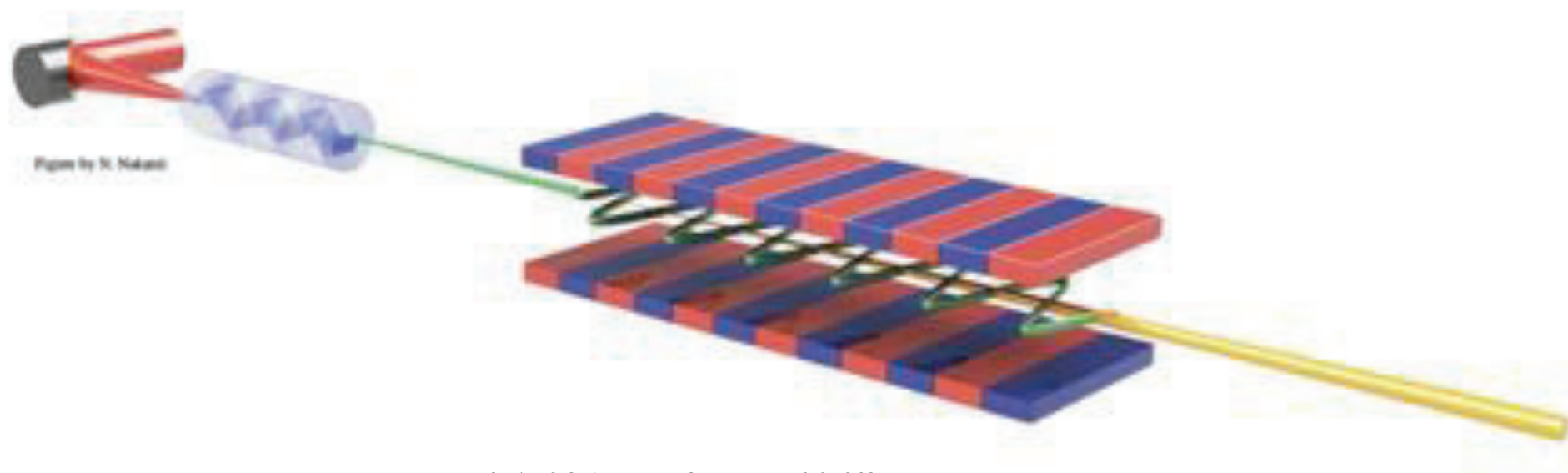


レーザー加速電子による EUV-FEL 計画

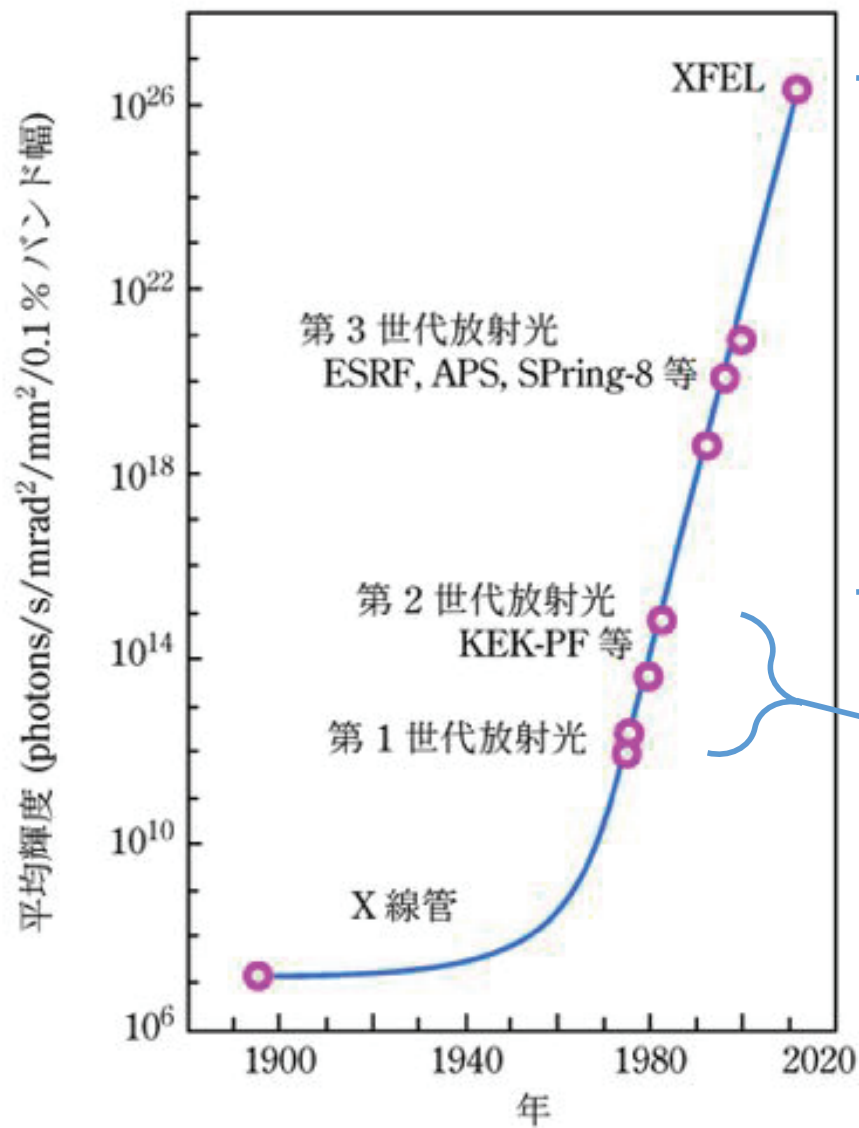


量子科学技術研究開発機構 (QST)

