

講演番号 WEOA11 :

単一サイクルFEL原理実証用超短パルスレーザー光源の開発

Ultrashort laser light source for demonstrating the monocycle FEL scheme

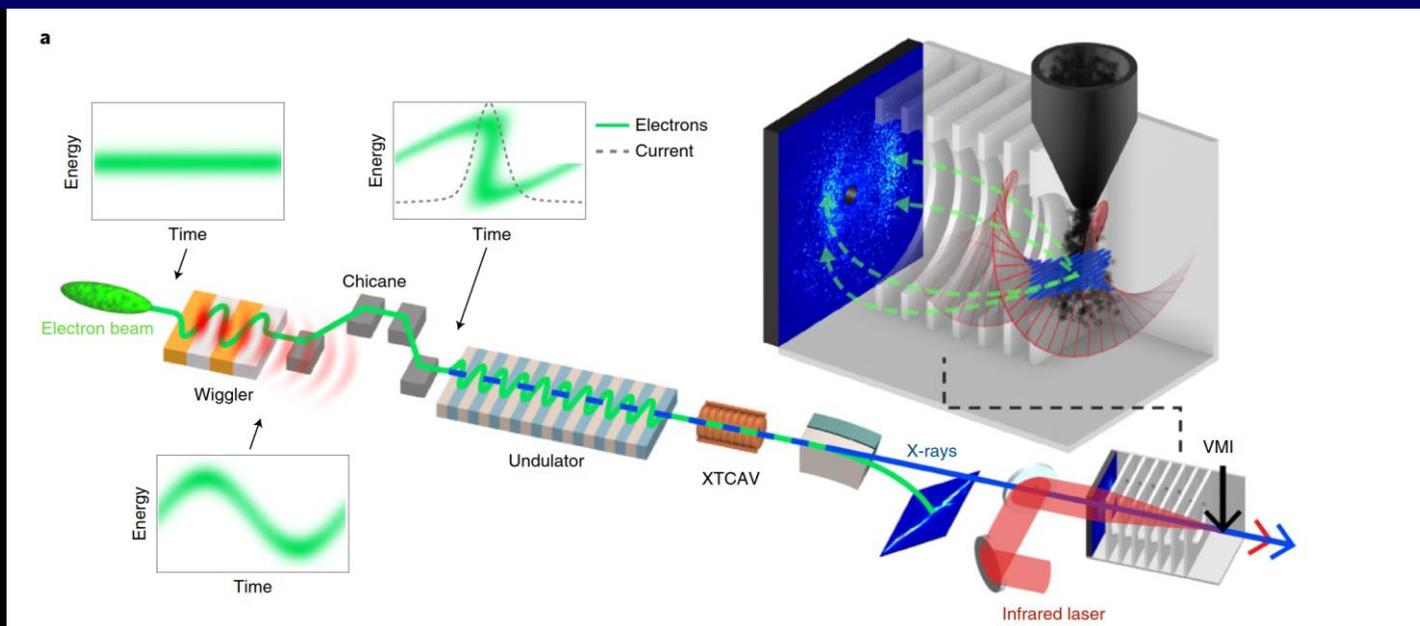
貴田祐一郎^{A)}, 橋本智^{B)}, 宮本修治^{C)}, 富樫格^{A,D)}, 富澤宏光^{A,D)},
岡部純幸^{E)}, 後長葵^{E)}, 金島圭佑^{E)}, 田中義人^{E)}, 田中隆次^{D)}

A) 高輝度光科学研究センター, B) 兵庫県立大学高度産業科学技術研究所
C) 大阪大学レーザー科学研究所, D) 理化学研究所放射光科学研究センター
E) 兵庫県立大学大学院理学研究科

アト秒X線自由電子レーザー(XFEL)：パルス幅数100 as

■ 硬X線: PRL 119, 154801 (2017); Appl. Phys. Lett. 111, 151101 (2017).

■ 軟X線: Nat. Photonics 14, 30 (2019).



Nat. Photonics 14, 30 (2019).

- 更にパルス幅を短縮すること (<100 as) は困難
- 光スリッページの壁

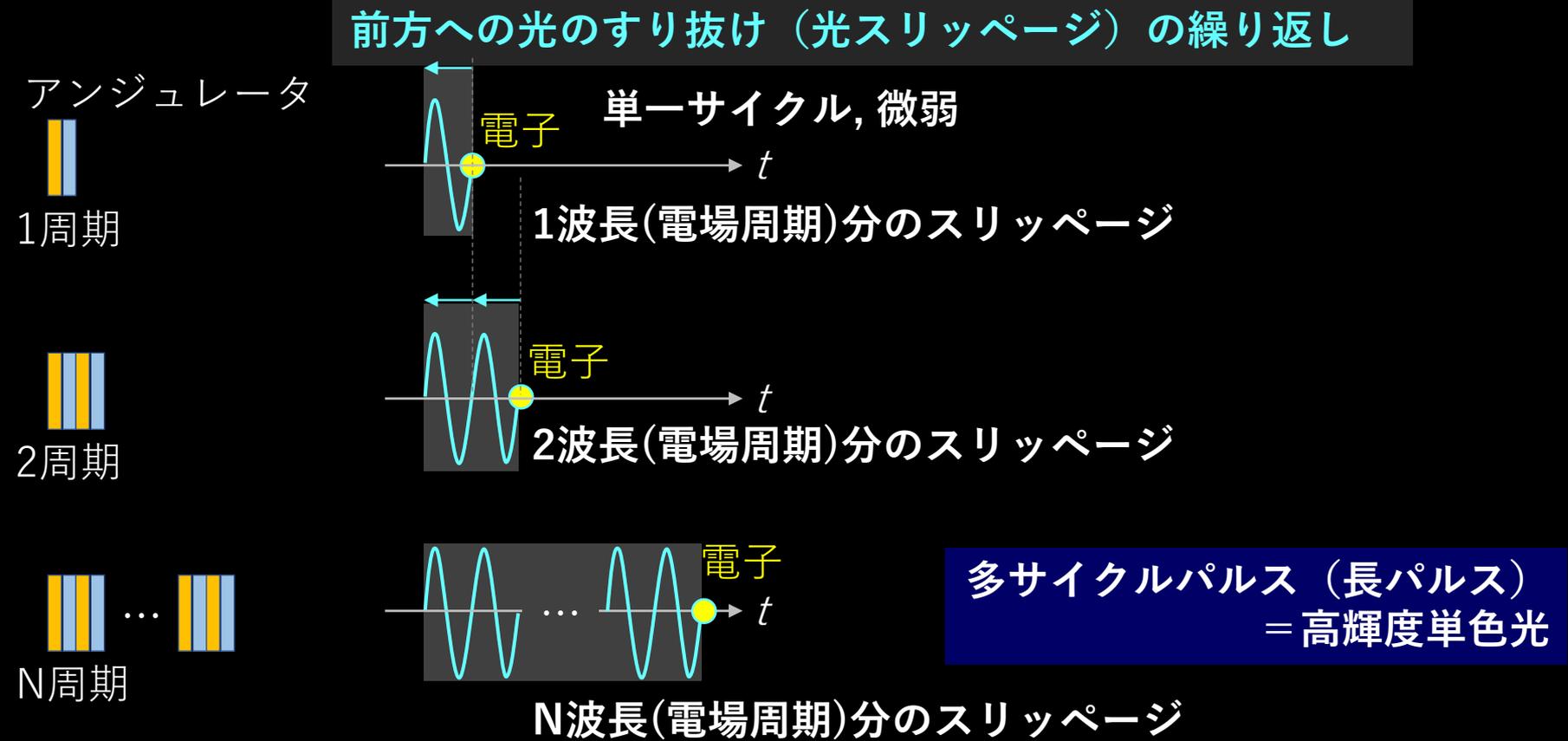


図. 単一電子のアンジュレータ放射電場

アンジュレータはパルス幅の長い光（高輝度単色光）を得るための光源

基盤原理：光スリッページに基づく同一(波長)放射の繰り返し

FELの基盤を形成する光源物理(光スリッページ)がパルス短縮の壁を作る

短パルスFELを実現するためには光スリッページの制御が必要

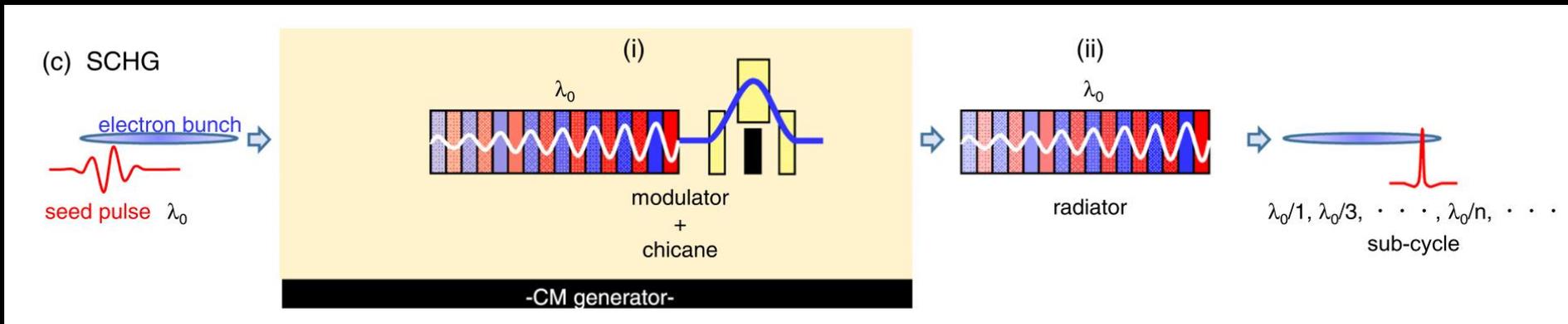
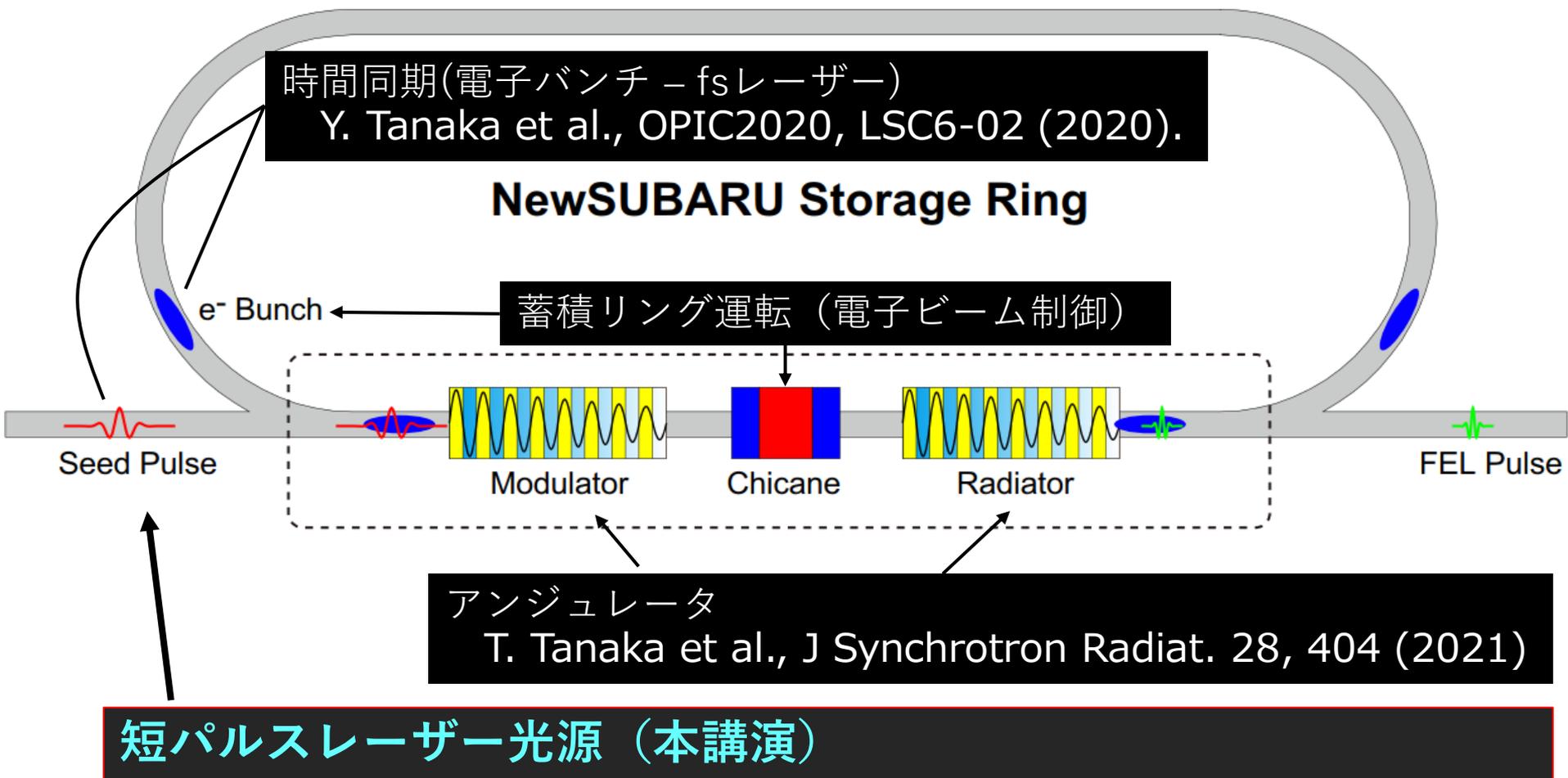


図. FELレイアウト例[2]

概要

- ①短パルスレーザー電場 + テーパーアンジュレータ (Modulator) + シケイン
極短電子バンチが非等間隔に並んだバンチ列 (チャープマイクロバンチ) を生成
- ②テーパーアンジュレータ (Radiator) に入射し、放射光を発生
複数のマイクロバンチから放射された光電場がある特定時刻でのみ建設干渉
- 短パルスコヒーレント放射光が出力
- パルス幅は短パルスレーザー電場の周期数 (パルス幅) で決まる

単一サイクルコヒーレント放射 (モノサイクルFEL) が得られる



■役割：電子バンチのエネルギー変調

■光源（要求）仕様

- ・ パルスエネルギー：0.1 mJ
- ・ 中心波長: 800 nm
- ・ パルス幅: 5サイクル (13.4 fs)
- ・ ビーム直径(半値全幅): 1 mm
- ・ 以上をアンジュレータの中で実現（境界条件）

■項目

(1)パルス圧縮

- レーザーパルスのパルス幅短縮

(2)入射

- アンジュレータ（蓄積リング）への入射

(3)空間同期

- 電子ビームとレーザー光を重ね合わせ

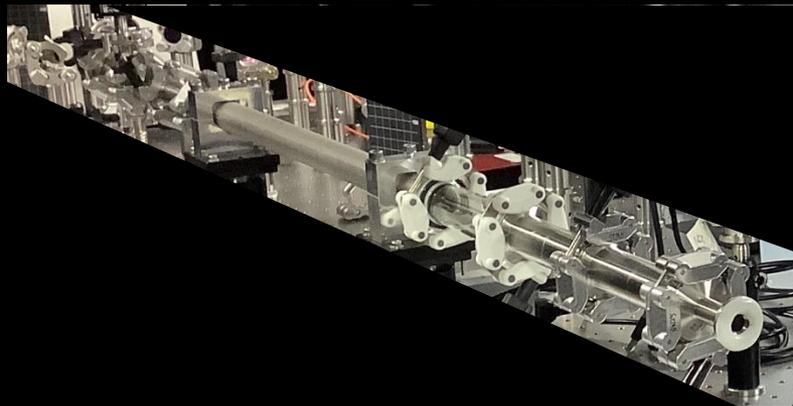
(4)時空間同期確認

- コヒーレント放射光検出

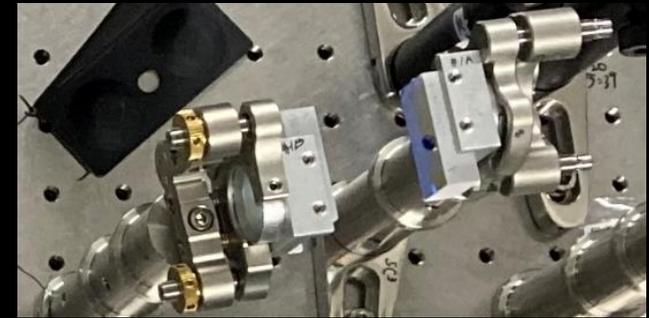
(1) パルス圧縮：手法

パルス圧縮：既存のレーザー光源のパルス幅を短縮
当該プロジェクトに適した既存技術を採用・実装[1-3]

パルス圧縮 = ①レーザー光源広帯域化 + ②位相制御（位相同期）



①広帯域化：希ガス充填中空ファイバー



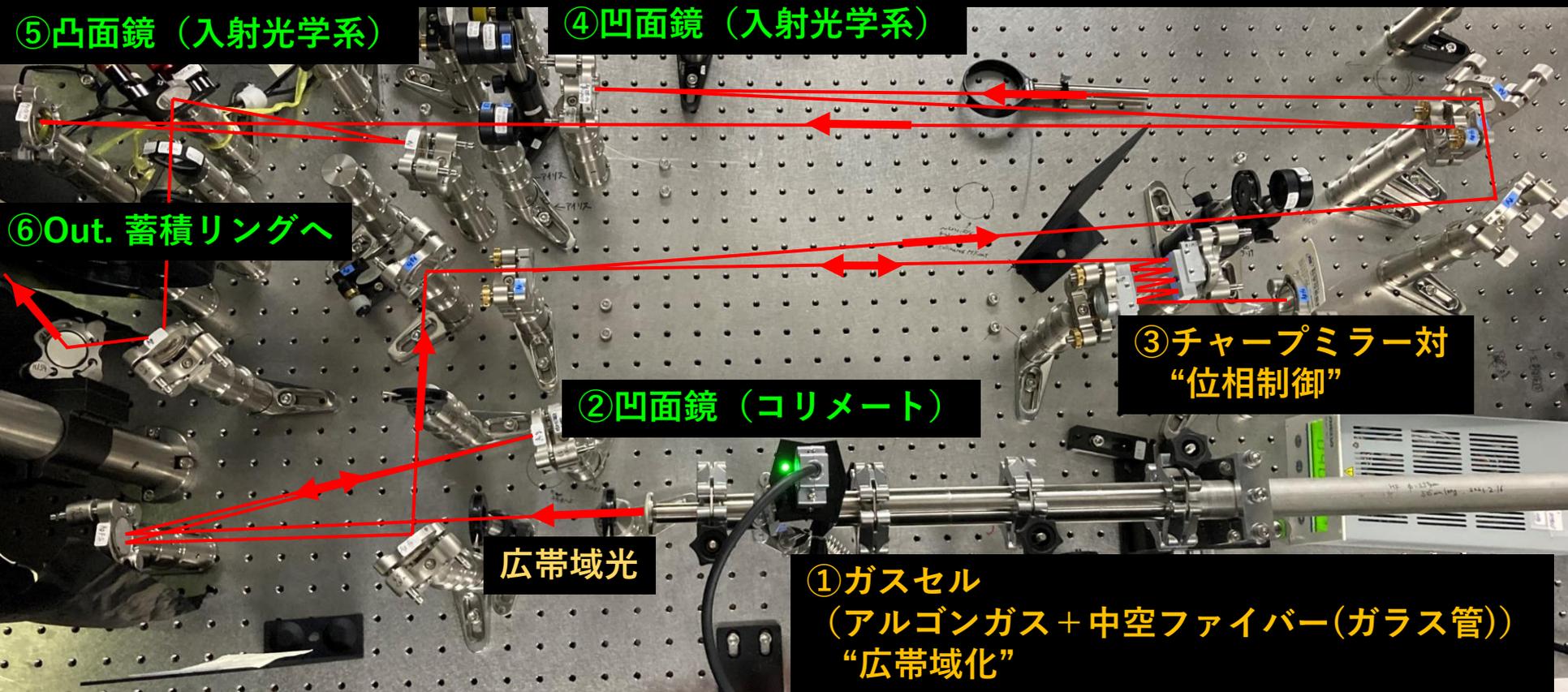
②位相制御：チャープミラー

入力：パルスエネルギー0.6 mJ, 幅40-50 fsのチタンサファイア再生増幅器出力
出力：パルスエネルギー0.1 mJ, 幅13 fs @アンジュレータ中央（真空槽内部）

当該プロジェクトでは過去に他の研究で構築したものと同等の光源を構築 [3]

