

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^A, 浅井 祥仁, 吉岡 孝高^B, 五神 真

東大理, 東大素粒子センター^A, 東大工^B



東京大学
素粒子物理国際研究センター
International Center for Elementary Particle Physics
The University of Tokyo



APSA
Advanced Photon Science Alliance

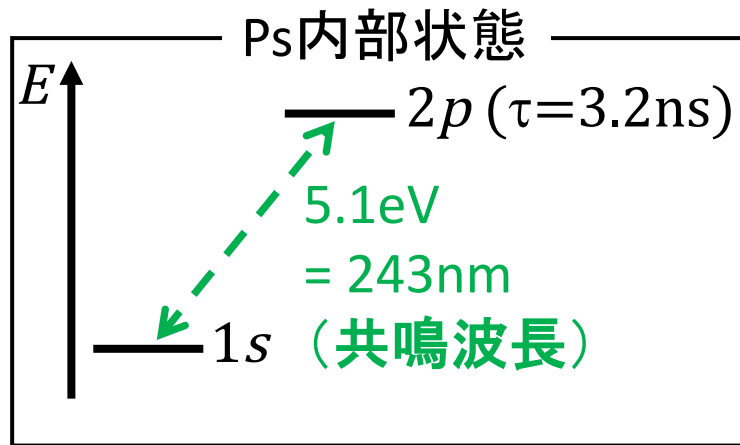
日本物理学会2016年秋季大会
2016.09.24 @宮崎大学木花キャンパス
24pSG-2

内容

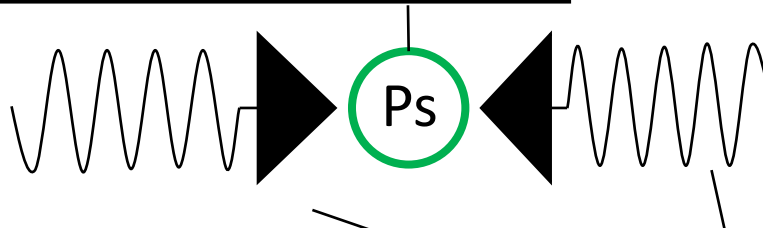
本講演: Ps冷却用レーザーの開発について

1. Ps冷却用レーザーの原理と設計概要
2. 開発状況の紹介
3. 展望・まとめ

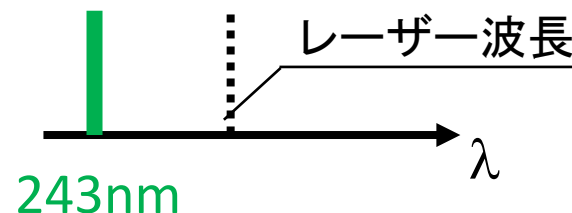
レーザー冷却の原理



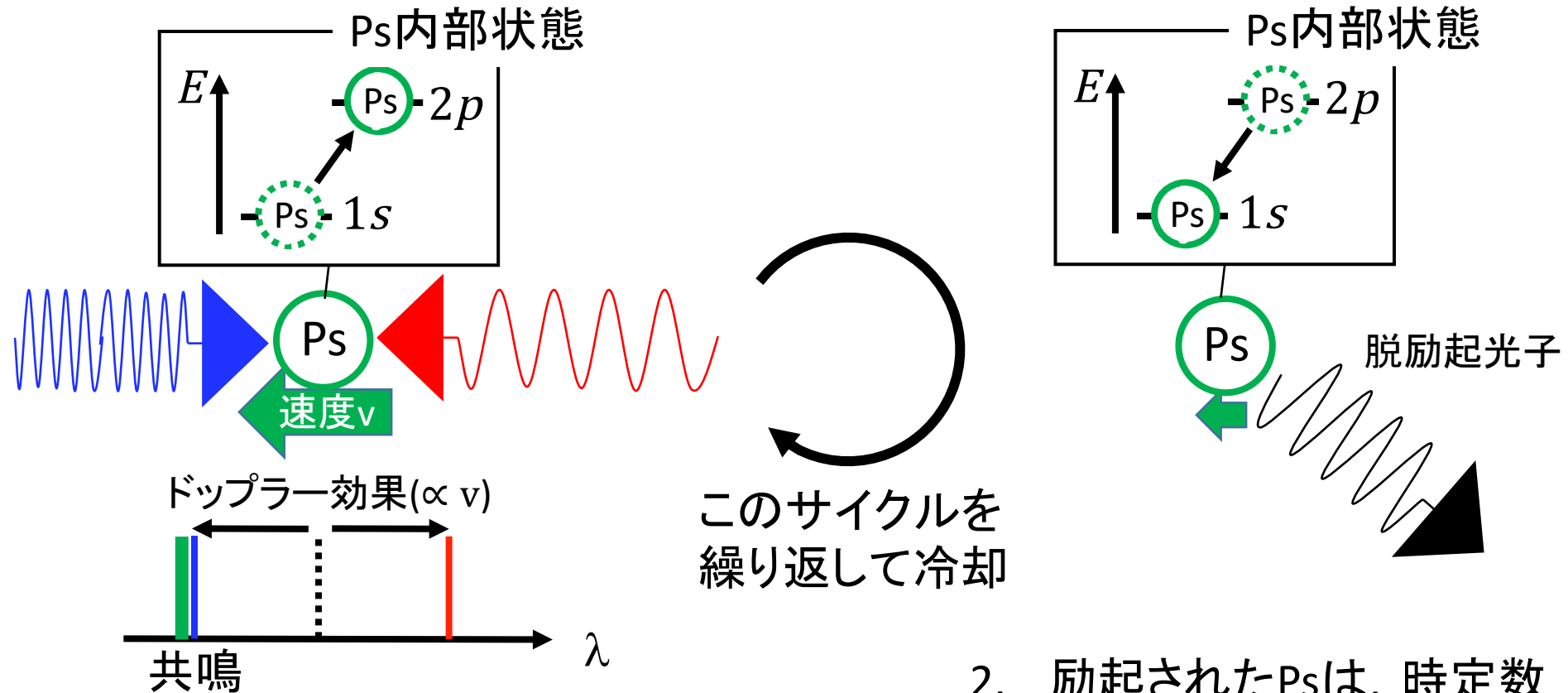
1s – 2p 準位間共鳴を利用:
Psは共鳴波長243nmぴったりの
光子を吸収して2p状態に励起
→時定数3.2nsで脱励起



レーザー冷却:
共鳴波長243nmより
少し波長の長い光を
あらゆる方向より入射



レーザー冷却の原理



1. 反対方向に進む光のみが共鳴し光吸収・励起
Psは光子の運動量分だけ減速

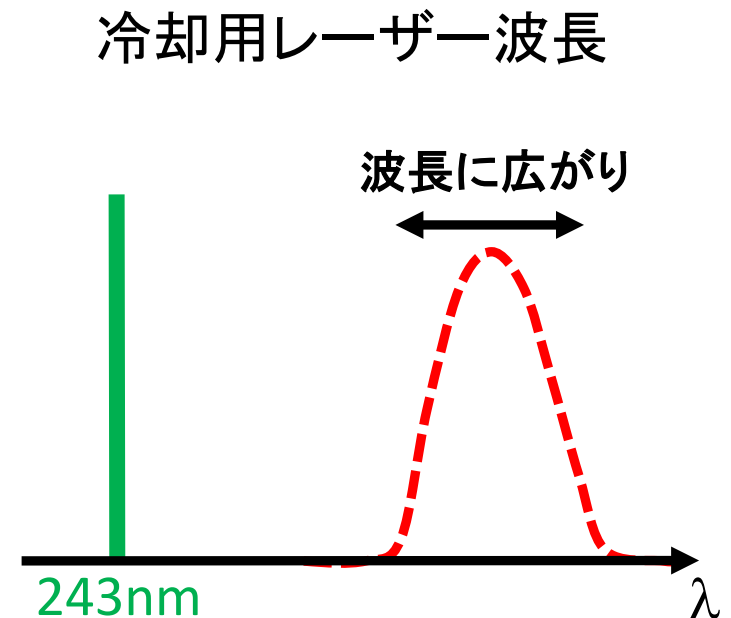
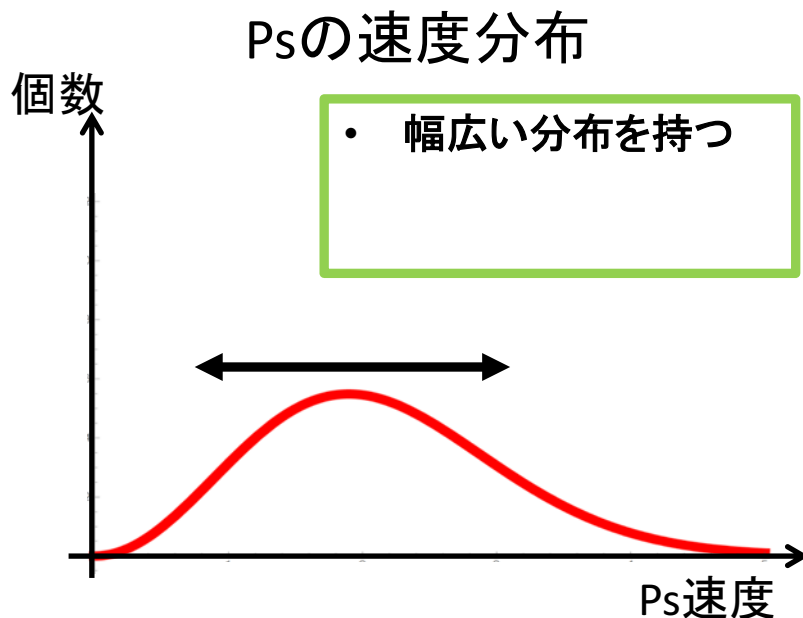
2. 励起されたPsは、時定数 3.2ns で自然に光子を放出し脱励起する
(光子の運動量方向はランダム、平均すれば温度は変わらない)

Ps冷却用レーザー

Psは非常に軽い原子(水素の $\sim 1/1000$)であり**ドップラー効果大**

→Psならではの特殊なスペック

- 非常に幅広い速度分布を持つため、様々な波長を同時に入射
 - **広線幅**(広い波長スペクトル)

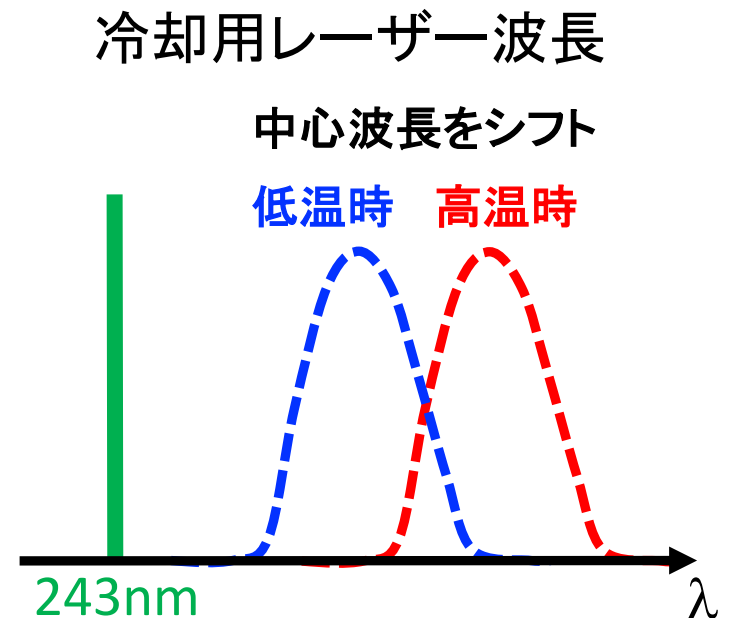
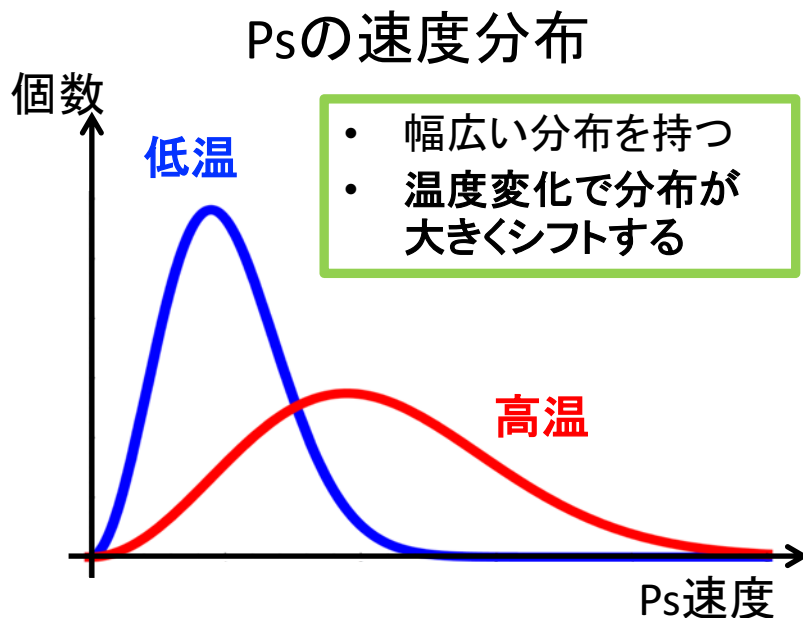


Ps冷却用レーザー

Psは非常に軽い原子(水素の $\sim 1/1000$)であり**ドップラー効果大**

→Psならではの特殊なスペック

- 非常に幅広い速度分布を持つため、様々な波長を同時に入射
 - **広線幅**(広い波長スペクトル)
- 速度分布が温度により大きく変化
 - Psの温度に合わせて**レーザー波長をシフト**



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紫外光パルスレーザー**作成を目指す

①持続時間: 300ns

→Psの寿命: $O(100\text{ns})$ にわたり冷却

②強度: $40\mu\text{J}$

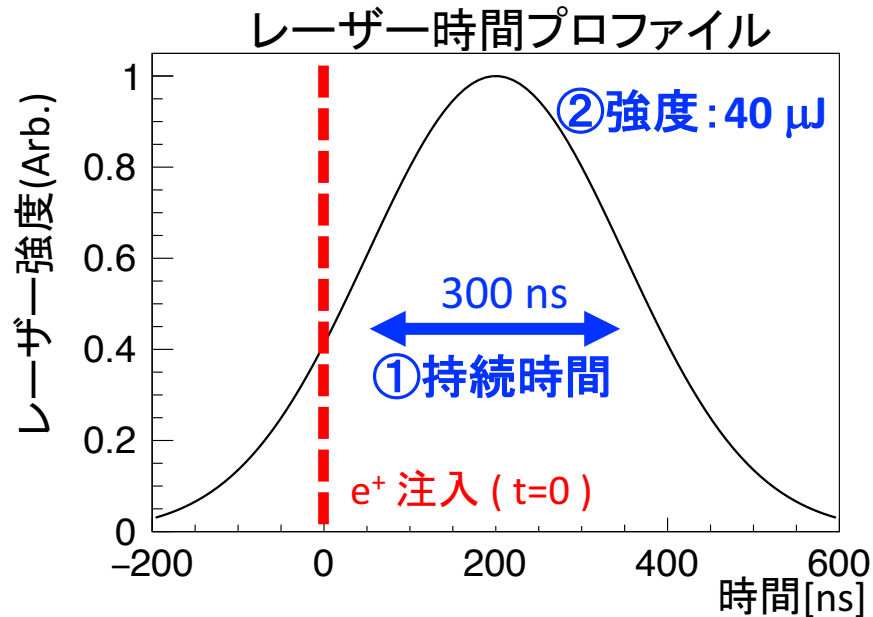
→冷却サイクルを飽和

③線幅: 0.08nm (140GHz)