神門 正城

kando.masaki@qst.go.jp

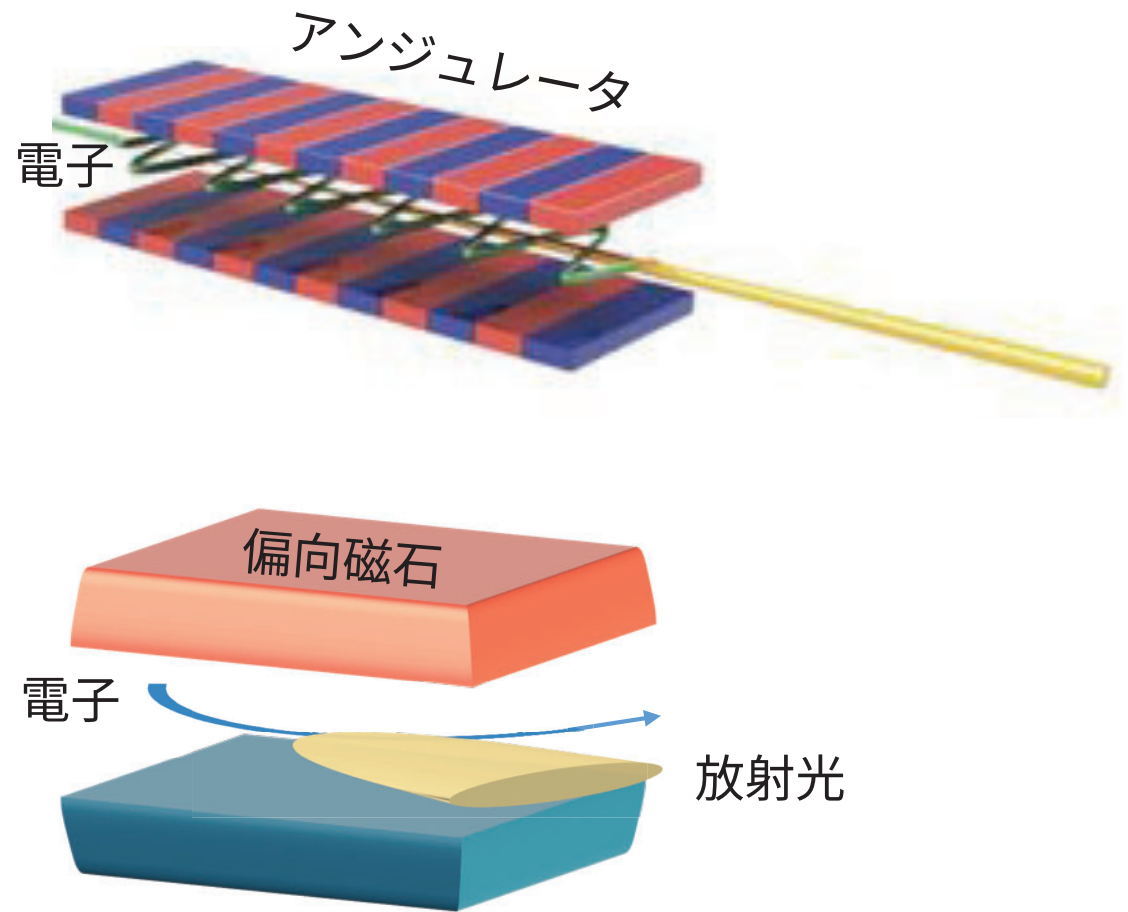
2021年6月25日@web



後藤俊治 ぶんせき2015より

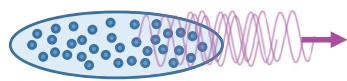
X線領域のレーザー

高輝度・短パルス・コヒーレント

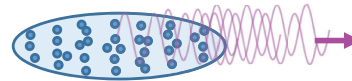


アンジュレータ放射とFEL光

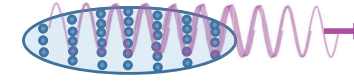
電子バンチ



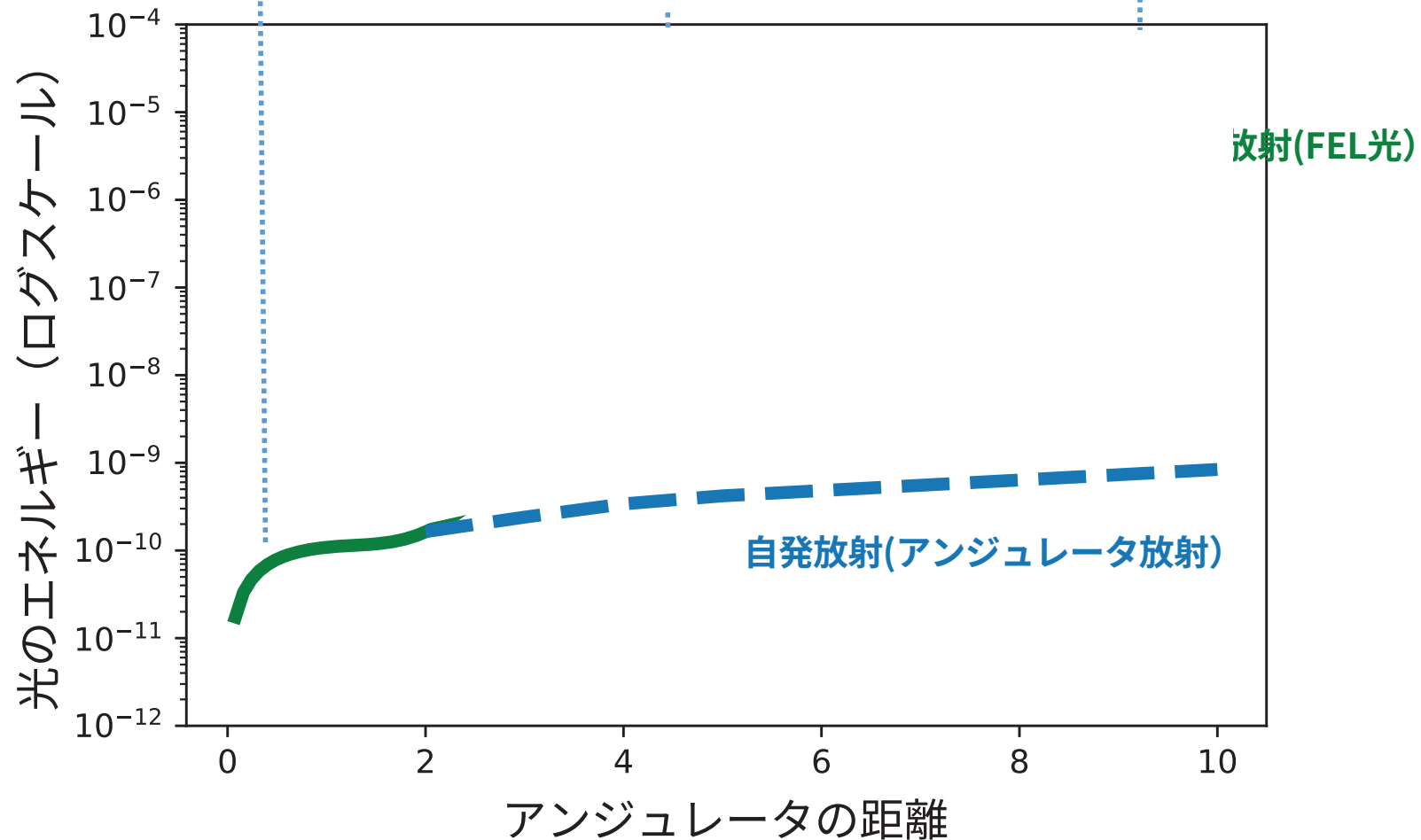
1. 光の位相が揃っていない



2. 電子が光の波長に揃っていく (バンチング)

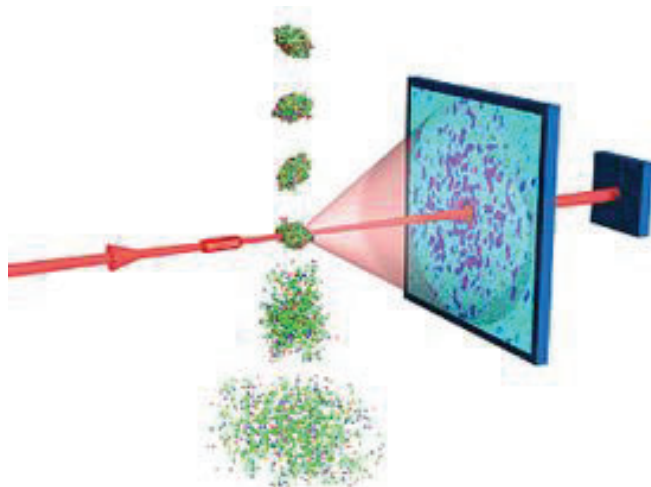


3. 光の位相が揃っている
=コヒーレント放射



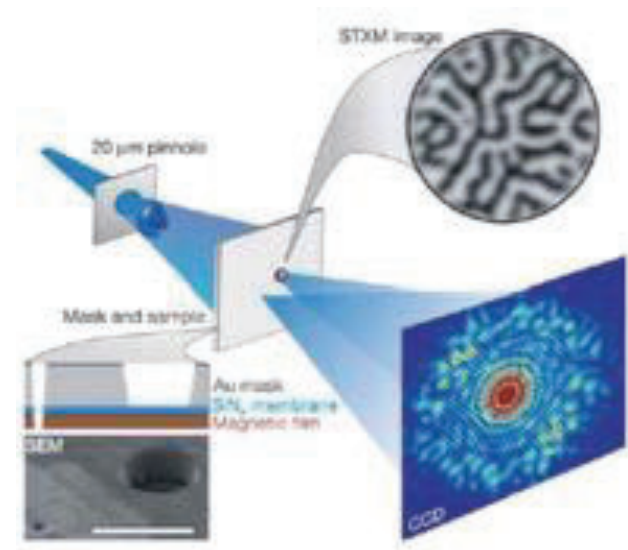
生体分子の構造解析(X線回折)

結晶化が難しい分子に対して有効



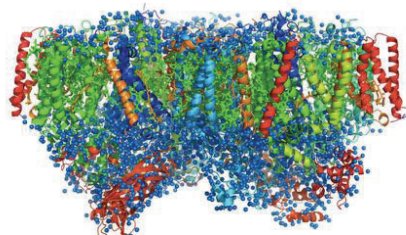
R. Neutze, et al., Nature 406, 752 (2000);
H. Chapman, Nature Physics 2, 839 (2006)

磁気ナノ構造の解析(X-ray Holography)



S. Elisebitt et al., Nature 432, 885 (2004)

光合成の機構解明

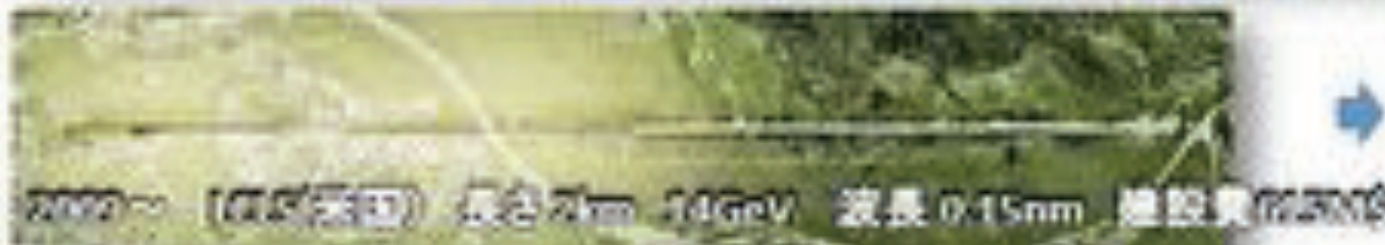


M. Suga et al., Nature 517, 7532 (2014)

Other high-impact results are being obtained at XFEL facilities.

XFELは役に立つが、サイズが大きい！

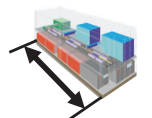
米田先生資料より



2011~ SACLA(日本)

😊 極めて魅力的な装置

😞 サイズが大きい
直線型なのでビームライン少
気軽には使えない…



~20 m

レーザープラズマ加速で
XFELの小型化を目指す

レーザープラズマ電子加速でのFEL開発状況

Strathclyde大学

(英)

COXINEL

(仏)

LUX, Hamburg

(独)

MPQ

(独)

SIOM

(中国)

ELI-BL
(チェコ)

LBNL

(米)

EuPRAXIA

(EU)

ImPACT/未来社会

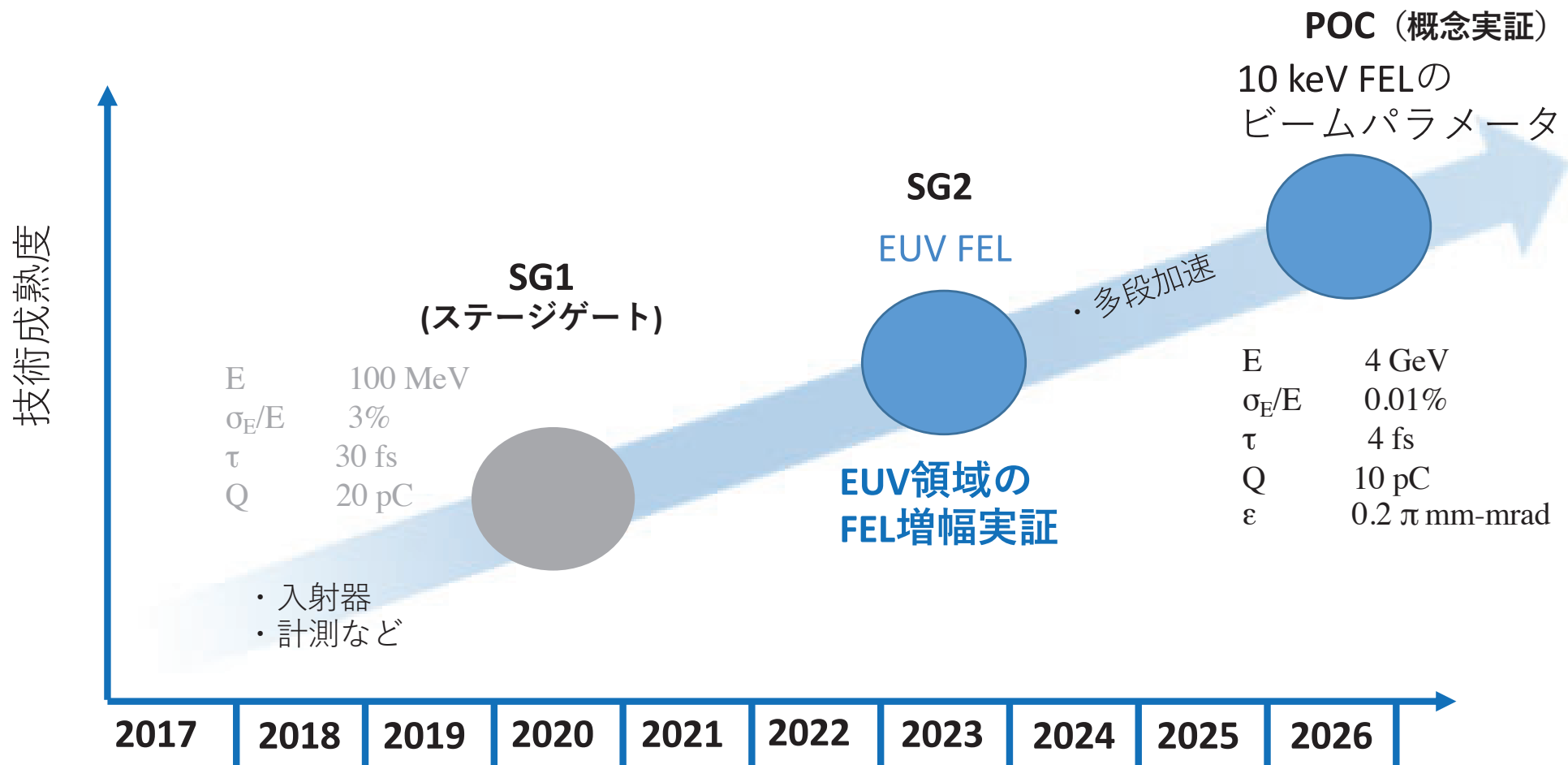
(日)

少なくとも8グループが研究開発中
うち、7グループがアンジュレータからの放射光を観測

<https://power-point-design.com/ppt-design/world-map-for-powerpoint/>

本プロジェクトでの計画

- **最終目標** 10 keVのXFELを実現できる電子ビーム性能を実証
- **中間目標** 各要素技術を統合した技術レベルの実証を行う
- 世界的にもEUV領域でのFEL増幅（アンジュレータからの放射ではなく増幅）を達成することが次のマイルストーンとなっている

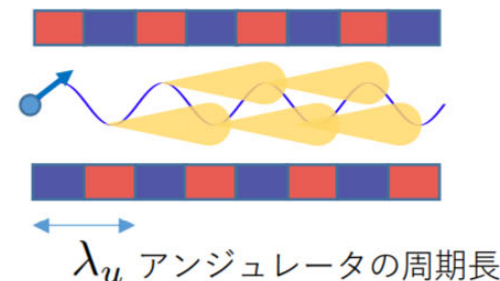


XFELには高品質・大電流電子ビームが必要

①X線の波長

$$\lambda_x = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

磁場の強さ



②エミッタンス (電子ビームの平行性)

小さいほどよい

$$\varepsilon_N < \gamma \frac{\lambda_x}{4\pi}$$

③FELのゲイン長 短いほどよい

$$L_{G0} \propto \frac{\lambda_u}{\rho} \quad P(z) = P_0 \exp(z/L_{G0})$$

Pierce パラメータ

$$\rho \propto \left(\frac{Q}{\sigma_z} \right)^{1/3} \frac{K^{2/3}}{\gamma} \left(\frac{\lambda_u}{\sigma_x} \right)^{2/3}$$

電荷量

大きい方がよい

バンチ長

平均ビームサイズ

④エネルギー拡がり

$$\frac{\sigma_E}{E} < \rho \quad \text{典型的には } 10^{-3} \sim 10^{-4}$$

- ① **高いエネルギー**が必要 $\gamma = E/mc^2$
- ② **高品質** (低エミッタンス) が必要
- ③ 小型化のためゲインを短く (ρを大きく)
大電流 (バンチ長短、電荷量大)
- ④ **エネルギー拡がりを小さく**

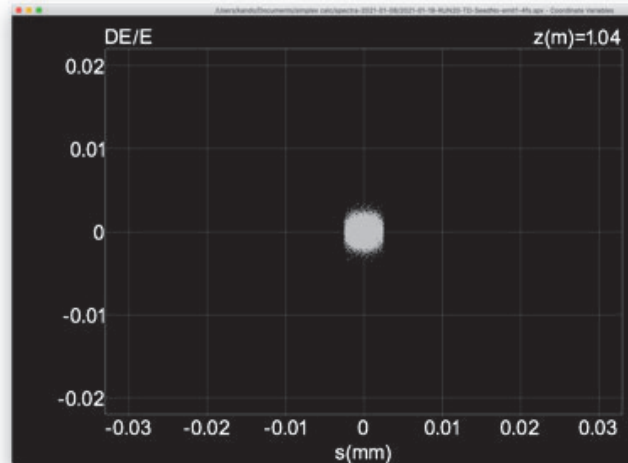
**レーザー電子加速では、
エネルギーと電荷量が課題!**

EUV FELに必要なパラメータ例

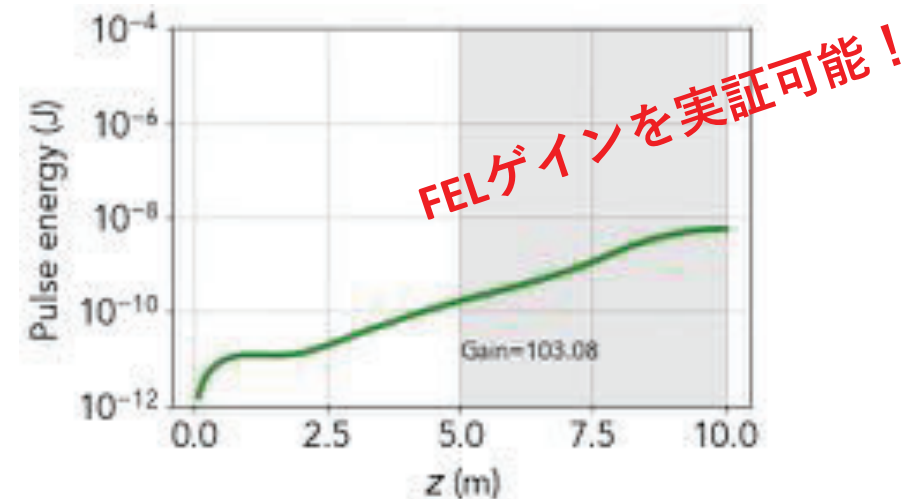
		例1	例2	例3
EUV-FEL	波長	50 nm	←	←
	Pierceパラメータ	2.4×10^{-3}	←	←
	ゲイン長	0.167 m	←	←
アンジュレータ	周期長	20 mm	←	←
	K値(磁場)	1.446 (B=0.785T)	←	←
	長さ	5 m	←	←
	テーパ	なし	←	あり
電子ビーム	エネルギー	330 MeV ($\gamma=644$)	←	←
	スライスエネルギー拡がり	0.1%	←	←
	チャープ	なし	あり	←
	バンチ長	4 fs	40 fs	←
	電荷量	10 pC	100 pC	←
	エミッタンス	1 mm-mrad	←	←

例1 : 4 fs, 10 pC, 0.1%, エネルギーチャープなし、アンジュレータ テーパなし

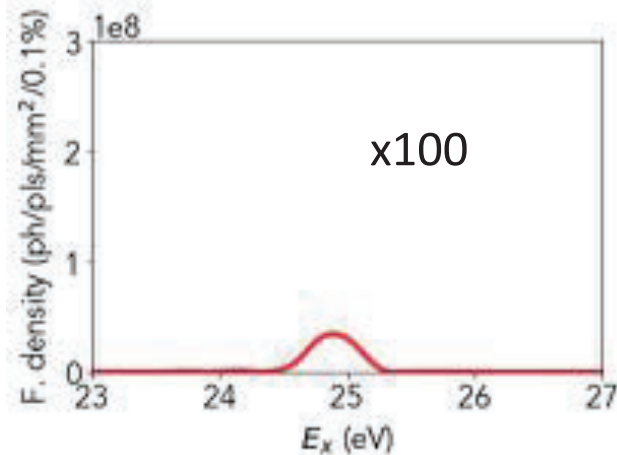
● 初期縦方向位相空間分布



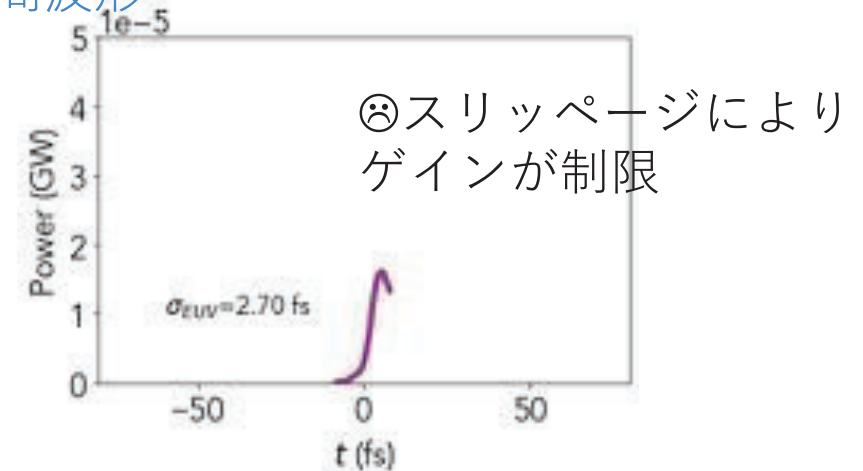
● ゲインカーブ



● スペクトル (4.4 m)



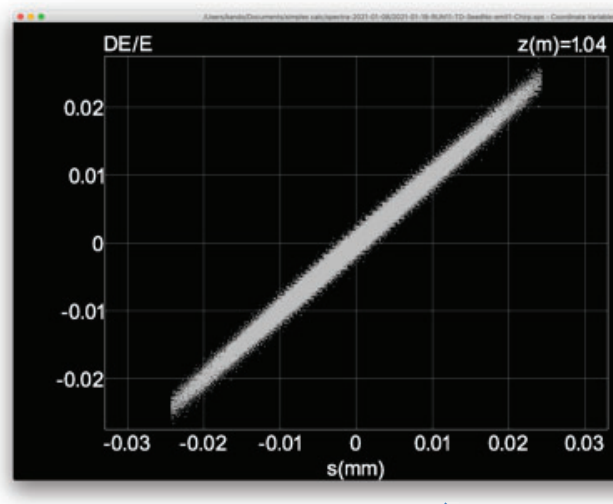
● 時間波形



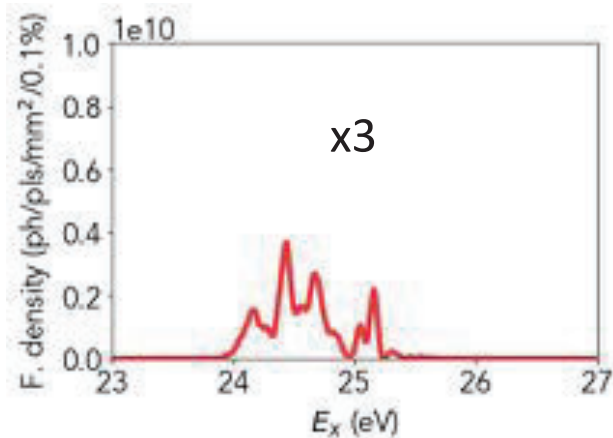
EUV FELの計算 例2

例2 : 40 fs, 100 pC, 0.1%, エネルギーチャープあり、アンジュレータ テーパなし

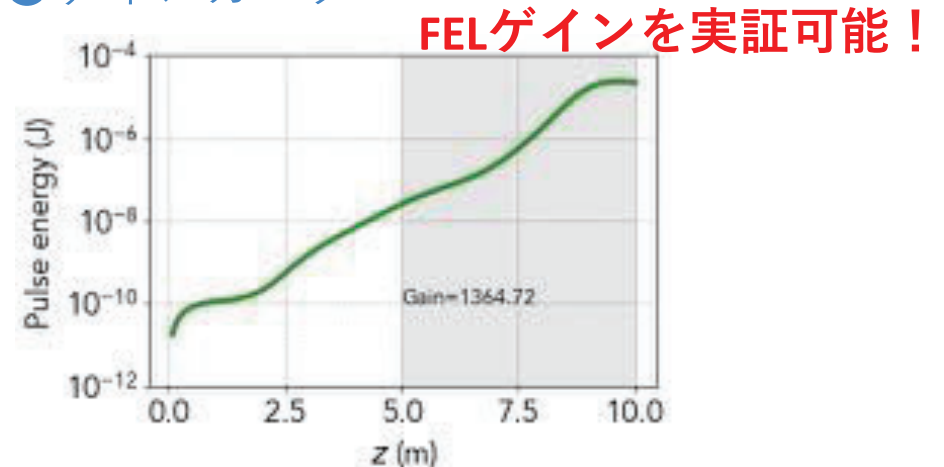
● 初期縦方向位相空間分布



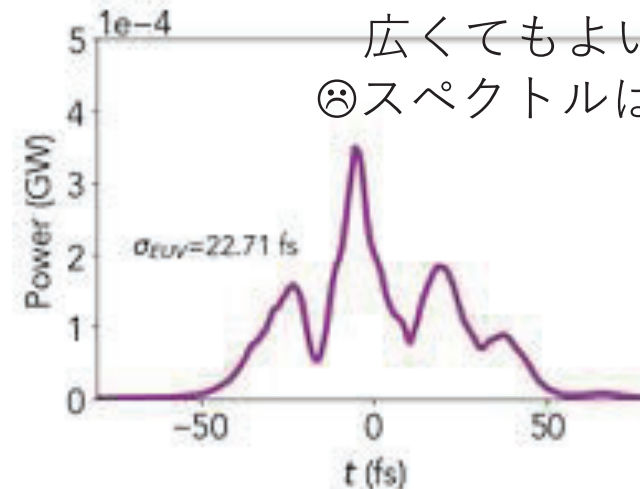
● スペクトル (4.4 m)



● ゲインカーブ



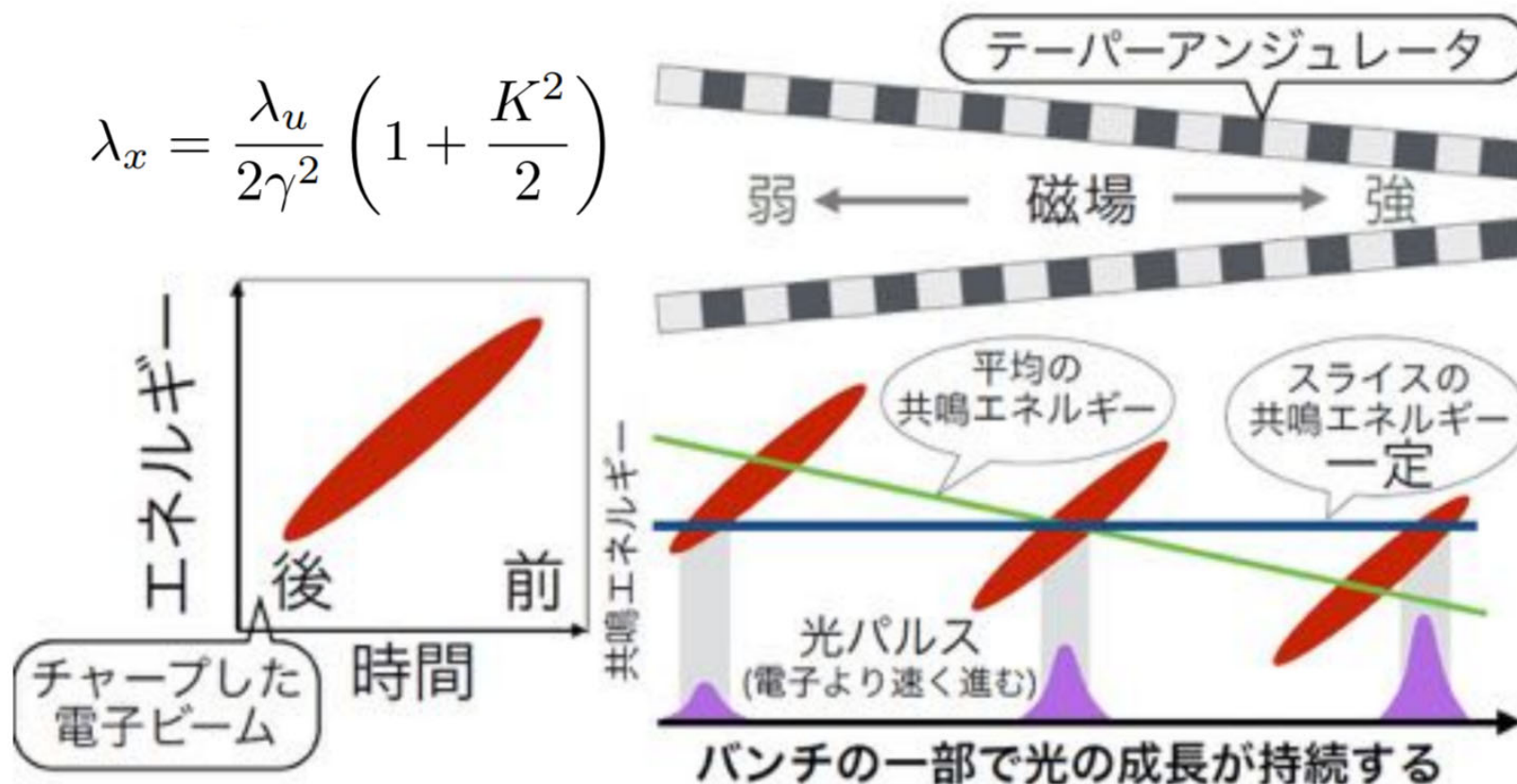
● 時間波形



- ☺ゲインはそこそこ高い
- ☺電子の全エネルギー幅は
広くてもよい
- ☹スペクトルは広がる

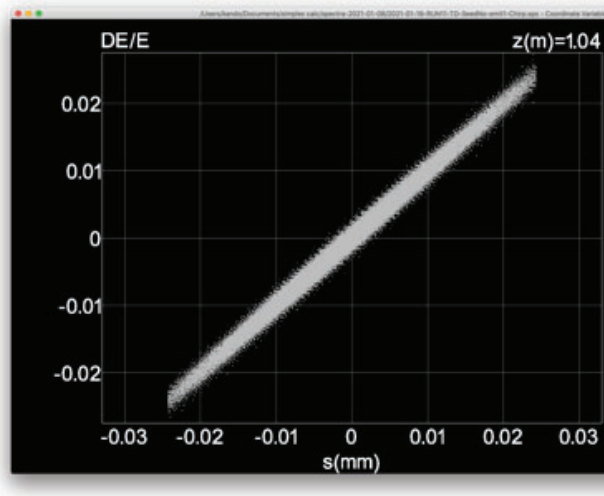
テーパアンジュレータの検討

レーザープラズマ電子の特徴として、エネルギーチャープがある。
これを積極的に利用するため、**テーパ型アンジュレータ**を検討中

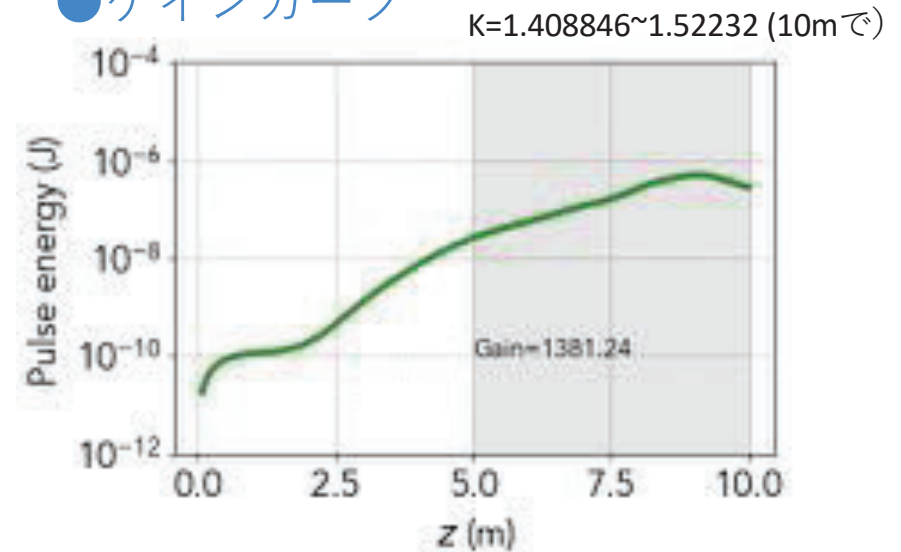


例3 : 40 fs, 100 pC, 0.1%, エネルギーチャープあり、アンジュレータ テーパーあり

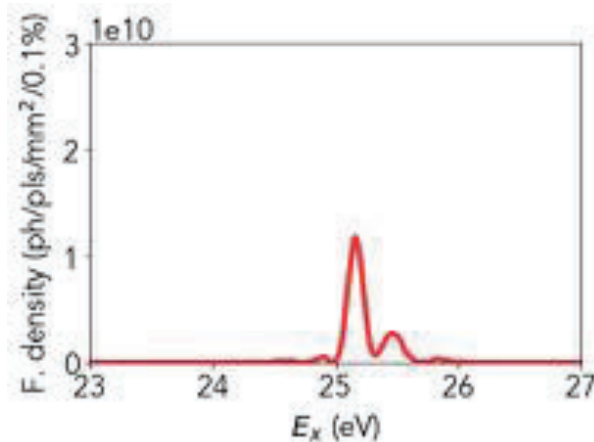
● 初期縦方向位相空間分布



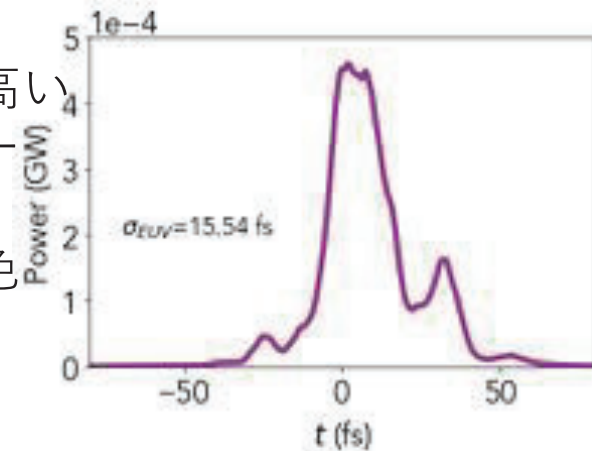
● ゲインカーブ



● スペクトル (4.4 m)

