

< 1 > 超高密度フォトン利用実証レーザーシステムの開発

< 1 - 1 > LD を用いた高強度フェムト秒レーザーの開発

サブテーマリーダー：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 岡田康光

< 1 - 1 - b > フェムト秒レーザーの開発

小テーマ： チタンサファイアレーザーAの開発 (フェーズ)

研究従事者：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究員 松岡伸一、中野文彦、吉井健裕、佐藤方俊、玉置善紀、伊山功一、加藤義則

(1) 研究の概要、新規性及び目標

研究の概要

レーザーA(ピーク出力 1TW、繰り返し周波数 10Hz、パルス幅 100fs、パルスエネルギー100mJ) の開発を行った。目標値を達成する為にパルス伸長器でパルス幅を広げた後、再生増幅器、主増幅器の 2 台の増幅器を用い増幅を行い、パルス圧縮器を用いてパルスの再圧縮を行った。

研究の独自性・新規性

励起光源として、LD を使用し、レーザーシステム全体を固体で構成する。

研究の目標

ピーク出力 1TW、繰り返し 10Hz のチタンサファイアレーザーシステムの開発。

(2) 研究の進め方及び進捗状況

1.はじめに

本小テーマでは、サブテーマ<1.1.b>フェムト秒 YAG レーザーの開発において、レーザーA (ピーク出力 1TW、繰り返し周波数 10Hz、パルス幅 100fs、パルスエネルギー100mJ) の開発について記述する。

Table Top サイズで、10Hz での繰り返し動作が可能であり、極短パルス・高ピーク出力である DPSSL(Diode-Pumped-Solid-State-Laser)励起 Ti:Sapphire($Ti:Al_2O_3$) レーザーの開発(図 1) を行った。これら極短パルス、高ピーク出力レーザーは、固体や気体中に集光照射することで、OFI(Optical-Field-Ionization)により瞬時にイオン化がおりプラズマが生じる。このことを利用した様々な高エネルギービーム発生(イオン、電子、中性子)の基礎研究、高エネルギーイオンと核反応によりポジトロンエミッターを生成し、サイクロトロンに変わる PET(ポジトロン CT)用ドライバー、レーザープラズマ技術を利用した、癌治療用小型重イオンシンクロトロンの開発および非常に短いパルス光を利用した、熱の影響が無い無機、有機材料へのレーザー加工等に応用が期待できる。

本レーザーシステムの開発目標は、ピーク出力 1TW($TW=10^{12}W$)、パルス幅 100fs($fs=10^{-15}s$)繰り返し数 10Hz であり、従来のフラッシュランプ励起固体レーザーに変わって、半導体レーザー(LD)励起固体レーザーで励起している特徴を有する。フラッシュランプは発光スペクトルが紫外域から赤外域までの広範囲にわたっているため、固体レーザーの吸収スペクトルとの整合性が悪く、電気 光変換効率が悪化し、熱負荷も大きい。そこで、励起源を LD にすることによって、固体レーザーにおける特定の吸収スペクトルで発光できるため、電気 光変換効率も向上し、熱負荷が少なくなる。また、LD の特徴を生かした、高繰り返し動作化(~kHz)への発展の可能性を持つ。本報告書では、平成 15 年 2 月 18 日の時点での Ti:sapphire レーザーシステムの開発状況と、平成 17 年 2 月 22 日の時点で最

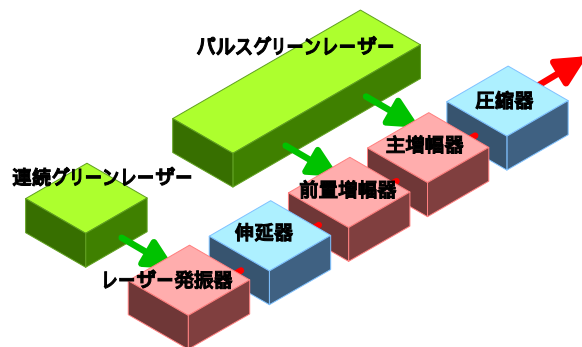


図 1 概略ブロック図

最終的に再構成した Ti:sapphire レーザーシステムの性能について報告する。

2.再構成前 Ti:sapphire レーザーシステム

図 2 に再構成前の Ti:sapphire レーザーシステムの概要図を示す。Ti:sapphire 発振器より出射したレーザー光をパルスストレッチャーにてチャープし、前置増幅器部および主増幅器部にて増幅する。Ti:sapphire 増幅器部の励起には 2 台の LD 励起グリーンレーザーを用いており、Ti:sapphire 結晶の励起に使用する総合のエネルギーは約 600mJ である。増幅後、パルスコンプレッサーにてパルス圧縮を行い、1TW・100fs・100mJ の超短パルス高強度レーザーを得ている。

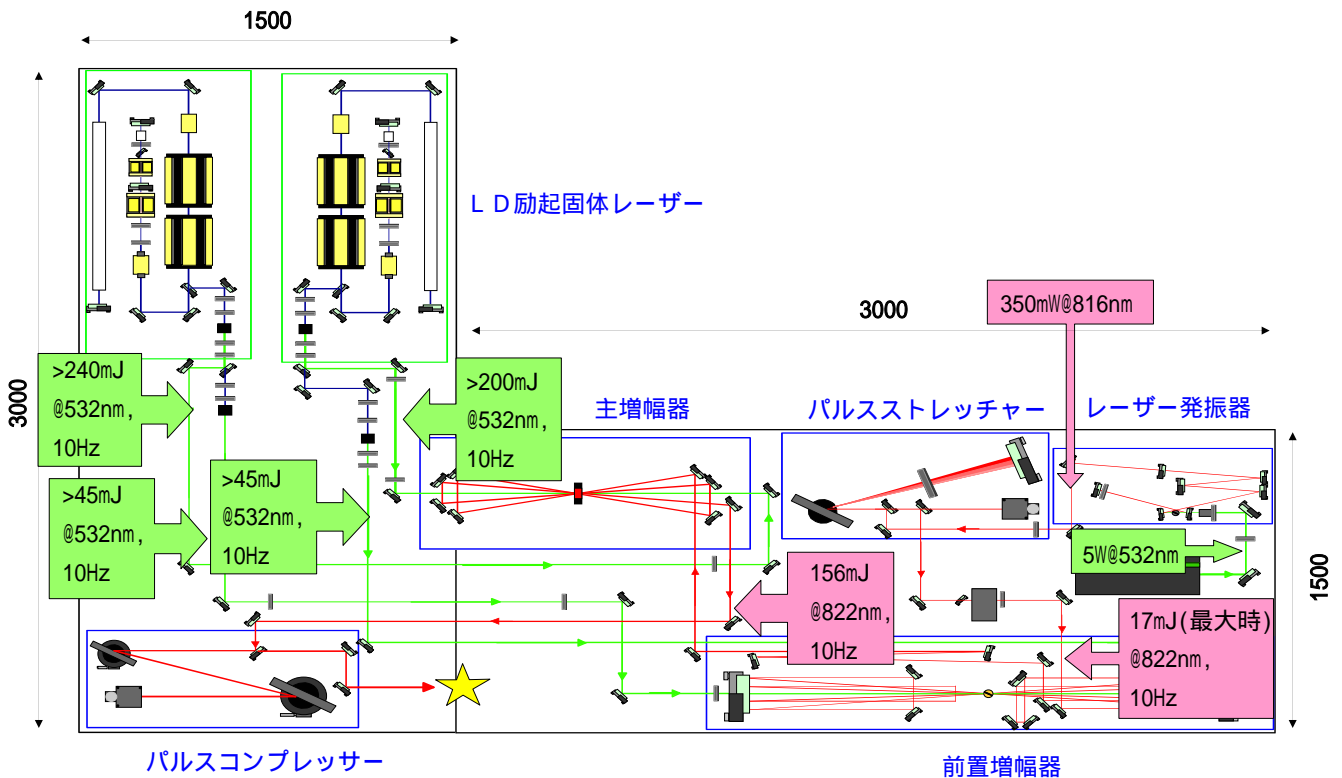


図 2 再構成前 Ti:sapphire レーザーシステム構成図

3.再構成前 Ti:sapphire 発振器の性能

分散補償素子としてチャープミラーを用いた Ti:sapphire 発振器の開発を行った。構成図を図 3 に示す。励起源には市販の CW グリーンレーザー (Verdi 5.0 coherent 社製) を用いており、励起エネルギーは 4W に設定している。リアミラーに機械的振動を与えることにより、370mW の自己モードロック発振が確認できた。図 4 にスペクトル波形を示し、図 5 にその際のパルス波形を示す。性能としては、目標としている 1TW・100fs・100mJ を達成するのに十分なスペックを有していると考えられる。

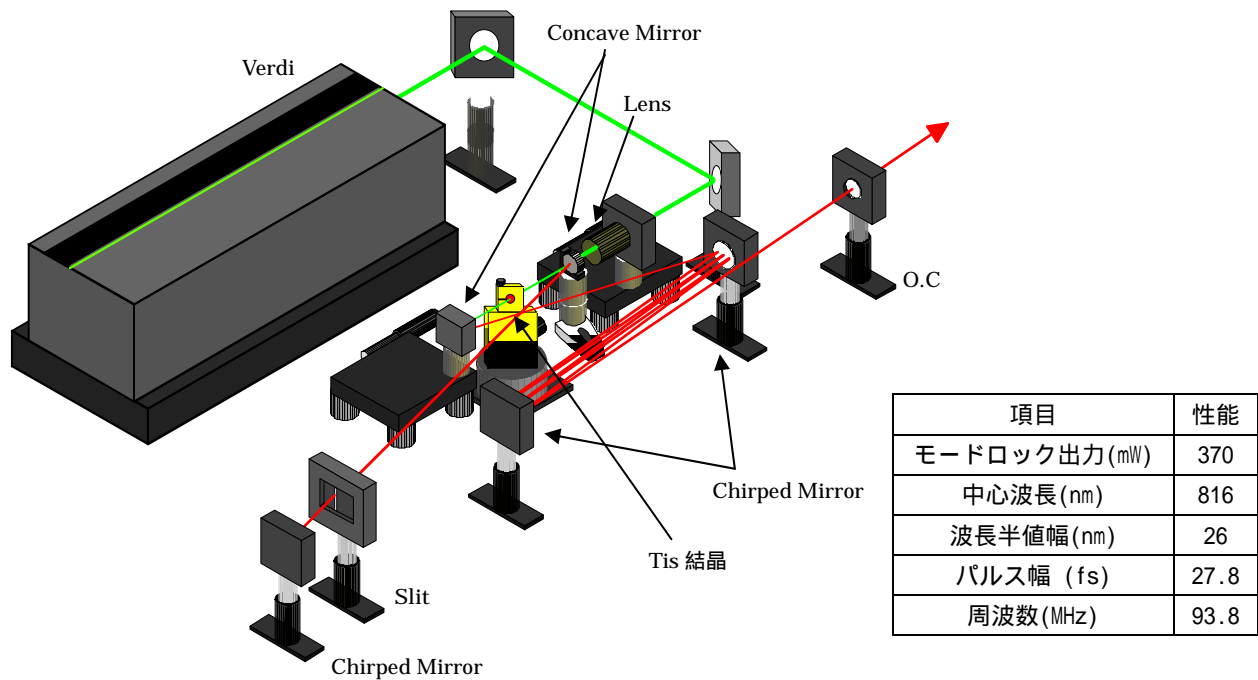


図3 発振器構成図

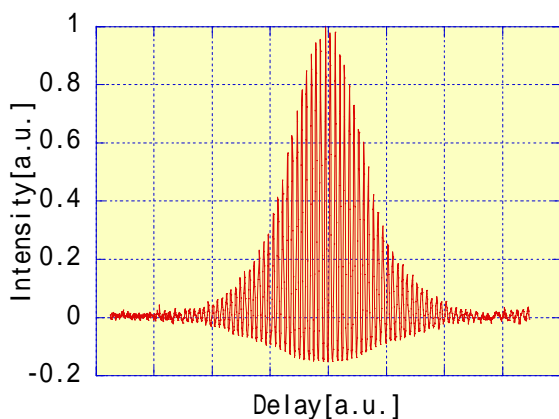


図4 パルス波形

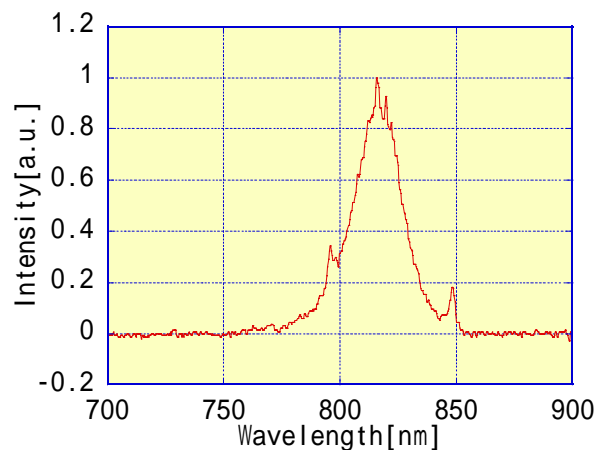


図5 スペクトル波形

4.再構成前パルスストレッチャー

再構成前のパルス伸延用パルスストレッチャーの全体構成図を図6に示す。レーザー光の分散素子として2000本/mmの金コートの回折格子を使用しており、像転送用レンズには $f=+500\text{mm}$ のアクロマートレンズを使用している。アクロマートレンズの焦点位置に800nm用誘電体ミラーを配置し、折り返す事でアクロマートレンズと回折格子をそれぞれ1つで構成出来る様にしている。今回構成したパルスストレッチャーは、チタンサファイアレーザー光を450ps~500psまでパルス伸延する様に構成している。

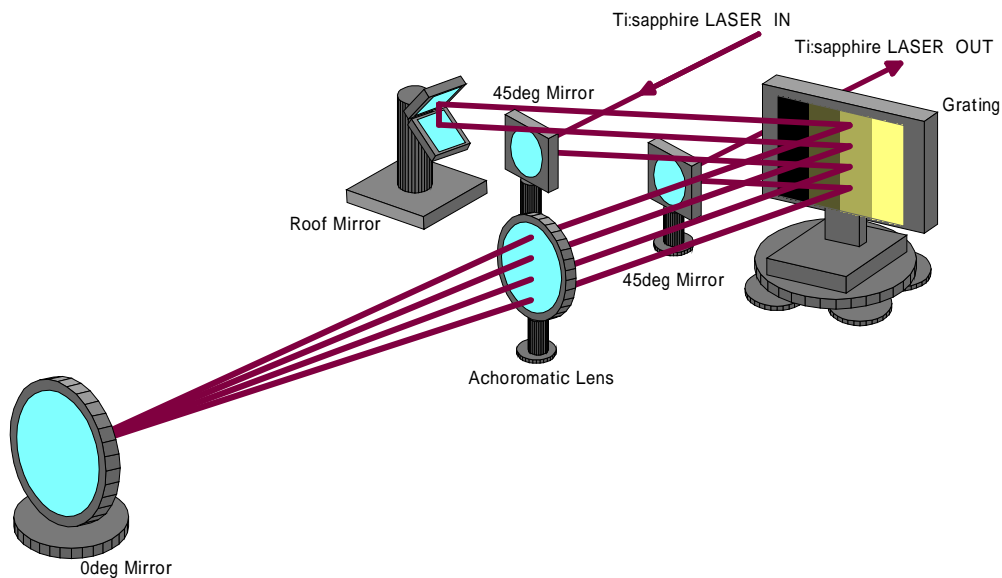


図6 パルスストレッチャーの全体構成図

自己モード同期フェムト秒発振器のレーザーパルスのスペクトル波形は半値幅で約 27nm となっており、パルス波形の半値幅は約 30fs になっている。

スペクトル幅が広い分、回折格子による分散も広い為、アクロマートレンズや、折り返しミラーで光を受けきれない事が予想される。その為、パルスストレッチャー入射前・出射後のスペクトル波形の変化およびビームパターンについて、測定と評価を行った。パルスストレッチャー入射前・出射後のスペクトル波形は図7に示し、ビームパターンは図8に示す。