(1) パルス圧縮：(実機) 光学系

パルス圧縮手法: 希ガス充填中空ファイバー+チャープミラー



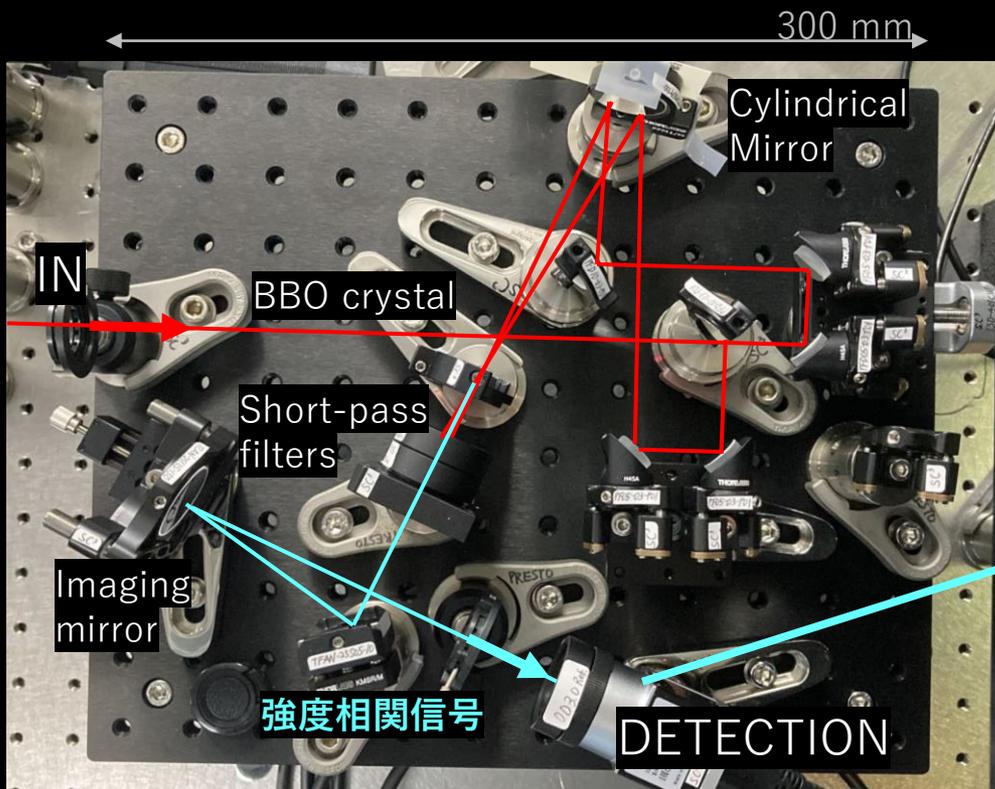
写真：パルス圧縮光学系

光路: ①→②→③→④→⑤→⑥

アンジュレータへの入射光学系の一部 (④⑤, 後に説明) を含む

「単一サイクルFEL原理実証用超短パルスレーザー光源の開発」

(1) パルス圧縮：(実機) スペクトル, パルス幅



写真：診断系 (二次の強度自己相関計)

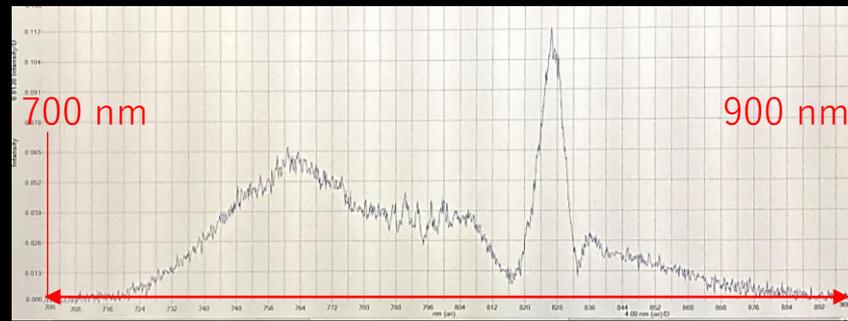


図. 広帯域光スペクトル

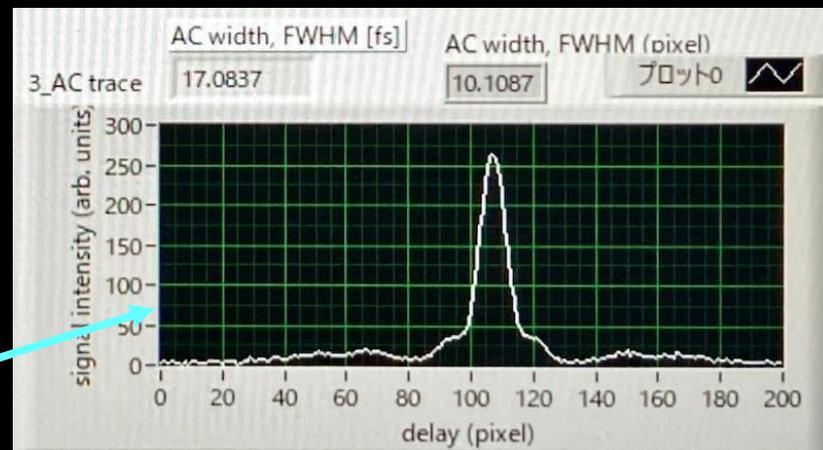


図. 自己相関波形 (パルス幅評価)