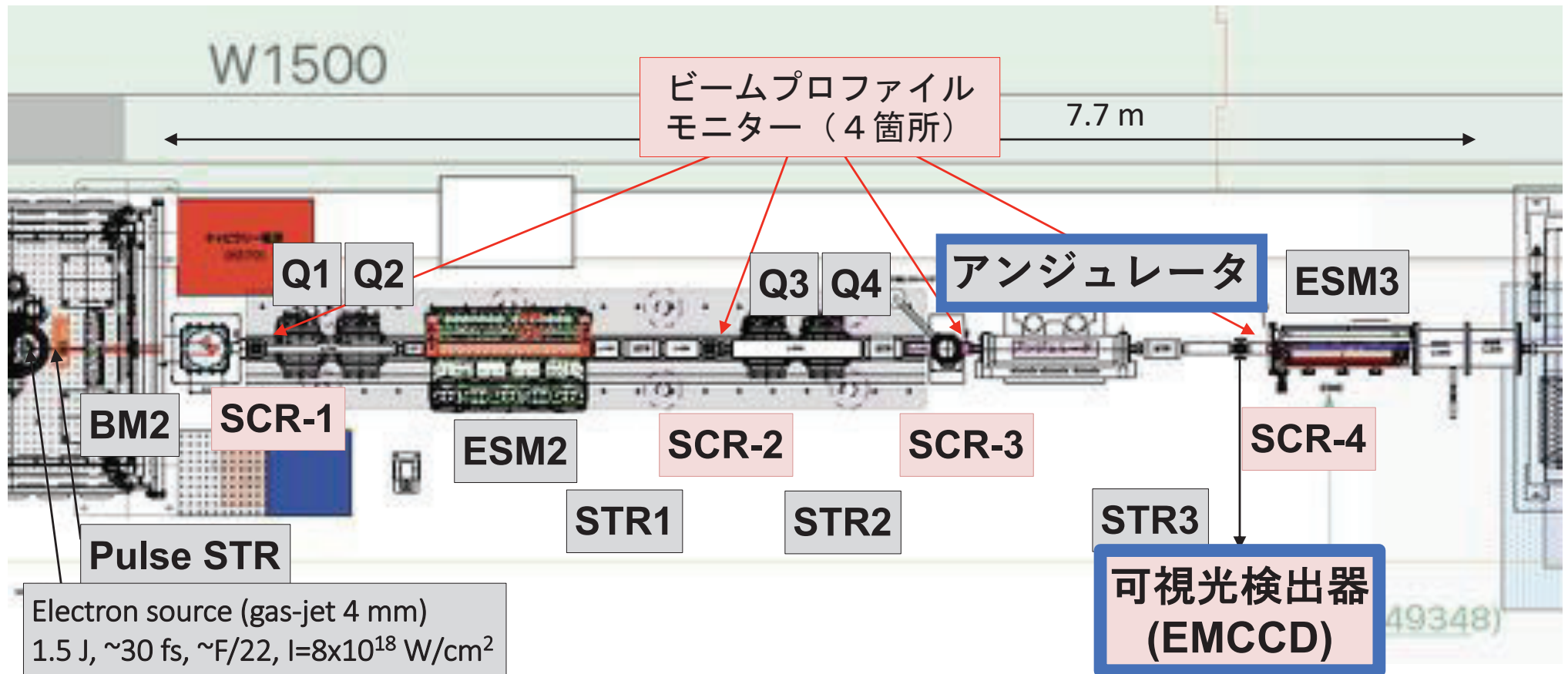


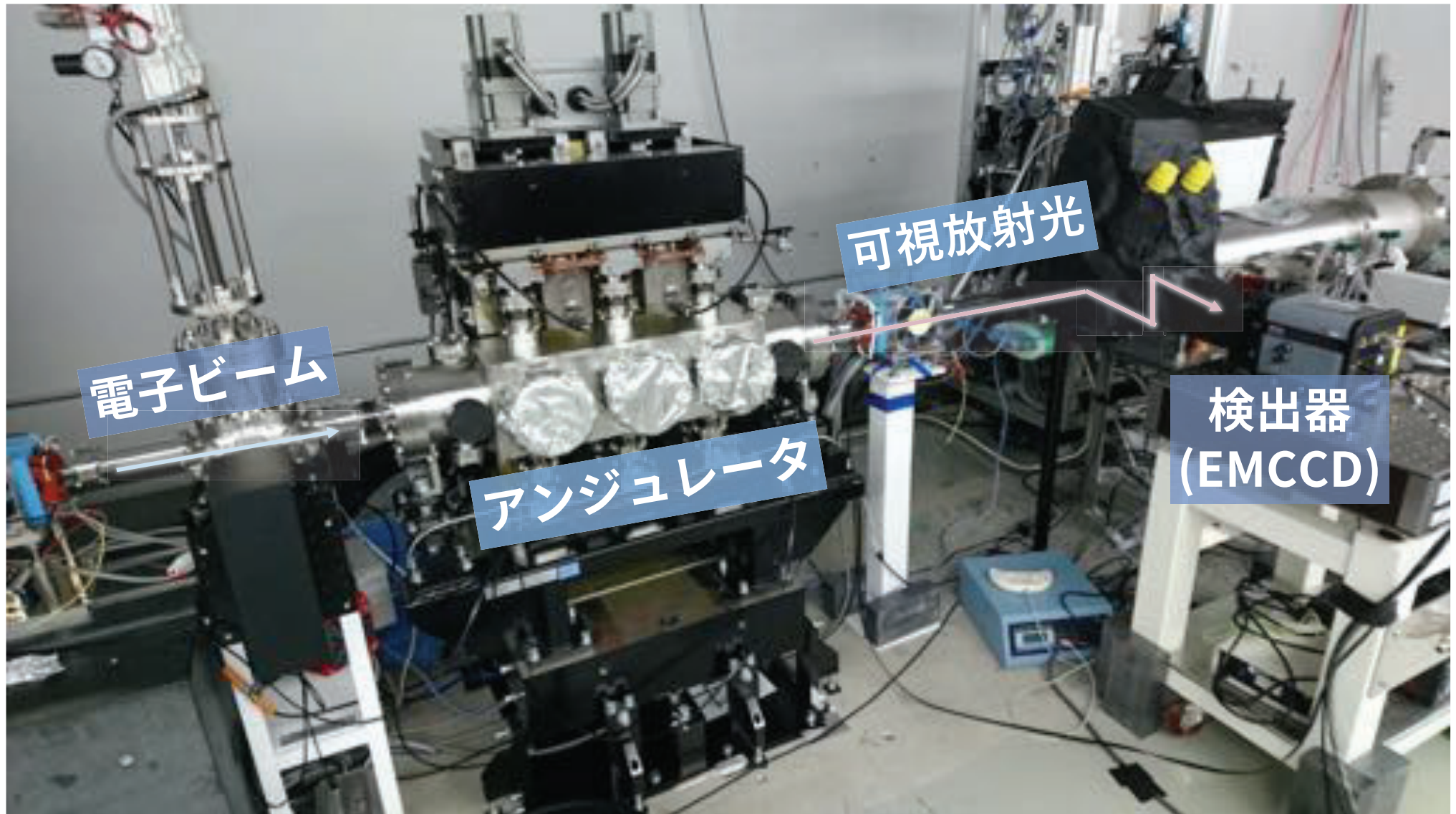
● 時間波形



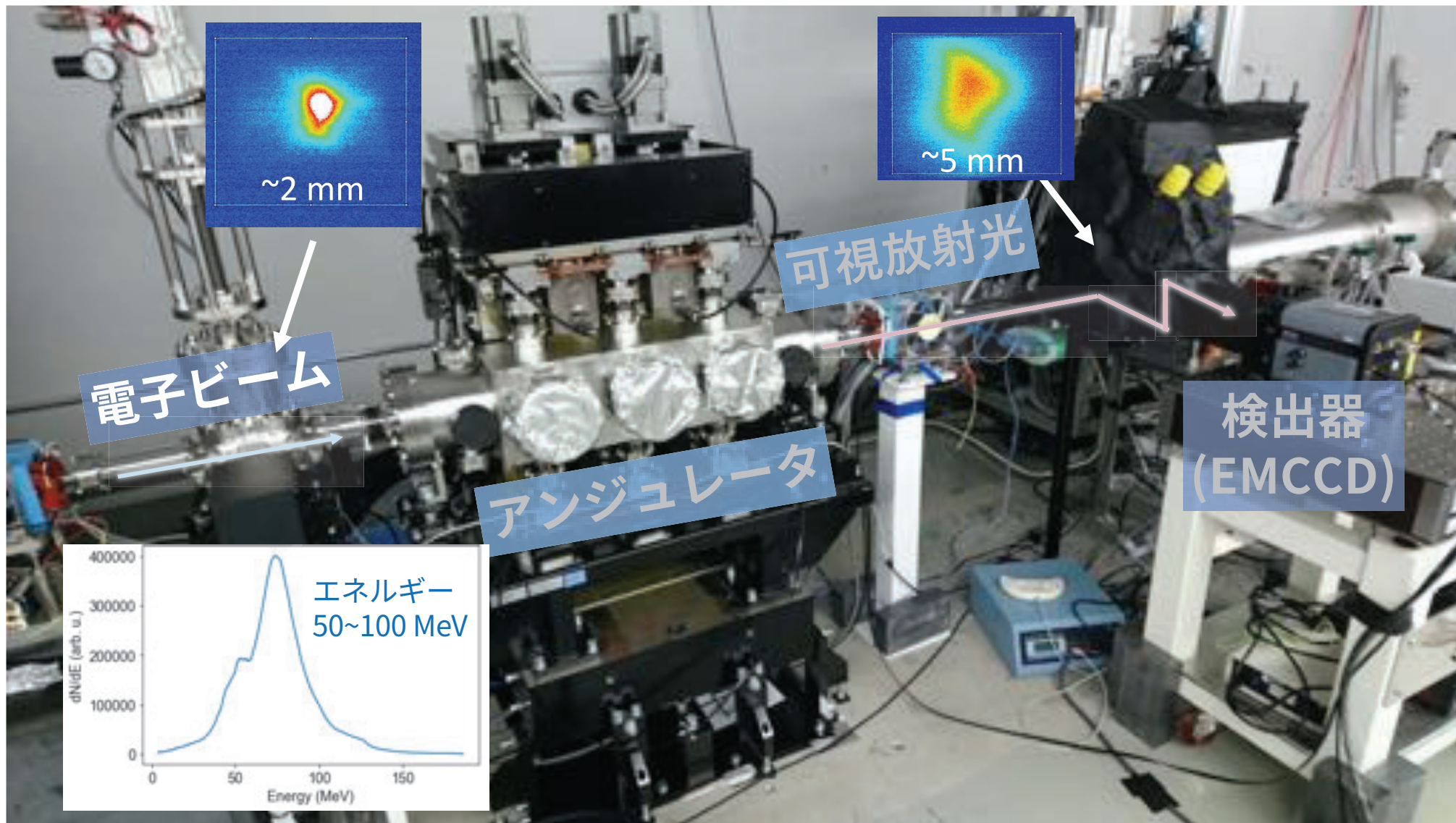
☺ゲインはそこそこ高い
 ☺電子の全エネルギー幅は広くてもよい
 ☺スペクトルも準単色
 ☺X線パルス長も短い