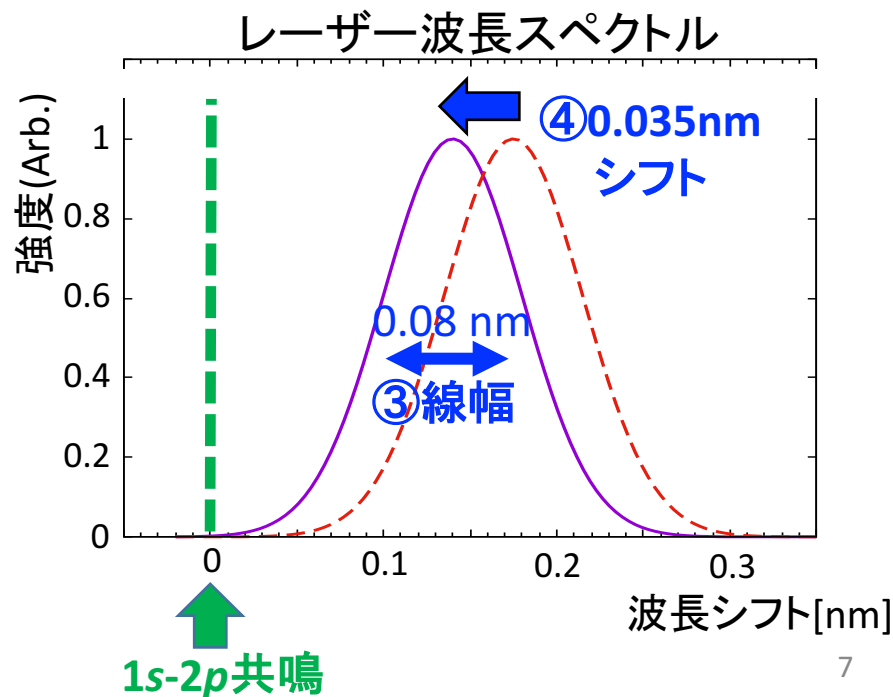
→Psの幅広い速度分布に対応

④波長シフト: 0.035nm (60GHz)

→Psの冷却に合わせ300nsで時間変化



2016/09/24



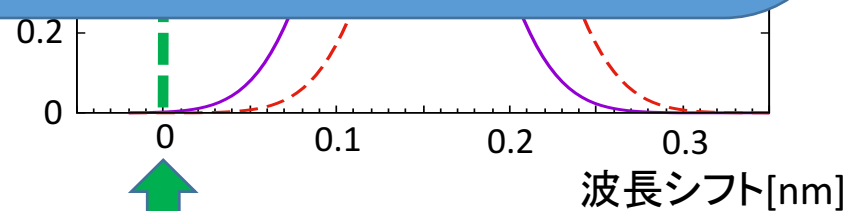
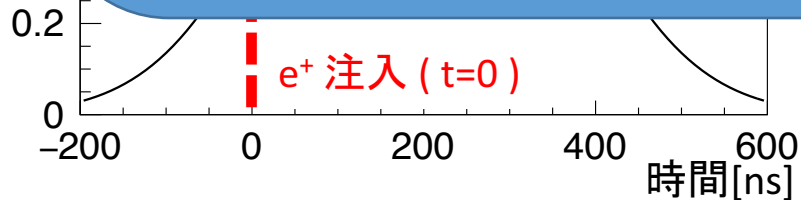
必要なレーザー特性

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紫外光パルスレーザー作成を目指す

- ① 長持続時間・広線幅のパルスレーザーは光学的に非常に特殊
 - ② 紫外線領域での大幅な波長シフトはまだない技術
- 非常にチャレンジングなスペックであり、新しい光源開発が必要

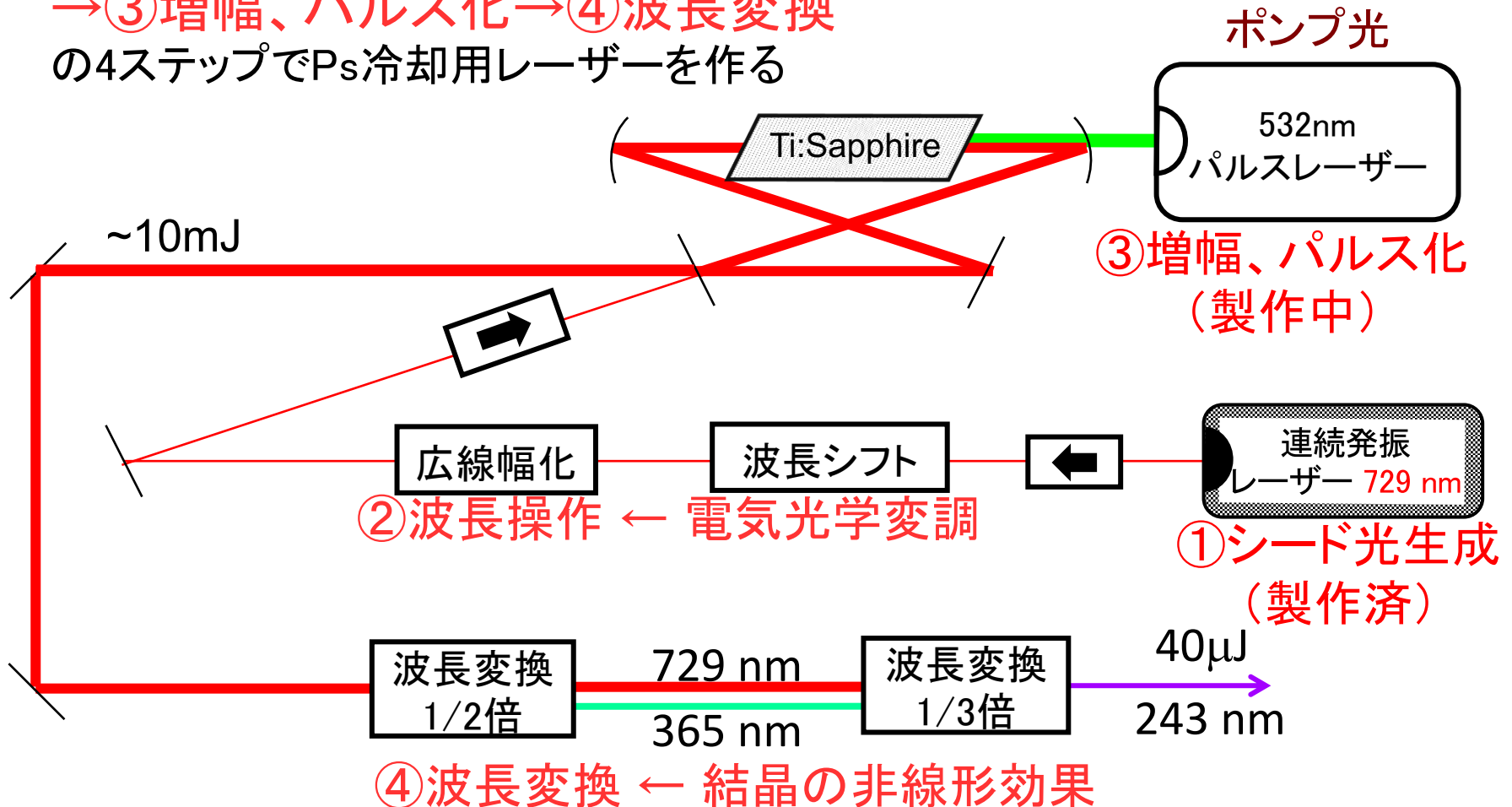
レーザー強度(Arb.)



Psレーザー冷却系の概要

必要スペックを達成するため、既存の技術を組み合わせて

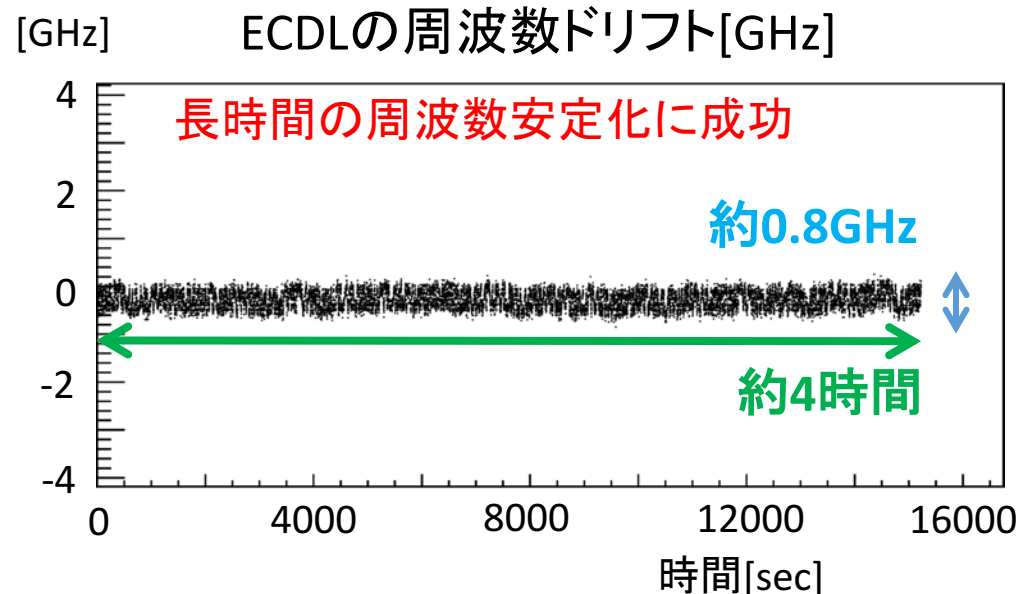
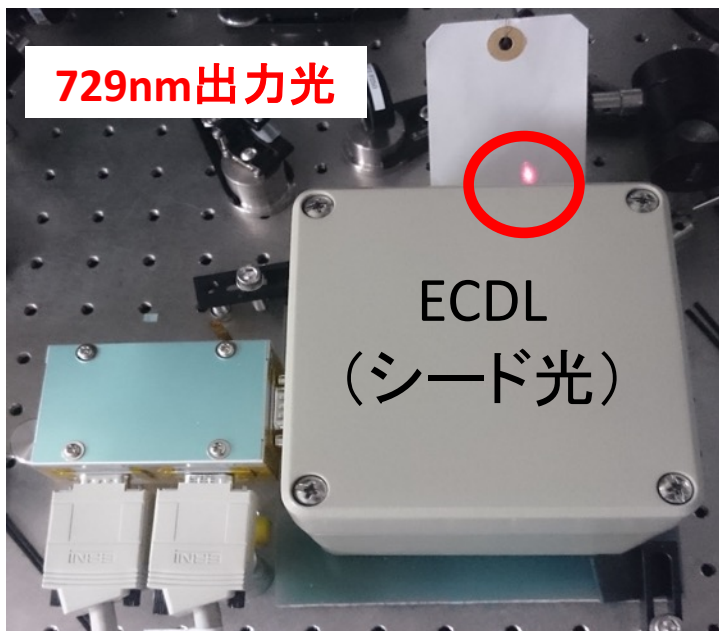
①シード光生成→②波長操作
→③増幅、パルス化→④波長変換
の4ステップでPs冷却用レーザーを作る



レーザー開発① 729nmシード光

シード光として外部共振器型半導体レーザー(ECDL)を製作した

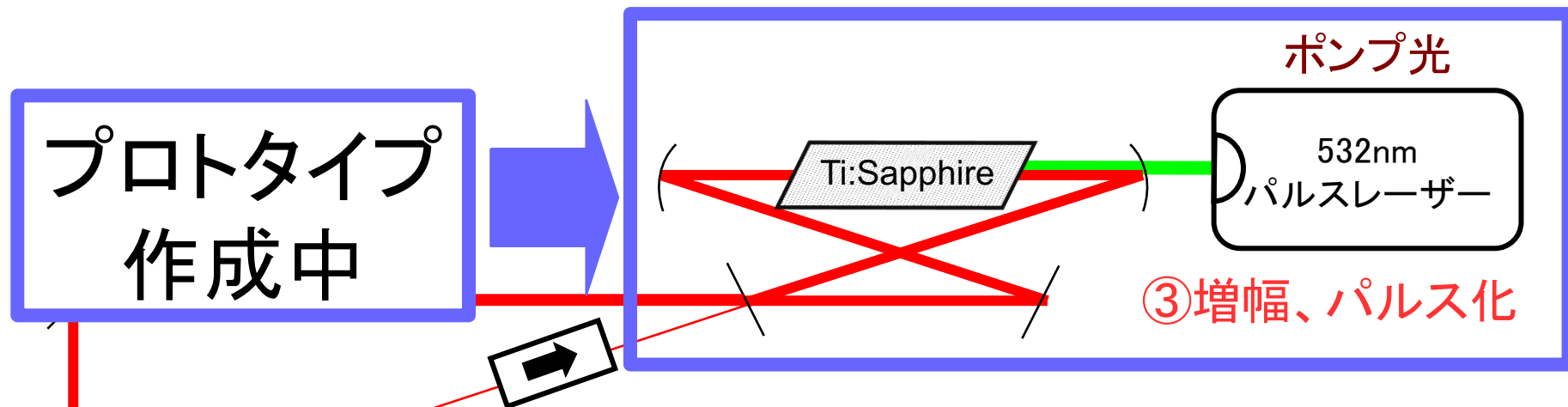
- 電気光学変調で波長操作(広線幅化+波長シフト)がしやすいように、連続発振で波長729nm($243\text{nm} \times 3$)
- 箱の密閉や囲いを作ることで空気の外乱を除去し、更に温度のフィードバック制御で周波数(波長)を十分に安定化(1GHz以下)
 - シード光完成



レーザー開発②

729nmシード光の増幅用共振器

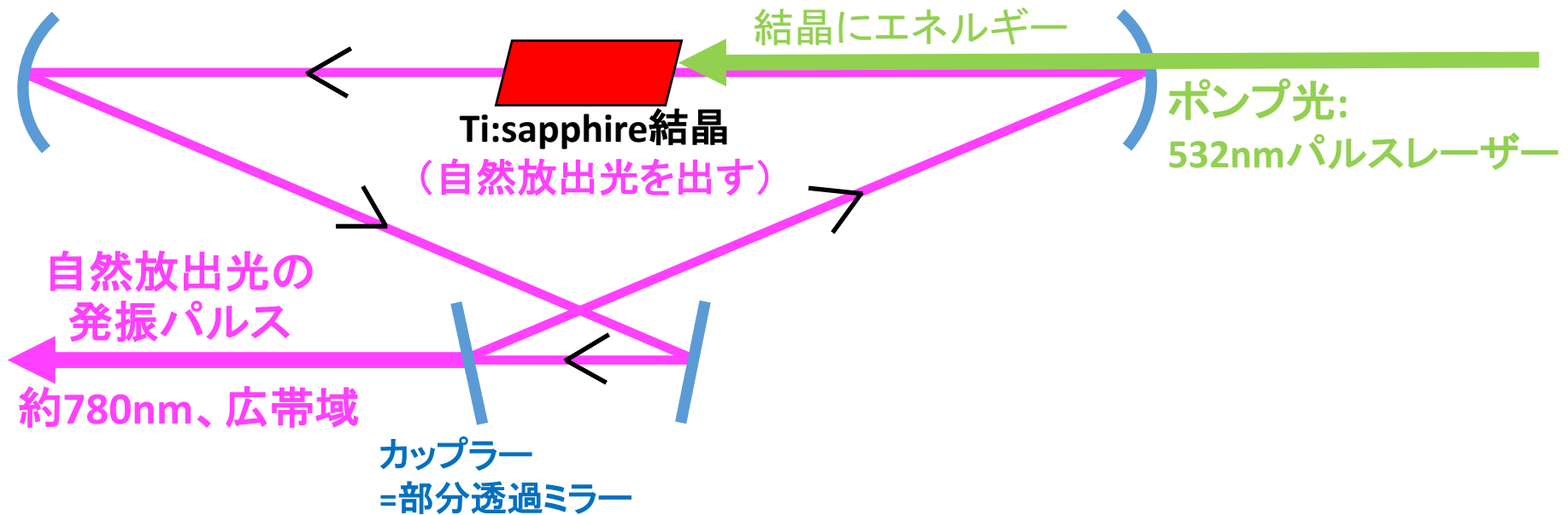
- 次のステップ: シード光を**増幅・パルス化**する機構 = **共振器**



まずは低強度・小型のプロトタイプを作成

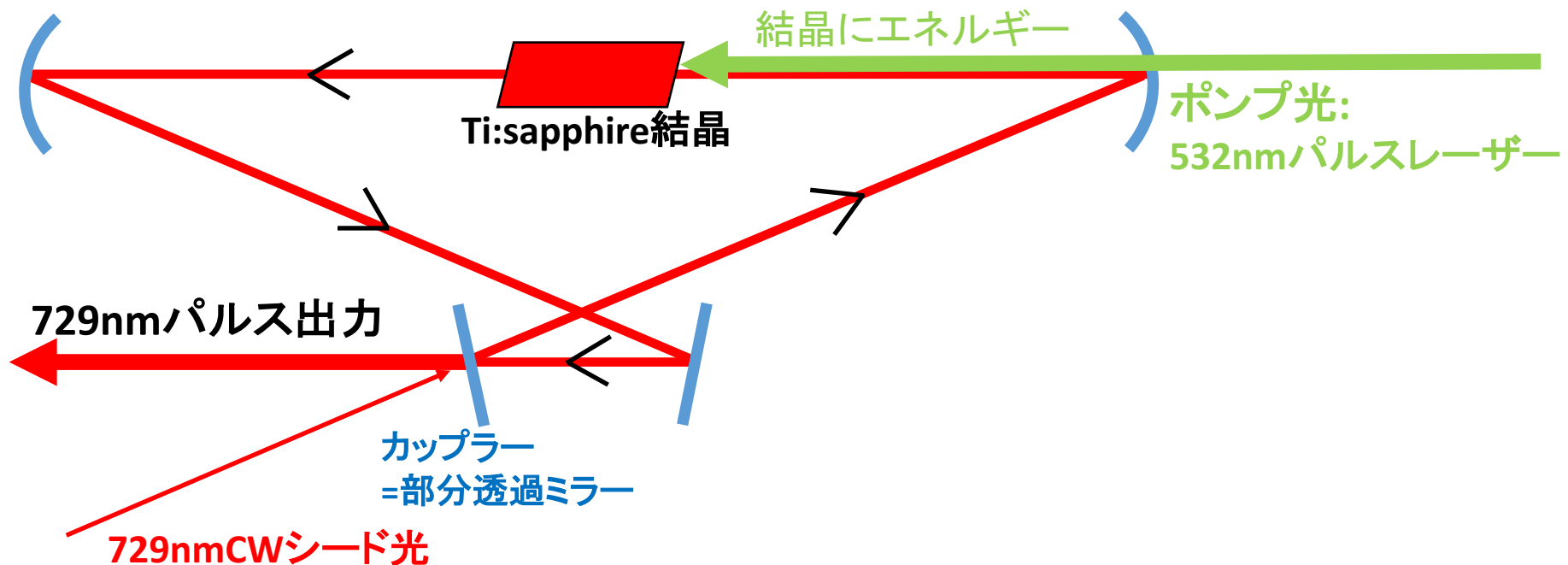
- シード光のパルス化、波長操作、波長変換といった物理プロセス・現象の確認
- 最終的な完成版(高強度・大型)の設計のメドを立て、要求スペックの実現可能性を確認

パルス化原理① 自然放出光の発振



- ポンプ光として532nmパルスレーザーをTi:sapphire結晶に照射して励起
 - エネルギーをためて**光の増幅が可能**になる
- 励起したTi:sapphireから**~780nmを中心とする広帯域の自然放出光**
 - 共振器内を何周もして結晶のもつエネルギーの分増幅されて発振
 - **ポンプ強度に応じたエネルギーを持つパルス**になる
- カップラー(部分透過ミラー)から**~780nmで広帯域の出力パルス**

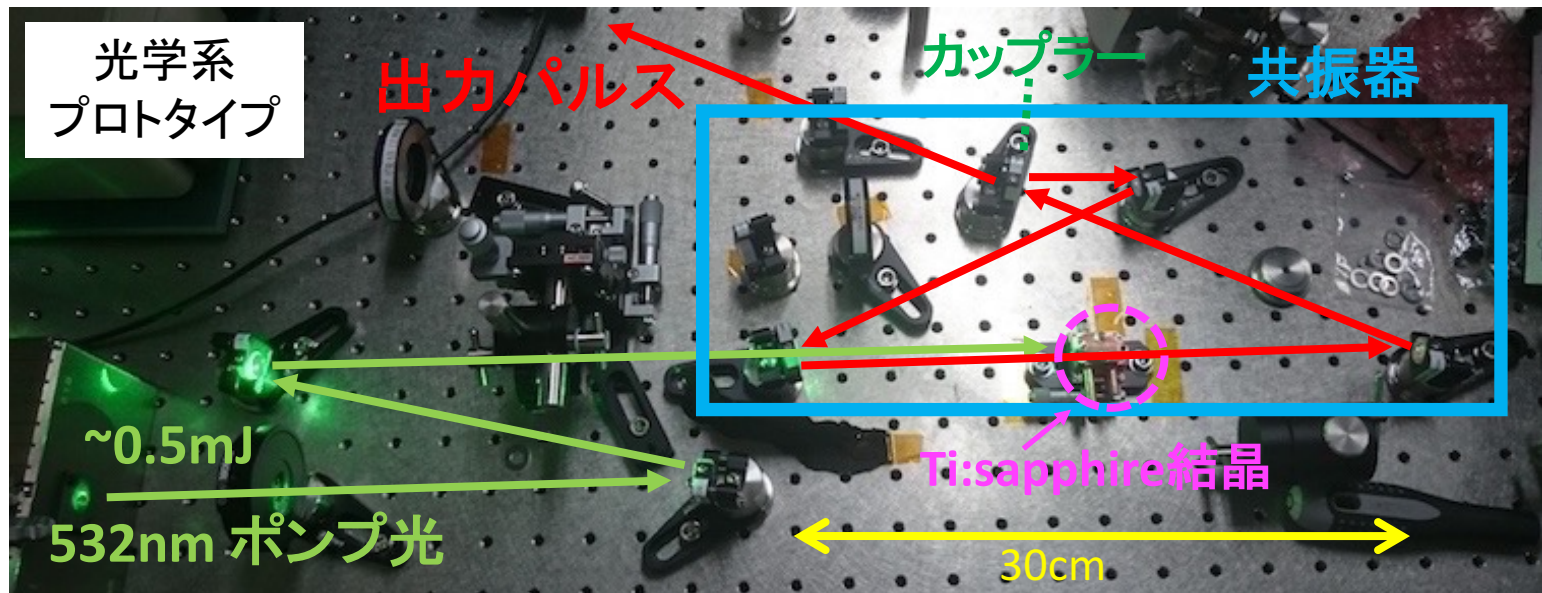
パルス化原理② シード光の発振



- 連続発振のシード光 (**729nm**) をカップラーから共振器に注入し、共振を起こして内部にためる
- Ti:sapphireからの自然放出光よりも十分強ければ、**シード光が代わりに増幅され、パルス発振**する(←原理自体は同じ)
- 増幅のとき、**波長スペクトルは維持**される
 - **シード光と同じ波長スペクトル(729nm)の出力パルス**

共振器の作成・特性評価

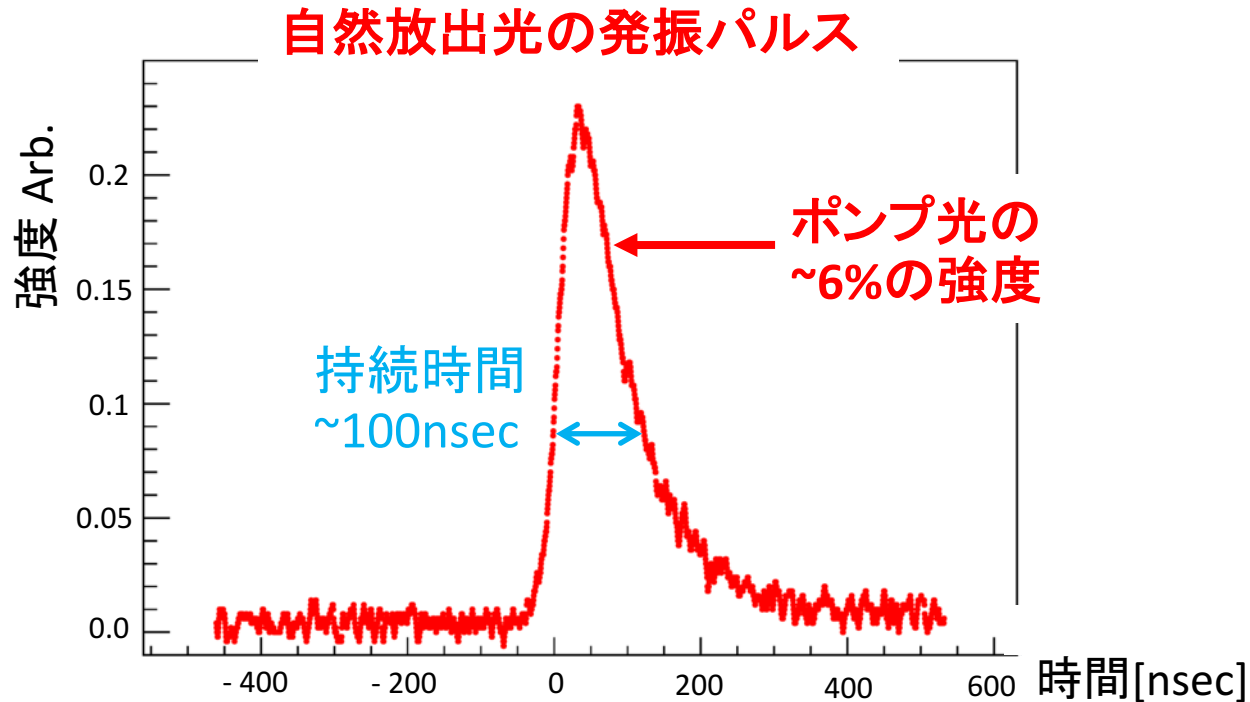
- プロトタイプの光学系を作成(写真)
- テスト用に低強度の532nmポンプ光(最大0.5mJ/pulse)を使用
- 共振器長: 1周750mm、共振器内でのビーム径: 0.1mm程度(コンパクト)
- まずはシード光を入れず、自然放出光のパルス発振を使って共振器の特性評価を行った。(変換効率など)



自然放出光の発振 - 波形と強度

- フォトダイオードで出力光を取得

➤ 自然放出光のパルス発振を確認(持続時間~100nsec)



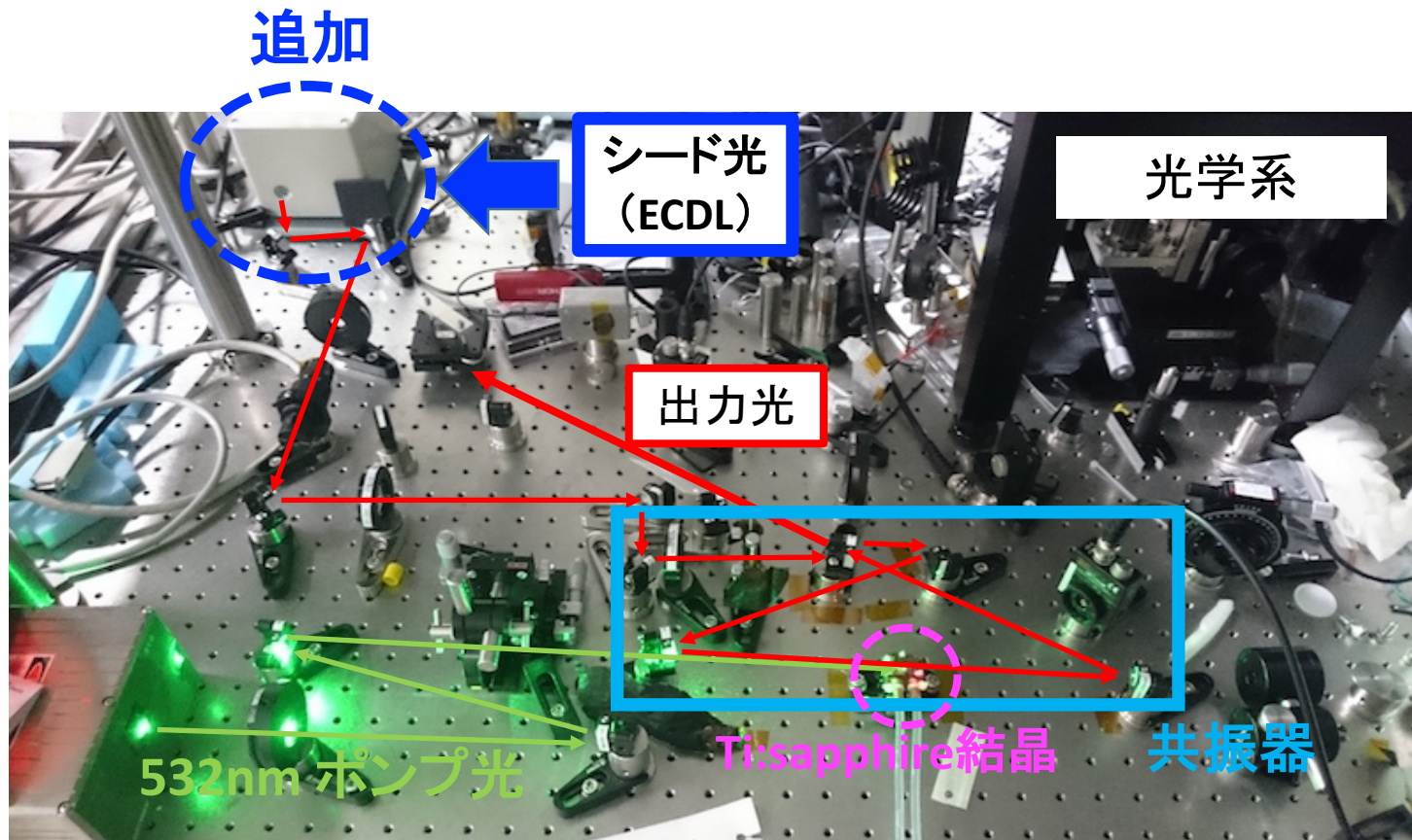
つづいて変換効率をパワーメーターで計測(共振器特性)

- ポンプ光460μJに対して、トータルで28μJのパルス出力:

➤ 変換効率~6%(← 期待される程度の水準)

シード光の注入

- 共振器プロトタイプにシード光(ECDL)を注入
➤増幅・パルス化が出来るかを試みた

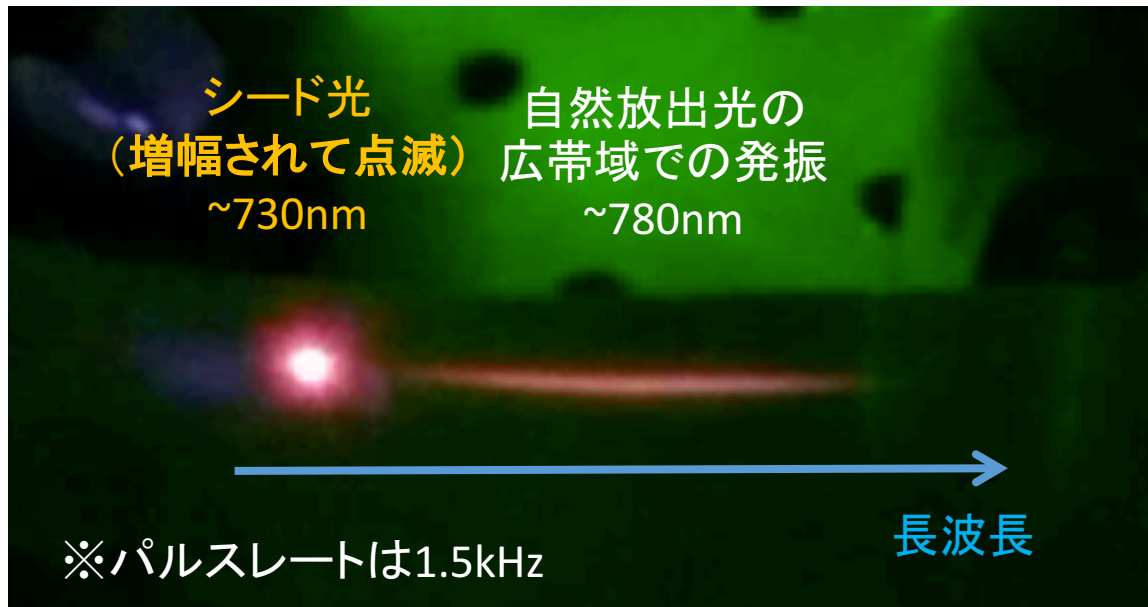


シード光増幅① - 波長分離

特性をみるため共振器にシード光を入れた時の出力光を回折格子で波長分離

- 自然放出光の発振による幅広い帯が見えた(写真右側)
- シード光のスポット(写真左側、増幅無しでも見える)
 - 点滅するように明るくなり、シード光の増幅が確認された

課題:「点滅」= 増幅が不安定 → 安定化させて明るいままにしたい



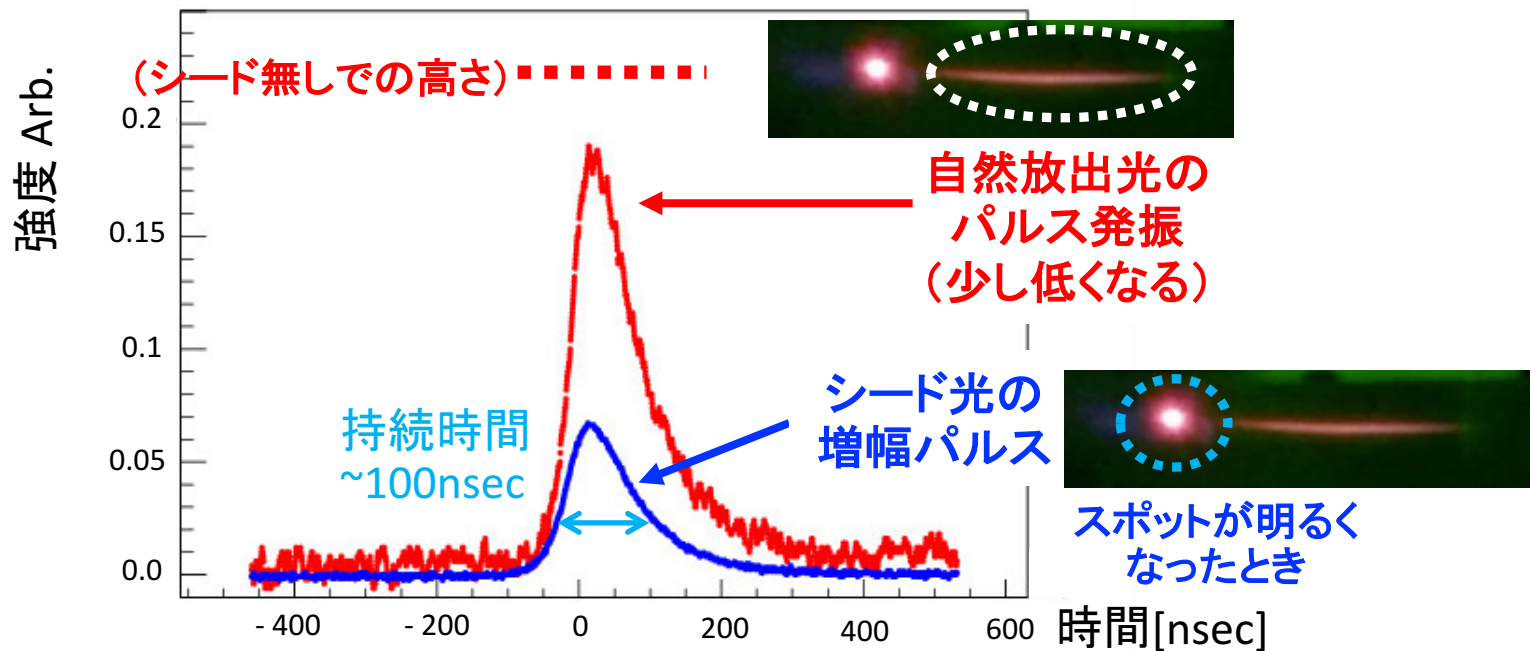
スポットが明るくなるのは
シード光が増幅されている
ことを意味する。

回折格子で波長分離した
共振器からの出力光

シード光増幅② - 時間波形

- 更に詳しくみるため、自然放出光の発振パルスとシード光の増幅パルスをそれぞれフォトダイオードに入力し、時間波形を同時に観察

シード光注入時



- シード光の注入で自然放出光の発振強度が1,2割弱くなる
 - 代わりにシード光が増幅されてパルス化している (持続時間~100nsec)
- 課題：不要な自然放出光の発振が依然優勢で、シード光増幅は部分的

増幅・パルス化用共振器の今後①

現在の課題をまとめると：

1. シード光増幅は点滅していて不安定(←空気などの外乱)
2. 目的であるシード光の $\sim 730\text{nm}$ の波長よりも、自然放出光の $\sim 780\text{nm}$ の波長での発振が優勢(=エネルギーの浪費)

そこで、これらに対する改善策として：

1. 共振器に対するフィードバック制御でシードを安定化
2. 共振器のミラーを $\sim 730\text{nm}$ 以外ではロスが大きいものに交換し、
不要な波長での発振を抑える

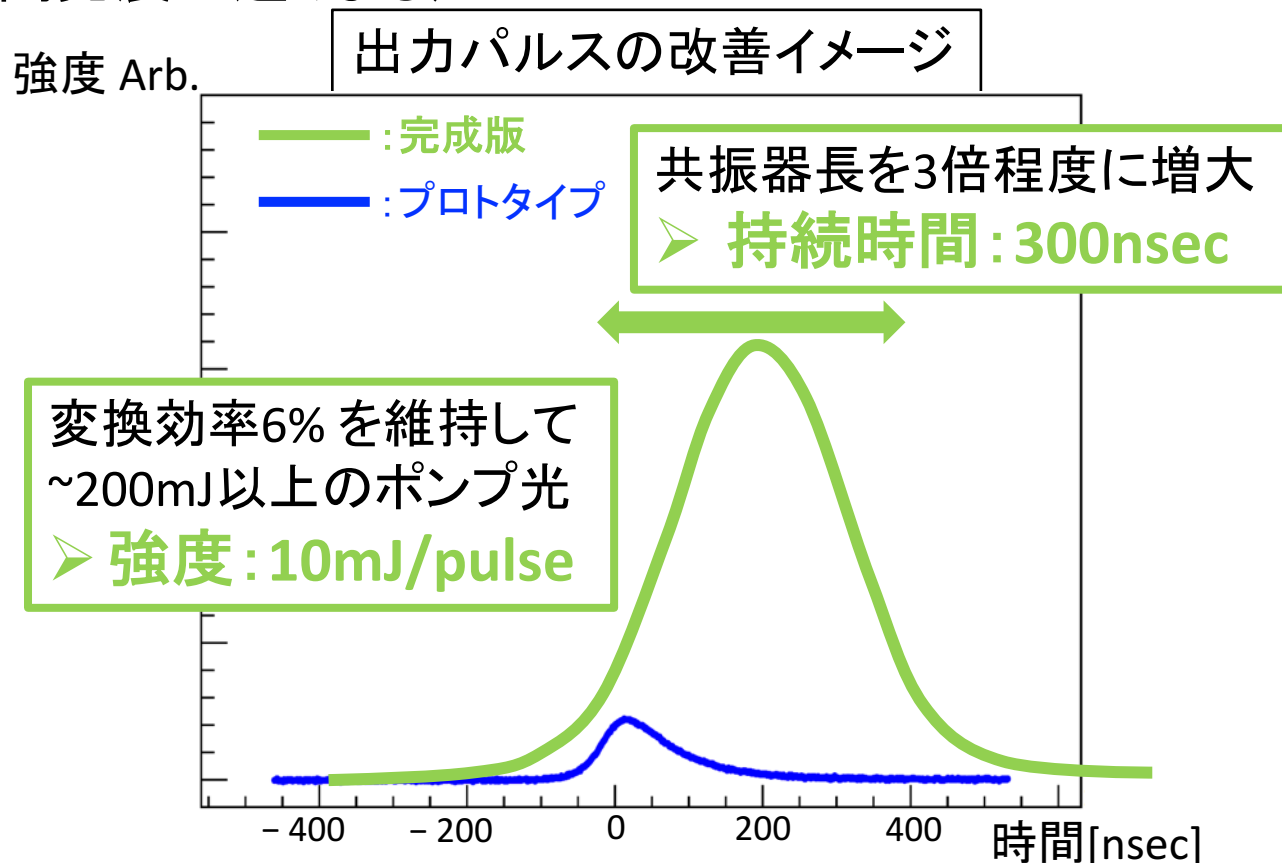
を計画している。

➤プロトタイプ目標：

729nmシード光のみを独占的にパルス発振させ、自然放出光での発振の時と同様に変換効率6%以上を達成しつつ、持続時間100nsec以上のパルスを得ることを目指す

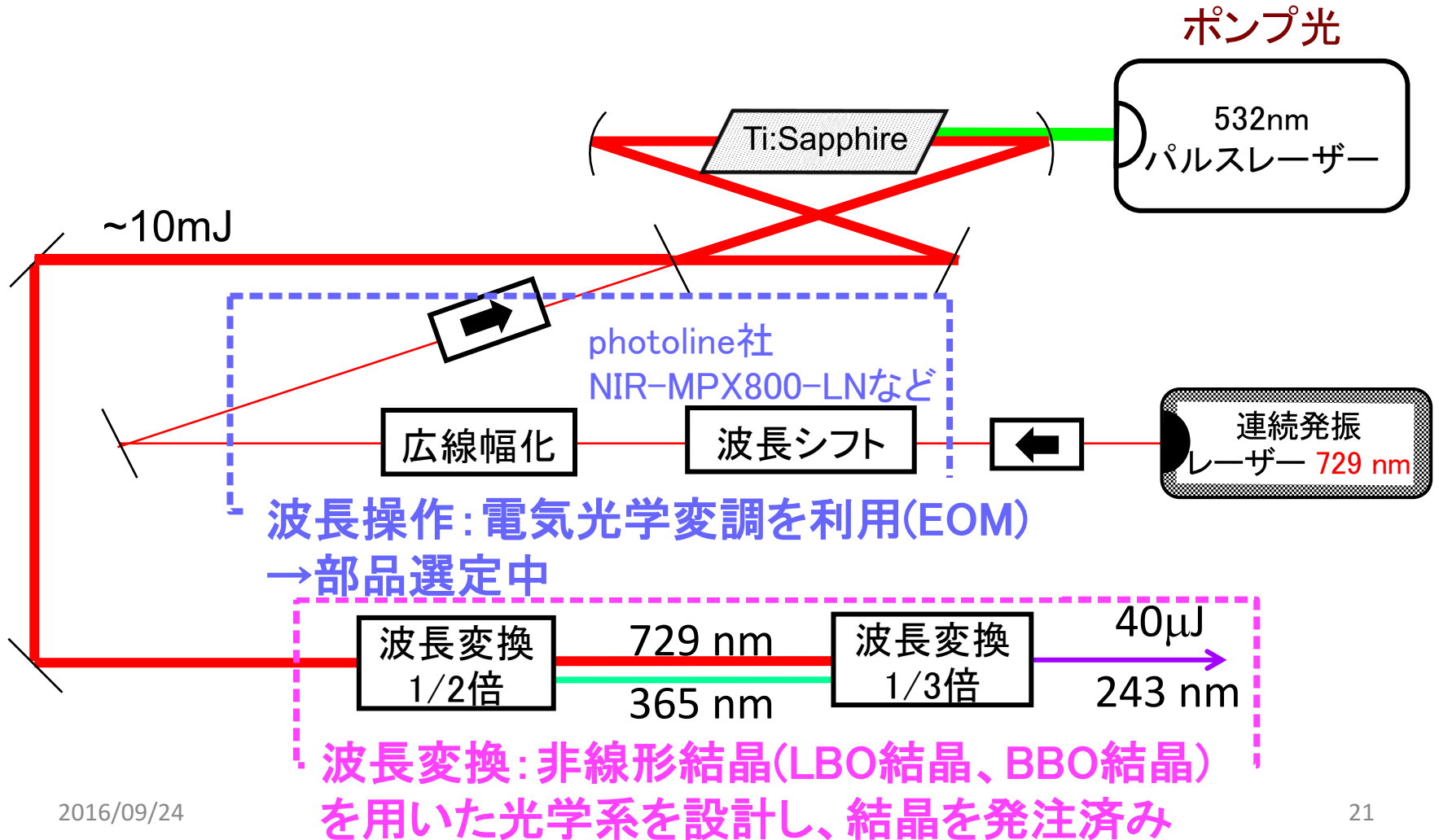
増幅・パルス化用共振器の今後②

- 完成版ではより**強力なポンプレーザー**を導入→**強度の増加**
- セットアップを大型化し、**共振器長を伸ばす**→**持続時間の増大**
(出力パルスの時間発展が遅くなる)



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



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(ECDL)を製作し、目標のスペック値を実現した。
- 次のステップとしてシード光増幅・パルス化用の共振器プロトタイプを製作し、シード光の増幅・パルス化は部分的に達成した
→ フィードバック制御・ミラー交換により、シード光のパルス化を十分に安定なものにする。
- 将来的には、より強力なポンプレーザーを使用し、セットアップを大型化することで必要スペックの達成を目指す。
- 以降のステップについては、波長制御用の必要部品の選定および、波長変換のための光学系づくりの準備を進めている。
- 今後3~4年間のPsレーザー冷却を目指し、PsBECの早期実現を図る。