半値全幅17-18 fs :
→パルス幅：12-13 fs
@アンジュレータ中

(アンジュレータにて)要求仕様を満たした

「単一サイクルFEL原理実証用超短パルスレーザー光源の開発」 (2) アンジュレータへの入射 <入射光学系>

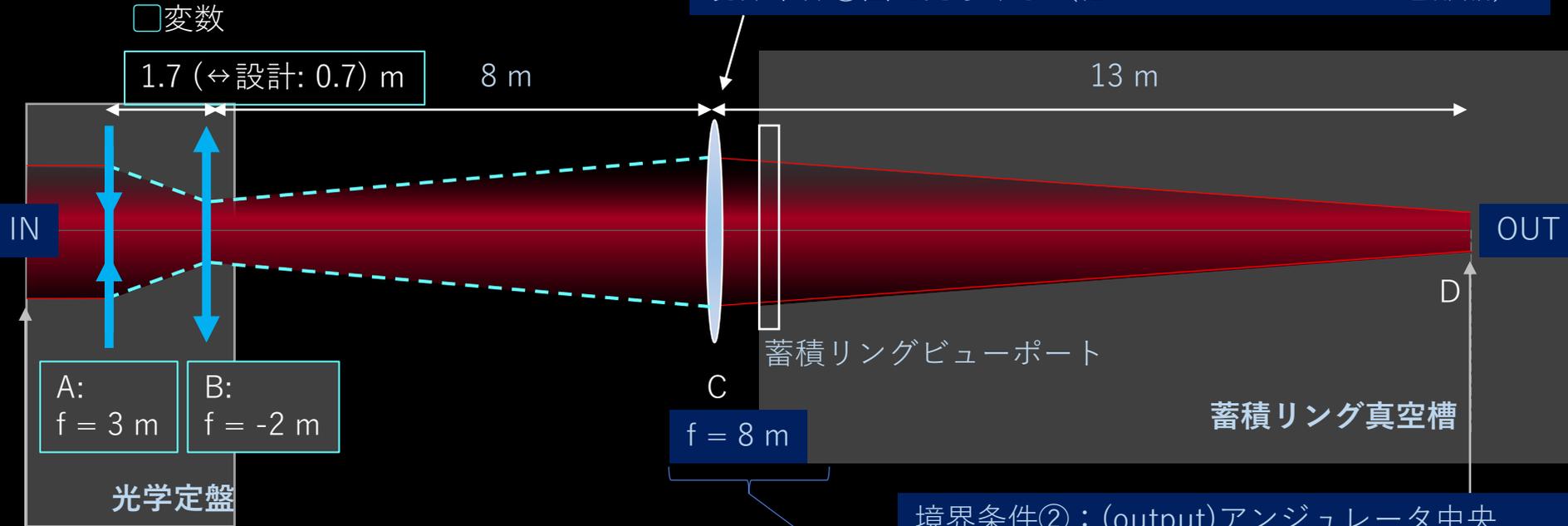
- 短パルスレーザー光をアンジュレータ（蓄積リング内）へ入射
- アンジュレータ中で集光されるようにビーム直径と発散角を制御



ニュースバル放射光施設
<https://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS/facility/>

「単一サイクルFEL原理実証用超短パルスレーザー光源の開発」 (2) アンジュレータへの入射：(実機) 光学系概略図

境界条件③固定光学素子 (他のBLユーザーとの共通部品)



境界条件①: (input) ビーム直径と発散角

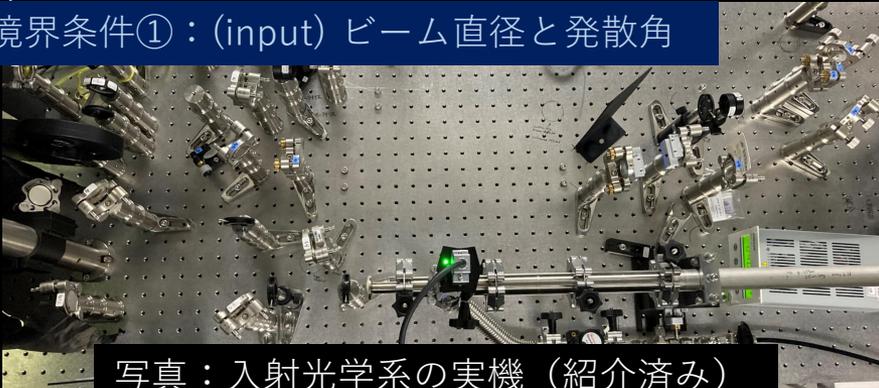
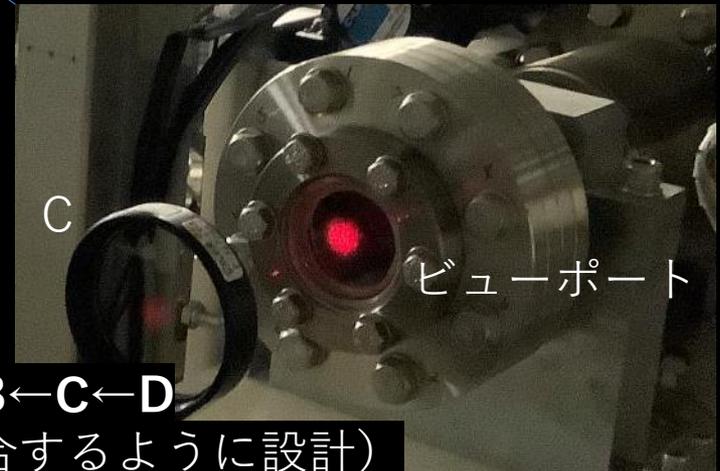


写真: 入射光学系の実機 (紹介済み)

境界条件②: (output) アンジュレータ中央 (D) において収束かつ直径1 mm (FWHM)



ビューポート

出口(OUT)から入口(IN)に向かって設計: A←B←C←D
(上流(IN)の光源特性 (別の境界条件) とも整合するように設計)

(3) 空間位置座標モニタ

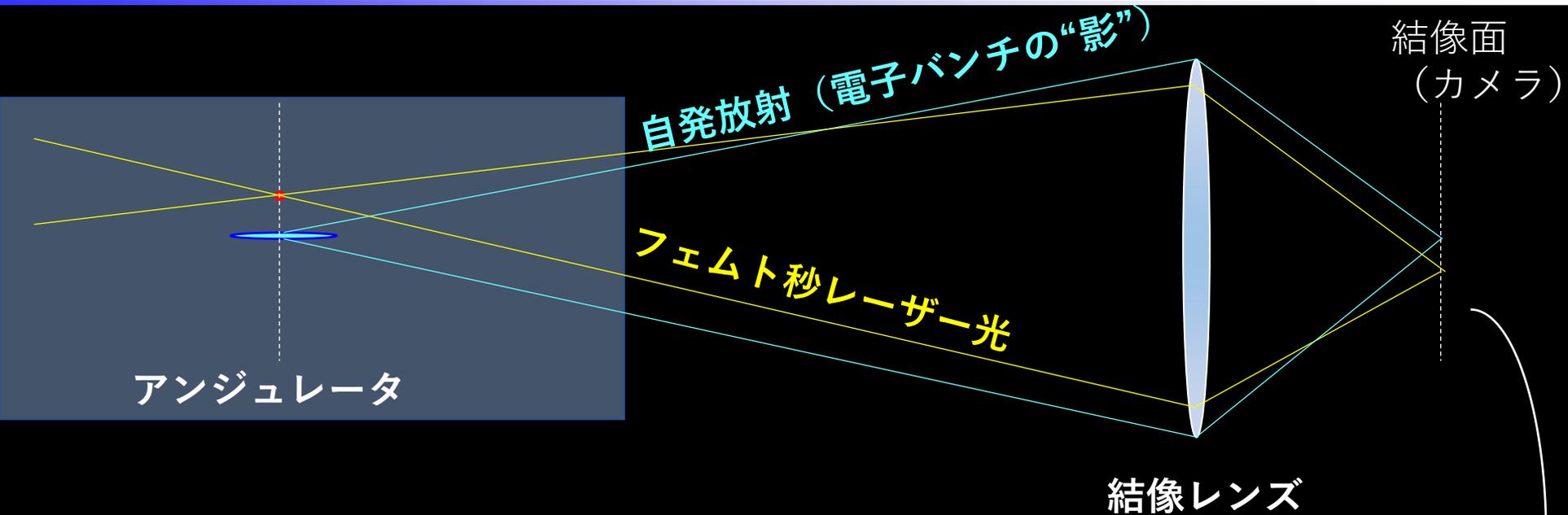
電子ビームエネルギーを変調するためには
電子バンチにレーザーパルスを当てる必要がある

つまり、
アンジュレータ中央にて時空間座標上で両者を一致させる必要がある
= 時空間モニタが必要

- ・ 時間座標 . . . ストリークカメラ
- ・ 空間座標 . . . 空間位置座標モニタ※ (次の話題)

※アンジュレータ中央（真空槽の中）における電子バンチとレーザーパルスの相対位置座標を実時間で確認するモニタ

(3) 空間位置座標モニタ



- アンジュレータの中の像を結像
- バンドパスフィルタを挿入し軸外放射を除去 (色収差由来の画像滲みを抑制)

- アンジュレータ中の両者の相対座標を確認しながら制御 (レーザー入射光軸)

自発放射光 (電子バンチの“影”)



フェムト秒レーザー光

カメラの画像

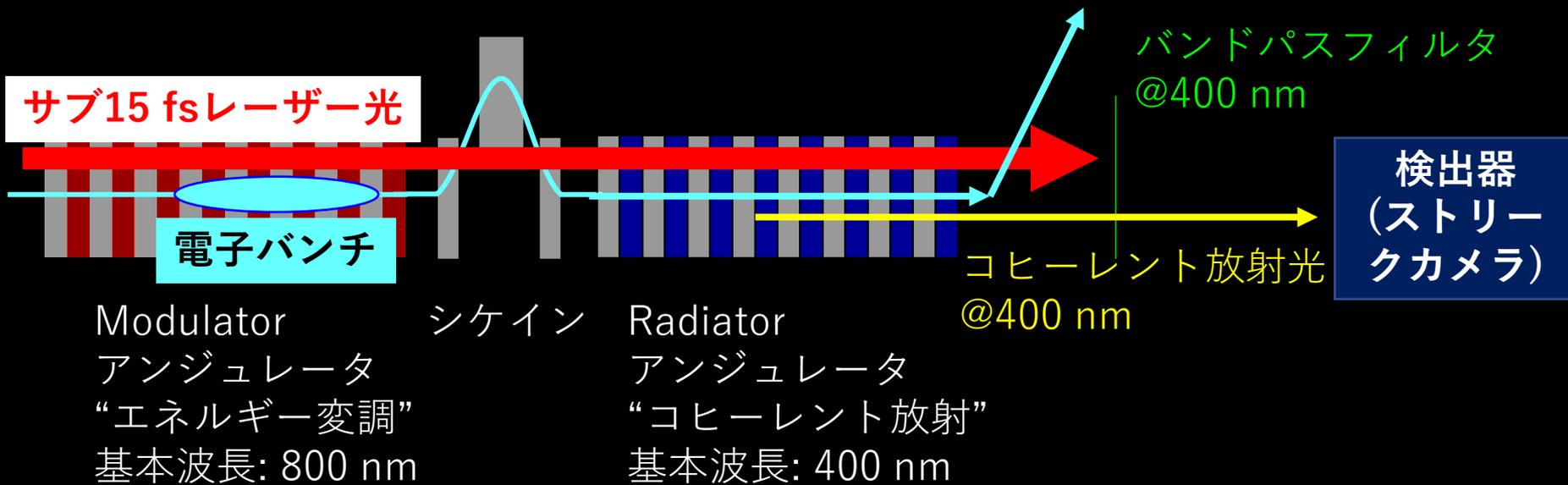
(アンジュレータの中の位置関係を見る)