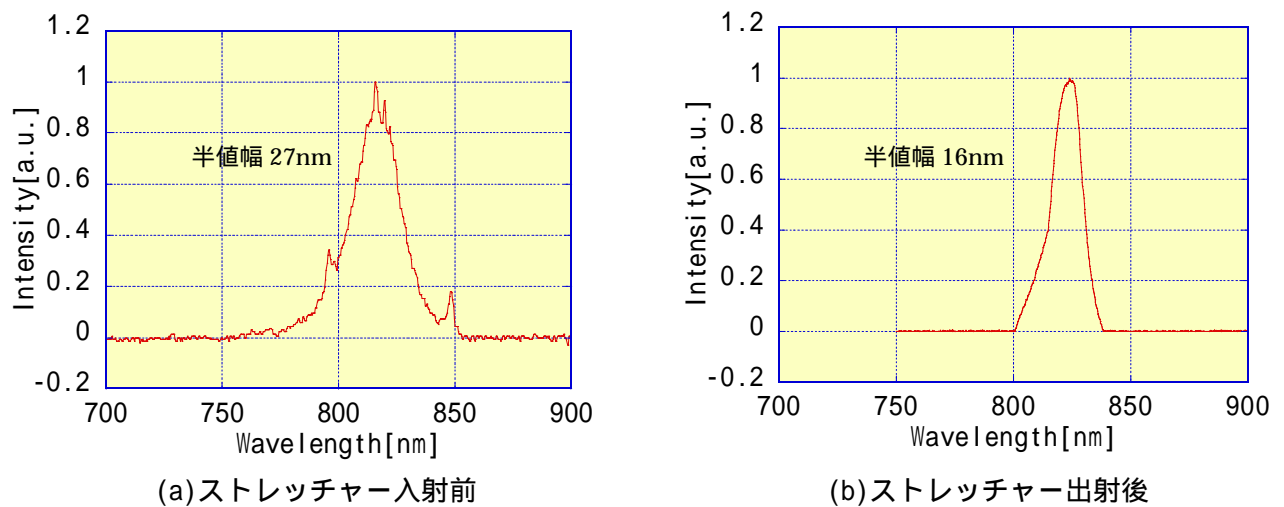
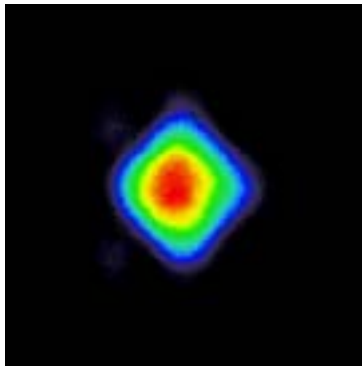
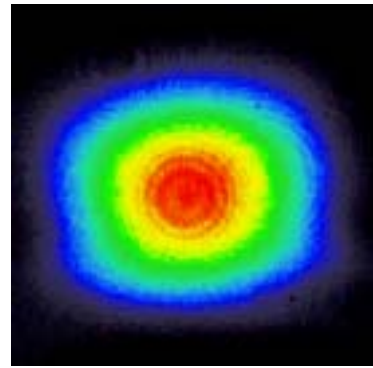


図7 パルスストレッチャー入射前・出射後のスペクトル波形



(a) ストレッチャー入射前



(b) ストレッチャー出射後

図8 パルスストレッチャー入射前・出射後の近視野像

パルスストレッチャー入射前は27nmあったスペクトル半値幅が、出射後は16nmに減少してしまっているのが分かる。これにより、パルスコンプレッサーにてパルスを圧縮した際、パルス波形の半値幅は最短で約50fsとなることが予想される。予定している100fsのスペックはクリアしているので問題はないが、より短パルス化を狙うのであれば、パルスストレッチャーを構成し直す必要があると考えられる。

また、ビームの近視野像はパルスストレッチャー入射前と比較して、出射後は広がっているのが分かる。これは、ビーム自体の拡がり角によって生じており、パルスストレッチャーに問題はないと思われる。

5. 再構成前 Ti:sapphire 前置増幅器の開発

Ti:sapphire 結晶は、有機色素に比べ飽和フルエンスが高く、利得帯域幅も大きいいため、短パルス光の増幅に適している。短パルス光を増幅するには、主に再生増幅器と多重増幅器2種類の増幅器に大別される。再生増幅器は、モード同期レーザーの1パルスを再生増幅器内の共振器に取り込み、周回させた後ポッケルスセルを用いて取り出す方法である。再生増幅器の最大の利点は、エネルギーの取り出し効率が大きいことである。また、多重増幅器は、多重光路を形成した増幅である。エネルギーの取り出しは、再生増幅器よりは劣るが、タイミング制御の容易なことが利点となる。

ここでは、反射光学系を利用した、共焦点多重光路増幅法を用いて、増幅特性を評価した結果を述べる。最終的にピーク出力1TWを目標としているので、 10^7 倍以上の増幅が必要となる。

Ti:sapphire 前置増幅器の設計において Franz-Nodvik モデルを用いて多重パス(4パス)増幅計算を行った。計算に用いたパラメータを以下に示す。ここで、励起ビーム直径及び増幅ビーム直径は実測値を基に設定した。

励起レーザー波長：532nm

増幅レーザー波長：800nm

Ti:Sapphire 結晶での励起ビーム直径：1mm (ビームパターンはフラットトップを仮定)

Ti:Sapphire 結晶での増幅ビーム直径：0.5mm (ビームパターンはフラットトップを仮定)

Ti:Sapphire 結晶での励起光吸収効率：95%

入力パルスエネルギー：0.5nJ

パス間の透過率：95% (仮定)

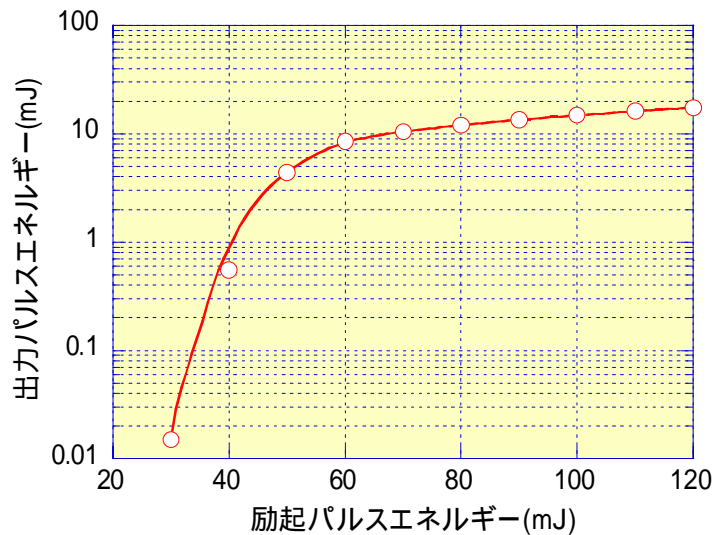


図9 4パス増幅後の出力パルスエネルギーの計算結果

図9は励起パルスエネルギーに対する4パス増幅後の出力パルスエネルギーの計算結果を示す。励起パルスエネルギーが100mJと120mJの場合、出力パルスエネルギーはそれぞれ14.5mJと17.5mJ程度であることが予測される。これらの計算結果は後で述べる実験結果と比べてほぼ一致した。尚、励起エネルギー100mJの場合、励起フルエンスは $12.7\text{J}/\text{cm}^2$ となり、1パス目の小信号利得は8660倍となり非常に高利得条件であることが分かる。

6. Ti:sapphire 前置増幅器の構成

図10はTi:sapphire前置増幅器の構成を示す。この前置増幅器は、共焦点位置(間隔2m)に設置した2枚の曲率半径2mの凹面ミラー、焦点位置に設置したTi:sapphire結晶(直径6mm、長さ20mm、励起光吸収効率~95%)及びステアリングミラーから構成されている。励起レーザー光は、結晶の両側から焦点距離1mのレンズを通過した後、凹面ミラーの中心に施した穴を通して結晶に照射される。フェムト秒レーザー発振器からのレーザーパルスは、パルスストレッチャーでパルス幅を伸張された後、パルススライサー部において繰り返し周波数を(87MHzから)10Hzに設定される。その後、前置増幅器に導入され、Ti:sapphire結晶を4回通過して、エネルギー増幅される。前置増幅器においては高利得増幅を達成するため、励起フルエンスが高く設定する必要がある。この条件では、Ti:sapphire結晶表面で高いダメージ閾値が要求されるため、結晶表面における反射防止コーティングは施さず、ブリュースターカットを施したものをを用いた。凹面ミラーの焦点位置に結晶が設置されているため、結晶上でのビームパターンは遠視野像となるとともに、結晶上のパターンは次のパスの結晶上へ像転送される構成となっている。

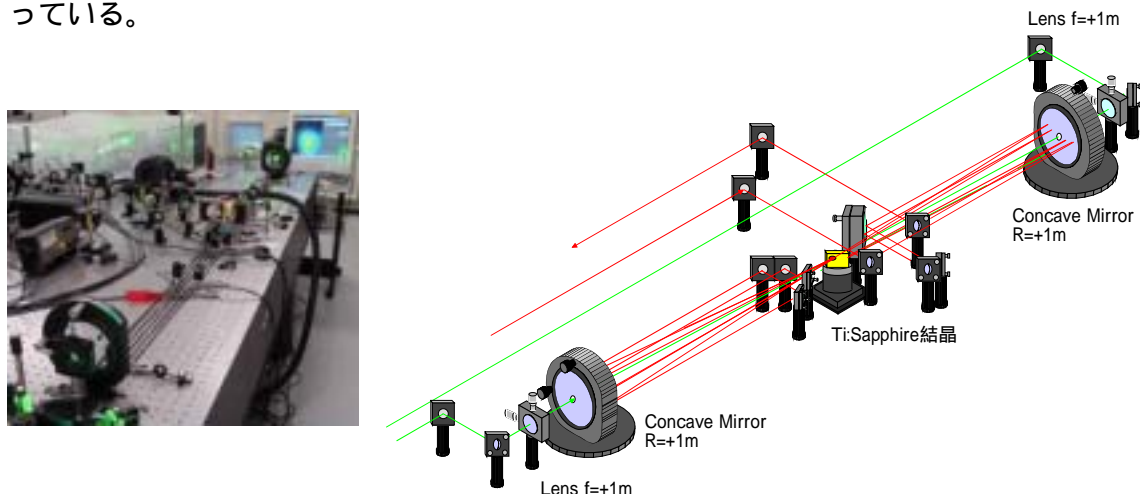


図10 前置増幅器の配置

7. Ti:sapphire 前置増幅器の増幅特性

図 11 に Ti:sapphire 前置増幅器の励起パルスエネルギーに対する利得特性を示す。励起パルスエネルギーの低い領域 (60mJ 以下) では、利得は励起パルスエネルギーに対して指数関数的に増加したが、励起パルスエネルギーの高い領域 (80mJ 以上) では、線形的な増加を示した。この線形的な増加傾向を示す領域は飽和増幅領域であり、この領域では増幅したレーザー光の出力安定性に関しても良い特性を示すことが推測できる。ここで、励起パルスエネルギーが 117mJ の時、利得 10^7 以上を達成し、このときの出力パルスエネルギーは 17mJ であった。この 10^7 以上の利得は比較的高い値であり、この理由として、励起ビーム径 (約 1mm) と増幅ビーム径 (1 パス目入射は約 1mm、4 パス目入射は約 0.5mm) をなるべく合わせてビーム結合効率を大きくしたことと、励起ビームパターンがガウス分布に近い良いパターンであったことに起因していると考えられる。1 パス目入射と比べて 4 パス目入射の増幅ビーム径が小さくなっているのは、利得の高い部分が強調されたことが原因である。この結晶位置即ち遠視野でのビーム径の縮小効果は、空間フィルタリング効果として作用し、増幅された近視野での出力ビームパターンはガウス分布に近いものが得られた (図 12 参照)。

但し、この増幅実験においては、励起用の LD 励起 Nd:YAG パルスグリーンレーザーの主増幅部をダブルパス増幅させずにシングルパス増幅させた基本波レーザー光 (波長 1064nm、パルスエネルギー 250mJ) を波長変換した 2 倍波レーザー光 (波長 532nm、パルスエネルギー最大 117mJ) を励起光として用いた。

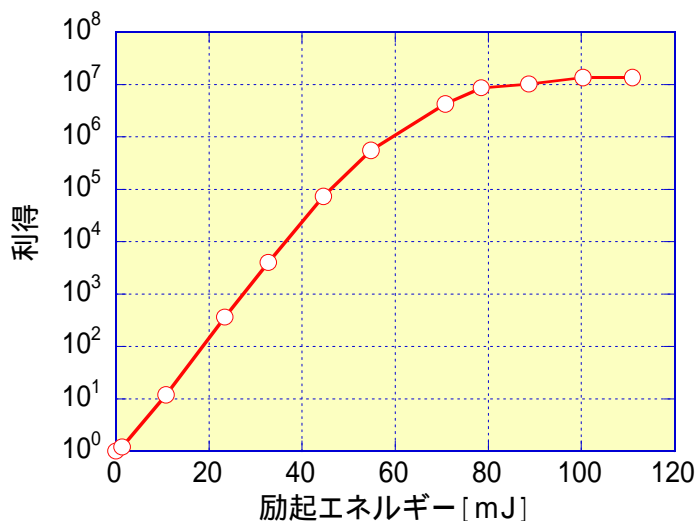


図 11 前置増幅器の励起パルスエネルギーに対する利得特性

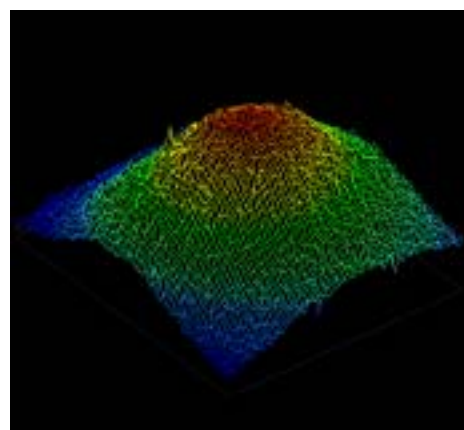


図 12 前置増幅器の増幅ビームパターンの 3 次元プロファイル

8. 再構成前 Ti:sapphire 主増幅器の開発

開発目標値であるピーク出力 1TW を達成するには、パルス幅 100fs、パルスコンプレッサーの透過率 63%を考慮すると、158mJ のパルスエネルギーが必要となる。

本章では、Ti:sapphire 前置増幅器で増幅されたパルスエネルギーを、さらに多重増幅法で増幅した結果を記述する。

前置増幅器と同様に Ti:sapphire 主増幅器の設計においても Franz-Nodvik モデルを用いて多重パス (4 パス) 増幅計算を行った。計算に用いたパラメータを以下に示す。

- 励起レーザー波長 : 532nm
- 増幅レーザー波長 : 800nm
- 励起パルスエネルギー : 450mJ
- Ti:Sapphire 結晶での励起ビーム直径 : 5mm (ビームパターンはフラットトップを仮定)
- ビーム結合効率 : 80% (仮定)

Ti:Sapphire 結晶での励起光吸収効率：90%
パス間の透過率：95% (仮定)

図 13 は励起パルスエネルギーに対する 1~4 パス増幅後の出力パルスエネルギーの計算結果を示す。この計算結果から、入力パルスエネルギーが約 5mJ 以上の場合、出力エネルギー180mJ 以上が得られることが分かる。しかし、後で示す実験結果と比較すると、計算結果の方が高い値を示した。これは、励起レーザー光と増幅レーザー光が同軸でないことによるビーム結合効率の低下や、Ti:sapphire の熱レンズ効果によって、ビームがパス毎に縮小することによるビーム結合効率の低下に依存していると考えられる。

尚、励起エネルギー450mJ の場合、励起フルエンスは $2.3\text{J}/\text{cm}^2$ となり、1 パス目の小信号利得は 2.7 倍となることが分かる。

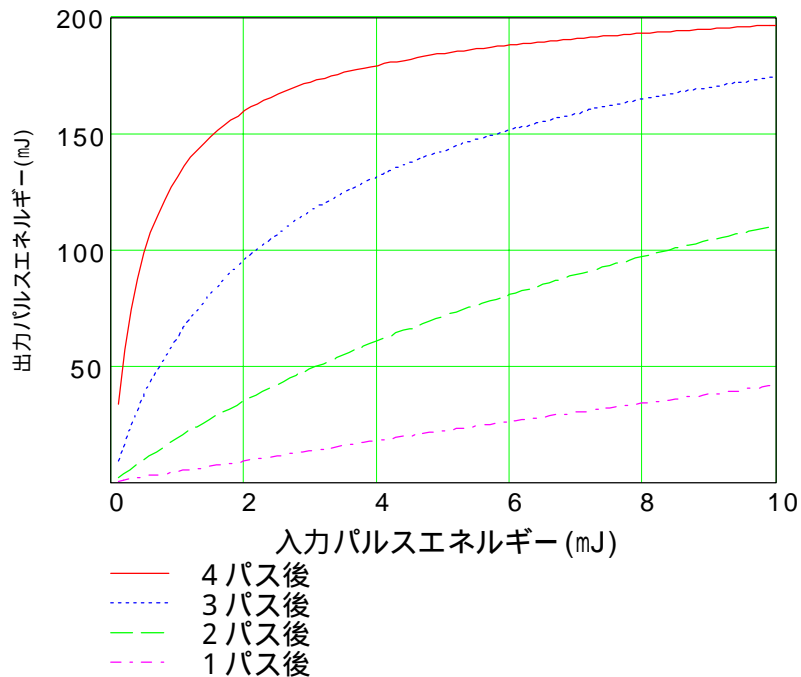


図 13 主増幅器の 4 パス増幅の計算結果

9. 主増幅器での増幅特性

Ti:sapphire 主増幅器は、垂直入射の広帯域反射防止膜付きの Ti:sapphire 結晶(直径 12mm、長さ 15mm、励起光吸収効率~90%)とステアリングミラーから構成されている(図 14 参照)。主増幅器では Ti:sapphire 結晶の両側から励起レーザーのパルスグリーン光が入射され、Ti:sapphire 前置増幅器において数 mJ ~ 十数 mJ 程度まで増幅されたレーザー光を入力レーザー光として、Ti:sapphire 結晶を 4 回通過させて更にエネルギー増幅を行う。実験において、励起レーザー光のビーム直径を 3.8mm 程度に設定した。

図 15 は(前置増幅器と主増幅器の両方の) 励起エネルギーの合計に対する主増幅器の出力パルスエネルギーを示す。前置増幅器と主増幅器の励起エネルギーが 530mJ の時、出力パルスエネルギー156mJ を達成した。この時の増幅ビームパターンの 3 次元プロファイルを図 16 に示す。図に示すように若干縦長のパターンとなったが、滑らかなガウス分布が得られた。パルスコンプレッサーの透過率は実測で 63%であり、この値を考慮すると、パルスコンプレッサー後のパルスエネルギーは 100mJ 程度となり、目標値(1TW, 100mJ, 10Hz 相当)を達成したと考えられる。

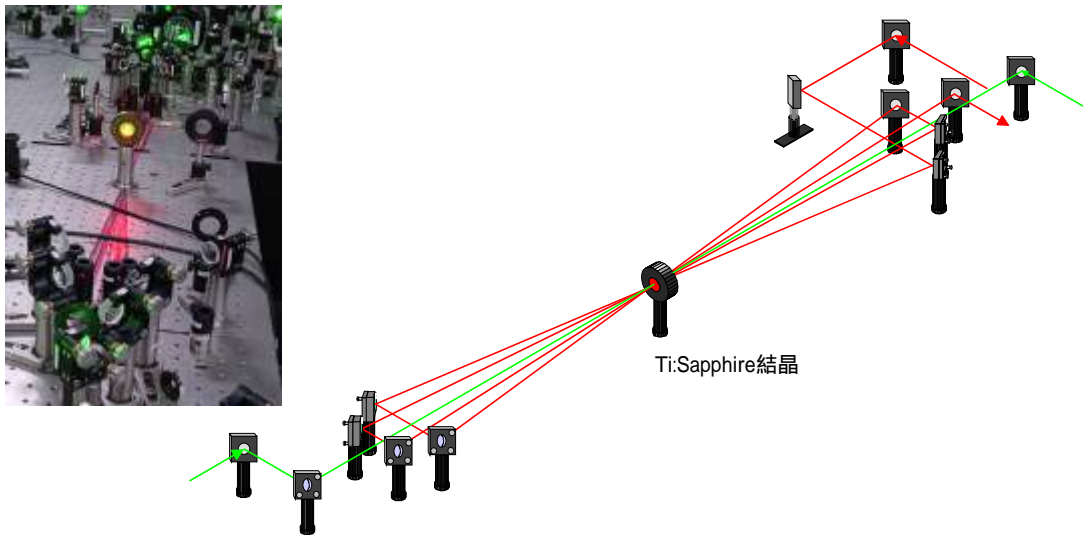


図 14 Ti:sapphire 主増幅器 (4 パス増幅構成)

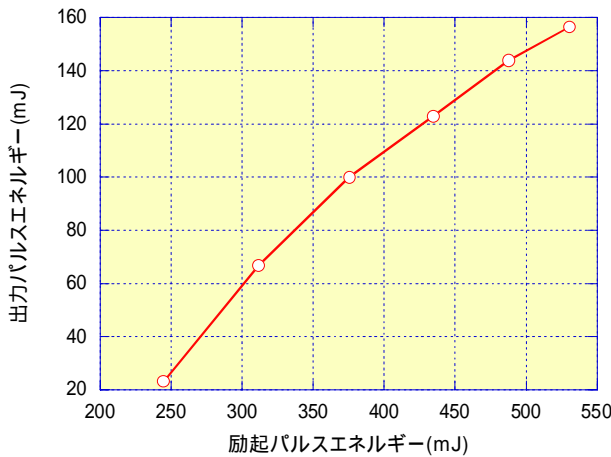


図 15 励起パルスエネルギーに対する主増幅器の出力パルスエネルギー特性

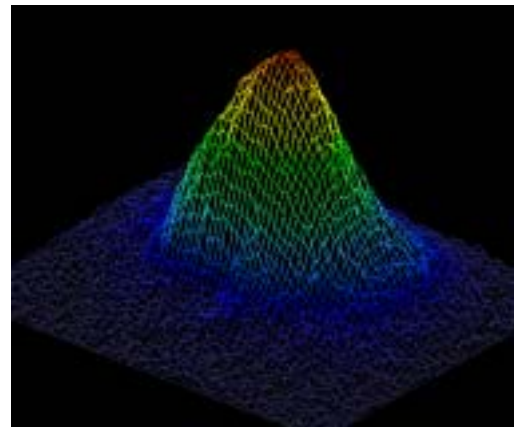


図 16 主増幅器の増幅ビームパターンの 3 次元プロファイル

10. 再構成前パルスコンプレッサーの開発

Ti:sapphire レーザー光の増幅には、高ピークパワーを考慮して CPA により増幅される。その為、増幅を行う増幅部では、パルスストレッチャーで正の分散特性を有する素子を通することにより伸延されたパルスの状態で増幅される。増幅されたパルスエネルギーは、負の分散特性(回折格子)を有する素子で構成されたパルスコンプレッサーで再圧縮を行う必要がある。よって、回折格子では、ピークパワーが極めて高くなり、ダメージ閾値を考慮し、ビーム径を大きくするなどの配慮が必要となる。また、空気中での非線形屈折により、波面が歪む可能性も示唆されるので、真空中で配置するのが理想である。

本章では、配置構成の簡易化およびピーク出力 1TW ということを考慮し、大気中にパルスコンプレッサーを構成し、前置増幅器からのレーザー光を入射して、透過後のビーム特性を評価した。

パルス圧縮用パルスコンプレッサーの全体構成図を図 17 に示す。パルスストレッチャーと同様に、分散素子として 2000 本/mm の金コートの回折格子を使用している。今回構成したコンプレッサーは、パルスストレッチャーにて 450ps ~ 500ps まで伸延されたチタンサファイアレーザー光を、100fs 以下程度まで圧縮できる様に構成している。

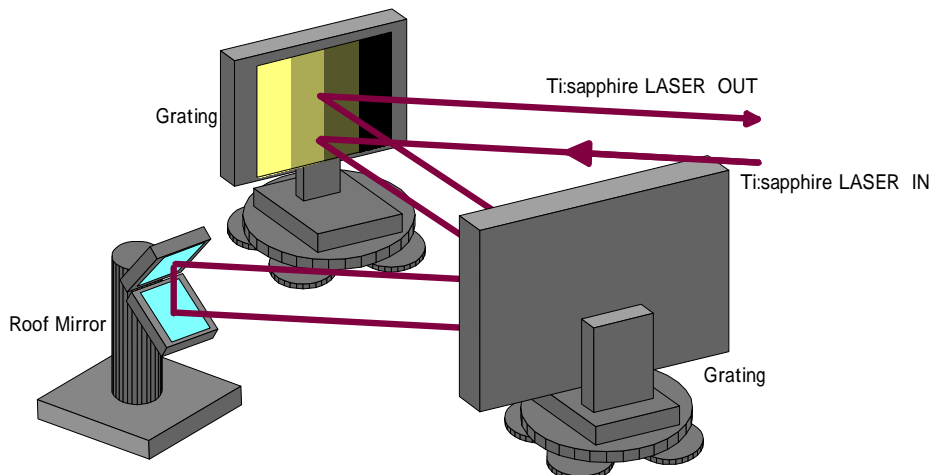


図 17 再構成前パルスコンプレッサー全体構成図

11. 入射前・出射後のレーザー評価

パルスコンプレッサーに約 8.2mJ のレーザーを入射させた場合、コンプレッサー出射後は約 5.2mJ になっていた。これより、パルスコンプレッサーを通過する事によって出力は約 37%減少する事が分かった。また、ビームパターンの集光特性および M^2 の評価を行った。結果を図 18 に示す。 M^2 は X 軸 : 1.5 となり、Y 軸 : 2.1 となった。

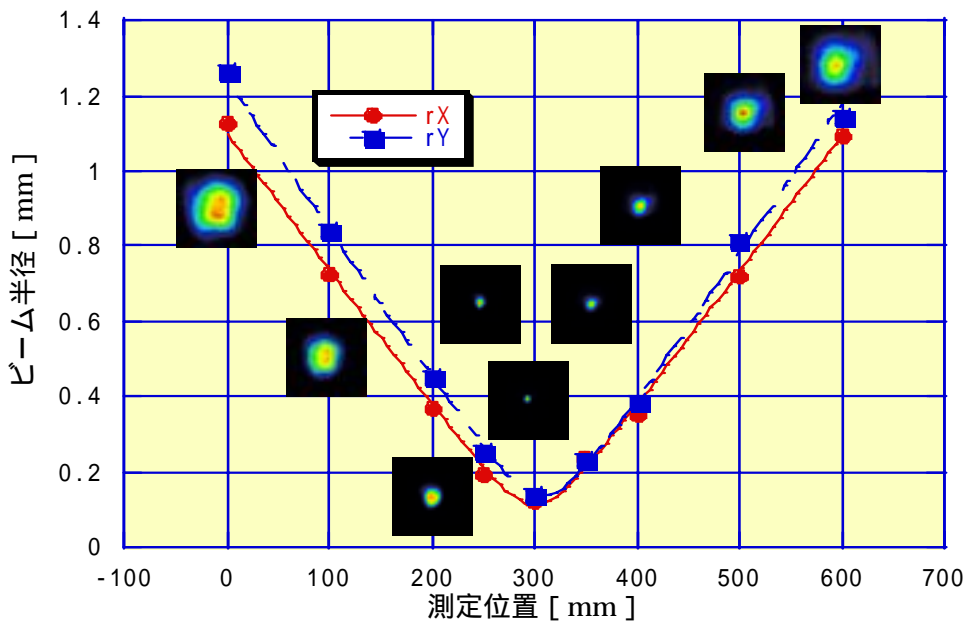


図 18 コンプレッサー通過後の M^2 値

パルス圧縮後のスペクトル波形とパルス波形の測定および評価の結果を図 19 に示す。スペクトル波形は半値幅で 25nm となり、スペクトル波形より算出したパルス半値幅は 75fs となった。オートコリレーターで実測したパルス波形は BBO 結晶にダメージがあった為、ノイズが多く、正確な測定が行えなかった。結果として、実測したパルス幅は半値幅で $110\text{fs} \pm 35\text{fs}$ となっている。また、パルスが広がっている原因としては、ストレッチャーにおけるスペクトルの損失、増幅課程における利得狭帯域化、パルス幅を決定する回折格子間の最適位置、オートコリレーターの BBO 結晶の不備によるパルス幅測定の信頼性が低いこと等が考えられる。

パルスコンプレッサーの透過率は 63% であるため、156mJ の増幅光を入射させた場合、出力光

は約 100mJ となる。現在のパルス幅は $110\text{fs} \pm 35\text{fs}$ であるため、目標値 (1TW, 100mJ, 10Hz 相当) を達成したと考えられる。

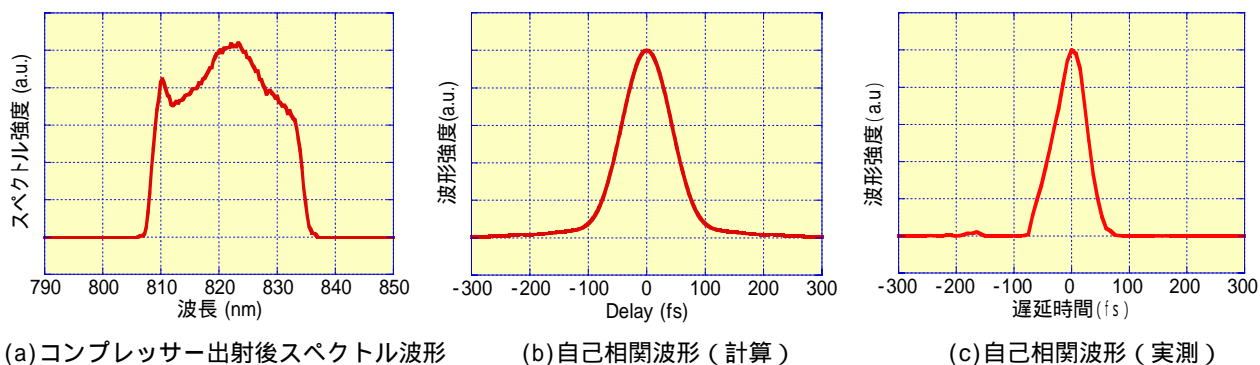


図 19 コンプレッサー後のスペクトル波形とパルス波形

12. Ti:sapphire レーザーシステムの再構成

再構成前のシステムは発振器の自己モードロックや、増幅後出力の安定性等に問題があり、長時間の運転が困難であったため、安定性を向上させるため、システムの再構成を行った。

主な再構成箇所としては、発振器部・パルスストレッチャー・前置増幅器部 (再生増幅器へ変更)・主増幅器部・パルスコンプレッサーである。再構成した全体図を図 20 に示し、各システムの再構成の内容を以下に示す。

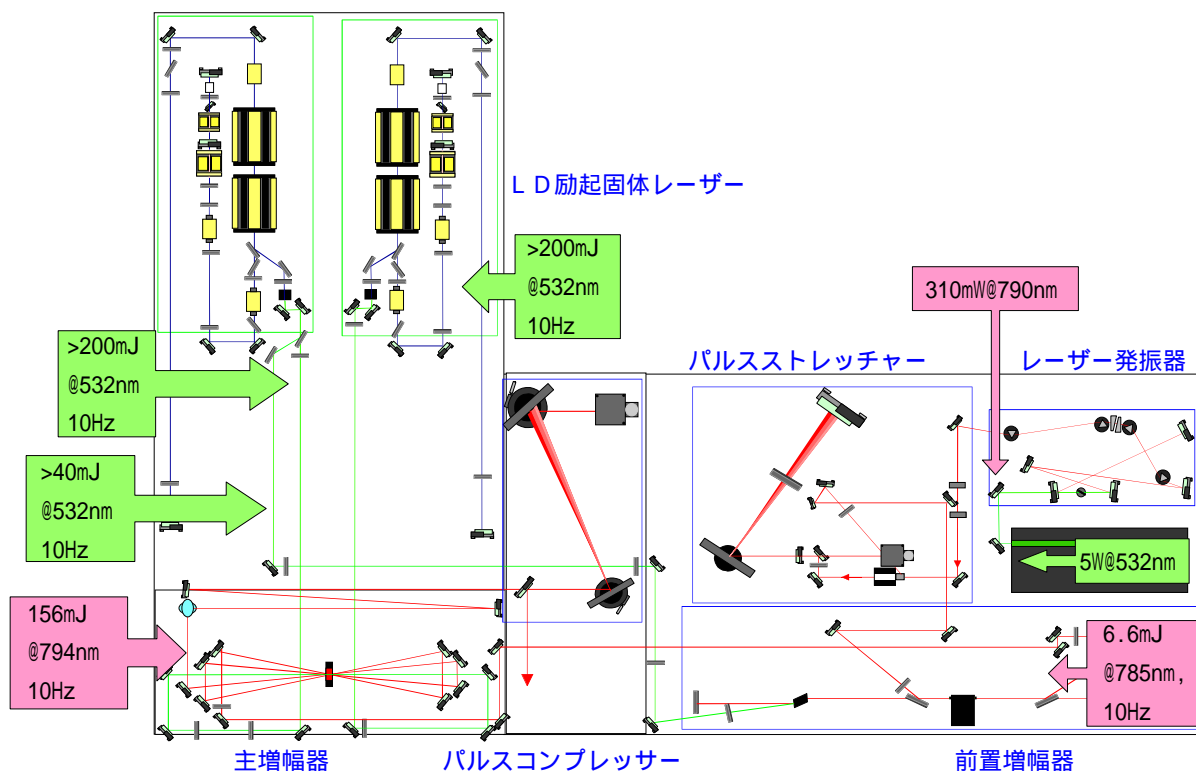


図 20 再構成後全体構成図

13. Ti:sapphire 発振器部再構成

再構成前の Ti:sapphire 発振器は、自己モードロックの安定性に問題があり、実験中にモードロックが外れるという問題が生じていた。そのため、発振器の再構成を行い、システムの性能と、モードロック安定性の向上を行った。主な変更は、分散補正素子として使用していたチャープミラーを、プリズムに変更し、チャープミラーでは出来ない線形的な分散補正を行って、発振器の最適化を行うことである。プリズムで分散補正を行った発振器の構成図を図 21 に示し、パルス波形とスペクトル波形をそれぞれ図 22・図 23 に示す。

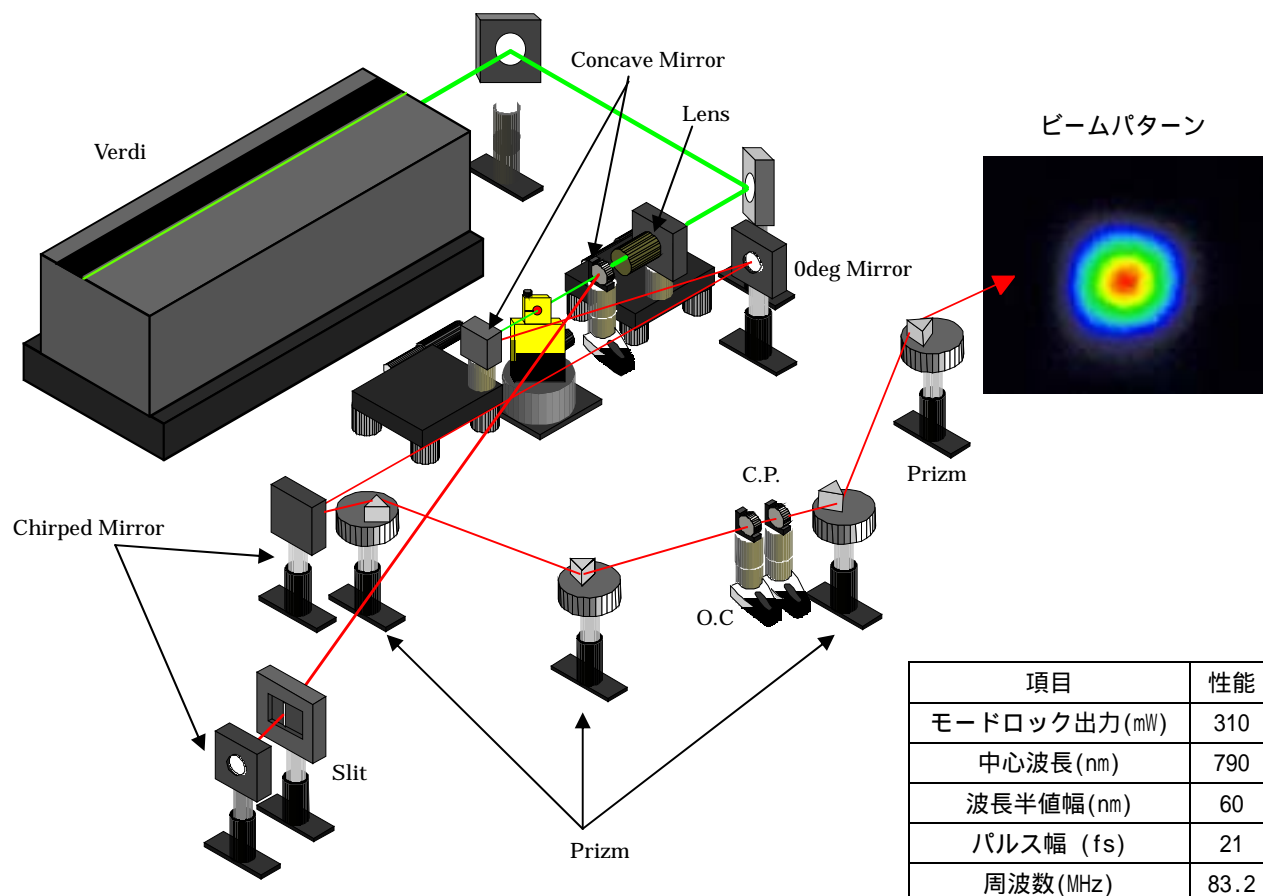


図 21 再構成後全体構成図

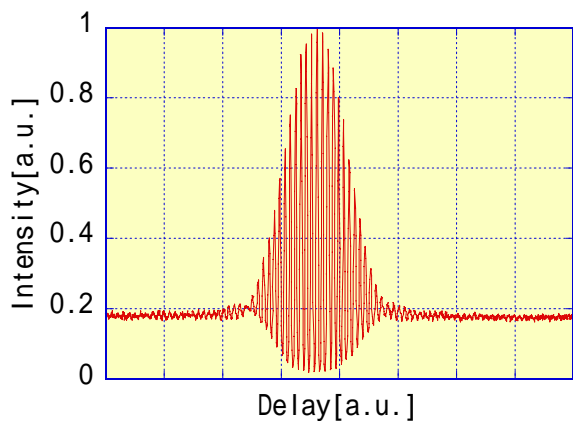


図 22 パルス波形

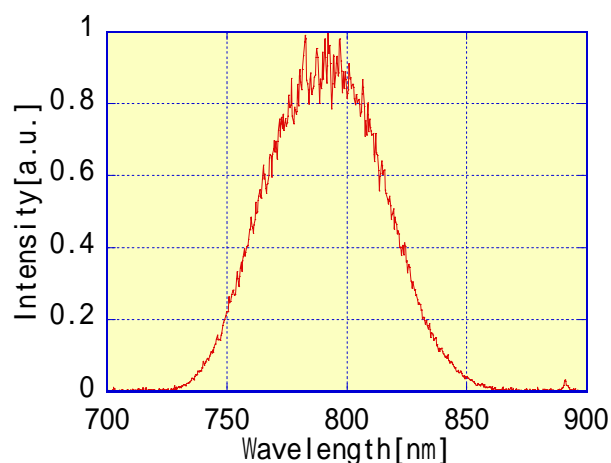


図 23 スペクトル波形

システムを再構成したことにより、スペクトル波形の拡大と、短パルス化に成功した。再構成前・再構成後の性能の比較を表 1 に示す。モードロックの安定性も向上しており、システム立ち上げ後、6 時間程度の間、未調整のままで安定した出力が得られている。この再構成した発振器を用いて 1TW レーザーシステムの開発を行っている。

表 1 再構成前・後での発振器性能比較

項目	再構成前	再構成後
モードロック出力(mW)	370	310
中心波長(nm)	816	790
波長半値幅(nm)	26	60
パルス幅 (fs)	27.8	21
周波数(MHz)	93.8	83.2

14. パルスストレッチャーの再構成

パルスストレッチャーの全体構成図を図 24 に示す。再構成前は、ストレッチャーを 1 パスさせてチタンサファイアレーザー光を約 450 ~ 500ps までチャープしていたが、アクロマートレンズの開口でレーザー光のスペクトル幅に制限を受け、透過できるスペクトル幅は半値全幅 16nm となっていた。

今回の再構成により、より広範囲のスペクトルを透過させるため、1 パスでのチャープパルス幅を約 200ps とし透過できるスペクトル幅を 2 倍にした。そしてストレッチャーを 2 パスさせることで約 400ps までパルス伸延するようにしている。

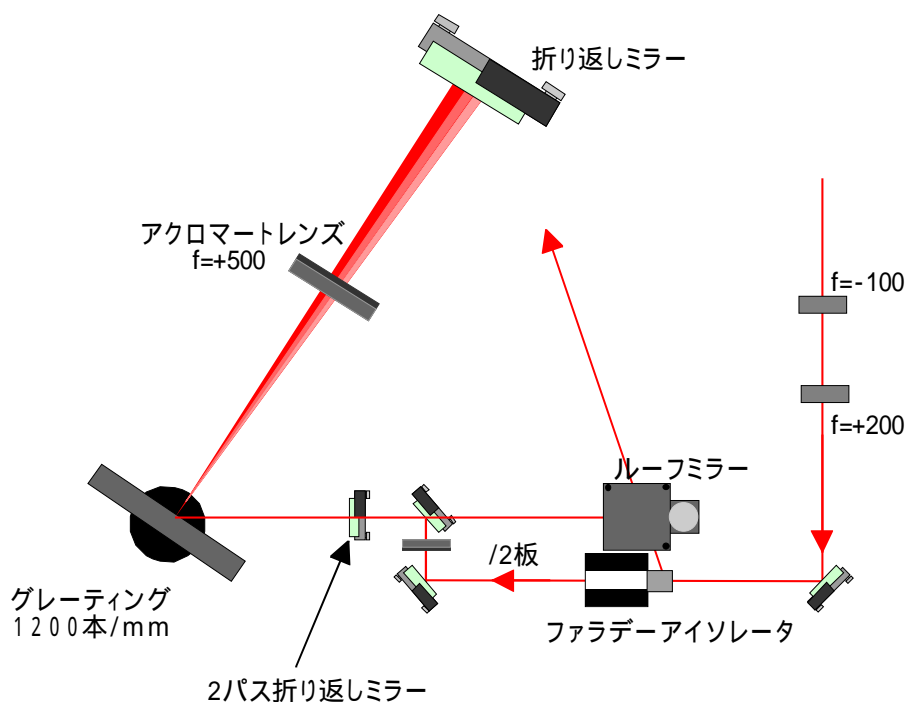


図 24 パルスストレッチャーの全体構成図

レーザー光の分散素子として、再構成前は 2000 本/mm の金コートのグレーティングを使用していたが、今回は 1200 本/mm のグレーティングを使用している。像転送用レンズには $f = +500\text{mm}$ のアクロマートレンズを使用し、アクロマートレンズの焦点位置に 800nm 用垂直入射誘電体ミラーを配置している。この誘電体ミラーでレーザー光を折り返すことによってアクロマートレンズとグレーティングがそれぞれ 1 つで構成出来るようにしている。

15. パルスストレッチャーの評価

フェムト秒レーザー発振器の高精度化により得られたレーザーパルスのスペクトル波形は半値幅で約 60nm、パルス波形の半値幅は約 21fs になっている。一方、再構成したパルスストレッチャーは約 40nm ~ 50nm のスペクトルしか透過させられない構造になっている。発振器の高精度化により、スペクトル幅が広がった分、グレーティングによる分散も広いため、アクロマートレンズや折り返しミラーでレーザー光を受けきれないことが予想される。そのため、パルスストレッチャー入射前・出射後でのスペクトル波形およびビームパターンの変化について、測定と評価をおこなった。再構成前のパルスストレッチャー出射後の波形およびビームパターンを図 25 に、再構成後パルスストレッチャー出射後の波形およびビームパターンを図 26 に示す。

パルスストレッチャー入射前の出力が約 300mW なのに対して、入射後は 34mW まで低下している。再構成前の 1 パスタイプのパルスストレッチャーでは 42mW 得られていたが、再構成後はできるだけ広範囲なスペクトルを透過させるために、パルスストレッチャーを 2 パスさせてパルス伸延させているため、グレーティングで回折される回数は 8 回になり、その分損失が大きくなっていると考えられる。

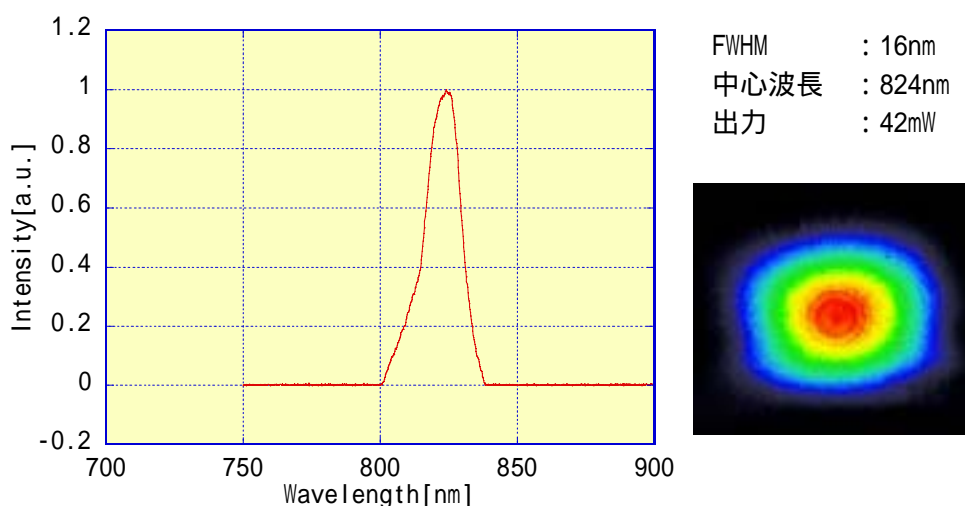


図 25 再構成前パルスストレッチャー出射後のスペクトル波形およびビームパターン

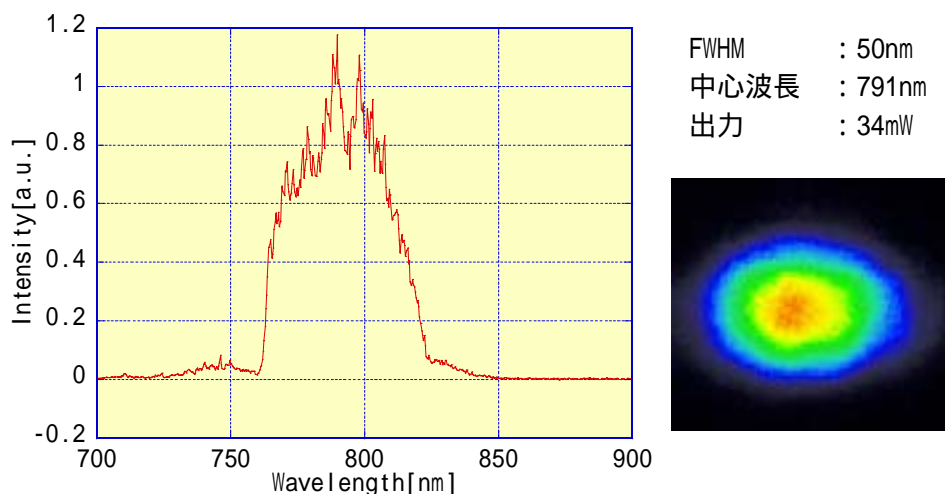


図 26 再構成後パルスストレッチャー出射後のスペクトル波形およびビームパターン

ストレッチャーを2パスさせたことによりエネルギーは低下したが、透過するスペクトル幅は広がっている。再構成前のスペクトル幅は半値幅 16nm であったが、再構成後は半値幅 50nm にまで広がっている。これによりコンプレッサーで圧縮されるパルス幅は、概算で 30~40fs になると予想される。

図 23 と図 26 を比較したところ、パルスストレッチャー入射前は 60nm あったスペクトル半値幅が、出射後は 50nm に減少してしまっているのがわかる。原因として再構成前と同様にアクロマートレンズが分散したレーザー光を受けきれていないのが原因であると考えられる。予定している ~50fs のスペックはクリアしているので問題はないが、より短パルス化を狙うのであれば、パルスストレッチャーを構成し直す必要があると思われる。

また、図 26 のビームの近視野像は図 21 に比べて X 軸が広がっているのがわかる。これは、レーザー光の横分散などではなくビーム自体の拡がり角によって広がっており、パルスストレッチャーに問題はないと思われる。

16. 前置増幅器部再構成

従来のマルチパスの再生増幅器では、光学素子が多くて調整が複雑であることや、増幅後の出力が 2.5mJ 程度でこれ以上の増幅が見込めないこと、寄生発振が発生することがある等の問題から再生増幅器に変更した。再生増幅器の構成を図 27 に示す。Ti:sapphire 結晶の励起には、ビームの安定性を向上させる目的で、MOPA1 号機の 2 倍波光 (532nm、270mJ) を $\lambda/2$ 板とポラライザーを用い分割し、レンズを用いた調整により Ti:sapphire 結晶上でのビーム径が再生増幅器の基本モード径 2mm 程度に合わせて励起を行っている。

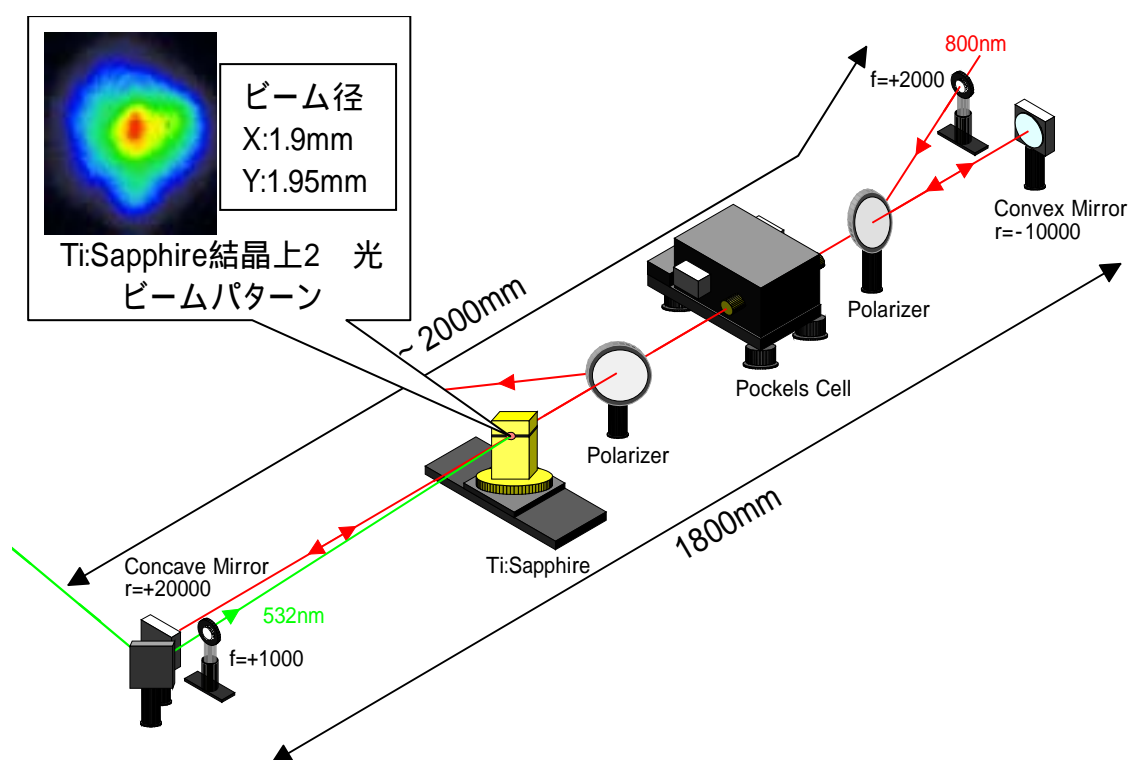


図 27 再生増幅器の構成図

17. 再生増幅器増幅実験

まず、2 倍波光 40mJ 程度で Ti:sapphire 結晶を励起しポッケルスセルを動作させずにフリーランニング発振試験を行った。フリーランニング発振ビームパターンを図 28 に、時間波形を図 29(a)に示す。また発振した光の安定性を調べるため波形の積算データ (20 回積算) を図 29(b)に示す。

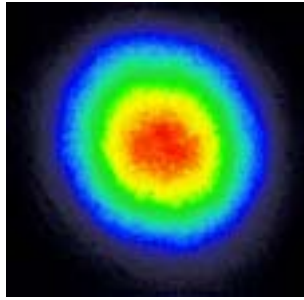


図 28 フリーランニング発振時のビームパターン

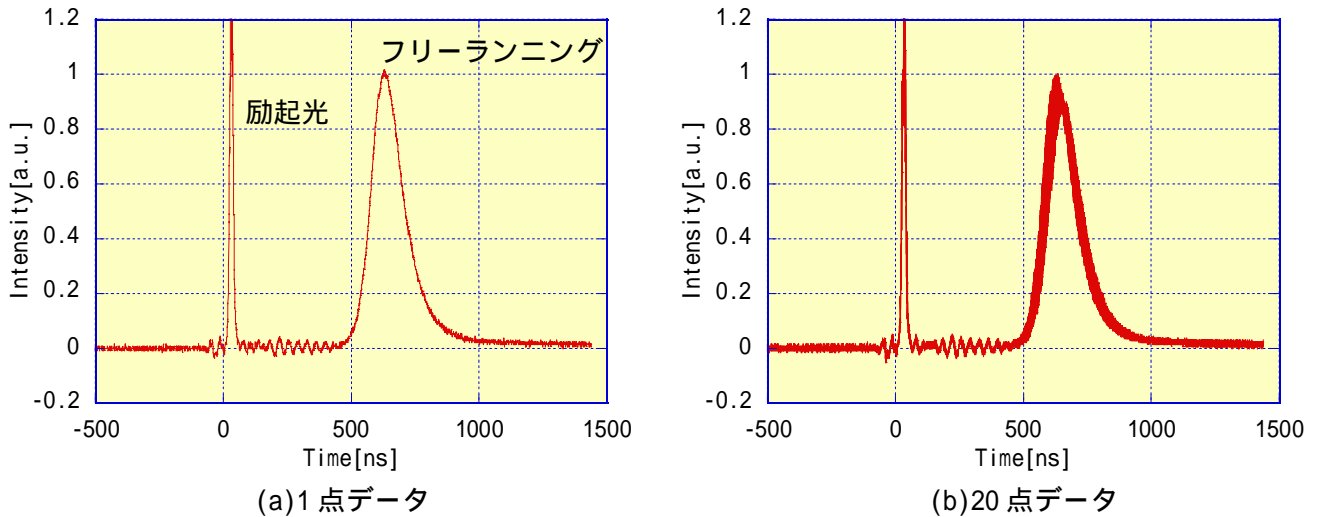


図 29 フリーランニング時間波形

次に、パルスストレッチャーからの 800nm 光(繰り返し周波数：約 83MHz)を再生増幅器に導き、ポッケルスセルを 10Hz 動作させて切り出した種レーザー光を再生増幅器の共振器内に導入して増幅実験を行った。この際、Ti:sapphire 結晶での入射光ビーム径を再生増幅器のモード径に合わせるため、焦点距離+2000mm のレンズを用いて入射光ビーム径を調整して、ビーム結合効率を向上させた。再生増幅器の増幅試験の際の共振器内のレーザー光の時間波形を 30(a)に、ポッケルスセルを再度動作させ再生増幅器から取り出した際の時間波形を図 30(b)に示す。ポッケルスセル動作によって再生増幅器内へのレーザー光の導入から取り出しまでの時間間隔は約 318ns であることから、再生増幅器の共振器長(1800mm)を考慮して再生増幅器内を 26 回往復して増幅されていることが分かる。

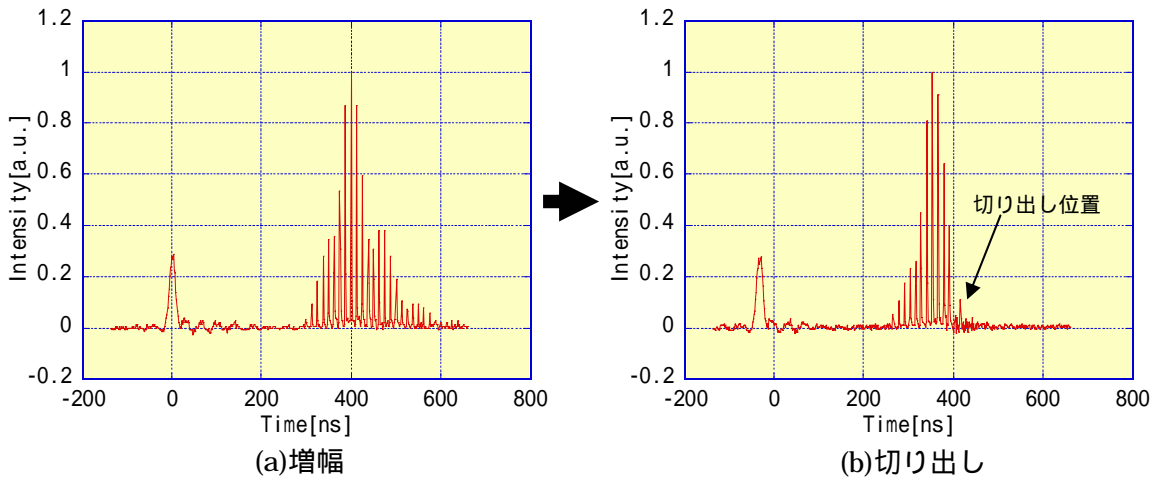


図 30 再生増幅器共振器内でのレーザー光の時間波形

入射レーザー光のパルスエネルギーは、平均パワー（約 6mW）と繰り返し周波数（約 82MHz）から約 70pJ であると計算され、増幅後のパルスエネルギーは 4.8mJ（48mW/10Hz）が得られた。この時の実効利得は 7×10^7 を達成した。増幅後のビームパターンは図 31 に示すように、理想的な空間高周波成分の少ない滑らかな基本横モードが得られた。

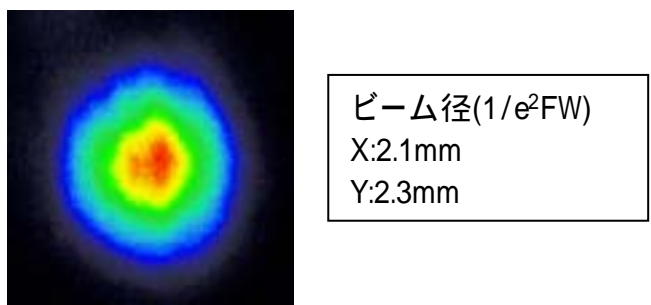


図 31 増幅後ビームパターン

発振器から得られたレーザー光はパルスストレッチャー透過後スペクトル幅 50nm 程度であるが、このままの構成では再生増幅器で増幅することによりスペクトル狭帯化の影響で 26nm 程度まで狭帯化が生じてしまう。このため再生増幅器内にエタロン板（MELLES GRIO社製、厚さ $2 \mu\text{m}$ ）を設置しスペクトルの補正を行った。図 32 に実験構成図を示す。エタロン板の設置場所は図 32 中 A 点とし、エタロン板設置条件及び実験結果を表 2、図 33 に示す。表 2 中のエタロン板の角度は、法線に対する角度を示す。

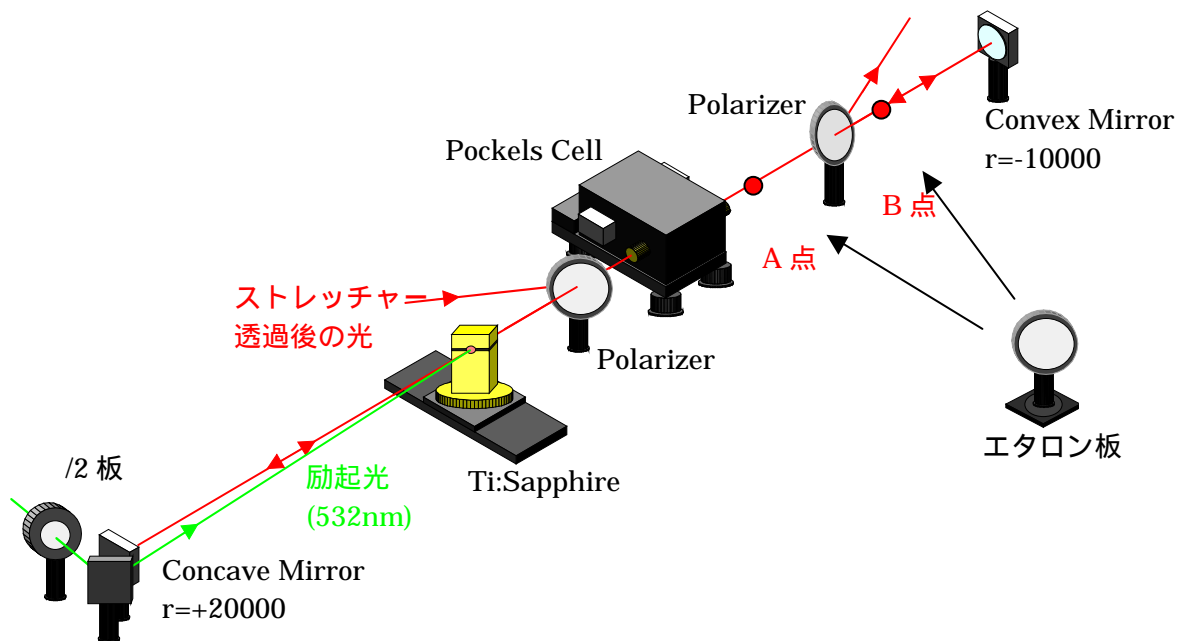


図 32 スペクトル狭帯化抑制実験構成図

表2 エタロン板によるスペクトル幅狭帯化抑制実験結果

条件	励起エネルギー (mJ)	A 点		スペクトル幅 (nm)	中心波長 (nm)	取り出しエネルギー (mJ)
		1 枚目	2 枚目			
	40			26	785	-
		28 °		47	794	2.5 以上
		-38 °	30 °	55	792	0.93 以上
	50	29 °		42	795	4.8 以上
		29 °	-40 °	49	790	2.3 以上

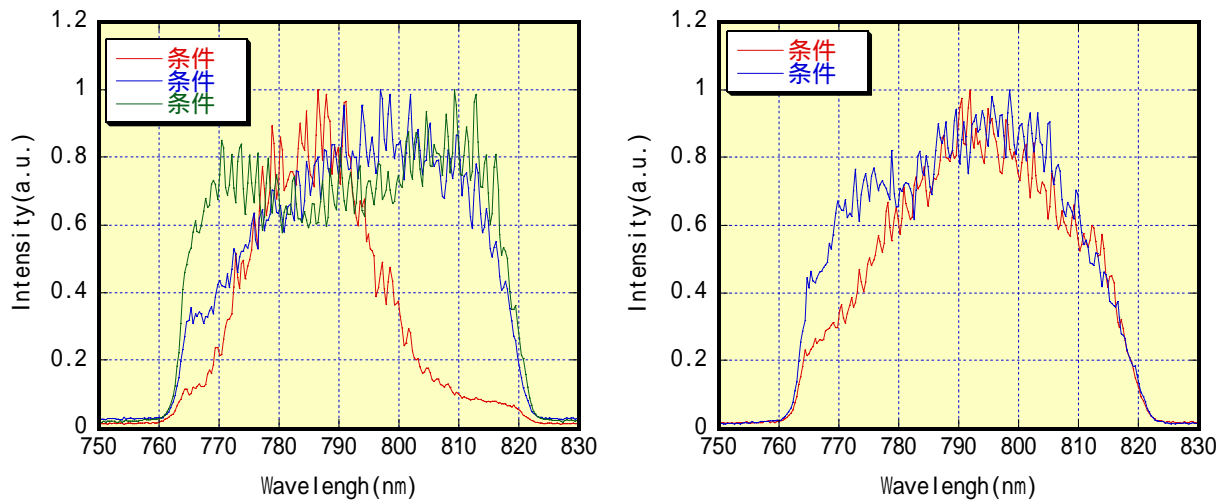


図 33 スペクトル狭帯化抑制実験結果

以上の結果より、再生増幅器増幅後のスペクトル幅は最大で 55nm まで広がった。

次に取り出しエネルギーの向上を図るためにエタロン板の設置位置を図 32 中 B 点に変更し、測定を再度行った。実験結果を表 3 に、出射後のスペクトルを図 34 に示す。また今回の実験では表 2 より分かるように励起 40mJ またはエタロン板 2 枚での実験では取り出し出力が低いため、励起エネルギー 50mJ、エタロン板 1 枚のみで実験を行った。

表 3 エタロン板設置場所によるスペクトル幅矯正実験結果

A 点	B 点	スペクトル幅(nm)	中心波長(nm)	取り出しエネルギー (mJ)
30 °		44	795	5.1 以上
	36 °	44	785	6.6 以上

エタロン板の設置場所を A 地点から B 地点に変更することにより、再生増幅器の最終パス後エタロン板を通過する過程がなくなり、取り出しエネルギーが増加する結果が得られた。以上の結果から、今後再生増幅器は 50mJ 励起でエタロン板 1 枚を図中 B 点の位置に設置した状態で使用することが最適だと考えられる。

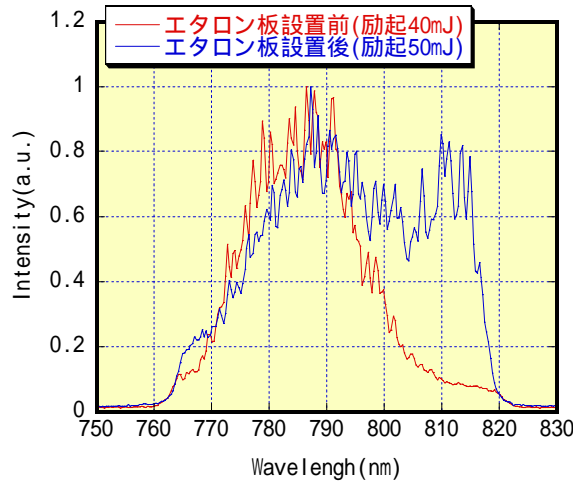


図 34 エタロン板設置前後のスペクトル波形

再生増幅器内にエタロン板を設置することによりスペクトル狭帯化を抑制することができ、再生増幅器増幅後のスペクトル幅が 26nm から 44nm まで広げることができた。その際の取り出しエネルギーは、励起エネルギーを増加させることで、6.6mJ 以上得られた。

以上の結果より、取り出しエネルギーは保持したままスペクトル狭帯化を抑制することができ、更なる短パルス化が期待できる。

マルチパスの前置増幅器から再生増幅器への変更により利得及び安定性が向上すると共にビームパターンが改善された。またマルチパスの前置増幅器では寄生発振が問題であったが、再生増幅器構成にすることにより抑制された。マルチパス前置増幅器と再生増幅器との比較を表 4 に示す。

表 4 再生増幅器とマルチパスの比較

	増幅後のパルスエネルギー [mJ]	実効利得	備考
再生増幅器	6.6	7×10^7 倍	-
マルチパス前置増幅器	2.5	3×10^7 倍	寄生発振が生じる

18. 主増幅器部再構成

再構成後の主増幅器の構成を図 35 に示す。チタンサファイア結晶の励起光には 2 台の励起用グリーンレーザーを用い、MOPA1 号機、MOPA2 号機それぞれ 205mJ、259mJ 合計 464mJ で励起を行っている。チタンサファイア結晶上の MOPA1 号機、MOPA2 号機のビームパターンとビーム径 ($1/e^2$) を図 36 に示す。尚、再生増幅器後の 800nm 光出力は 6.6mJ であった。また主増幅器チタンサファイア結晶での熱レンズ効果を補正するために主増幅器入射前に $f=-2000\text{mm}$ のレンズを設置した。

19. 主増幅器増幅実験

MOPA1 号機の 2 倍波は主増幅器のチタンサファイア結晶励起と再生増幅器のチタンサファイア結晶の励起に用いるため、主増幅器の増幅試験を行う際は MOPA1 号機で主増幅器のチタンサファイア結晶を励起した状態で、MOPA2 号機の励起光の出力を調整して増幅試験を行った。増幅試験の結果を図 37 に示す。また、再構成前後の主増幅器の特性比較を表 5 に示す。

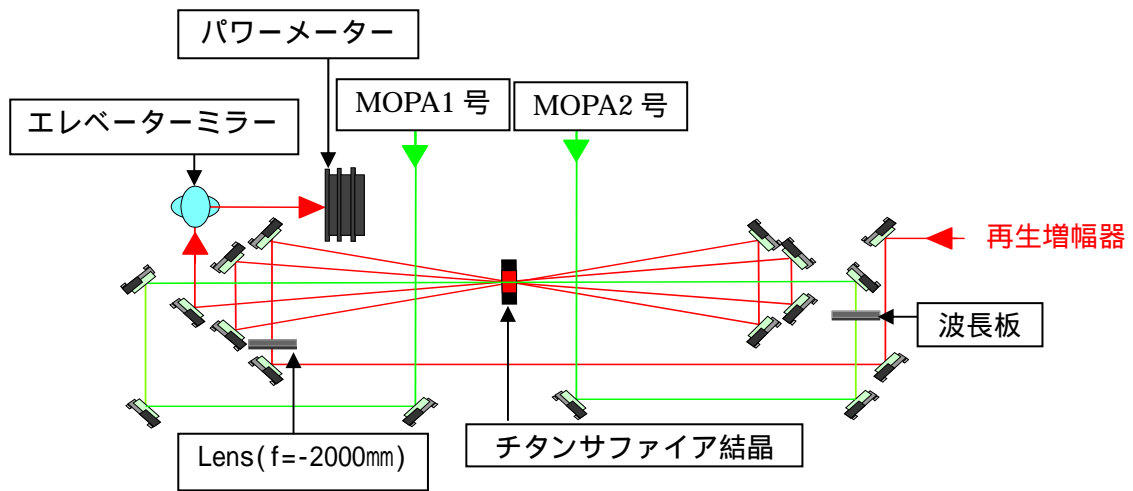


図 35 チタンサファイアレーザー主増幅器部

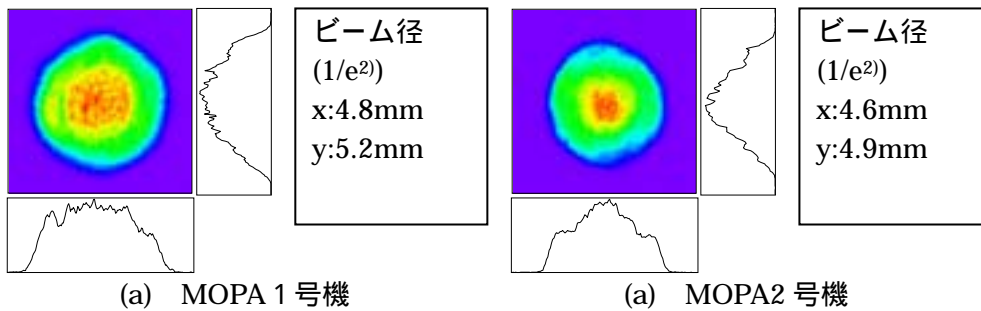


図 36 チタンサファイア結晶上ビームパターン

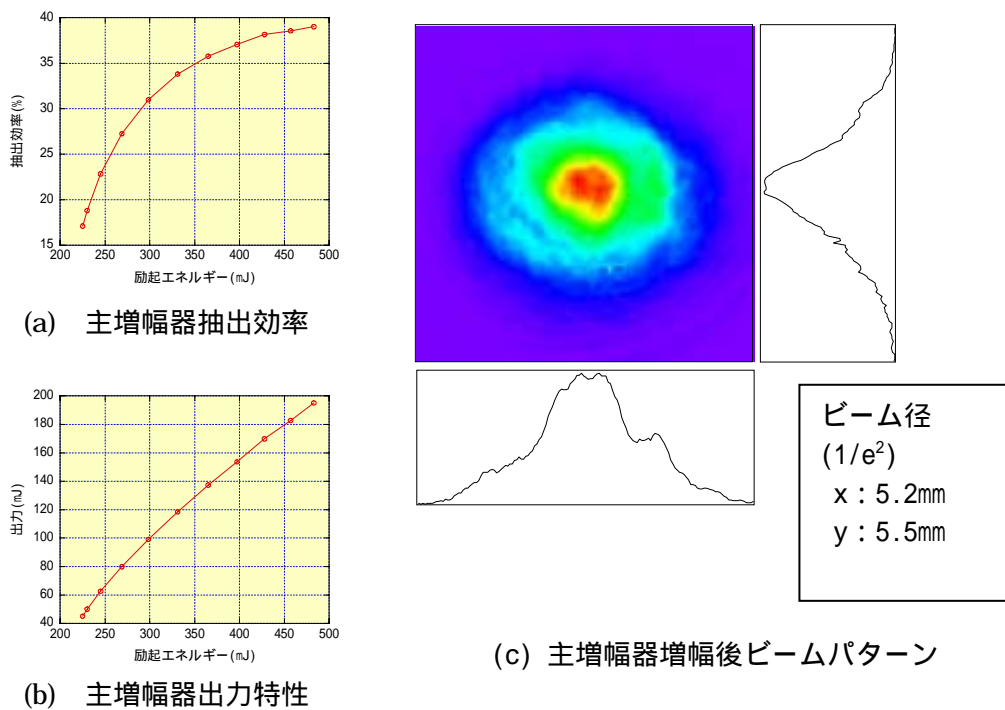


図 37 チタンサファイア主増幅器特性

表 5 再構成前後の主増幅器特性

	出力(mJ)	抽出効率(%)	利得
再構成前	159	35	約 20 倍
再構成後	195	39	約 30 倍

結果、主増幅器後の出力は 195mJ、利得は約 30 倍となった。しかし図 37 のビームプロファイルからも分かるように増幅後のビームパターンは中心部分の強度が高くこのままではパルスコンプレッサーに入射した際、グレーティングにダメージを与える可能性が考えられる。

これまでの構成では主増幅器後のビームパターンに強度の偏りがあり、コンプレッサーに入射させることによってコンプレッサー入射側のグレーティングにダメージが発生する可能性がある。この問題を解決するためには、主増幅器後のビームパターンの改善、すなわち主増幅器チタンサファイア結晶上の励起用グリーンレーザービームパターンを改善する必要がある。励起用グリーンレーザー（MOPA1 号機、MOPA2 号機）のビームパターン改善による主増幅器の性能とビーム品質改善を行った。（Ti:sapphire 励起用パルスグリーンレーザーの開発参照）

主増幅器の構成を図 38 に示す。チタンサファイア結晶の励起光には 2 台の励起用グリーンレーザーを用い、MOPA1 号機、MOPA2 号機それぞれおよそ 230mJ、200mJ 合計 430mJ で励起を行っている。また主増幅器チタンサファイア結晶での熱レンズ効果を補正するために主増幅器直前に $f=-2000\text{mm}$ のレンズを設置した。MOPA2 号機の 2 倍波は主増幅器のチタンサファイア結晶励起（約 200mJ）と再生増幅器のチタンサファイア結晶の励起（約 50mJ）に用いるため、主増幅器の増幅試験を行う際は MOPA2 号機で主増幅器のチタンサファイア結晶を励起した状態で、MOPA1 号機の励起光の出力を調整して増幅試験を行った。増幅試験の結果、励起エネルギー 429mJ に対して出力は 186mJ が得られた。またこのときの再生増幅器後の 800nm 光出力は図 38 中のパワーメーターで 4.1mJ が得られたことから、実行利得は 45 倍、抽出効率は 42% となった。励起用グリーンレーザーのビームパターン改善前後の主増幅器後ビームパターンを図 39 に示す。

