

荷電粒子(電子、イオン)ビームを
自在にあやつるためのモニター
～ビームのエネルギー分布・時間分布を
同時に非破壊・単発で計測～

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
関西光量子科学研究所
副所長 神門 正城

2023年6月20日

はじめに: 本特許の想定される用途



本特許は、特に

レーザープラズマ加速器

を用いた、

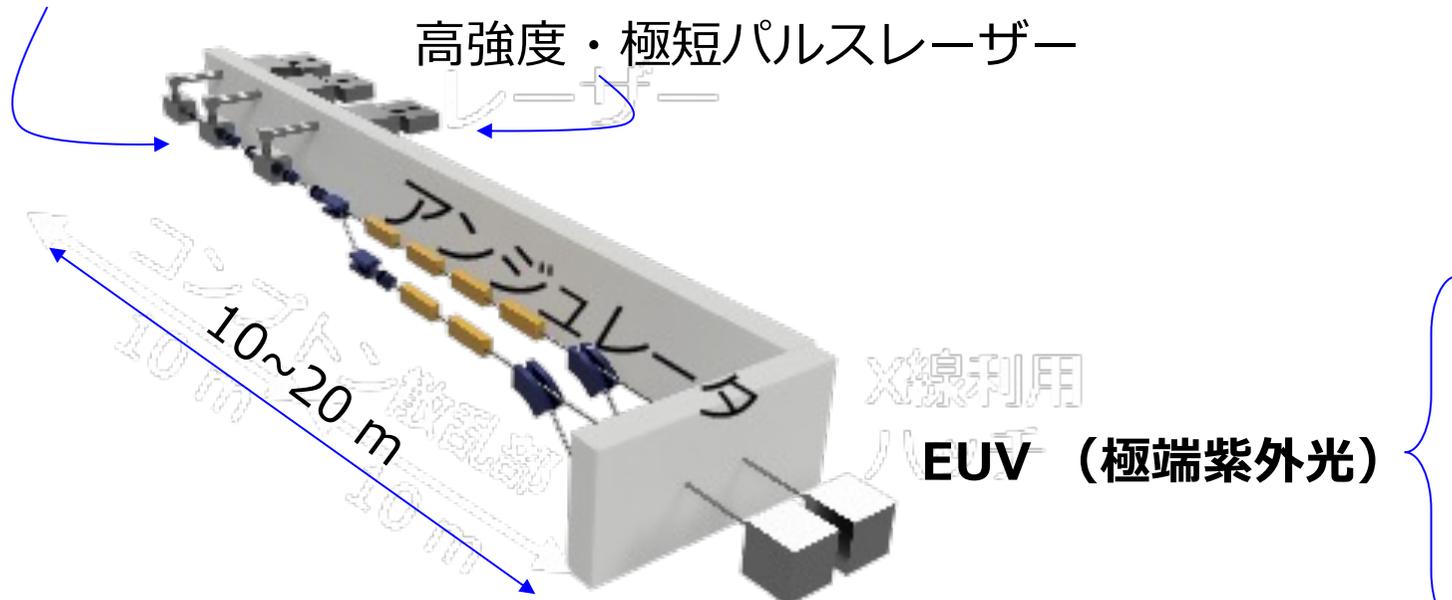
- ・ 小型ガンマ線非破壊検査装置
- ・ フェムト秒EUV光によるレーザー加工装置
- ・ 過渡現象を測るX線、電子線、イオン計測装置

に使える要素技術です。

はじめに: 本特許の想定される用途



レーザープラズマ電子加速器



高強度・極短パルスレーザー

EUV (極端紫外光)

- 微細加工
- 半導体加工
- 高速現象解明

工場や研究室
に設置可能なサイズ!

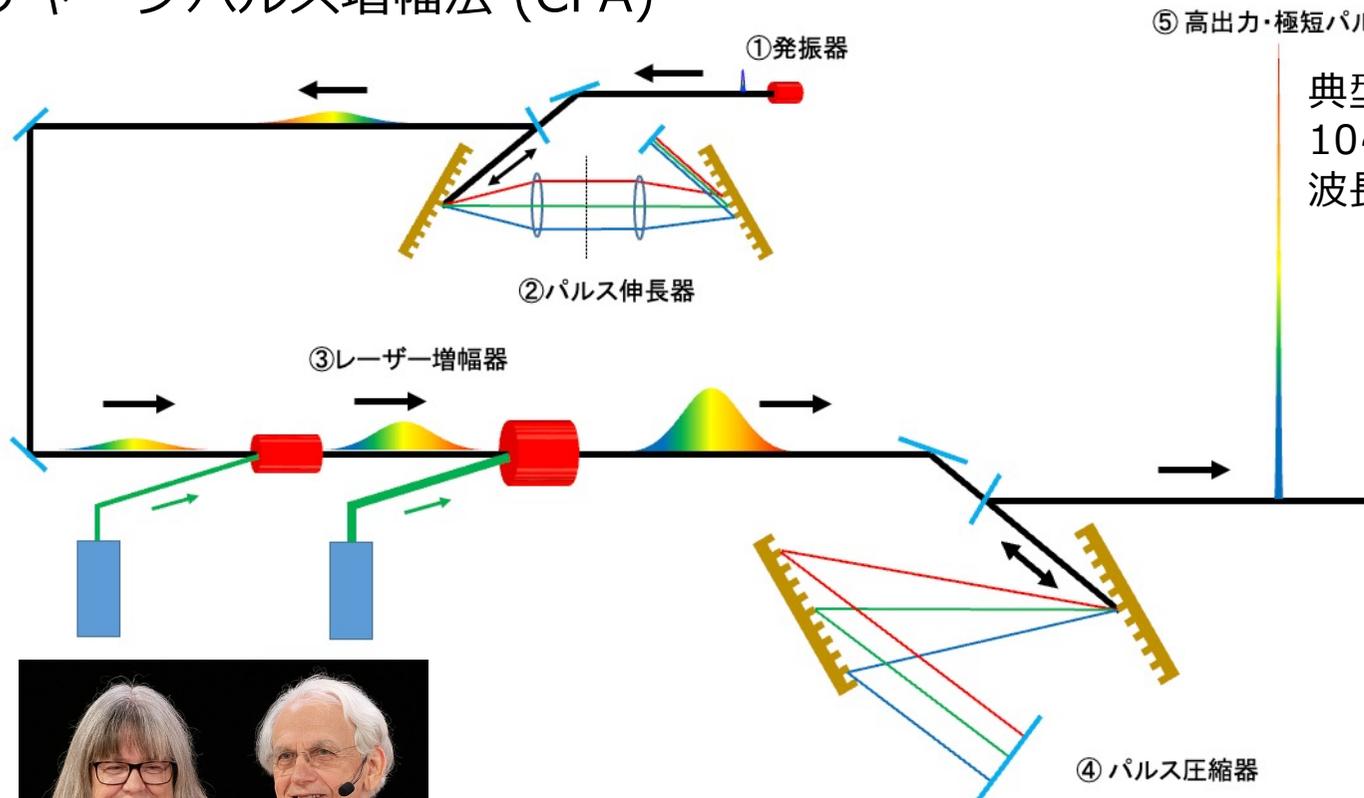
ガンマ線・X線

- 非破壊検査
 - モノや製品の中身を壊さず透視
- 高速現象の解明
 - フェムト秒のパルスで化学反応の追跡 (放射線化学)

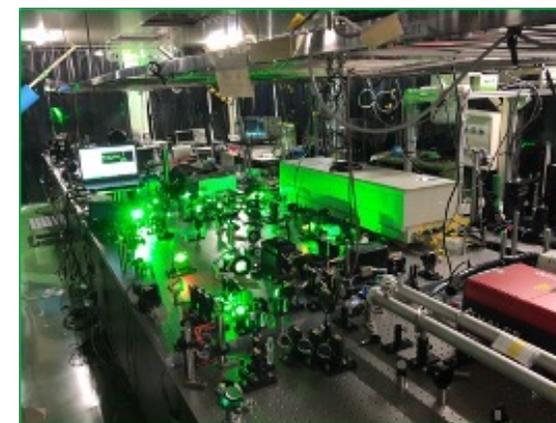
はじめに: 高強度・極短パルスレーザー

時間的にパルスを伸ばして
増幅し、最後に圧縮して高出力を得る

チャープパルス増幅法 (CPA)



典型的には、
10~100 TW, 30 fs
波長 800 nm

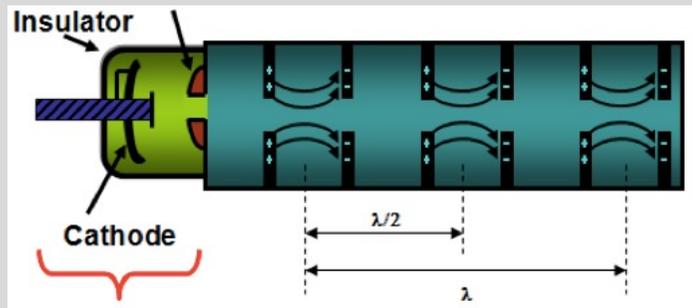


CPAの原理
2018年ノーベル物理学賞
(Strickland博士とMourou博士)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Donna_Strickland_%26_G%C3%A9rard_Mourou_EM1B5839_%282845321404295%29.jpg

はじめに: レーザープラズマ加速

高周波加速



電子銃

~10 cm

~10-100 MV/m

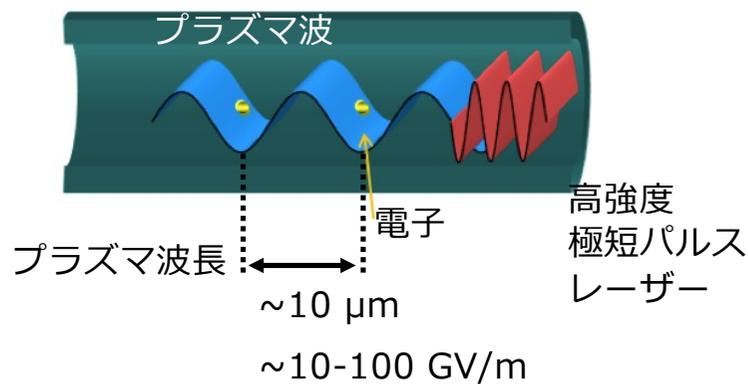
X線自由電子レーザー-SACLA

加速器の長さ~400 m



出典: 理研
<http://xfel.riken.jp/gallery/index.html#image/001-1.jpg>

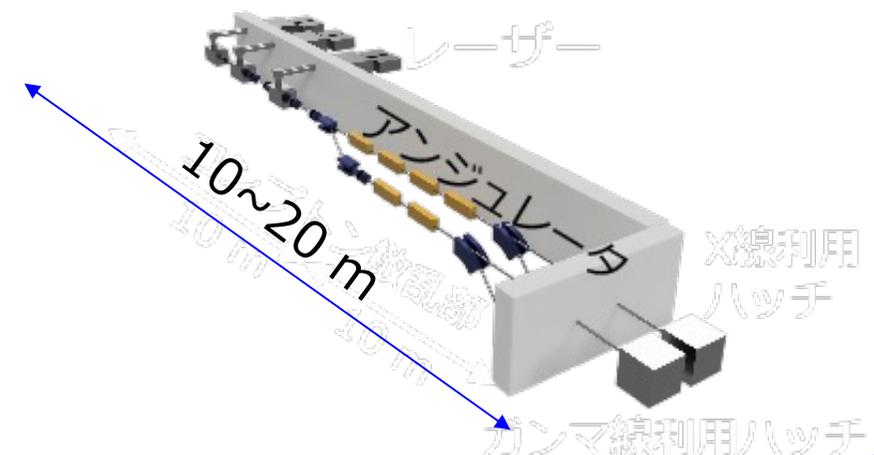
レーザープラズマ電子加速



~10 μm

~10-100 GV/m

レーザープラズマX線自由電子レーザー

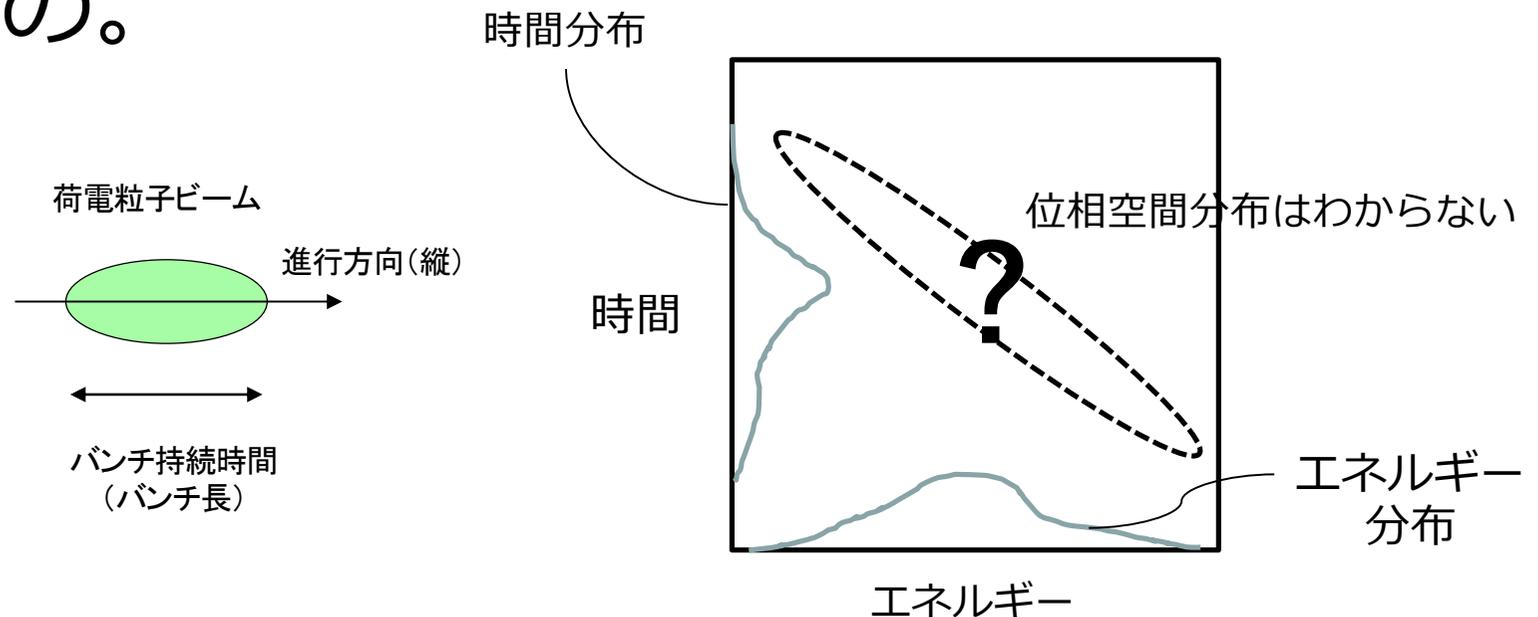


ビームの縦方向位相空間計測

粒子加速器からのビームの「縦方向位相空間」は、ビームの

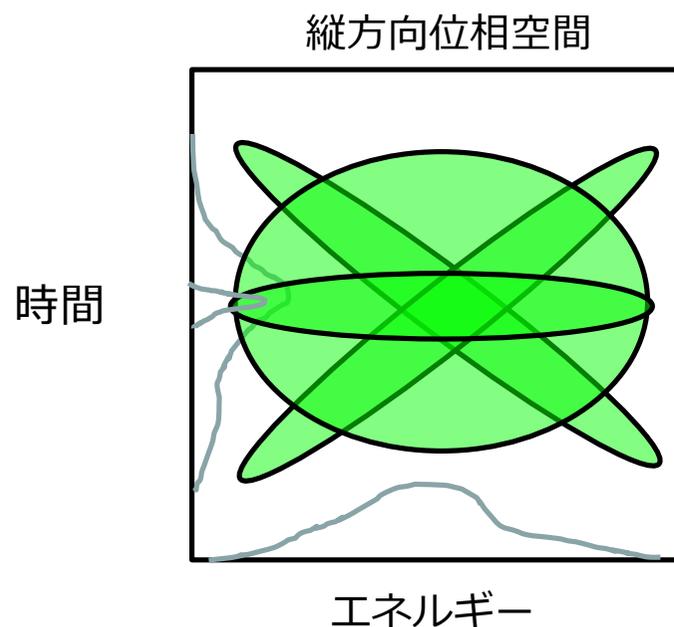
- ・エネルギー拡がり
- ・バンチ持続時間（バンチ長）

を表すもの。



縦方向位相空間は、

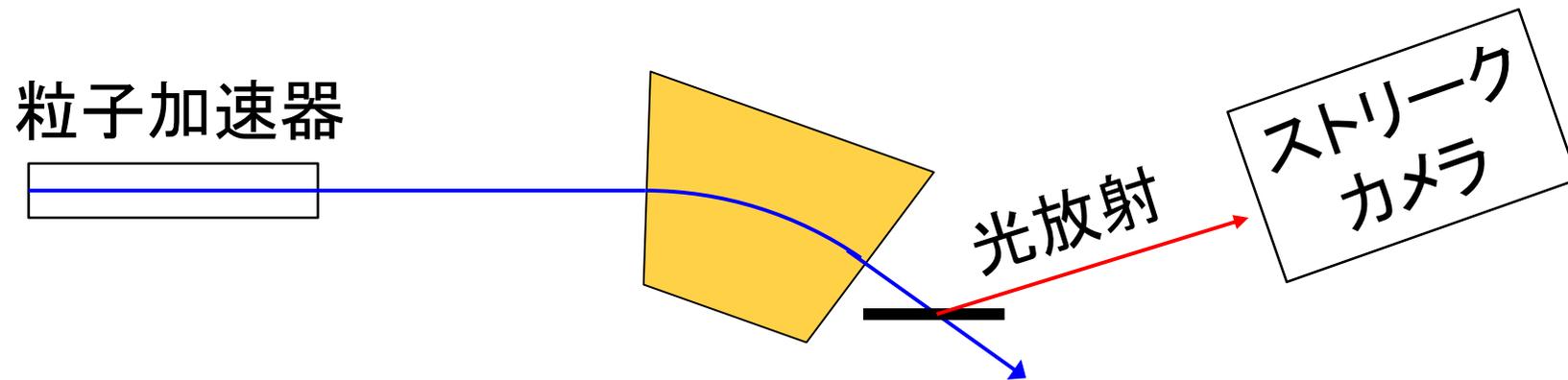
- ・ 高速現象 (30 fs~)のポンプ・プローブ実験
 - ・ 極端紫外光から軟X線自由電子レーザー生成
- などにおいて超短パルスビームを作るのに重要な技術



- ・ 対象物中で最も短く調整したい
- ・ 自由電子レーザーの発振を効率的に行いたい

これまでの計測方法

- 偏向磁石とストリークカメラ



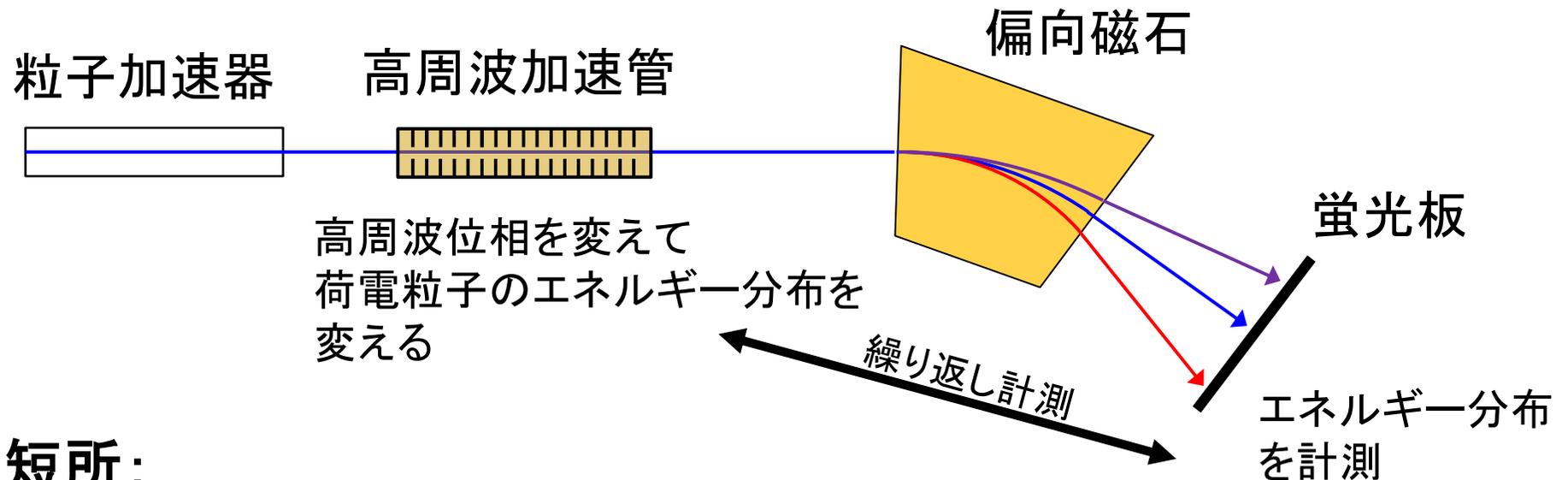
欠点:

- ストリークカメラの時間分解能は ~ 200 fsと限定的
- ビーム破壊計測

J. Rönsch et al., Proceedings of the 27th International Free Electron Laser Conference, pp. 552-555 (2005).

これまでの計測方法

- 高周波加速管の位相を変えてエネルギーを計測



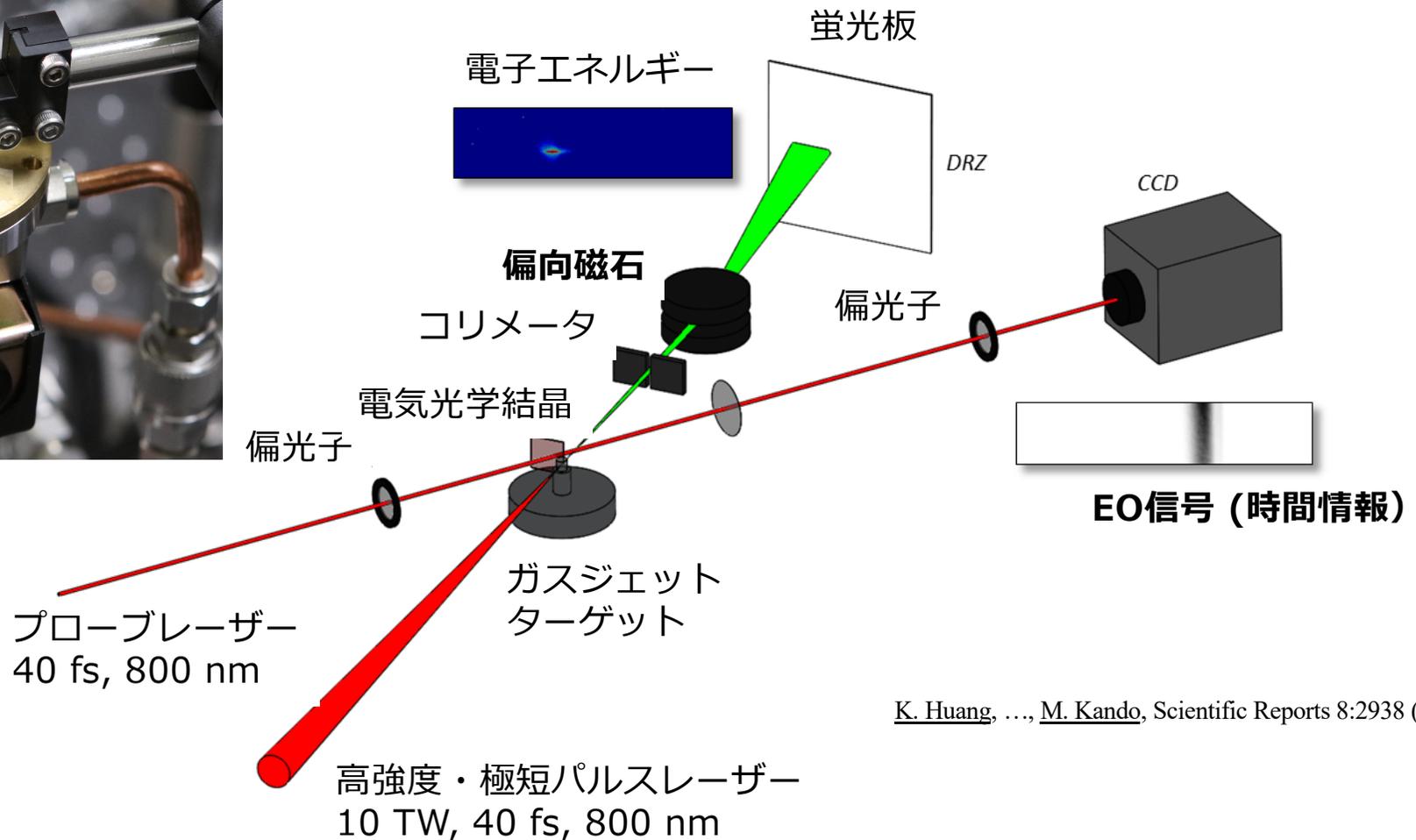
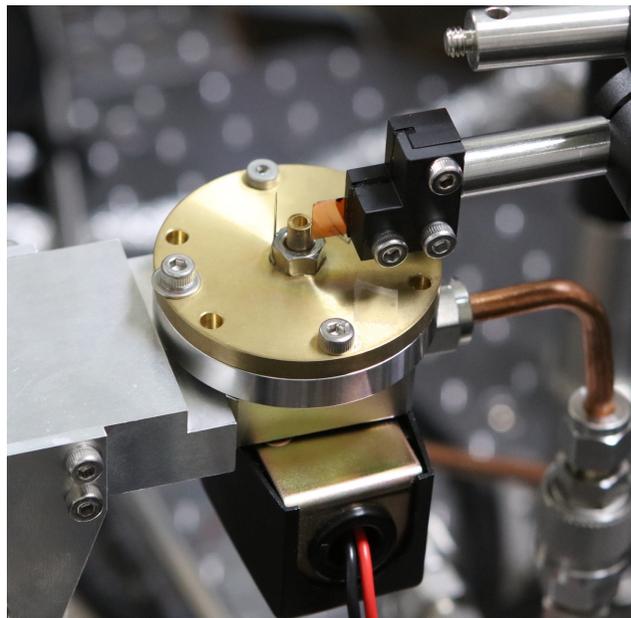
短所:

- 高周波加速管が必要(高価)
- 繰り返し計測が必要
- 時間方向は計算でしか評価できない

S. Kashiwagi et al., Proceedings of XX International Linac Conference, MOC03, pp. 149-151 (2000).

これまでの計測方法

- 電子のエネルギーと時間情報の射影を計測

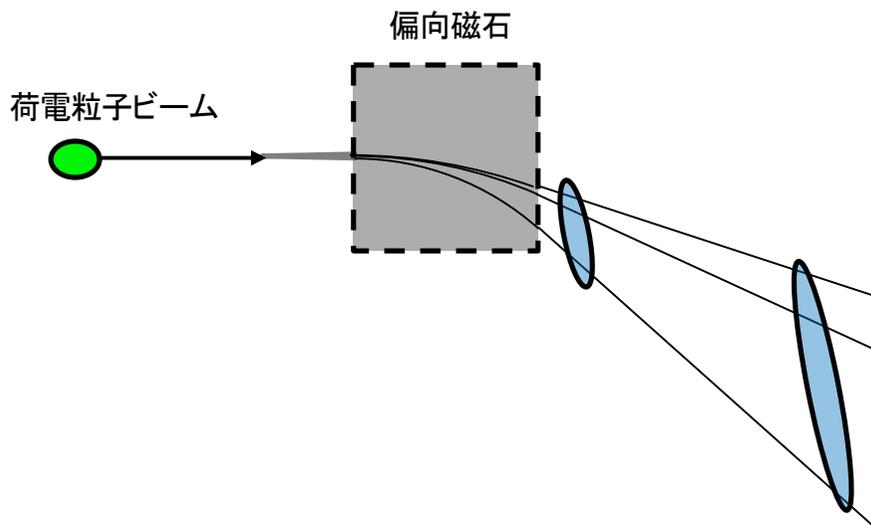


[K. Huang, ...](#), [M. Kando](#), Scientific Reports 8:2938 (2018)

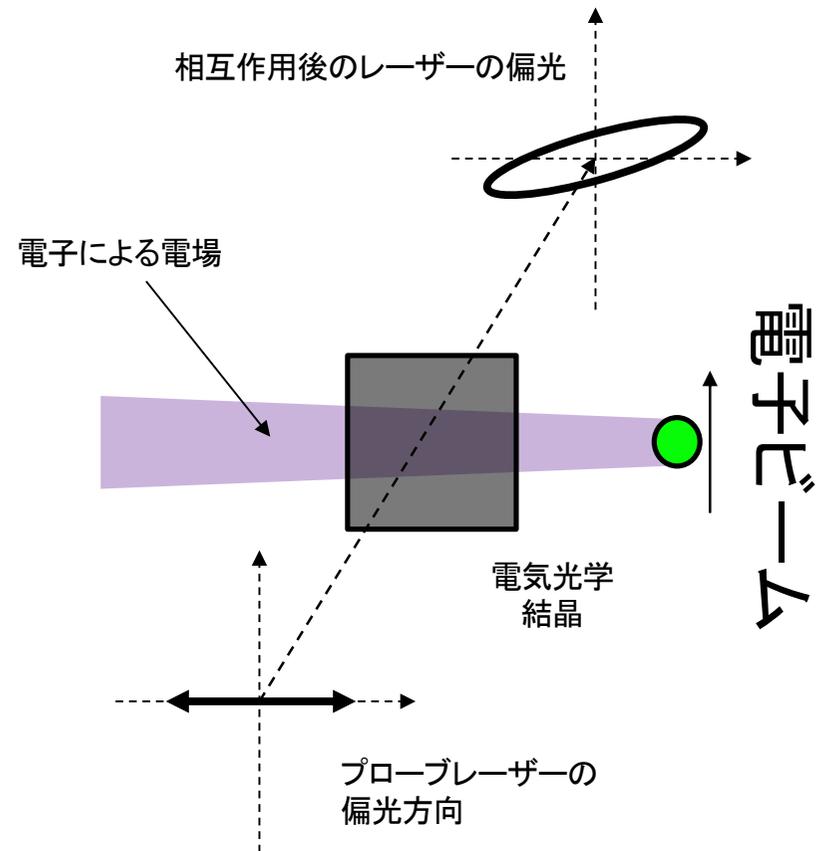
新技術(今回の発明)

● 偏向磁石と電気光学結晶の組合せ

エネルギー計測

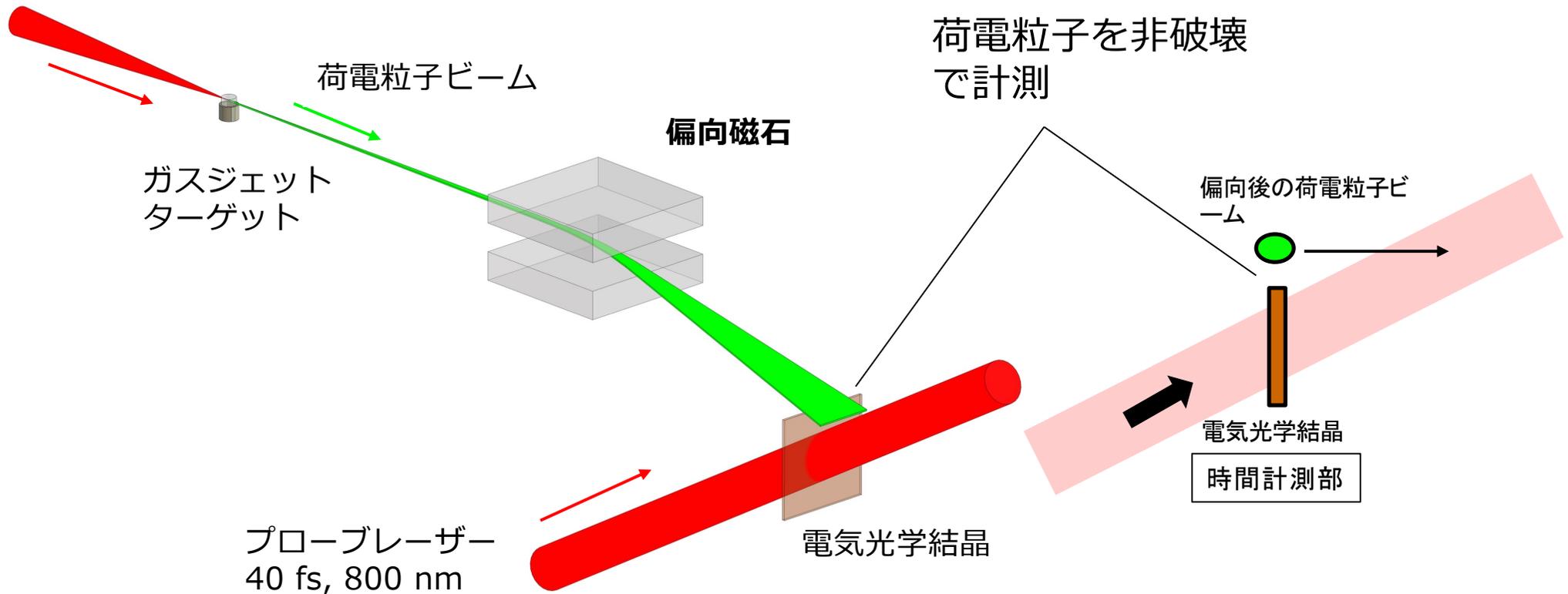


時間計測



新技術(今回の発明)

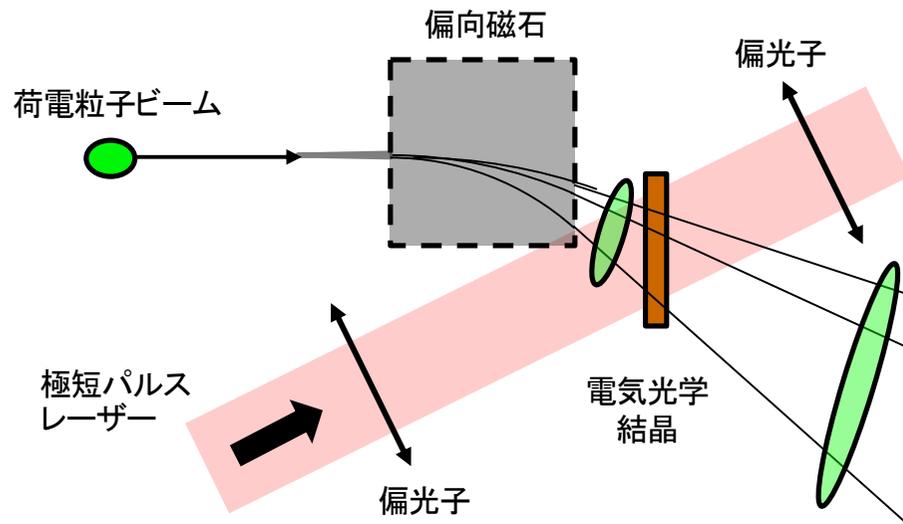
高強度・極短パルスレーザー
10 TW, 40 fs, 800 nm



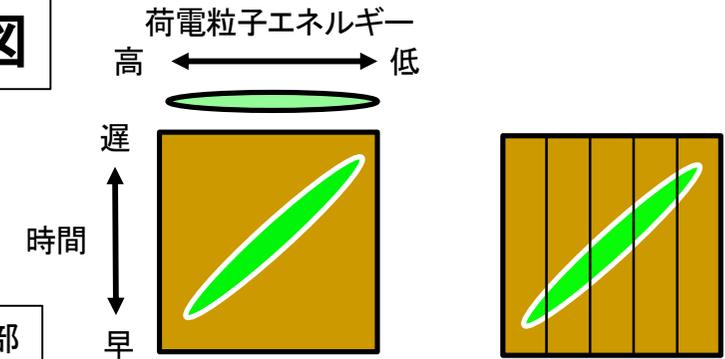
新技術(今回の発明)

● 偏向磁石と電気光学結晶の組合せ

上面図

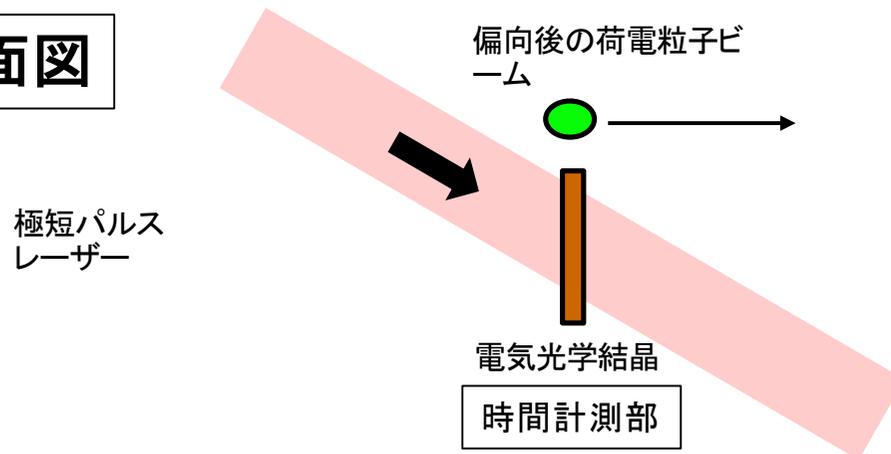


正面図



時間計測部

側面図



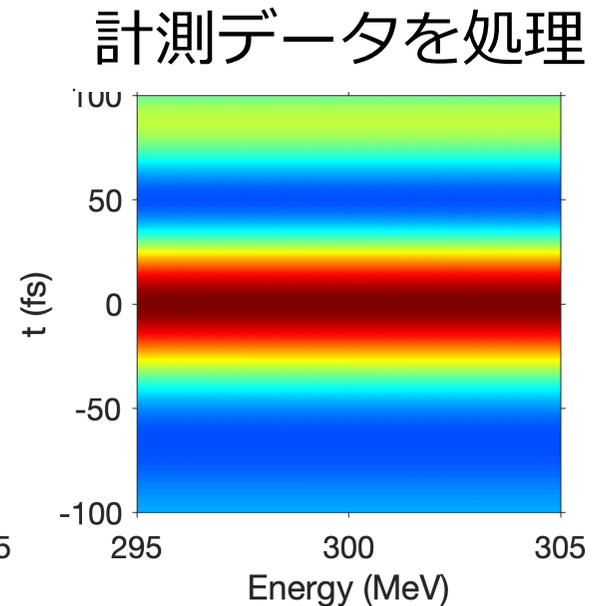
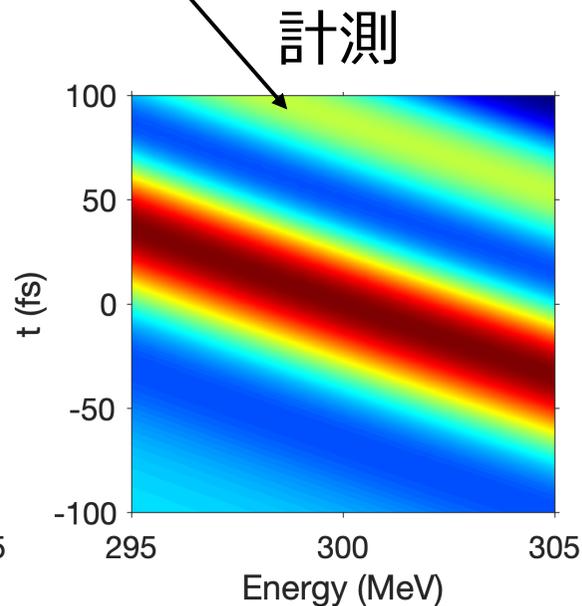
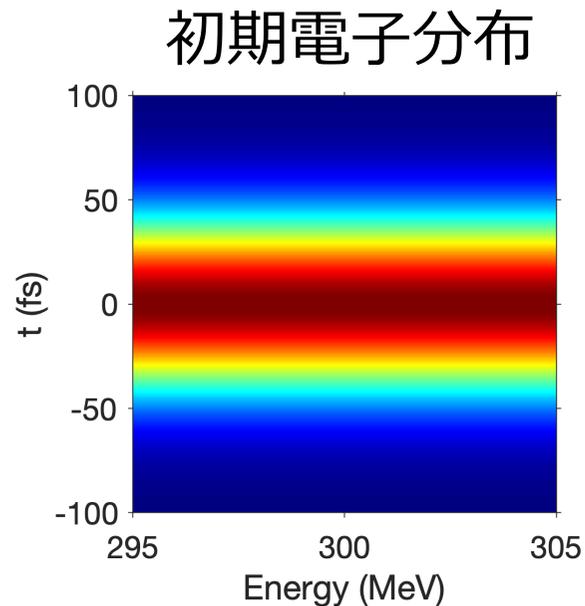
長所:

- 非破壊で計測が可能
- 直接的な計測が可能
- 高い時間分解能 (< 30 fs)

- 偏向磁石と電気光学結晶の組合せ (計算)

- ① 初期チャープなし

結晶のレスポンスで生じるリング成分



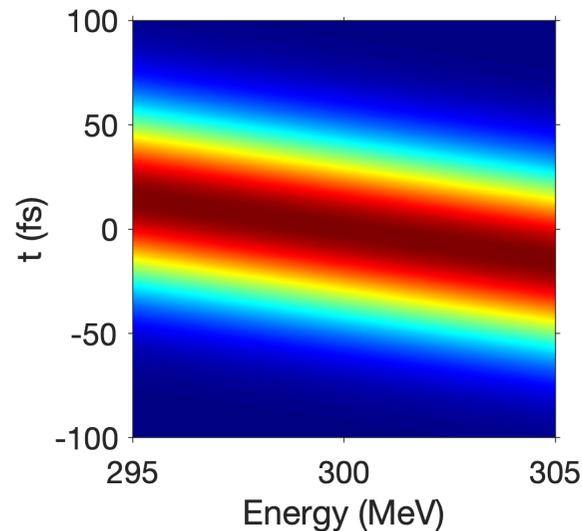
新技術(今回の発明)

- 偏向磁石と電気光学結晶の組合せ (計算)

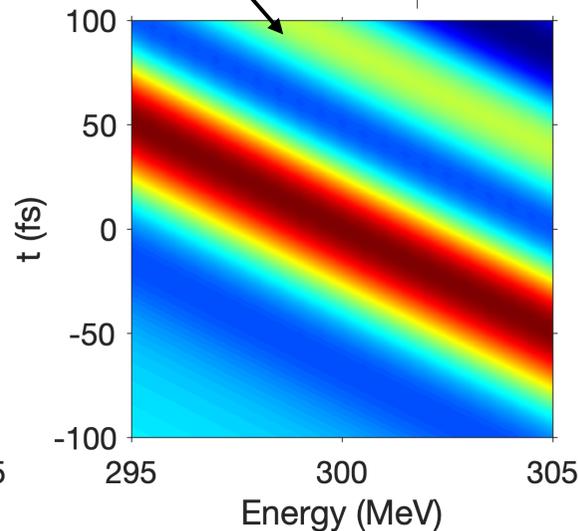
- ② 初期チャープあり (-7 fs/MeV)

結晶のレスポンスで生じるリング成分

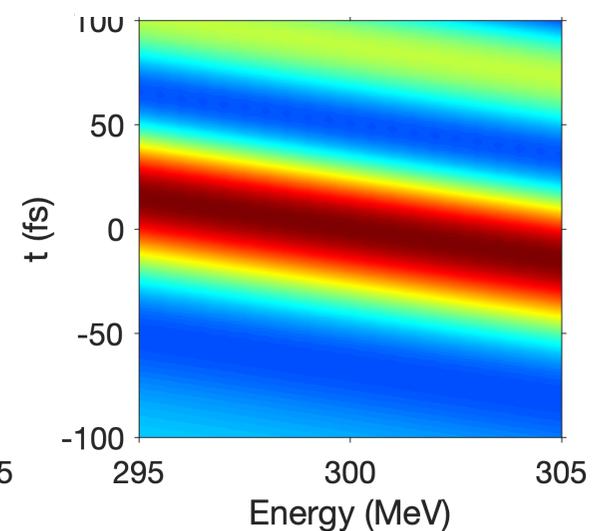
初期電子分布



計測



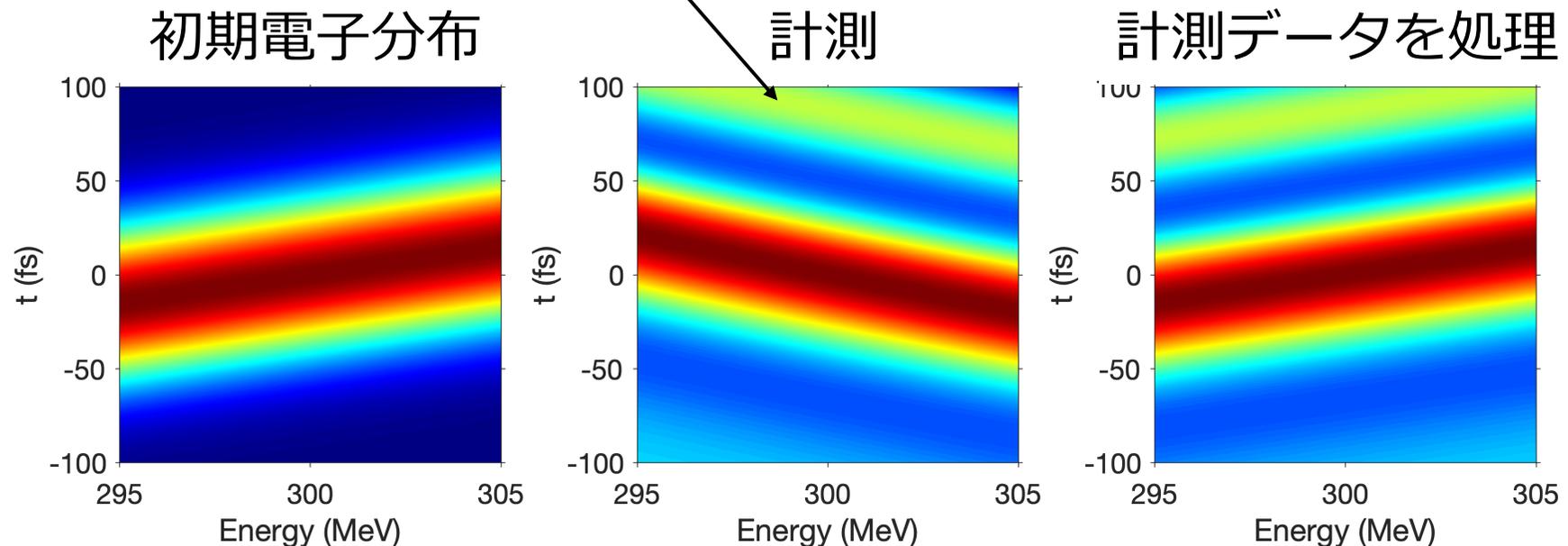
計測データを処理



- 偏向磁石と電気光学結晶の組合せ (計算)

- ③ 初期チャープあり (+7 fs/MeV)

結晶のレスポンスで生じるリング成分



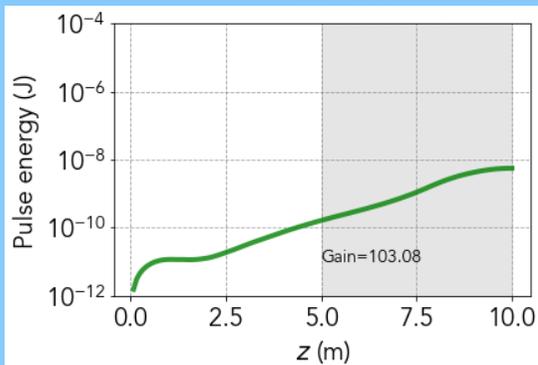
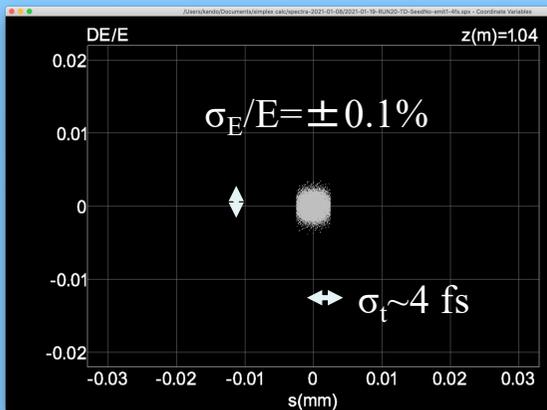
シミュレーション、解析コードを作成し原理検証

新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術の問題点であった、**時間分解能・破壊計測・高価である点**を改良することに成功した。
- 特に、超短パルスビームの生成が可能な**レーザープラズマ粒子加速**において威力を発揮する。
- 本技術の適用により、レーザープラズマ粒子加速における**短パルス性**を活かした装置が製作できる。

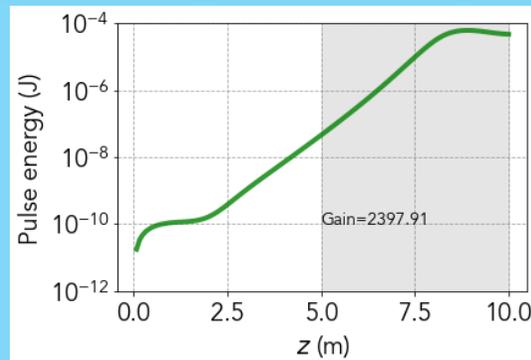
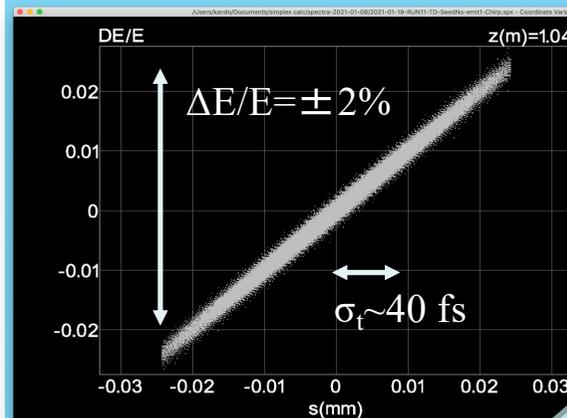
チャープを活かしたFEL増幅

1) 4 fs, 10 pC, チャープ無



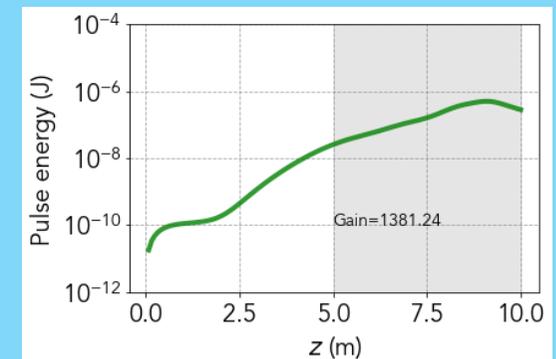
ゲインは100倍程度あるが、スリッページの効果があり、最適ではない

2) 40 fs, 100 pC, チャープ有



ゲインは高い。EUVスペクトルと時間形状は広い

3) 40 fs, 100 pC, チャープ有
テーパー有り



ゲインも比較的高く、EUVのスペクトル、時間形状も良好

チャープを活かしたFEL増幅

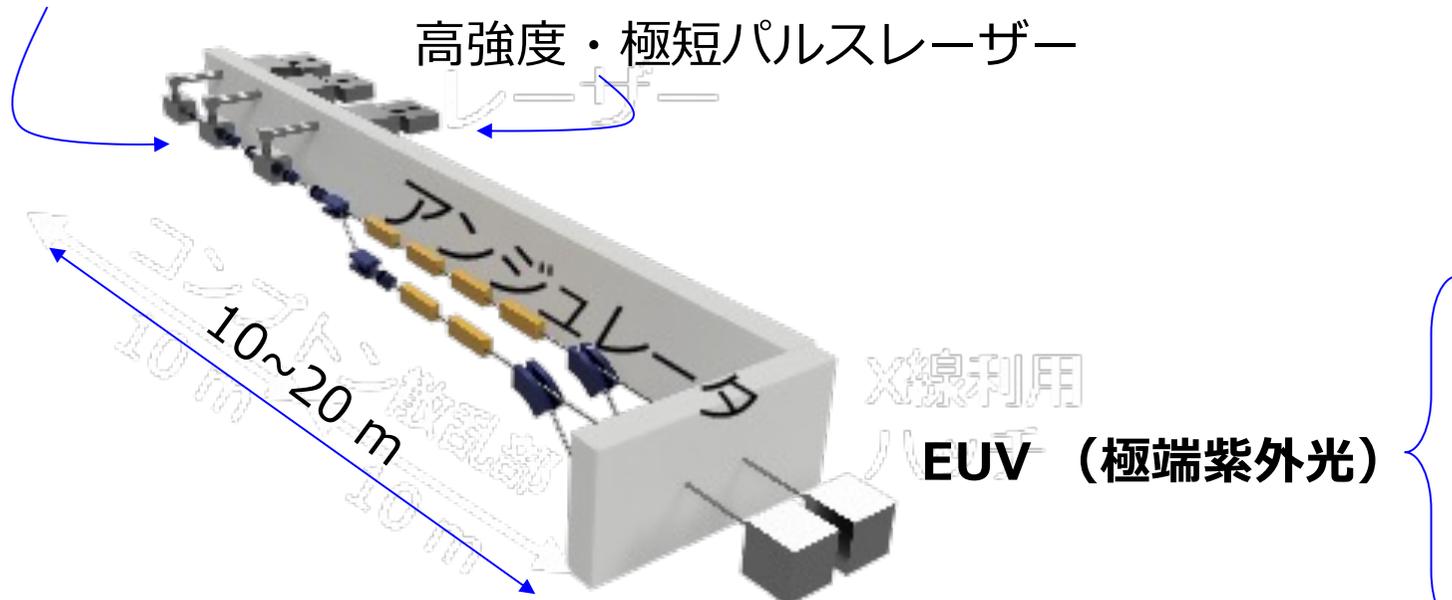
	位相空間分布	FELスペクトル	FEL時間波形
<p>チャープなし (通常アンジュレータ 使用)</p>			
<p>チャープあり (テーパアンジュ レータ使用)</p>			

位相空間分布を変えることでスペクトルなどを制御可能

本特許の想定される用途



レーザープラズマ電子加速器



- 微細加工
- 半導体加工
- 高速現象解明

工場や研究室
に設置可能なサイズ!

**計測器単体でも
装置にはなるが
システムが魅力的
と思われる。**

- 非破壊検査
 - モノや製品の中身を壊さず透視
- 高速現象の解明
 - フェムト秒のパルスで化学反応の追跡
(放射線化学)

実用化に向けた課題

- 現在、計算コードを整備し基本的動作を解析できるところまでは開発済。電気光学結晶を用いた計測も実証済。磁石と組み合わせた実証も準備中である。
- 計測器としてのパッケージングがまだであり、ソフトウェアも含めた開発が必要である。

企業への期待

- 超短パルスを用いた検査器開発
 - 電子ビームを用いた放射線素過程の現象の解明、検査
 - X線、ガンマ線による高速現象の時間分解計測
- 自社敷地内に設置可能な小型X線自由電子レーザー装置装置への展開

上記装置を開発するにあたり、本技術は重要な装置となります。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 測定装置及び測定方法
- 出願番号 : 特願2022-34464
- 出願人 : 量子科学技術研究開発機構
- 発明者 : 神門正城、黄開

お問い合わせ先

量子科学技術研究開発機構
イノベーションセンターまでお願いします

T E L : 043-206-3027

F A X : 043-206-4061

e-mail : chizai@qst.go.jp