「単一サイクルFEL原理実証用超短パルスレーザー光源の開発」

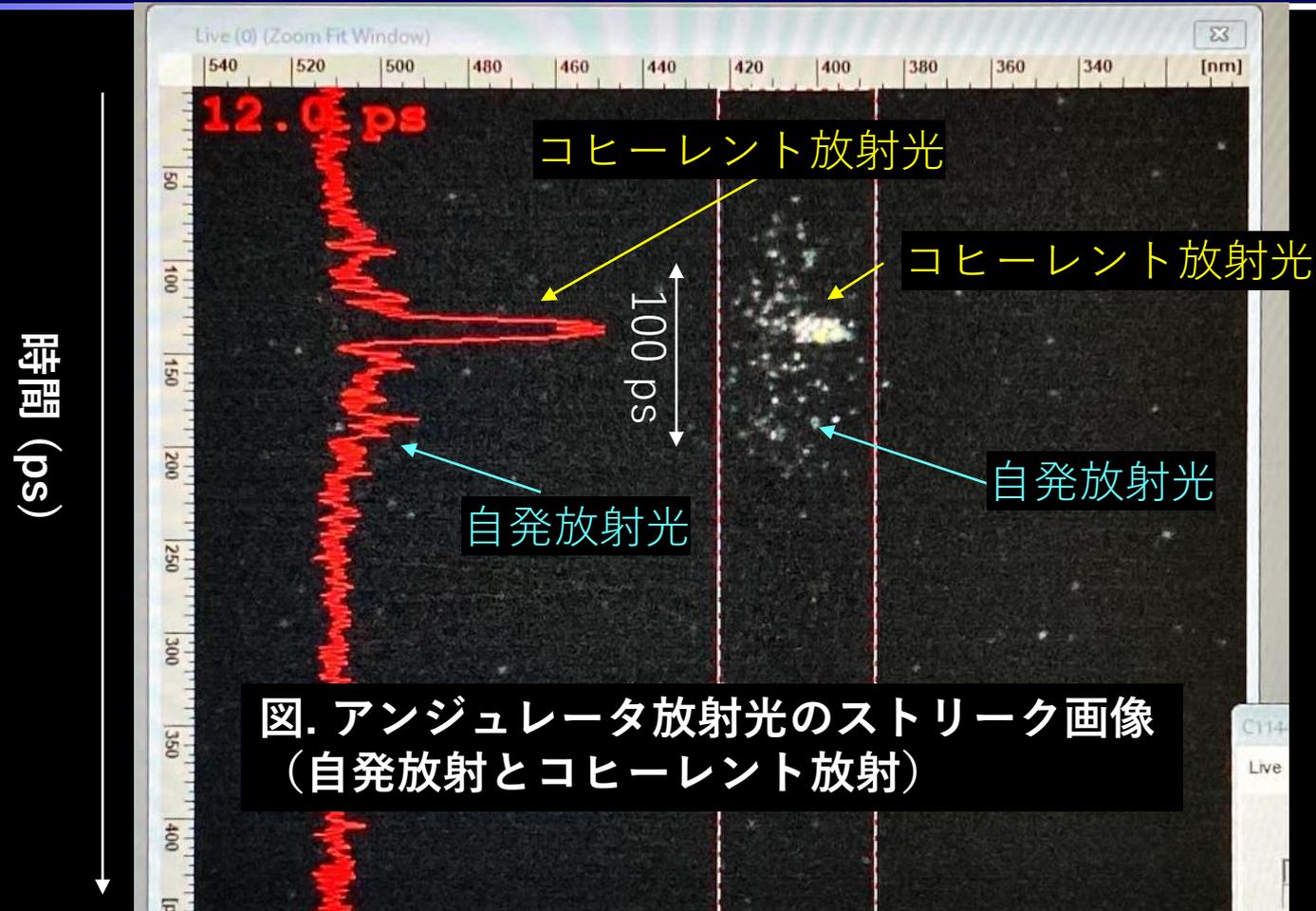
(4) 時空間同期確認：コヒーレント放射光の検出

目的：時空間同期が十分な精度で取れているかを確認する

方針：コヒーレント放射光が発生 = 時空間同期が取れていることを示す
コヒーレント放射光を検出すればよい



「単一サイクルFEL原理実証用超短パルスレーザー光源の開発」 (4) 時空間同期確認：コヒーレント放射光の検出



同期（コヒーレント放射光発生）検証済み

時間・空間の両座標軸上で電子バンチとレーザー電場が同期

講演のまとめ, 現在地, そして今後

内容：一要素「サブ15 fs超短パルスレーザー光源」に関して

- ・役割
- ・仕様
- ・実機の紹介: 光源・入射・モニタ
 - 想定通り動作
 - 安定性・再現性：良

現在地：当該プロジェクト全体の進捗

- ・コヒーレント放射光の発生・検出

今後

- ・コヒーレント放射光の時間特性評価（診断系の実装）
- ・光スリッページ制御原理の検証(プロジェクトの主題)