



# cERLを用いた中赤外FELの開発とFEL発振

阪井 寛志, 加藤 龍好, 土屋 公央, 谷本 育律, 本田 洋介, 宮島 司,  
島田 美帆, 帯名 崇, 高井 良太, 中村 典雄, 原田 健太郎, 高木 宏之,  
満田 史織, 東 直, 山本 将博, 福田 将史, 田中 織雅, 野上 隆史, 江口 柊,  
塩屋 達郎, 下ヶ橋 秀典, 多田野 幹人, 長橋 進也, 濁川 和幸, 三浦 孝子,  
Feng Qiu, 荒川 大, 梅森 健成, 許斐 太郎, 加古 永治, 仲井 浩孝,  
中西 功太, 清水 洋孝, 原 和文, 本間 輝也, 小島 裕二,  
河田 洋, 内山隆司 (KEK),  
羽島 良一, 川瀬 啓悟 (QST), 坂本文人 (秋田高専),  
Norvell Nora (SLAC), 佐藤 正健, 屋代 英彦, 欠端 雅之 (AIST)

In detail, please see  
<http://arxiv.org/abs/2106.13247>

30ページ

(30分)

# 目次

(1) 研究の概要

(2) cERL-FELの設計

- cERL-FELのsetup
- FELの計算結果

(3) 昨年夏までのcERL-FELのコミッショニング状況

- cERL-FELの建設
- ビーム運転と昨年夏までのコミッショニング結果

(4) FEL出力向上に向けた改良と今年2-3月の実験結果

(5) まとめ & 今後

## (1) 研究の概要

## (2) cERL-FELの設計

- cERL-FELのsetup
- FELの計算結果

## (3) 昨年夏までのcERL-FELのコミッショニング状況

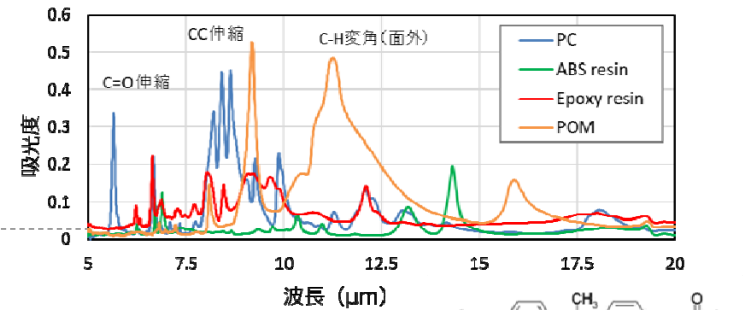
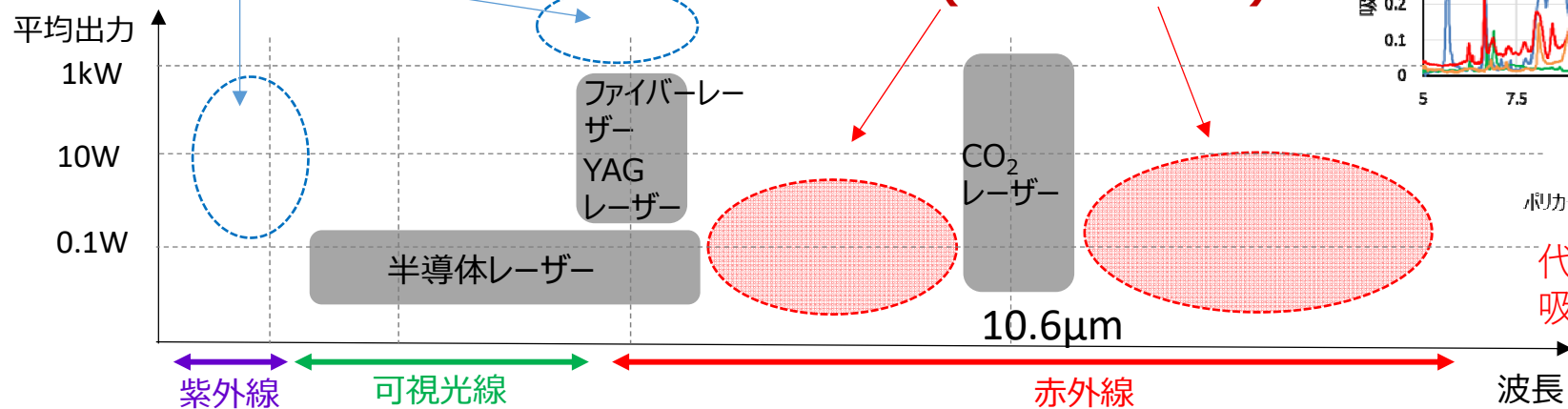
- cERL-FELの建設
- ビーム運転と昨年夏までのコミッショニング結果

## (4) FEL出力向上に向けた改良と今年2-3月の実験結果

## (5) まとめ & 今後

# 研究の目的

現在のレーザー加工で主に使われている波長域



代表的な樹脂材料の吸収スペクトラム

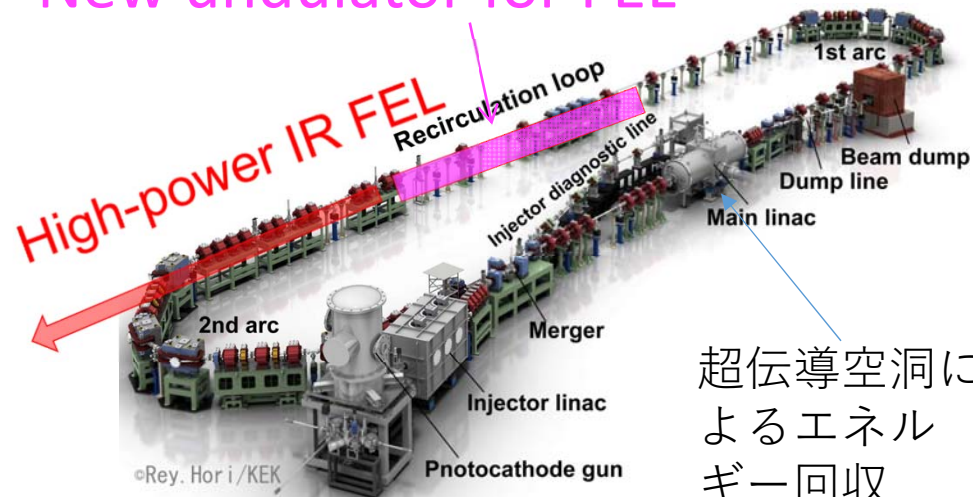
**目的：樹脂材料加工ニーズの顕在化（例：車の軽量化）に赤外レーザープロセスで対応**  
**樹脂材料の分子振動の吸収波長のピークに合わせ、レーザー加工を行う。**  
**材料に合わせて赤外波長を選択し、高出力の赤外波長による樹脂加工効率の向上を目指す。**

波長可変で中赤外領域で大強度レーザーの候補は自由電子レーザー(FEL)

超伝導リナックベースで高輝度・短バンチで高繰り返しを有する我々のエネルギー回収リナック(ERL)を用いることで高出力の波長可変赤外レーザーを作成できるのではないかとというのが本研究開発の目的。

New undulator for FEL

Compact ERL



超伝導空洞によるエネルギー回収

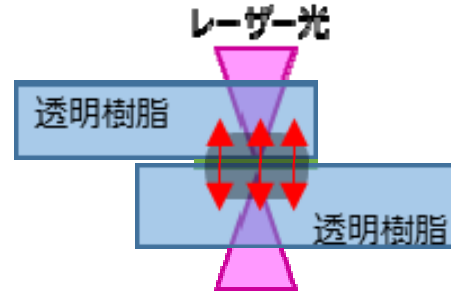
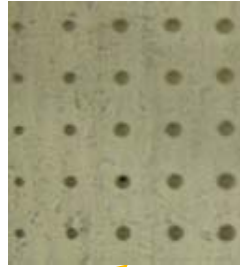
# NEDOプロジェクト