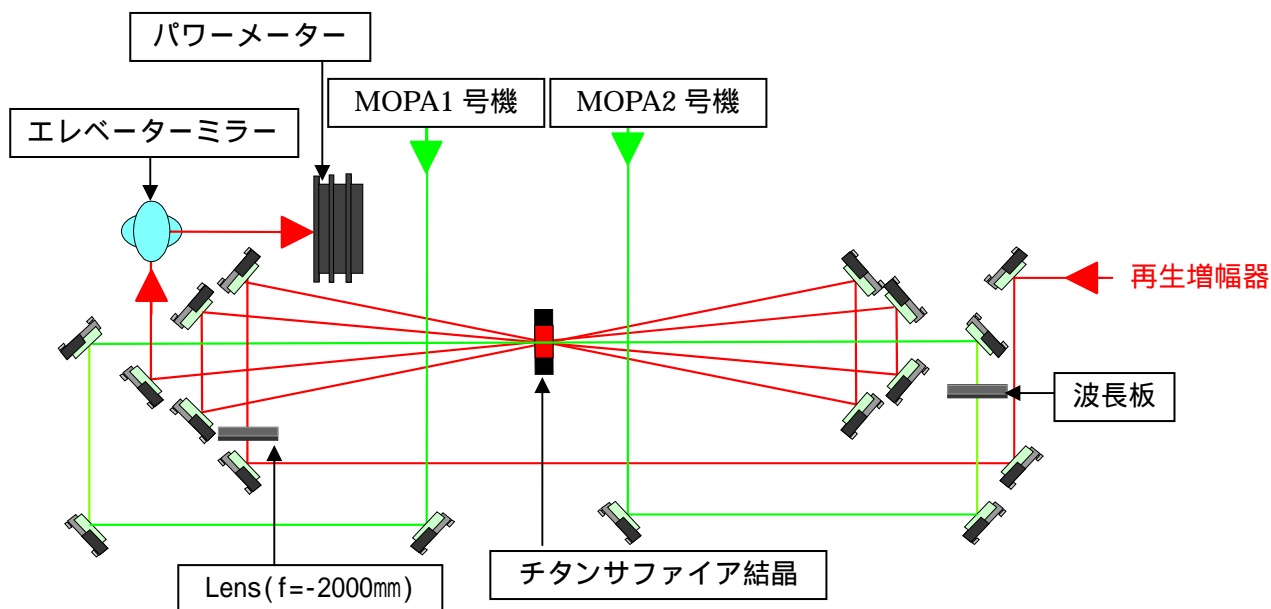


図 38 チタンサファイアレーザー主増幅器部構成図

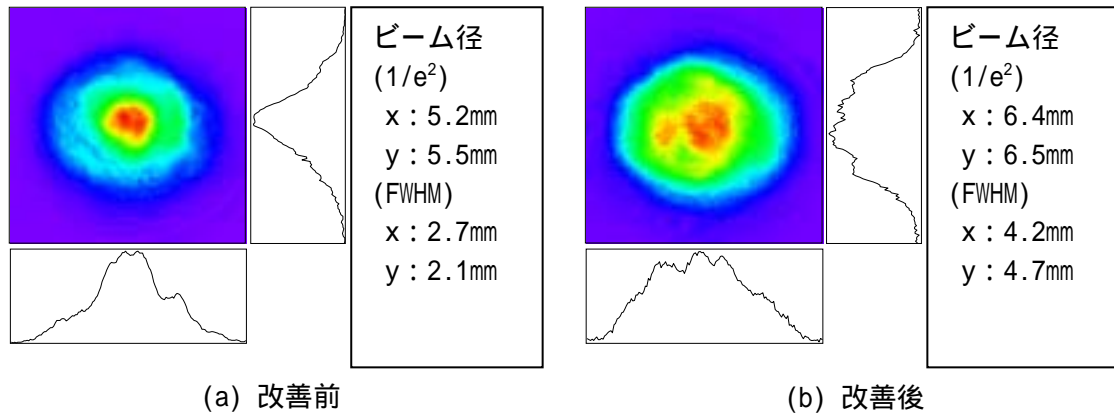


図 39 改善前後の主増幅器後ビームパターン比較

主増幅器後の出力は 195mJ から 186mJ と 10mJ 程度低下したがビームパターンは大幅に改善することができた。出力が低下した原因として MOPA 主増幅器の Nd:YAG ロッドを交換(ドープ量 0.6% 1.0%) 及びピンホールの設置等により励起エネルギーが 460mJ 程度から 430mJ 程度へ低下したことが考えられる。ビームパターン改善前後の主増幅器の比較を表 6 に示す。

表 6 ビームパターン改善前後の主増幅器特性

	出力 (mJ)	抽出効率 (%)	利得	ビーム径 (mm)	
				1/e ²	FWHM
ビームパターン改善前 (H16.4.22)	195	39	約 30 倍	5.2	2.7
				5.5	2.1
ビームパターン改善後 (H17.2.3)	186	42	約 47 倍	6.4	4.2
				6.5	4.7

20. パルスコンプレッサーの再構成

パルスストレッチャーの再構成に対応して、パルスコンプレッサーの再構成をおこなった。再構成後のパルス圧縮用パルスコンプレッサーの全体構成図を図 40 に示す。分散素子は、再構成後のパルスストレッチャーと同様に、1200 本/mm の金コートのグレーティングを使用している。今回再構成したパルスコンプレッサーは、パルスストレッチャーで約 400ps まで伸延されたチタンサファイアレーザー光を 1パスで元の約 30~40fs まで圧縮できるよう設計されている。再構成後のパルスコンプレッサーの透過率は約 40%であった。

21. パルス圧縮実験

主増幅器部にて得られた約 180mJ のレーザーパルスをコンプレッサーにて圧縮し、目標としていたピーク強度 1TW の高強度超短パルスレーザーを得ている。本節では、コンプレッサーでのパルス圧縮評価及び高強度超短パルスレーザーの性能評価について報告する。

主増幅器において MOPA1 号機及び MOPA2 号機でチタンサファイア結晶を励起し 800nm のシード光を増幅した。増幅した光をコンプレッサーに透過させ、波長変換素子として BBO 結晶を用いたオートコリレーターに導きパルス幅の測定を行った。このときのスペクトル幅は 35nm(FWHM)、中心波長は 794nm であった。

この結果、約 74fs 程度まで圧縮されていることが確認できた。現在の測定方法では画像の横軸を 240 分割し計算しており、1 ピクセル当たりの遅延時間は 2.4fs に相当する。またこのときのコンプレッサー後の出力は 78.6mJ であったことからピーク出力 1.06TW が得られている。この際の自己相関波形・スペクトル波形を図 41 に示す。

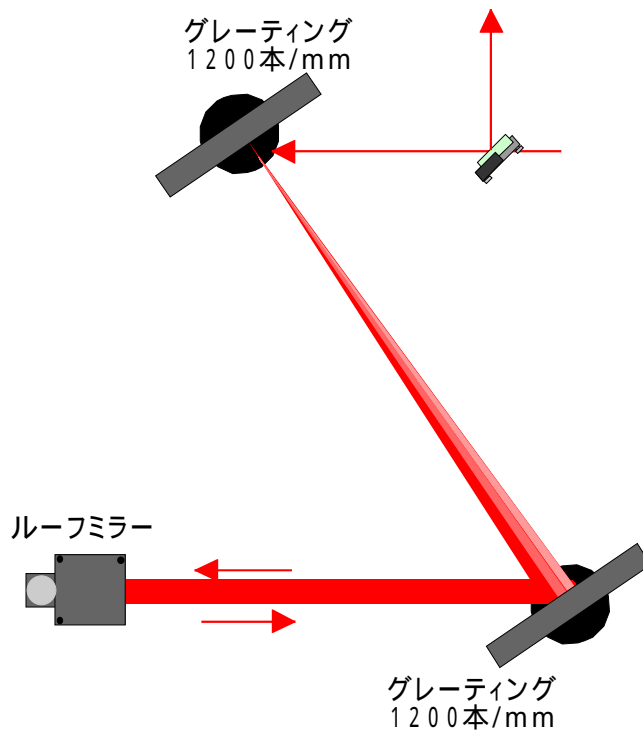


図 40 再構成後コンプレッサー構成図

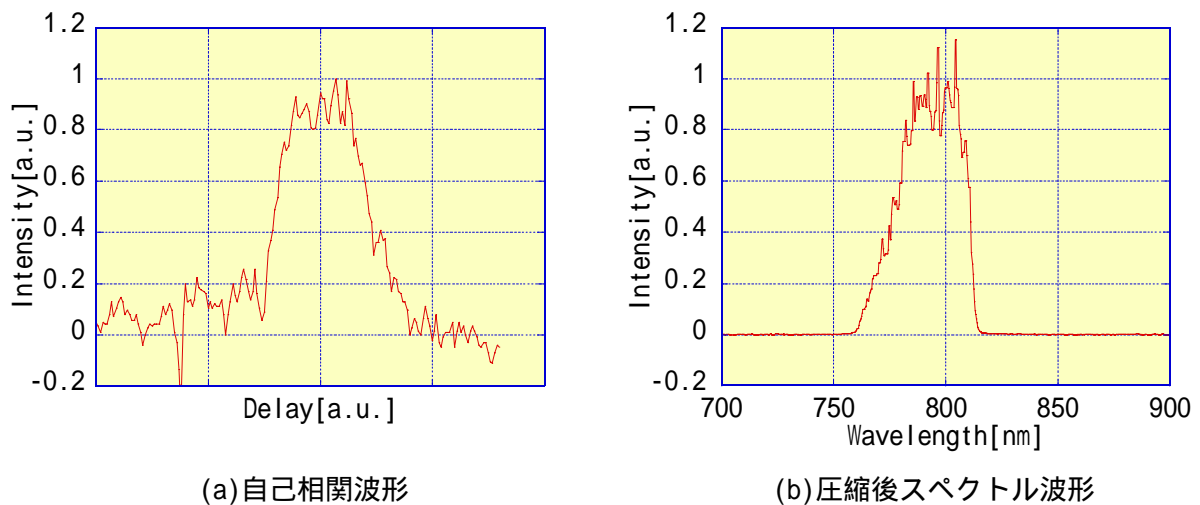


図 41 自己相関波形・スペクトル波形

22.Ti:sapphire LASER システムの性能評価

1TW レーザーシステムの性能評価として、パルス圧縮後の M^2 値を測定した。測定には $f=+1000\text{mm}$ のレンズ (Fused Silica) を使い、CCD カメラ前に 50 倍の対物レンズを設置した。また本実験は一方のグリーンレーザー (MOPA1 号機) の主増幅器励起タイミングを最適値からずらした状態で行った。この時のコンプレッサー後のパルス幅は 68.9fs、スペクトル幅 30nm(FWHM)及び中心波長は 778nm であった。実験の構成を図 42 に、測定結果を図 43 に示す。また再構成前と再構成後の比較を表 7 に示す。

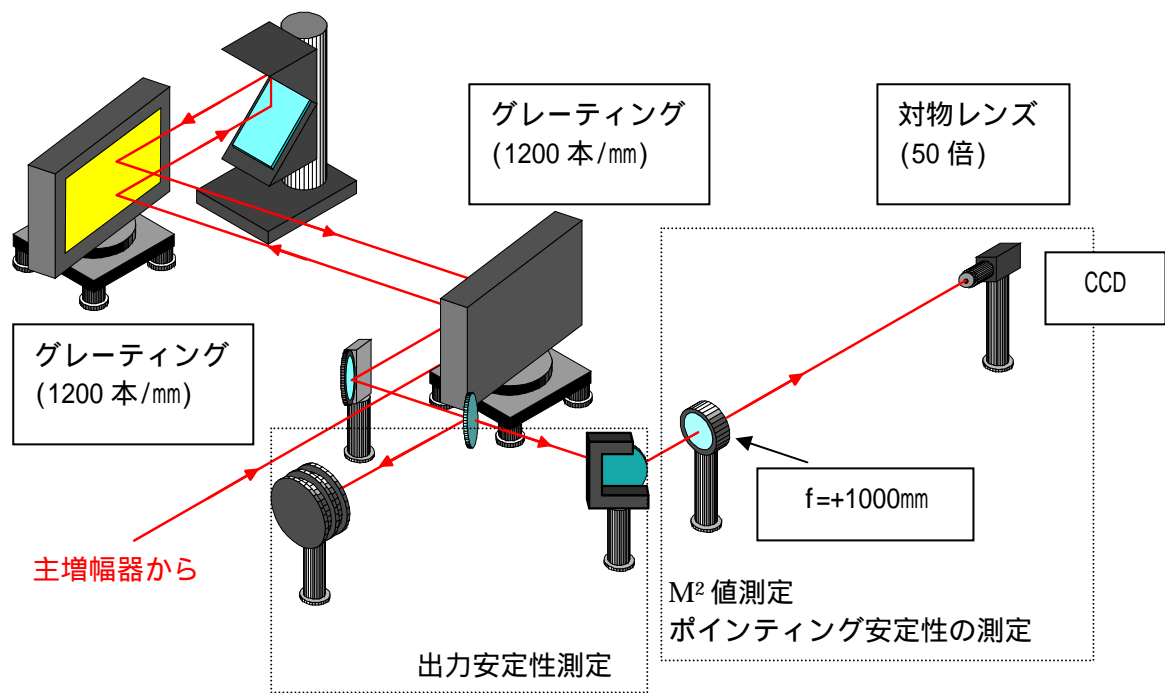


図 42 実験構成図

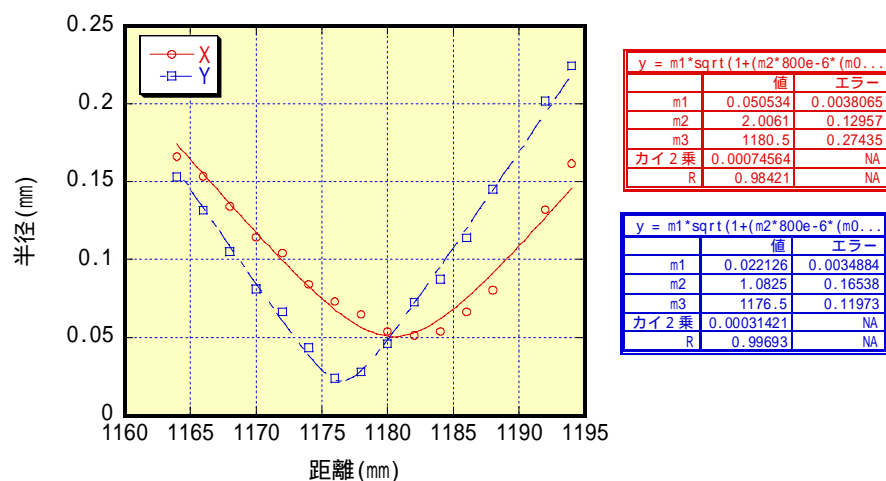


図 43 M²値測定結果

表 7 再構成前後の M² 値比較

	M² 値	
	X	Y
再構成前 (2003.2)	1.5	2.1
再構成後	2.0	1.1

結果、M²値はX軸方向で2.0、Y軸方向で1.1となった。再構成後も非点収差が生じており、ビーム品質の改善はなされていない。しかし、M²値が2程度なのでピーク出力1TWクラスのレーザーであることを考慮すると比較的優れた集光特性を有する品質だと考えられる。

次に定常的な長時間動作及び安定動作が可能かを調査する目的で出力安定性及びポインティング安定性の測定を行った。実験時のレーザー出力は、コンプレッサー後出力 78.6mJ(コンプレッサー透過率 42%)・パルス幅 74.3fs から、ピーク出力 1.06TW であった。(実験構成は図 42 参照)。

測定は 15 秒間隔で 1 時間行っている。また、空調の擾乱を低減させるため、システム全体にカバーをした状態で測定している。ビーム角度変位の時間経過、ビーム角度変位の軌跡、ピークレスポンス安定性をそれぞれ図 44～46 に示し、その際の集光パターンを図 47 に示す。そして、測定結果を表 8 にまとめる。

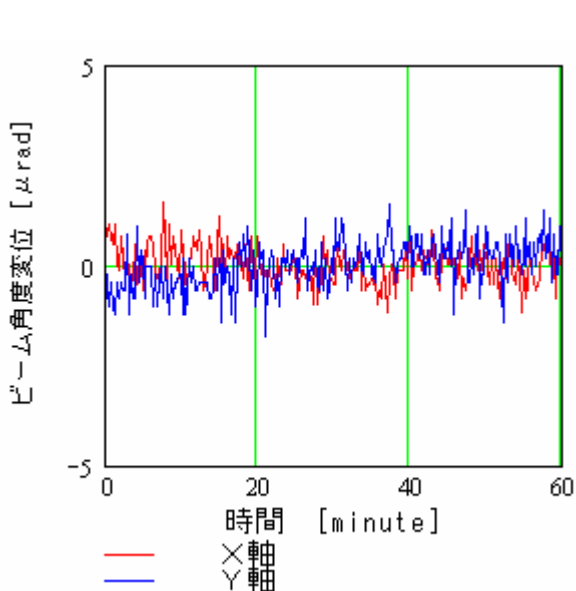


図 44 ビーム角度変位の時間経過

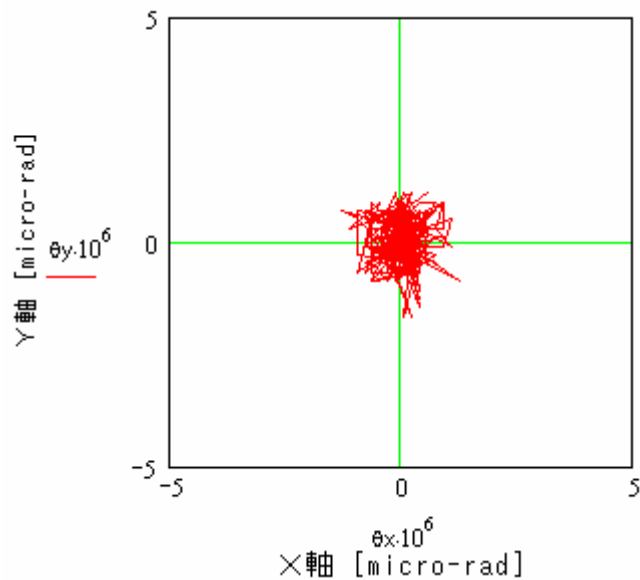


図 45 ビーム角度変位の軌跡

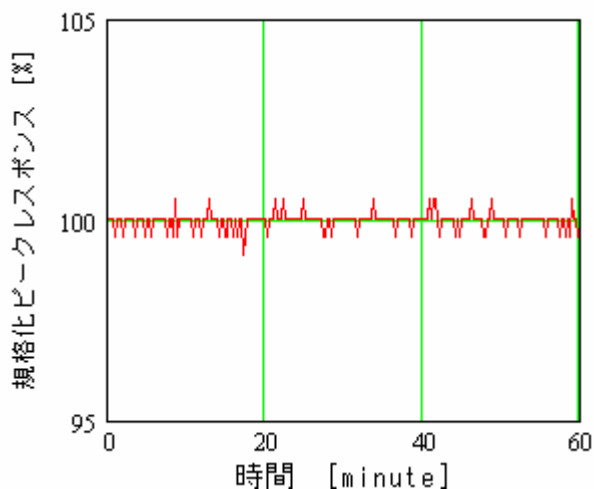


図 46 ビーム角度変位の軌跡

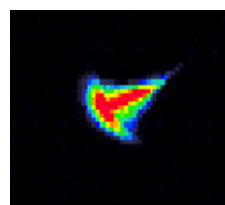


図 47 集光プロファイル

表 8 ポインティング安定性測定結果

		測定結果
ポインティング安定性 (1時間) [μrad]	X	0.47
	Y	0.60
ピークレスポンス安定性	[%]	0.21

上記の結果から、ポインティング安定性が $0.5 \sim 0.6 \mu\text{rad}$ と、励起レーザーの安定性 ($12 \sim 15 \mu\text{rad}$) に比べて小さいことから信頼性に問題が残る。現在の考えられる不安要素として、圧縮後のミラー径がビーム径より小さく集光プロファイルに劣化が生じている(図 47 参照)、集光径が小さいため、対物レンズを組み込んだことにより測定系が複雑になっている。このため、測定方法を再度検討する必要がある。

次に出力安定性の測定を行った。出力安定性についてもポインティング安定性の測定と同様にカバーを取り付けて評価を行っている。結果を図 48 に示す。また短時間での安定性を比較するため同測定中 10 分から 20 分の間の 10 分間についても RMS 変動率、Pk-Pk 変動率の算出を行った。測定結果のまとめを表 9 に示す。

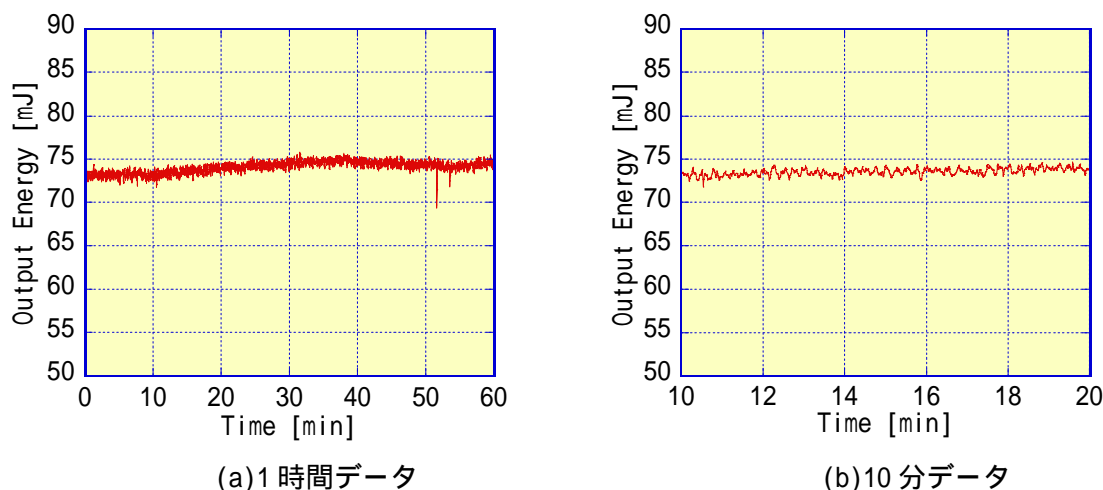


図 48 出力安定性測定結果

表 9 1 時間出力安定性測定結果

		測定結果
1 時間	RMS 変動率	74.1 [mJ] \pm 0.88 [%]
	Pk-Pk 変動率	74.1 [mJ] \pm 8.45 [%]
10 分	RMS 変動率	73.5 [mJ] \pm 0.57 [%]
	Pk-Pk 変動率	73.5 [mJ] \pm 3.83 [%]

図 48(a)の 53 分程度経過した時点で瞬間的に出力が低下した原因としては MOPA の像転送系でのブレイクダウンが生じたこと等が考えられる。Pk-Pk 変動率の計算には出力の最大値、最小値及び平均値を用いているため、瞬間的な出力低下が大きく影響している。

次に、更なる定常的な長時間安定性動作の確認を行うため、連続 2 時間運転を行った際の出力安定性を測定した。結果を図 49、表 10 に示す。また、RMS 変動率及び Pk-Pk 変動率は 1 時間後、2 時間後の結果から算出した。

結果、時間経過による若干の出力低下が見られた。原因は、室内温度の上昇(実験開始時約 21 実験終了時 24.6)によって生じる励起用グリーンレーザーのアライメント変化による励起エネルギーの低下および、再生増幅器の出力低下等が考えられる。しかし、出力の低下は見られたもののシステムに異常やダメージは確認できず長時間安全に運転することは可能だと思われる。また、運転時の温度上昇を抑えるために、エアコンによる温度調整および、空冷式のチラーを水冷式に変更することで温度上昇を低減させる方式が考えられる。

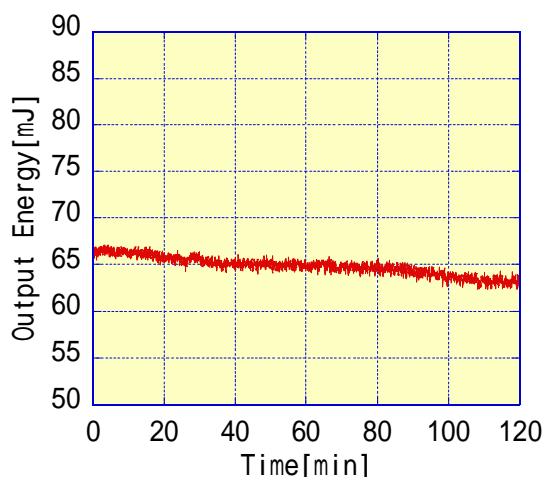


図 49 出力安定性測定結果（2時間）

表 10 2時間出力安定性測定結果まとめ

	1時間後	2時間後
平均出力[mJ]	65.6	64.8
RMS 変動率[%]	±0.96	±1.5
Pk-Pk 変動率[%]	±4.6	±7.2

23.まとめ

システム全体を再構成したことにより、主に出力安定性等の性能が向上した。各システムの再構成前・後での性能の変化を以下にまとめる。

発振器部

分散補正素子としてチャープミラーのみを使用していたが、プリズムを加えることで線形的に分散補正の調整が出来るようにした。これにより発振器の最適化を行い、性能を向上させた。再構成前の発振器は、自己モードロックの安定性に問題があり、実験中にモードロックが外れるという問題が生じていたが、再構成後は、自己モードロックの安定性が向上し、問題なく実験を進められるようになった。再構成前・後での性能比較を表 11 に示す

表 11 再構成前・後での発振器性能比較

項目	再構成前	再構成後
モードロック出力(mW)	370	310
中心波長(nm)	816	790
波長半値幅(nm)	26	60
パルス幅(fs)	27.8	21
周波数(MHz)	93.8	83.2

パルスストレッチャー再構成

再構成前のパルスストレッチャーは、透過可能なスペクトル幅が半値全幅で 16nm 程度であるため、システムの再構成を行い、透過スペクトル幅を拡大させた。使用する回折格子を 2000 本/mm から 1200 本/mm へ変更し、パス数を倍にすることにより、ストレッチャー内でのスペクトルの損失を低減させた。しかし、パス数が倍になったことにより、回折格子での損失が増え、出力は若干低下している。結果を表 12 にまとめる。

表 12 再構成前・後でのストレッチャー性能比較

項目	再構成前	再構成後
透過スペクトルの半値全幅(nm)	16	50
中心波長(nm)	824	791
出力(mW)	42	34

前置増幅器再構成

再構成前のマルチパスの再生増幅器は光学素子が多く、調整が複雑であり、増幅後の出力が 2.5mJ 程度であった。さらに寄生発振が発生することがある等の問題から再生増幅器に変更した。マルチパス増幅器から再生増幅器への変更により利得及び安定性が向上すると共に

ビームパターンが改善された。問題とされていた寄生発振も、再生増幅器構成にすることにより抑制された。マルチパス前置増幅器と再生増幅器との比較を表 13 に示す。

表 13 再生増幅器とマルチパスの比較

	増幅後のパルスエネルギー [mJ]	実効利得	備考
再生増幅器	6.6	7×10^7 倍	-
マルチパス前置増幅器	2.5	3×10^7 倍	寄生発振が生じる

主増幅器部再構成

主増幅器と、励起用グリーンレーザーの再構成により、システムの性能が向上した。結果を表 14 にまとめる。

表 14 再構成前・後での主増幅器部の性能比較

	出力(mJ)	抽出効率(%)	利得
再構成前	159	35	約 20 倍
再構成後	186	42	約 47 倍

コンプレッサー再構成

パルスストレッチャーの再構成に対応して、パルスコンプレッサーを再構成した。分散素子は、再構成後のパルスストレッチャーと同様に、1200 本/mm の金コートのグレーティングを使用している。今回再構成したパルスコンプレッサーは、パルスストレッチャーで約 400ps まで伸延されたチタンサファイアレーザー光を 1 パスで元の約 30~40fs まで圧縮できるよう設計されている。再構成後のパルスコンプレッサーの透過率は約 40%であった。再構成前は 63%であったが、ストレッチャーや、他のシステムに生じる分散に合わせてコンプレッサーを再構成したため、透過率が若干低下している。再構成前・後での性能の比較を表 15 に示す。

パルス圧縮後、最終的に得られたスペックは、出力 78.6mJ・パルス幅 74.3fs・スペクトル幅 35nm・ピーク出力 1.06TW となり、目標としていた 1TW をクリアしている。

表 15 コンプレッサーの透過率比較

	透過率(%)
再構成前	63%
再構成後	40%

Ti:sapphire LASER システムの評価

レーザーシステム全体の評価として増幅後・パルス圧縮後の、 M^2 ・ポインティング安定性・出力安定性の測定を行った。各測定結果を表 16~18 に示す。また、再構成前・後での性能の比較を表 19 に示す。

表 16 M^2 測定結果

	M^2 値	
	X	Y
再構成前(H15.2.18)	1.5	2.1
再構成後(H17.2.22)	2.0	1.1

表 17 ポインティング安定性・ピークレスポンス安定性測定結果

		測定結果
ポインティング安定性 (1時間) [μ rad]	X	0.47
	Y	0.60
ピークレスポンス安定性 [%]		0.21

表 18 1時間出力安定性測定結果

		測定結果
1時間	RMS変動率	74.1[mJ] ± 0.88[%]
	Pk-Pk変動率	74.1[mJ] ± 8.45[%]
10分間	RMS変動率	73.5[mJ] ± 0.57[%]
	Pk-Pk変動率	73.5[mJ] ± 3.83[%]

表 19 レーザーシステム性能比較

	パルス幅	パルスエネルギー	透過率	ピーク出力
再構成前 (H15.2.18)	110 ± 35fs 以下 (推定)	98mJ (推定)	63% (推定)	約 1TW (推定)
再構成後 (H17.2.22)	74.3fs	78.6mJ	42% (実測値)	1.06TW

再構成により、M²値はX軸方向で2.0、Y軸方向で1.1となっている。再構成後も非点収差が生じているが、M²値が2程度なのでピーク出力1TWクラスのレーザーでは比較的優れた集光特性を有すると考えられる。

ポインティング安定性は0.5~0.6μ radと、励起レーザーの安定性(12~15μ rad)に比べて小さいことから信頼性に問題が残る。一度、測定方法を再度検討する必要があると思われる。

出力安定性も改善されており、再構成後には長時間の運転が可能になった。長時間運転する際、若干出力の低下が見られたが、室温変動を低減させる対策をとれば改善されると思われる。

最終的に、システム全体を再構成したことにより、出力安定性等の性能が向上し、システムにダメージ等の異常を起こすことなく長時間の運転が可能となった。スペックも、予定していた1TWをクリアしており、Ti:sapphire LASERシステムは完成したと言える。

(3) 主な成果

具体的な成果内容：レーザーA(繰り返し周波数10Hz・ピーク出力1.06TW・パルス幅74.3fs・出力78.6mJ)の開発に成功した。

口頭発表件数：2

(4) 研究成果に関する評価

国内外における水準との対比

市販の励起用パルスグリーンレーザーとの比較を以下に示す。

製造元	地域結集	関西原研	産総研	THALES
ピークパワー[TW]	1.06	10	24(相等)	100
パルス幅[fs]	74.3	16	12.3	30
出力[mJ]	78.6	160	300	3000
周波数[Hz]	10	10	10	10
グリーンレーザー 励起源	LD	Flash Lamp	-	Flash Lamp

実用化に向けた波及効果

開発した高強度超短パルスレーザーを用いて、高密度フォトンを制御して利用することで、主に新医療分野等における新規産業創出を目標として、短寿命放射性同位体の生成・遠赤外線イメージング・非熱加工等における実証研究を目指す。

(5) 残された課題と対応方針について
特になし。