アンジュレータ放射の実験セットアップ

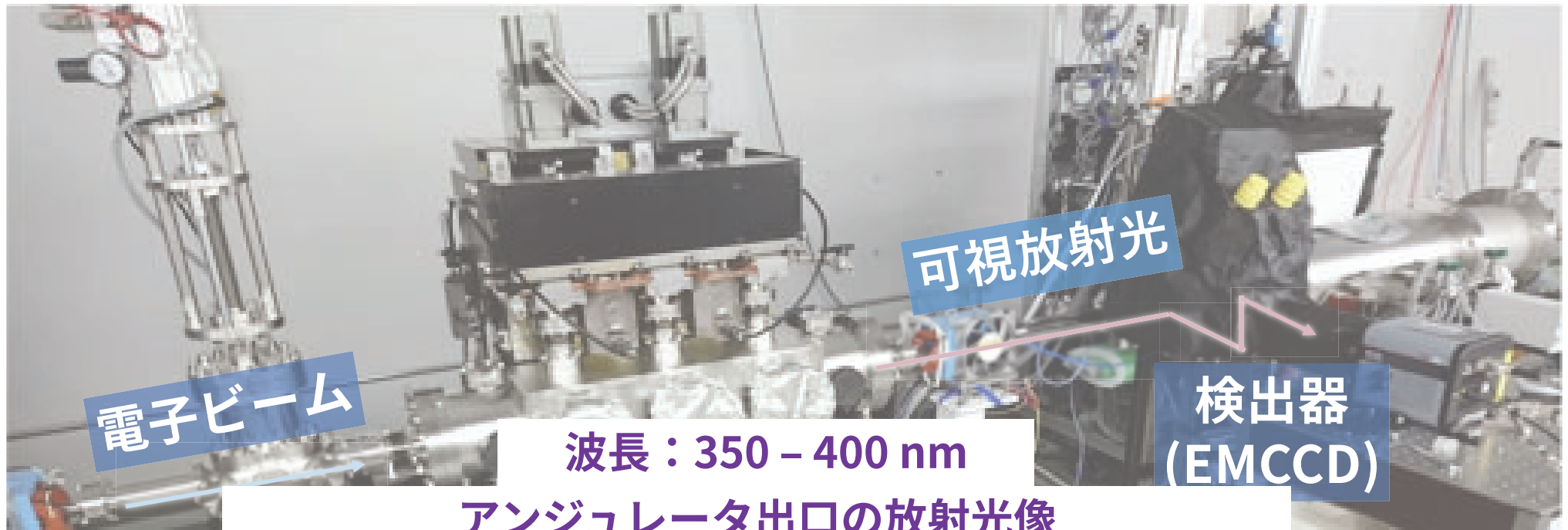




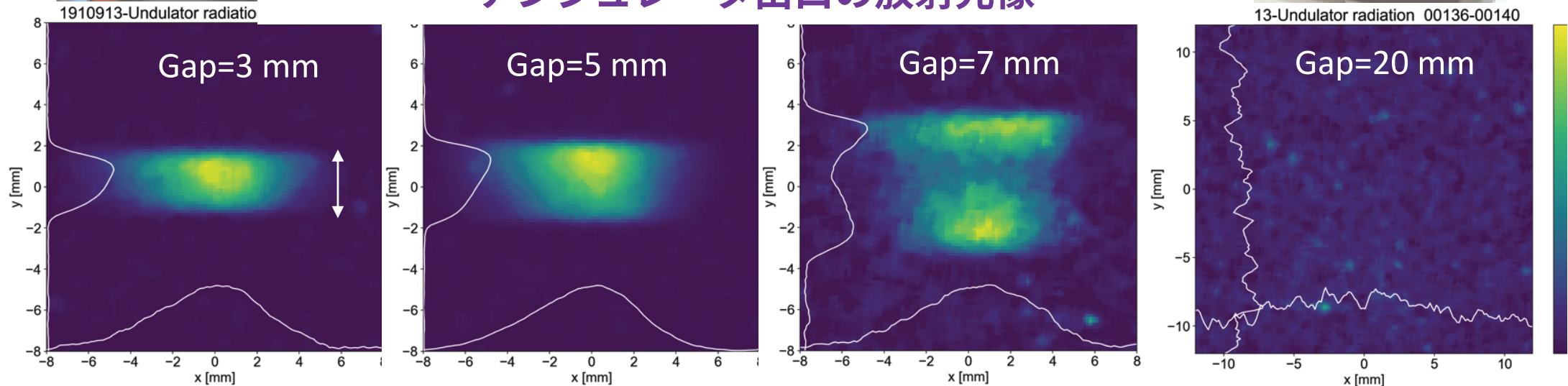
実験時の電子ビームパラメータ



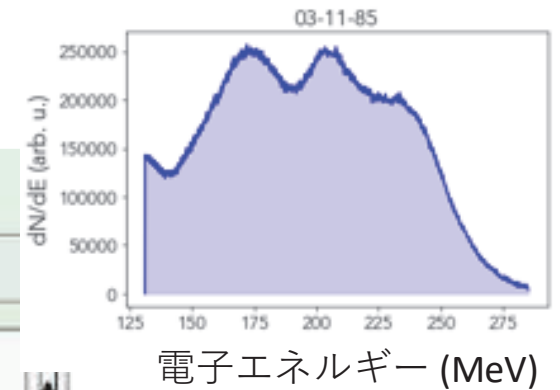
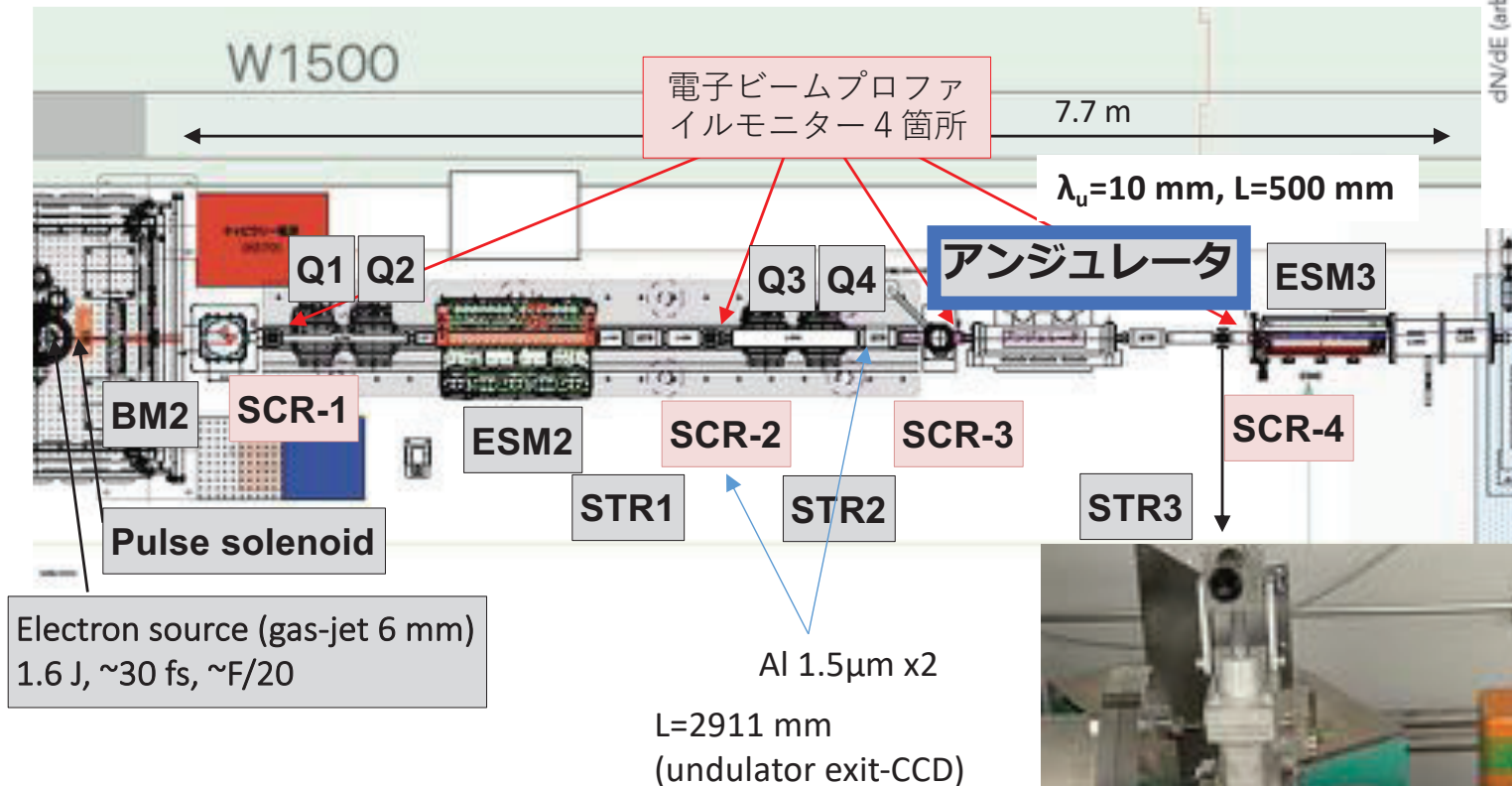
レーザー加速電子による放射光を観測！



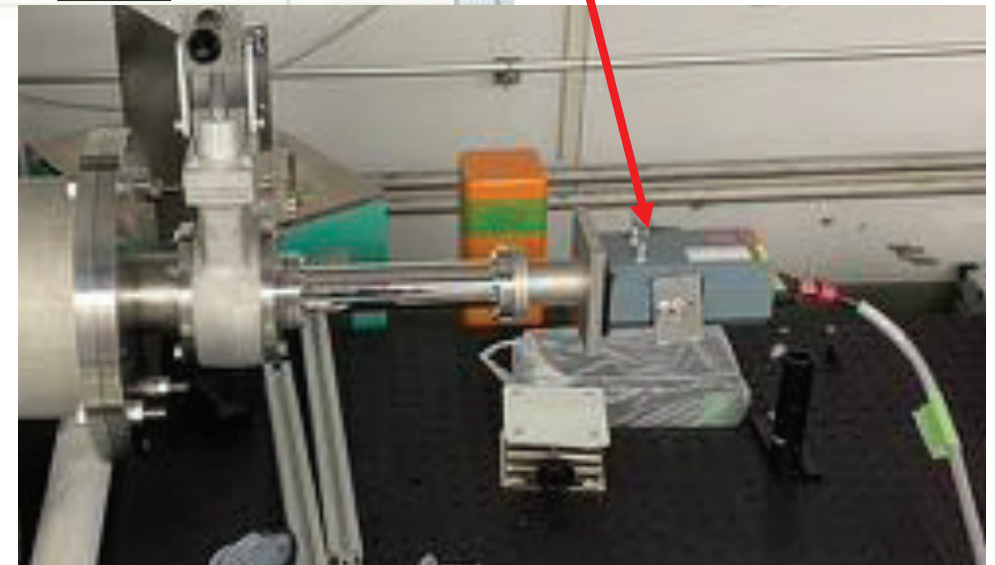
アンジュレータ出口の放射光像



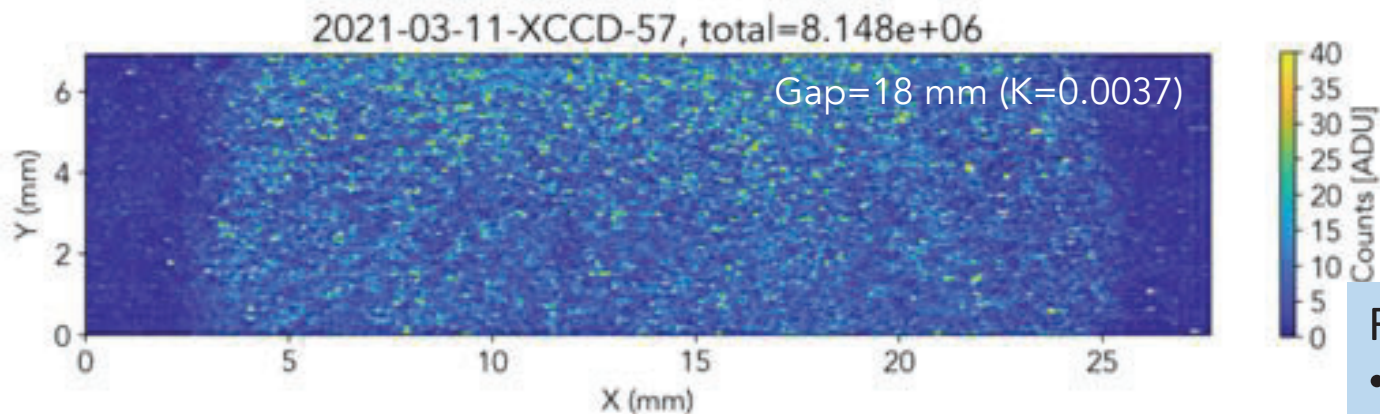
X線CCDカメラにて、アンジュレータ光を直接計測



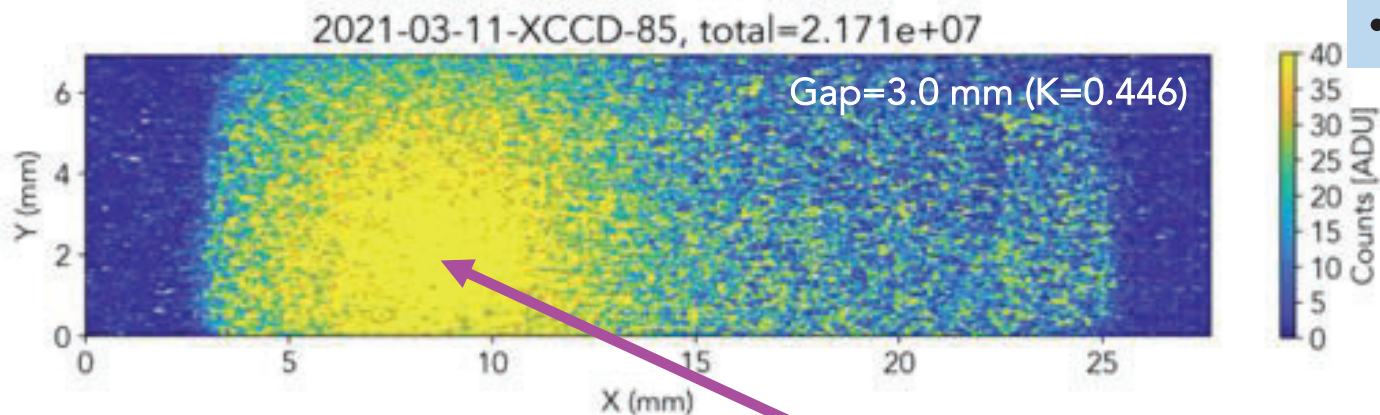
X線CCDカメラ



アンジュレータ磁場が弱い場合



アンジュレータ磁場が強い場合



FELのためには・・・

- エネルギー分散を減らす
- 電荷量を増やす
- アンジュレータ磁場を高める
- テーパーなどの工夫

※まだFELではありません

200 MeV級の電子ビームを輸送し、**アンジュレータ光**（～35 nm計算値）を観測

おわりに

- レーザープラズマ電子加速によるEUV-FELの計画の計算方針とシミュレーションによる見積を紹介しました。
- アンジュレータ光の観測には成功しており、今後ビーム性能をさらに向上させ、2023年までに**世界初**のレーザープラズマ電子加速による**EUV FEL発振**を目指します。
- 本プロジェクトの支援を募集しています。
安定で、高性能の電子ビーム生成のための要素技術は多岐に渡ります。

ご興味のある方はぜひ一緒に開発しましょう！！

共同研究者

大阪大学 産業科学研究所



金展, Naveen Pathak, 水田好雄, 松門宏治
Alexei Zhidkov, Tomonao Hosokai

QST 関西研



Kai Huang, 大東出, 中新信彦, 森道昭, 小瀧秀行
林由紀雄, Timur Esirkepov, James Koga

高エネルギー加速器研究機構



山本樹, 本田洋介, 吉田光宏

東北大学



武藤俊哉

謝辞

酒井泰雄, 末田敬一, 谷澤優介, 寺本高啓, 荻野純平, 陳博順, 益田伸一, 大塚崇光, 兒玉了祐
藪内俊毅, 矢橋牧名, 夏井拓也, 木村洋昭, 理研播磨エンジニアリングチーム

本研究は、JST、未来社会創造事業JPMJMI17A1 の支援を受けたものです。