10 <sup>-2</sup> | 6.80460 × 10 <sup>-2</sup> | 51.7149                   | 1                          |

| エネルギー・仕事・熱量 | J (=10 <sup>7</sup> erg)    | kgf·m                       | kW·h                        | cal (計量法)                   | Btu                         | ft·lbf                      | eV                         |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|             | 1                           | 0.101972                    | 2.77778 × 10 <sup>-7</sup>  | 0.238889                    | 9.47813 × 10 <sup>-4</sup>  | 0.737562                    | 6.24150 × 10 <sup>18</sup> |
|             | 9.80665                     | 1                           | 2.72407 × 10 <sup>-6</sup>  | 2.34270                     | 9.29487 × 10 <sup>-3</sup>  | 7.23301                     | 6.12082 × 10 <sup>19</sup> |
|             | 3.6 × 10 <sup>6</sup>       | 3.67098 × 10 <sup>5</sup>   | 1                           | 8.59999 × 10 <sup>5</sup>   | 3412.13                     | 2.65522 × 10 <sup>6</sup>   | 2.24694 × 10 <sup>25</sup> |
|             | 4.18605                     | 0.426858                    | 1.16279 × 10 <sup>-6</sup>  | 1                           | 3.96759 × 10 <sup>-3</sup>  | 3.08747                     | 2.61272 × 10 <sup>19</sup> |
|             | 1055.06                     | 107.586                     | 2.93072 × 10 <sup>-4</sup>  | 252.042                     | 1                           | 778.172                     | 6.58515 × 10 <sup>21</sup> |
|             | 1.35582                     | 0.138255                    | 3.76616 × 10 <sup>-7</sup>  | 0.323890                    | 1.28506 × 10 <sup>-3</sup>  | 1                           | 8.46233 × 10 <sup>18</sup> |
|             | 1.60218 × 10 <sup>-19</sup> | 1.63377 × 10 <sup>-20</sup> | 4.45050 × 10 <sup>-26</sup> | 3.82743 × 10 <sup>-20</sup> | 1.51857 × 10 <sup>-22</sup> | 1.18171 × 10 <sup>-19</sup> | 1                          |

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
= 4.184 J (熱化学)  
= 4.1855 J (15 °C)  
= 4.1868 J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS (仏馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499 W

| 放射能 | Bq                     | Ci                          |
|-----|------------------------|-----------------------------|
|     | 1                      | 2.70270 × 10 <sup>-11</sup> |
|     | 3.7 × 10 <sup>10</sup> | 1                           |

| 吸収線量 | Gy   | rad |
|------|------|-----|
|      | 1    | 100 |
|      | 0.01 | 1   |

| 照射線量 | C/kg                    | R    |
|------|-------------------------|------|
|      | 1                       | 3876 |
|      | 2.58 × 10 <sup>-4</sup> | 1    |

| 線量当量 | Sv   | rem |
|------|------|-----|
|      | 1    | 100 |
|      | 0.01 | 1   |

高線り返し軟X線レーザー開発用ドライバレーザーの設計と要素性能の評価

**R100**

古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています