

# ボース・アインシュタイン凝縮を目指した ポジトロニウム冷却Ⅱ

村吉 諄之, 周 健治, 樊 星, 石田 明,  
難波 俊雄<sup>A</sup>, 浅井 祥仁, 吉岡 孝高<sup>B</sup>, 五神 真

東大理, 東大素粒子センター<sup>A</sup>, 東大光量子科学センター<sup>B</sup>



第53回アイソトープ・放射線研究発表会  
2016.07.07 @東京大学弥生講堂

# 内容

本講演：Ps冷却用レーザーの開発状況について

1. Ps冷却用レーザーの設計概要
2. 開発状況①：シード光(ECDL)の製作
3. 開発状況②：シード光パルス化・増幅用の共振器開発
4. 展望・まとめ

# 必要なレーザー特性

PsBEC実現のためには高速かつ十分な冷却が必要

→以下の特性を持つ243nm紫外光レーザー作成を目指す

①持続時間: 300ns

→Psの寿命: O(100ns)にわたり冷却

②強度: 40 $\mu$ J

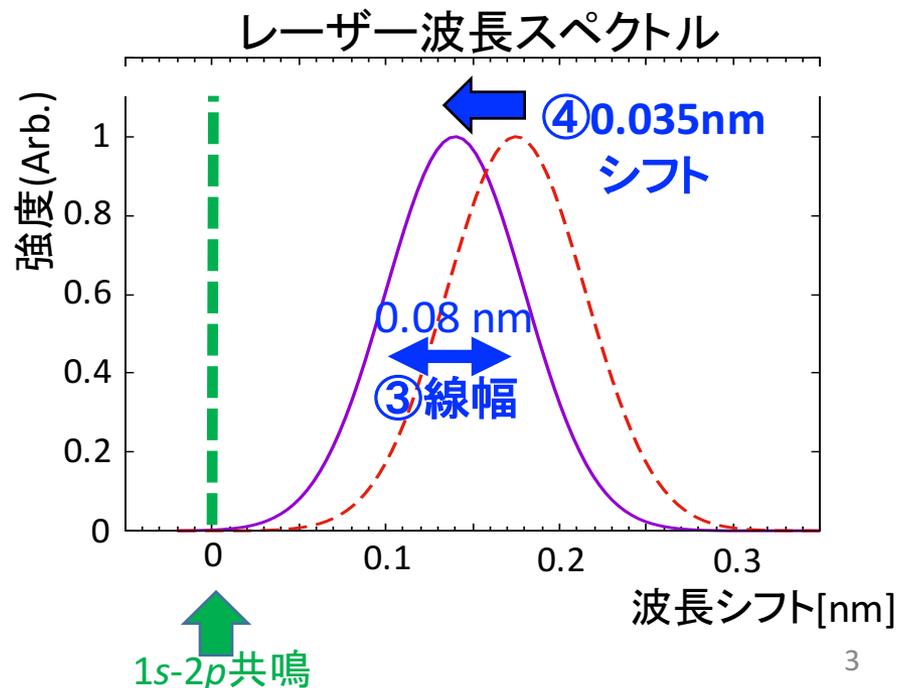
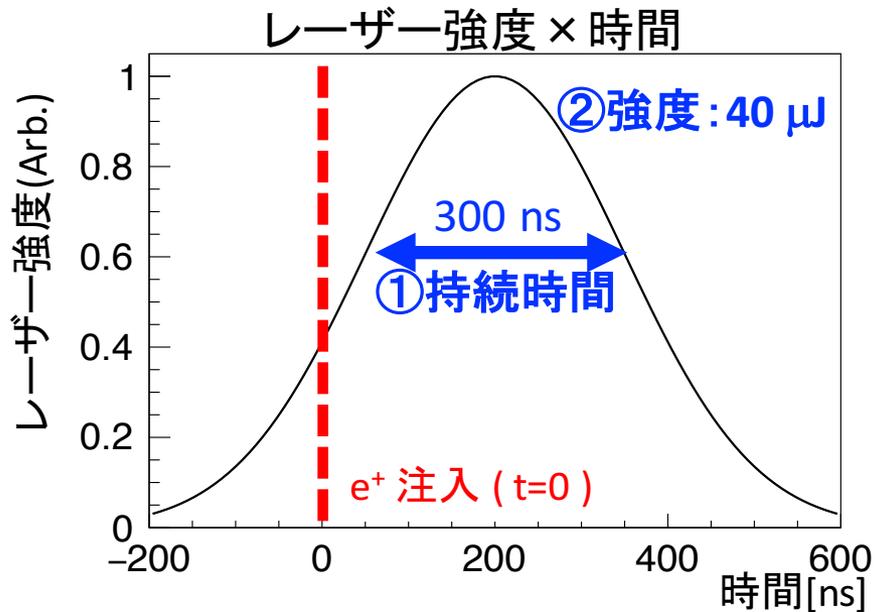
→冷却サイクルを飽和

③線幅: 0.08nm (140GHz)

→幅広い速度分布のPsを一気に冷却

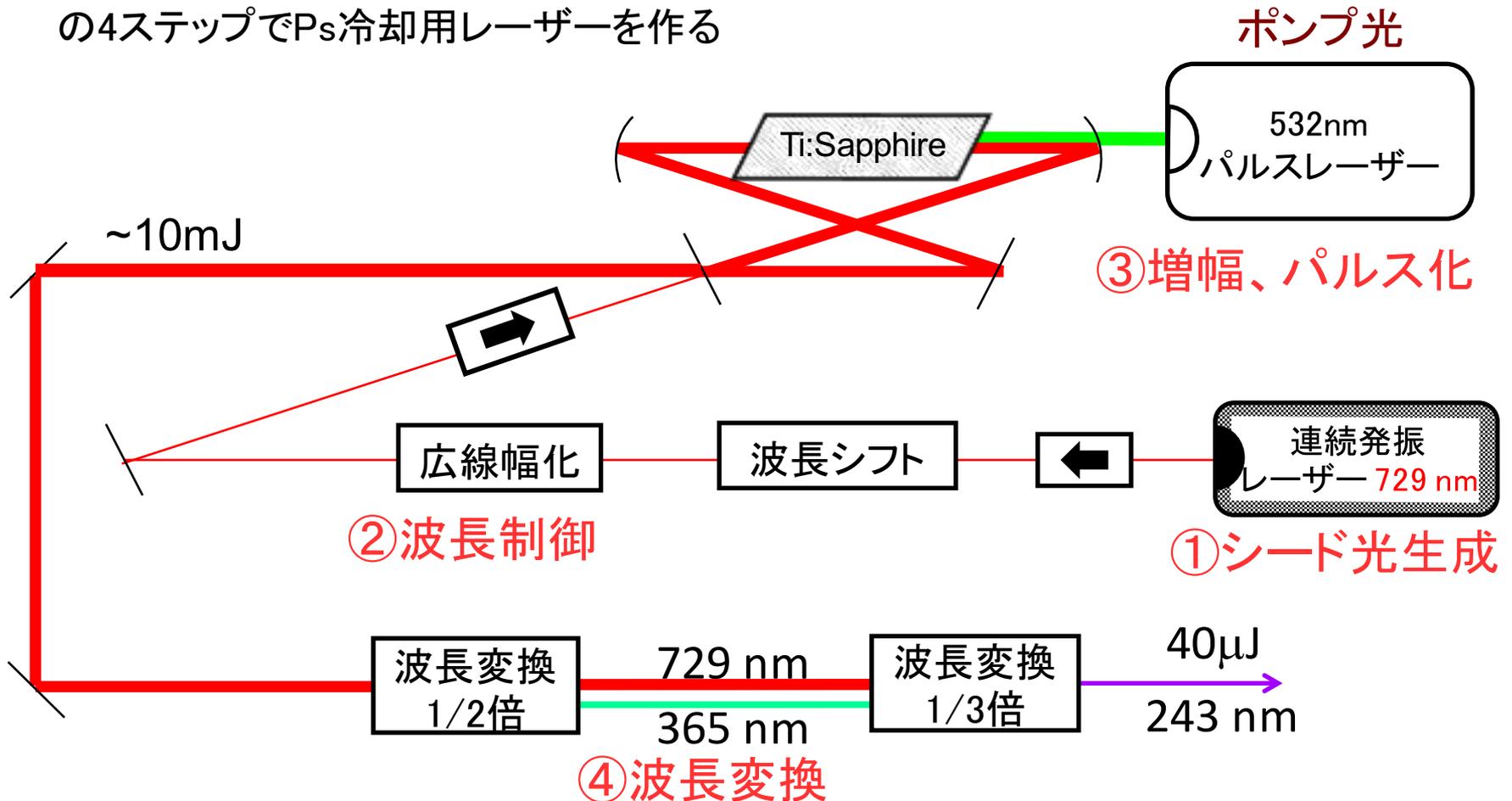
④波長シフト: 0.035nm (60GHz)

→Psの減速に合わせ300nsで時間変化



# Psレーザー冷却系の概要

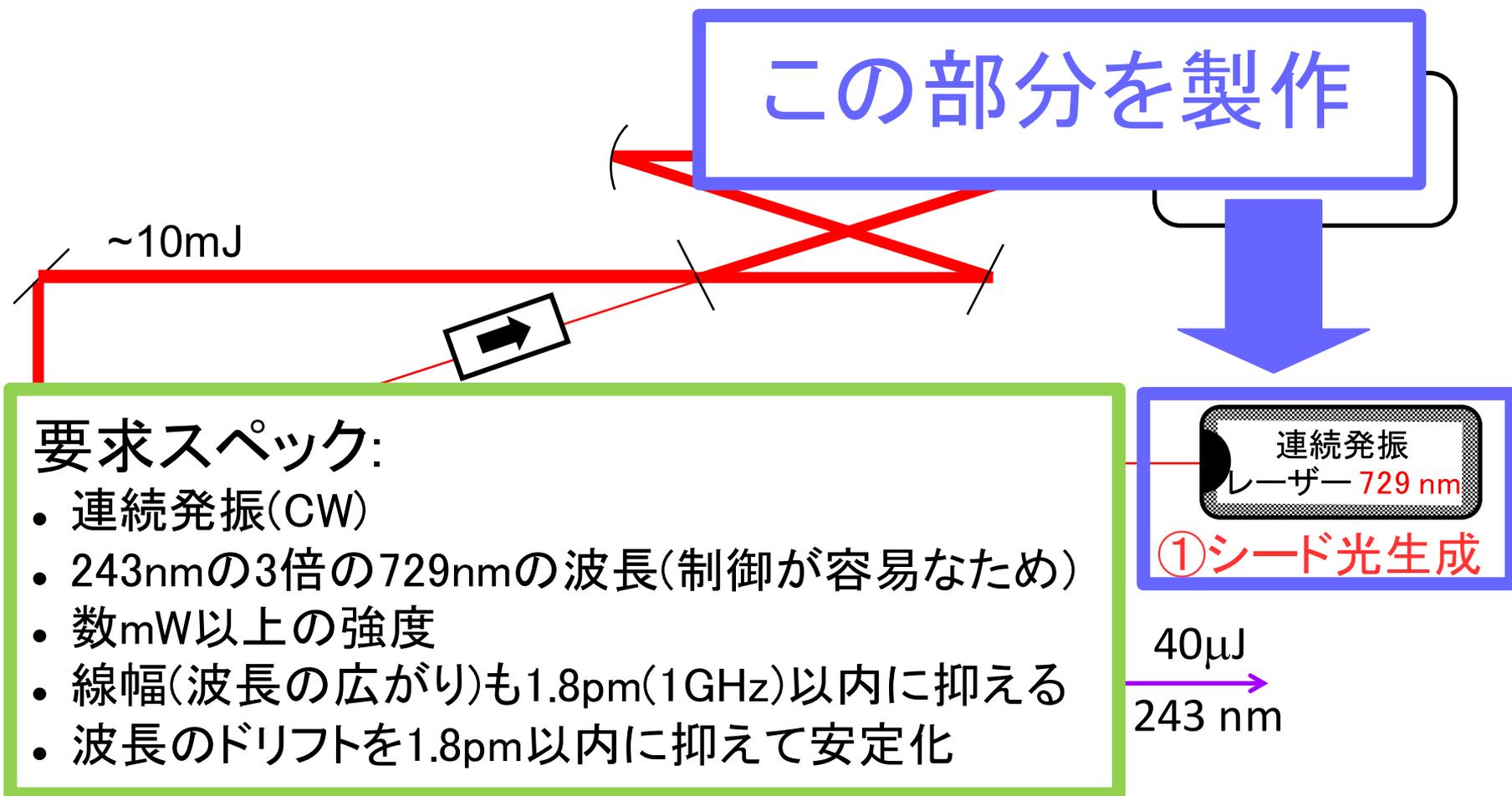
①シード光生成→②波長制御  
→③増幅、パルス化→④波長変換  
の4ステップでPs冷却用レーザーを作る



# レーザー開発の現状①

## 連続発振729nmレーザー

- シード光: 連続発振729nmレーザーを製作した(→ECDL)



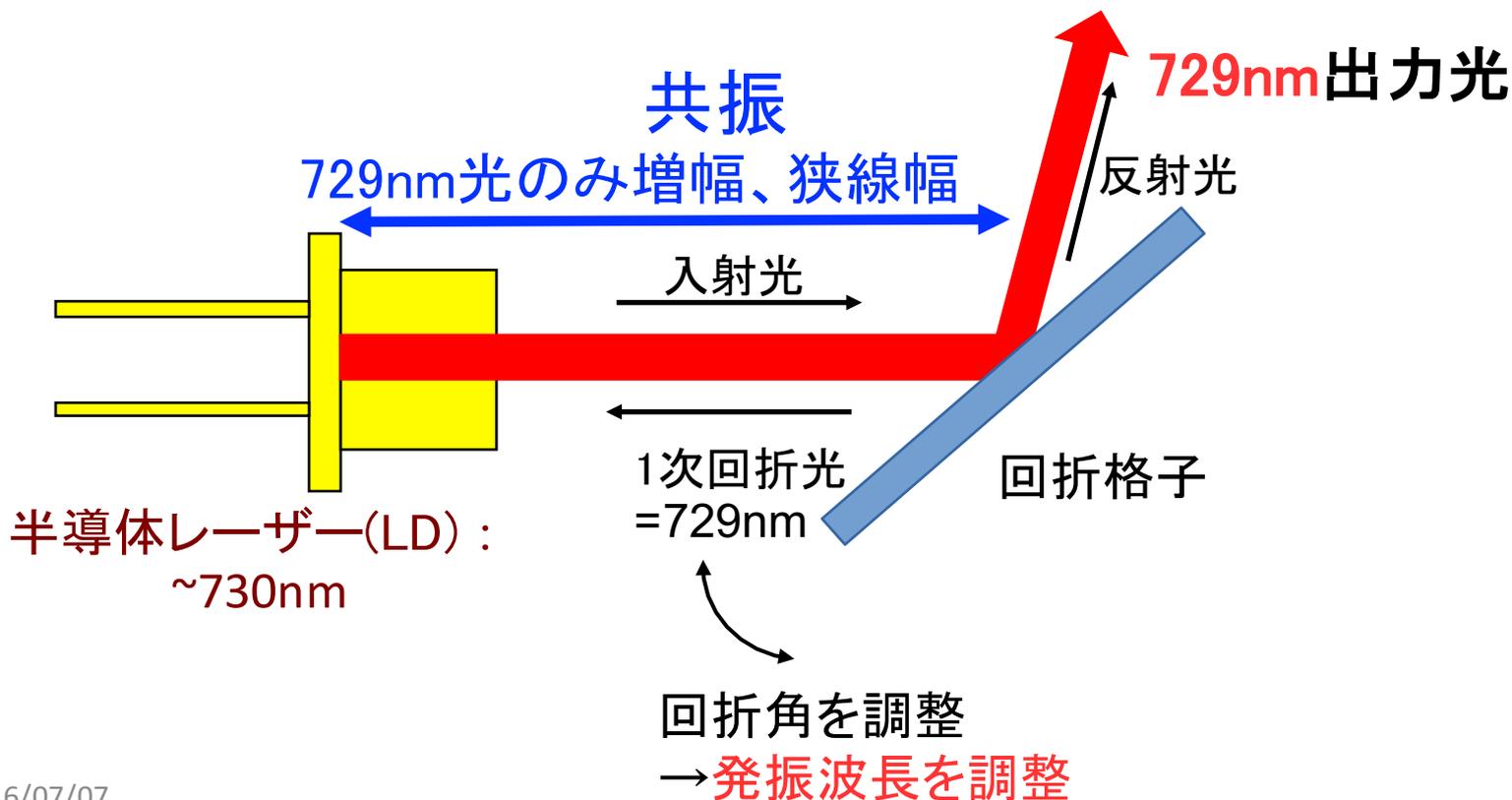
### 要求スペック:

- 連続発振(CW)
- 243nmの3倍の729nmの波長(制御が容易なため)
- 数mW以上の強度
- 線幅(波長の広がり)も1.8pm(1GHz)以内に抑える
- 波長のドリフトを1.8pm以内に抑えて安定化

40 $\mu$ J  
→  
243 nm

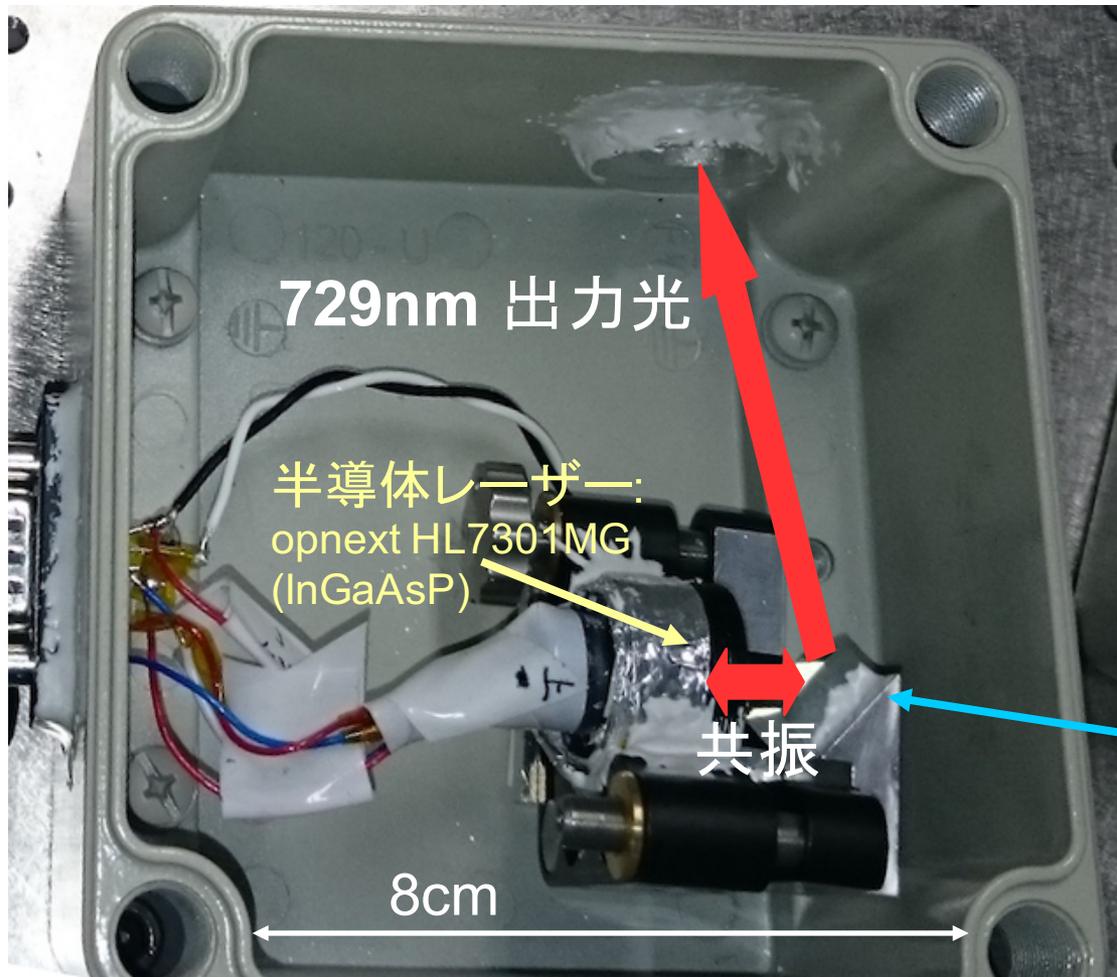
# 外部共振器型半導体レーザー(ECDL)

- 1次回折光(=729nm)を半導体レーザーの方に戻す
- 半導体レーザーと回折格子との間で共振器を形成
- 回折角を調節して729nmに波長を選択・調整 + 線幅を抑える



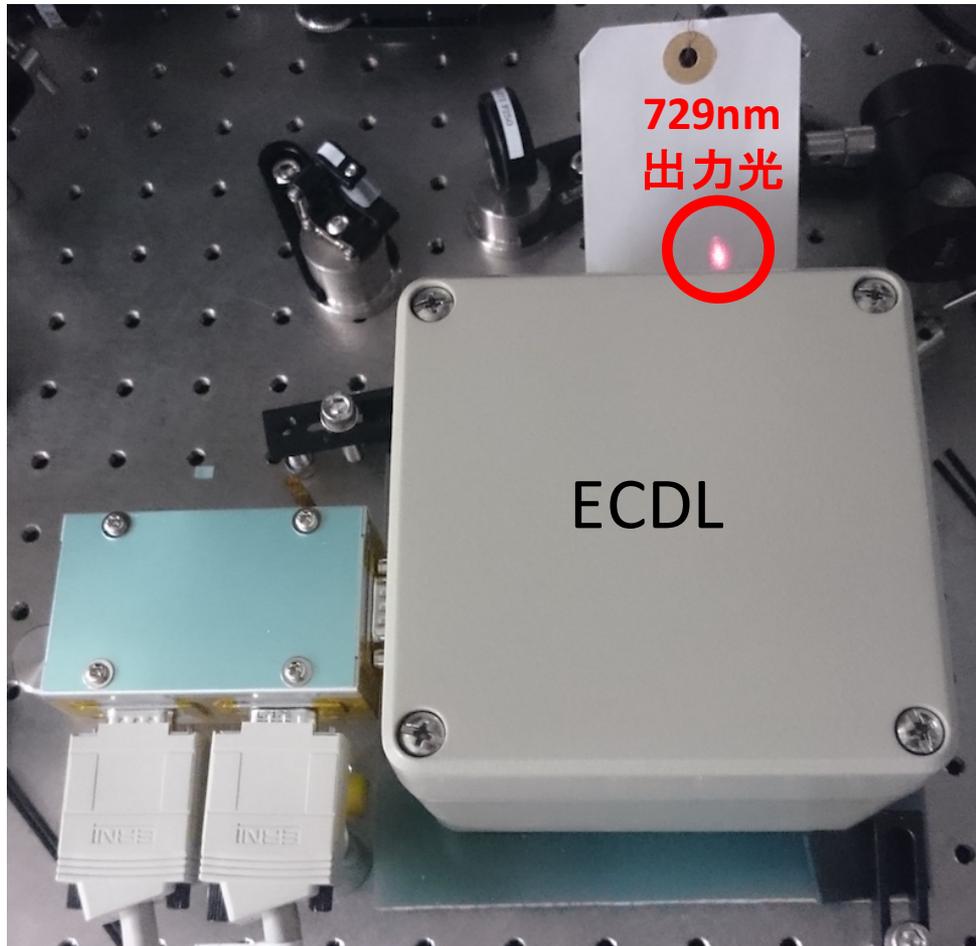
# ECDLの製作 1/3

- 製作したECDL(内部)



# ECDLの製作 2/3

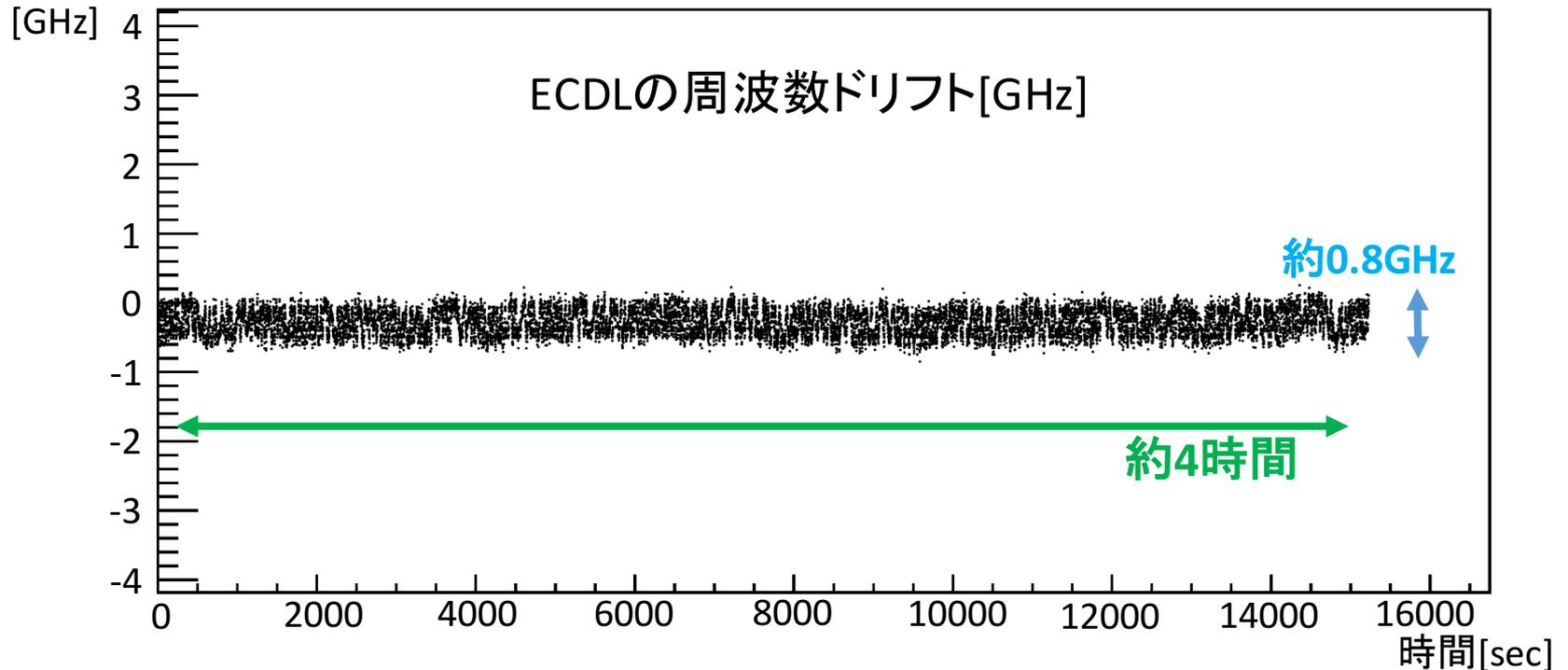
- 製作したECDL(外見)



- **729nm**に発振波長を選択
- **50kHz**以下の線幅を達成(要求値1GHzを大幅に下回る)
- **8.7mW**の十分な出力を確認

# ECDLの製作 3/3

- 周波数メーターを用いて、ECDLの**周波数安定性**を計測した



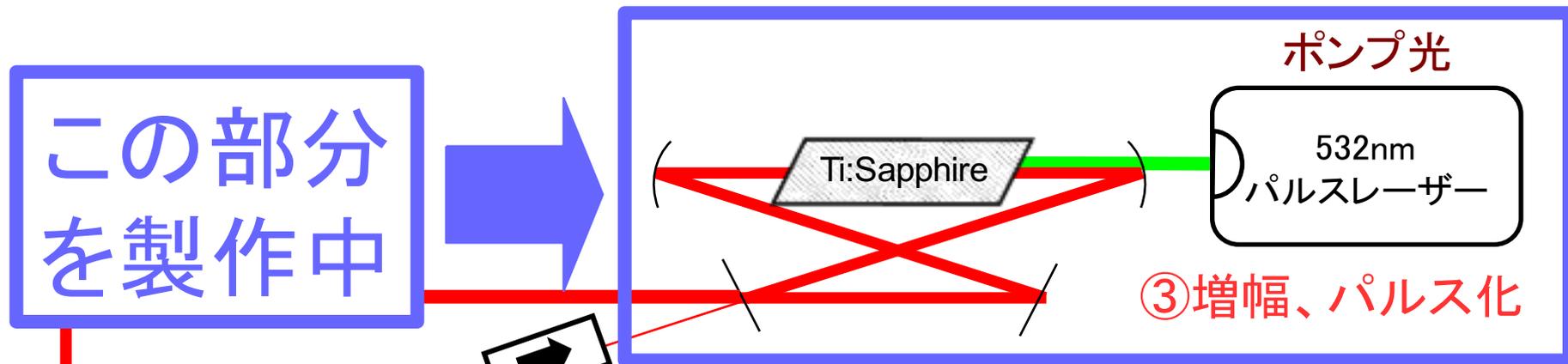
- 4時間以上にわたって**周波数ドリフトを目標値の1GHz以下**に抑えることに成功(**高い安定性を実現**)

➤ **発振波長・強度・安定性の要求スペック達成**

# レーザー開発の現状②

## 729nm光の増幅用共振器

- 次のステップとして、シード光の増幅・パルス化用の機構(共振器)を製作中



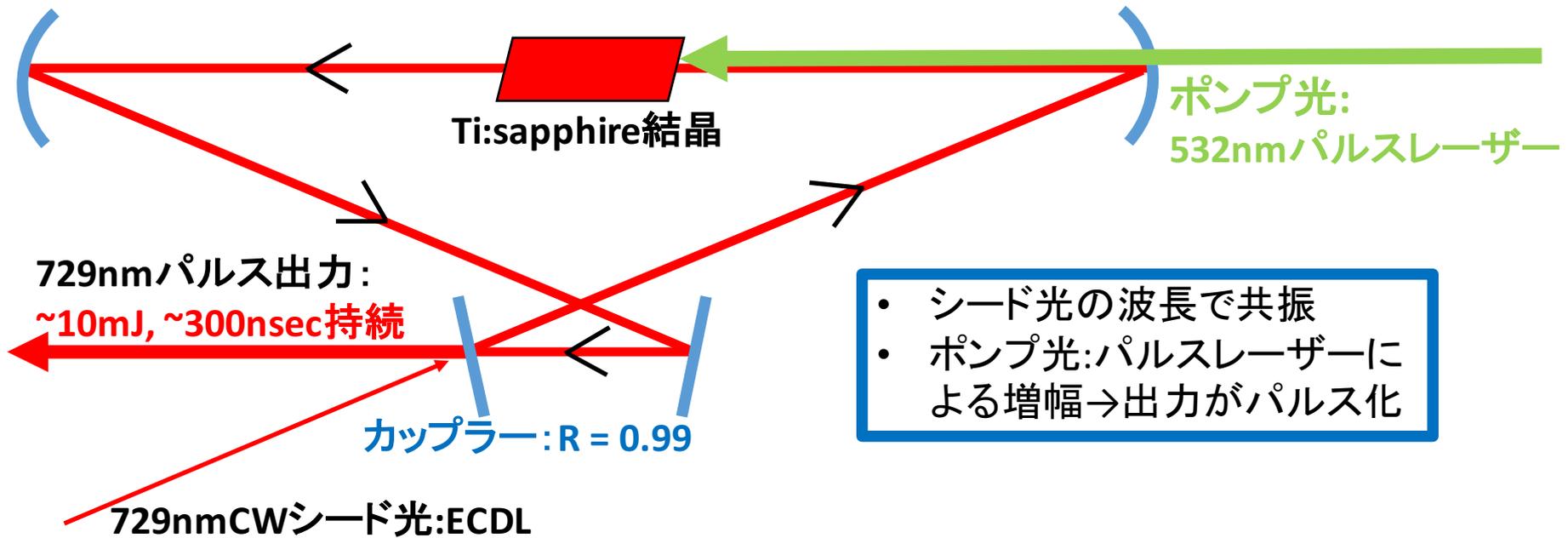
### 要求スペック:

- パルス化して $\sim 10\text{mJ/pulse}$ の強度、 $300\text{ns}$ の持続時間を持たせる
- シード光の波長スペクトルを保持して増幅



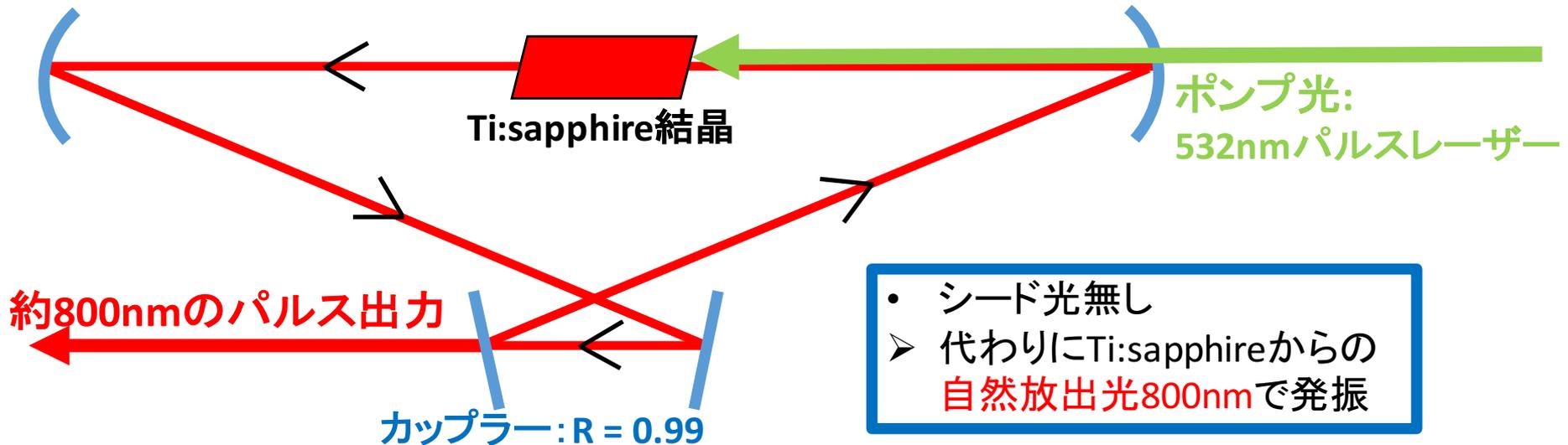
### ④波長変換

# 増幅・パルス化用共振器の概要



- ポンプ光として532nmパルスレーザーをTi:sapphire結晶に照射
  - シード光を注入するとその波長で発振(スペクトルが保持される)
  - 共振器中でシード光は増幅され、カップラー(部分透過ミラー)からパルス出力として取り出される
- 光子寿命(出力光の減衰時定数)を250nsに設計し、パルス持続時間を300nsに近づける

## ※シード光無しの場合

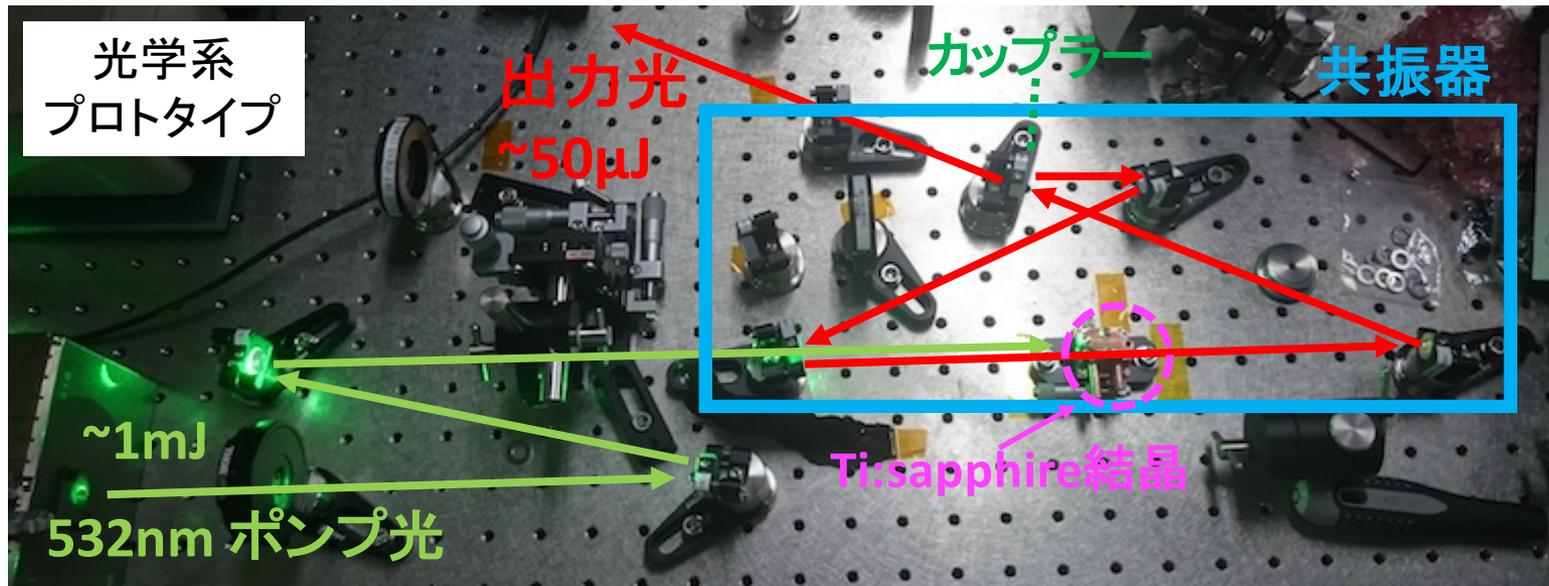


※実験ではテスト段階のためシード光をまだ入れていない

- シード光が無い場合仕組みは同じだが、Ti:sapphire結晶の自然放出光が増幅され発振
  - 約800nmを中心波長に広い帯域の出力

# 共振器製作の現状

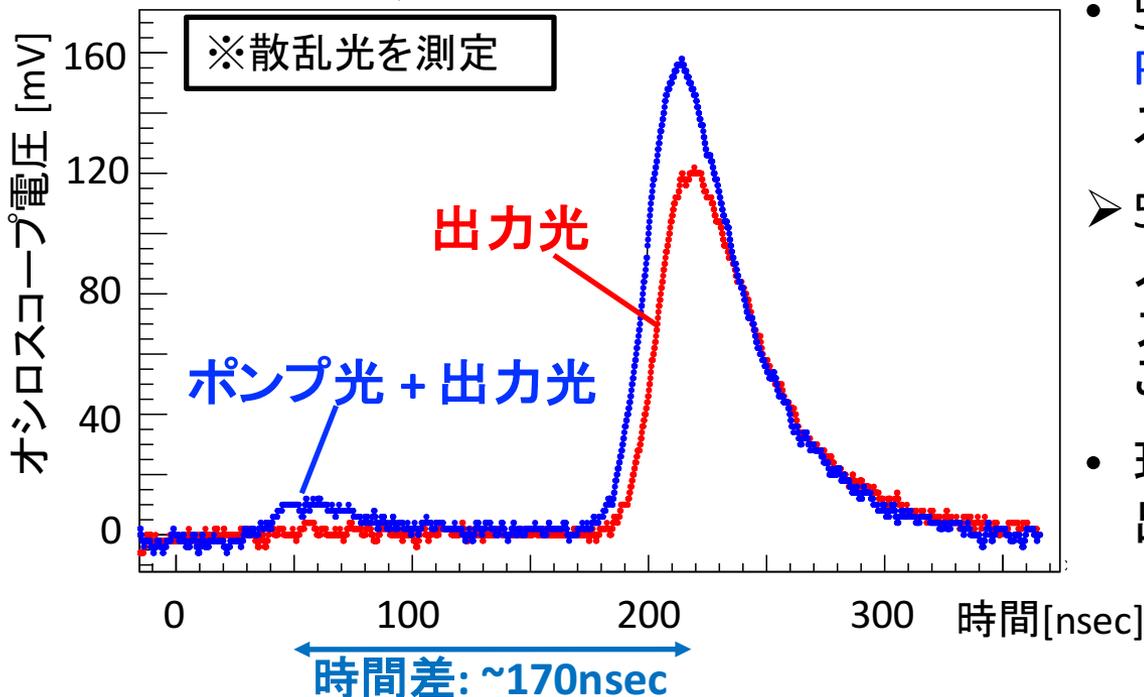
- シード光無し(800nm発振)での変換効率やパルスの時間波形などをテスト
- プロトタイプ光学系を作成(写真)
- テスト用に比較的弱い532nmポンプ光(1mJ/pulse)を使用



# 共振器の発振

- **発振の確認**のため出力パルスの波形をPD+オシロスコープで観察
- 700nm~1800nmの感度があるPD(**出力:800nmのみ見える**)と、500nm~1700nmの感度があるPD(**ポンプ光:532nm、出力:800nm両方見える**)の2種類を使って各パルスを識別

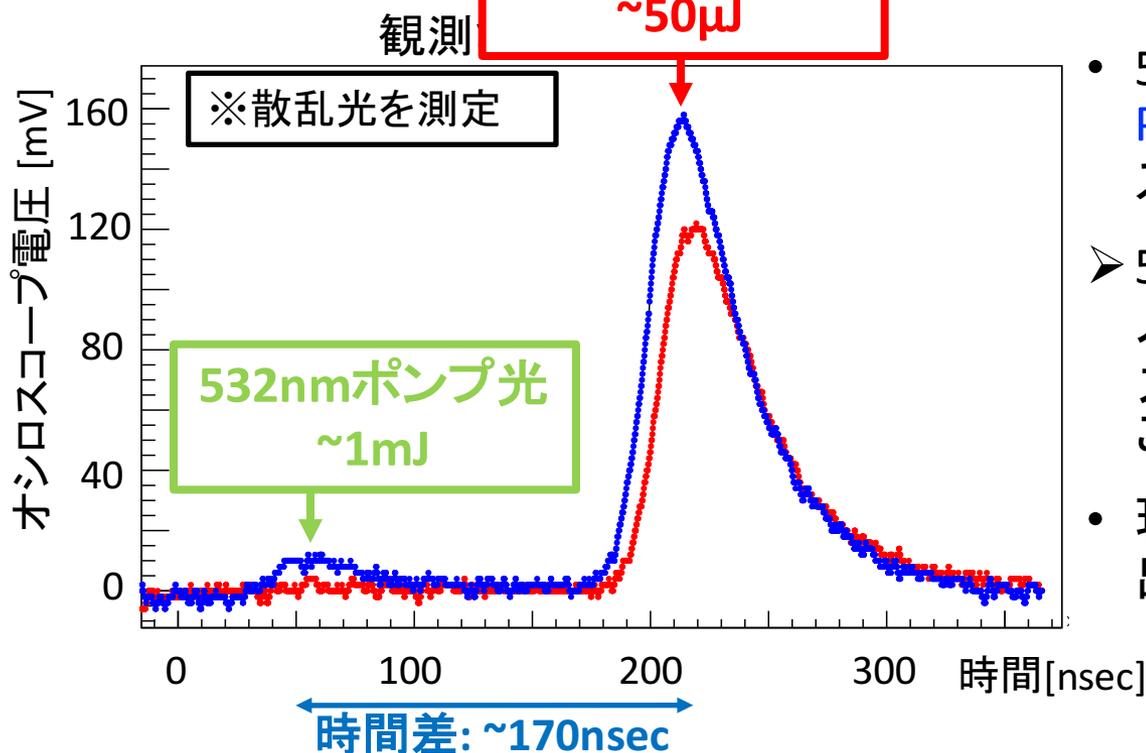
観測されたパルス波形



- 532nmのポンプ光は**片方のPD**でのみ見えて、出力パルスは両方のPDで見える
- 532nmポンプ光が共振器に入射して約170nsec後に出光パルスが発生していることを確認(**発振の証拠**)
- 現在ポンプ光~1mJに対して出力光~50μJ(**変換効率5%**)

# 共振器の発振

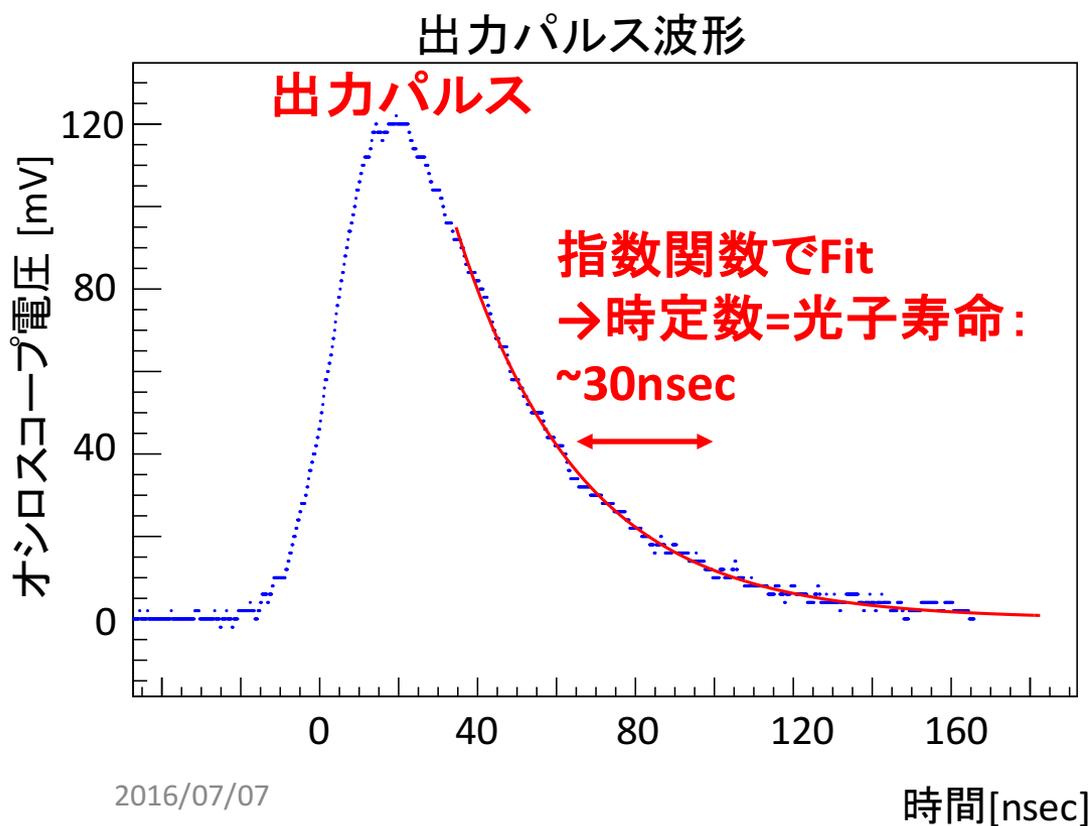
- 発振の確認のため出力パルスの波形をPD+オシロスコープで観察
- 700nm~1800nmの感度があるPD(出力:800nmのみ見える)と、500nm~1700nmの感度があるPD(ポンプ光:532nm、出力:800nm両方見える)の2種類を使って各パルスを識別



- 532nmのポンプ光は片方のPDでのみ見えて、出力パルスは両方のPDで見える
- 532nmポンプ光が共振器に入射して約170nsec後に出光パルスが発生していることを確認(発振の証拠)
- 現在ポンプ光~1mJに対して出力光~50 $\mu$ s(変換効率5%)

# 時間波形 - 光子寿命

- 共振の良さの目安として出力光の減衰の時定数: 共振器での**光子寿命**を調べる(共振器中での**ロスが少ないと長くなる**)
- 光子寿命: 光子が共振器に閉じ込められる時間
- パルスの**持続時間**を伸ばす上でも重要



- 光子寿命の観測値:  
**~30nsec**
- アライメント不足及びミラーでのロスのせいで光子の閉じ込めが弱く、設計値の250nsecよりもかなり小さくなっている

# 共振器製作の今後

- 現状はシード光無しでの800nm発振

- シード光(ECDL)を入れて**729nmでの発振**を起こす

その上で

- **出力強度10mJ**を達成するため

- アライメント、ミラー反射率の改善によりエネルギー変換効率を改善(**目標10%**)

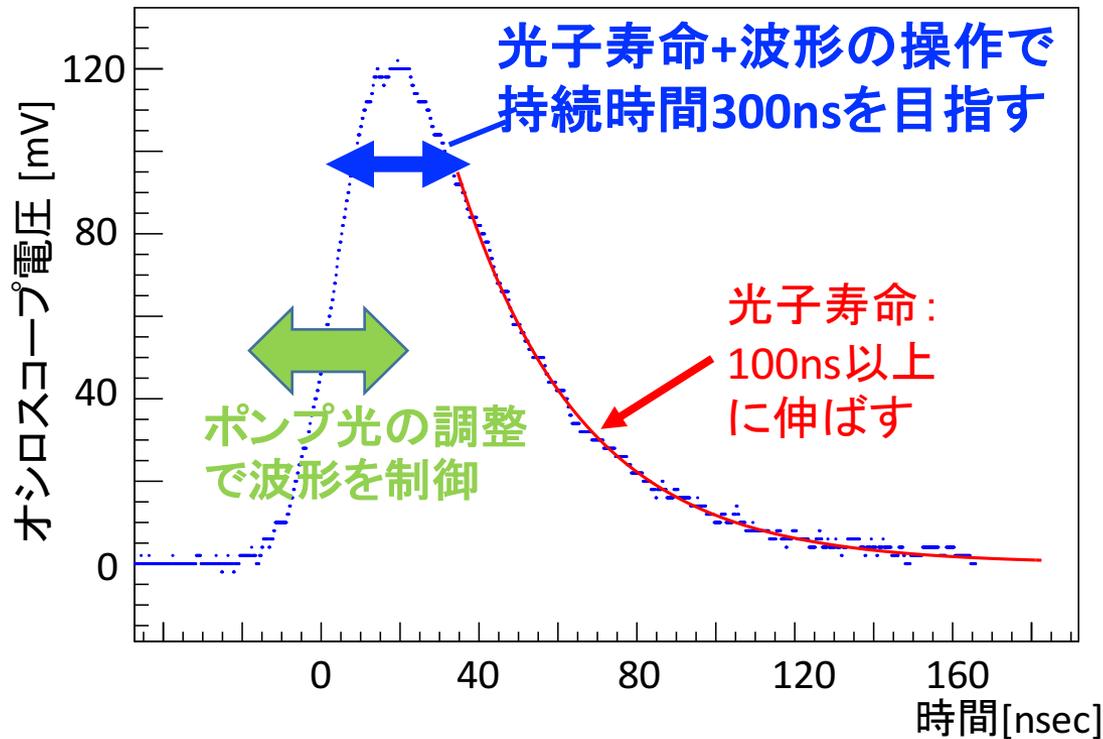
- 強度100mJ以上のポンプレーザー  
(SOLAR Laser Systems社 LQ529Bなどを検討)

- **持続時間300ns**を達成するため

- アライメント、ミラー反射率の改善により光子寿命を伸ばす(**目標100ns以上**)

- ポンプ光の時間プロファイルを調整し(幅広くする)、出力光の波形を操作することを検討

## 出力パルス波形



• 現

その

• 出

す

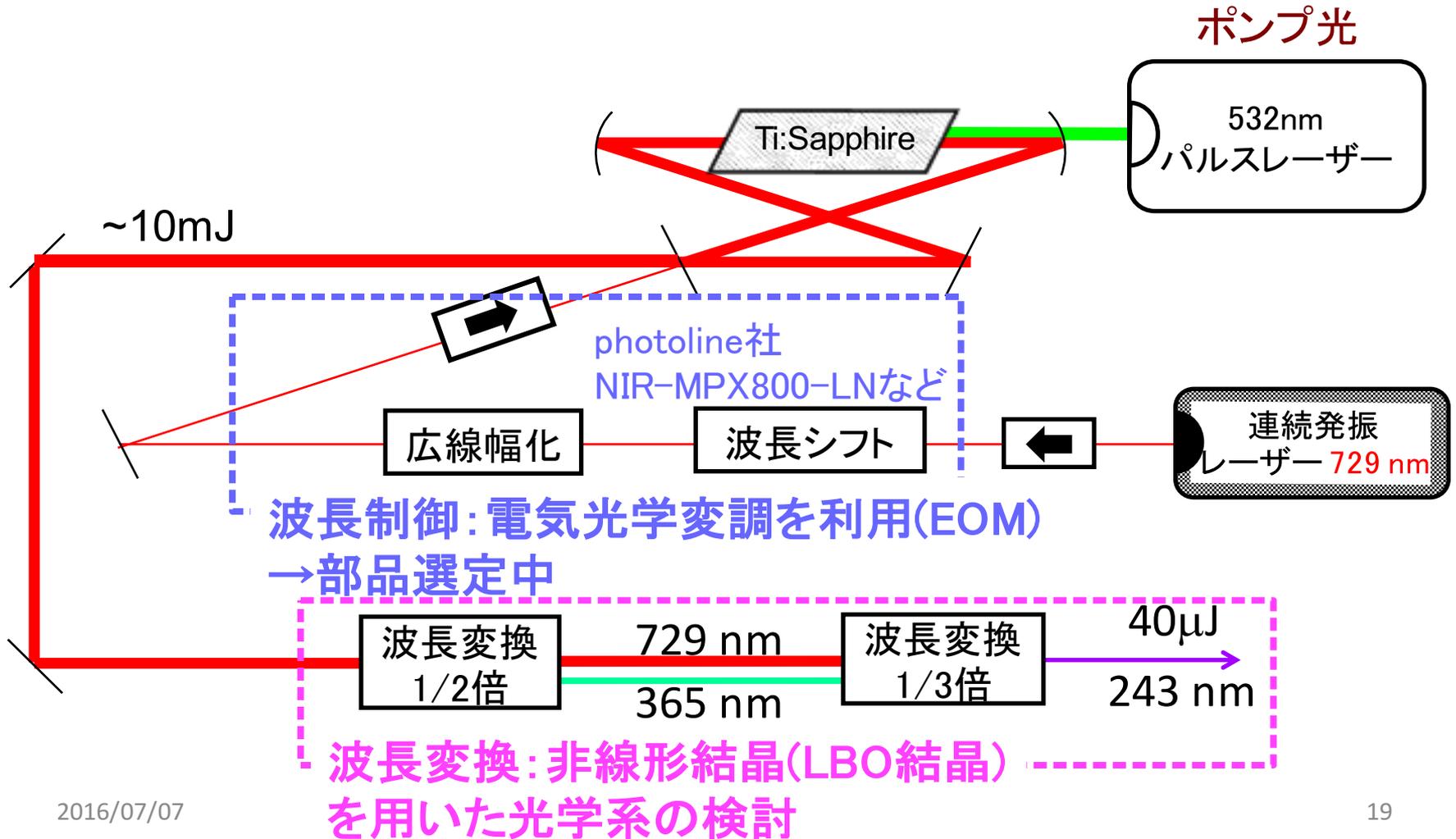
ギ一変換効率

• 持続時間300nsを達成するため

- アライメント、ミラー反射率の改善により光子寿命を伸ばす (目標100ns以上)
- ポンプ光の時間プロファイルを調整し(幅広くする)、出力光の波形を操作することを検討

# 今後の展望

- シード光の生成及びその増幅に加え、全体の光学系についても設計を進めている



# 今後の展望

- シード光の生成及びその増幅に加え、全体の光学系についても設計を進めている

ポンプ光

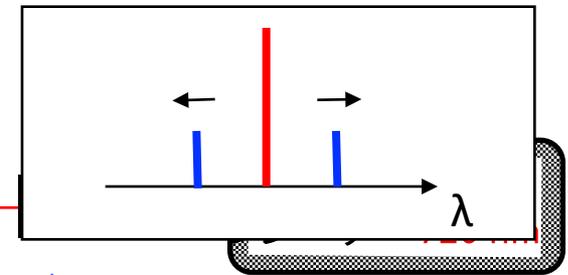
※EOM(Electro Optical Modulator):  
強誘電体結晶の電気光学効果を利用してサイドバンドを生成・操作  
→波長シフト・広線幅化を実現

photoline社  
NIR-MPX800-LNなど

広線幅化

波長シフト

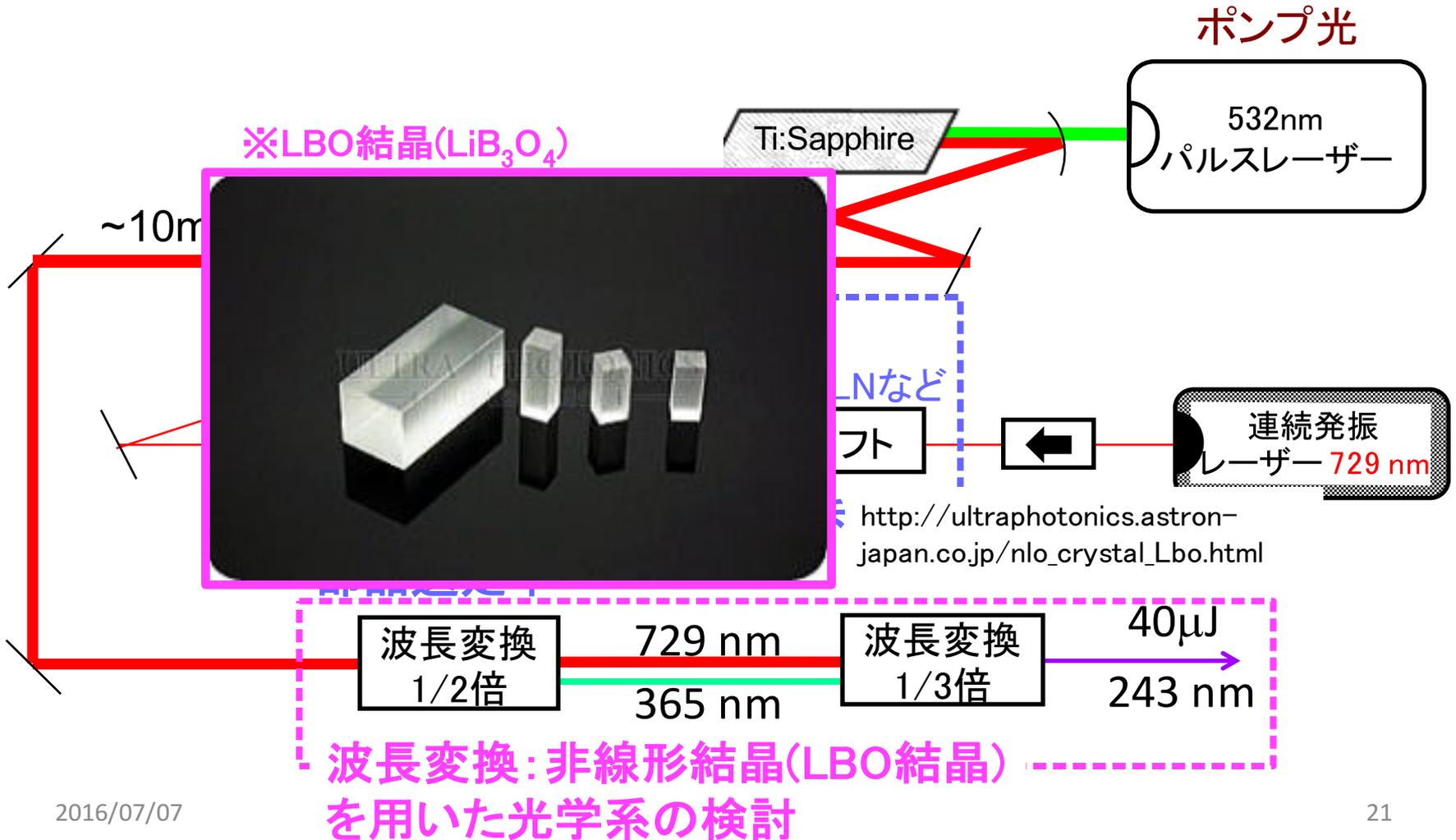
波長制御: 電気光学変調を利用(EOM)  
→部品選定中



[http://www.hikari-trading.com/opt/photoline/file/nir\\_mpx800\\_ln\\_series.pdf](http://www.hikari-trading.com/opt/photoline/file/nir_mpx800_ln_series.pdf)

# 今後の展望

- シード光の生成及びその増幅に加え、全体の光学系についても設計を進めている



# まとめ

- PsのBECを実現するため、冷却用243nmレーザーを開発中。
- 第一ステップとして729nmCWシード光源の製作(ECDL)に取り組み、8.7mWの強度、50kHz以下の線幅、1GHz以下の周波数ドリフトを達成、スペックの目標値の実現に成功した。
- 次のステップとしてシード光増幅用の共振器を532nmポンプレーザーとTi:sapphire結晶を用いて製作中である。現在シード光の注入無しでの800nm発振に成功し、5%の変換効率と30nsecの光子寿命を達成している。
- 今後はシード光の注入により729nmで発振させつつ変換効率・光子寿命を改善する。また、100mJ以上の強力なポンプレーザーを使うことで10mJの出力強度を目指し、更にポンプ光の時間プロファイルを調整して出力パルスの波形制御と持続時間300nsを目指す。
- 全体部分については、波長制御用の必要部品を選定しつつ、波長変換のための光学系を検討している。
- 今後4年間でのPsレーザー冷却を目指す。