2年強のNEDOプロジェクト(Dec. 2018 – Mar. 2021)を受託

題目：「**分子振動を利用する高効率加工プロセス用中赤外高出力レーザー光源開発**」



KEK (東京理科大学)  
浜松ホトニクス  
産総研で本NEDOの開発を  
協力して行った。

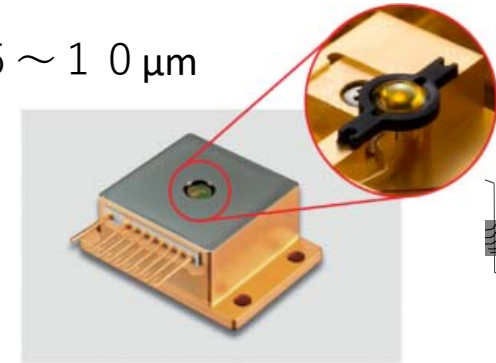


## 樹脂加工・評価

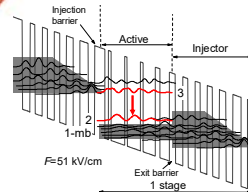
産総研でFEL,QCLを用いた  
**高効率樹脂加工**を行う。



5 ~ 10  $\mu\text{m}$

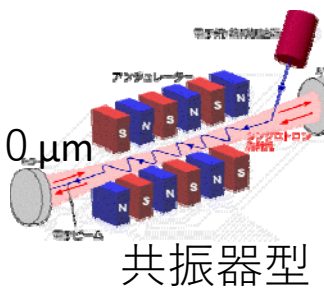


## QCL



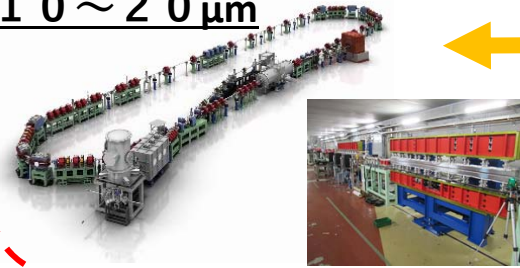
## FEL

5 ~ 10  $\mu\text{m}$



cERL

10 ~ 20  $\mu\text{m}$



KEKと東京理科大学で波長可変**赤外自由電子レーザー(FEL)の開発**と狙った波長で樹脂加工実験を行う。

浜松ホトニクスで狙った赤外波長の高輝度**量子カスケードレーザー(QCL)の開発**。

## KEK (cERL-FEL)での2年強の開発目標

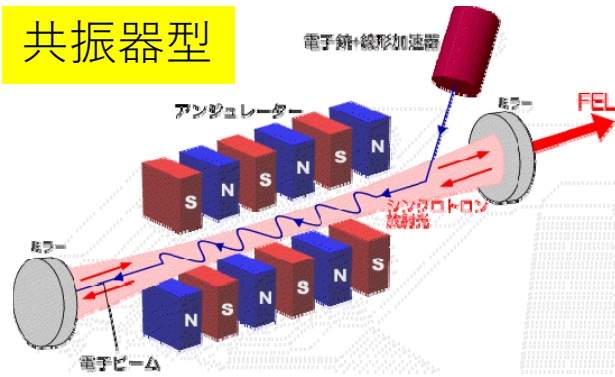
- ・ 波長： **10~20 $\mu\text{m}$ の波長可変**なFELの生成
- ・ 強度： **1W級の高出力レーザー**

全体活動はOPIE'21のNEDO virtualブース(8/5公開)  
<https://360camera.space/nedo/>  
の「次々世代F」にお立ち寄りください。

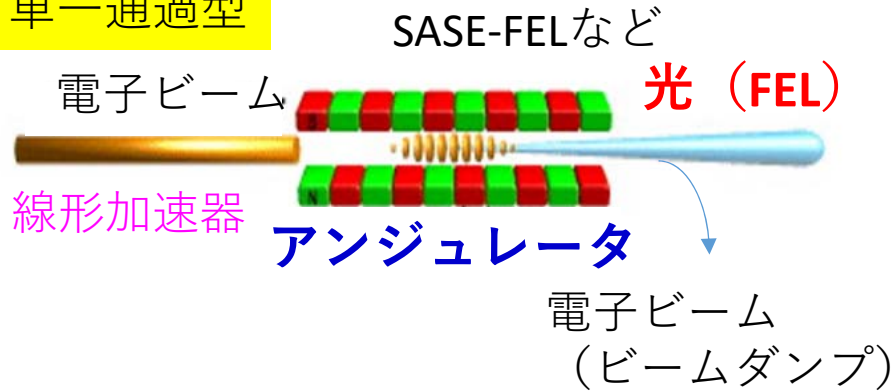
# ERL型FELの特徴

自由電子  
レーザー  
(FEL)

共振器型

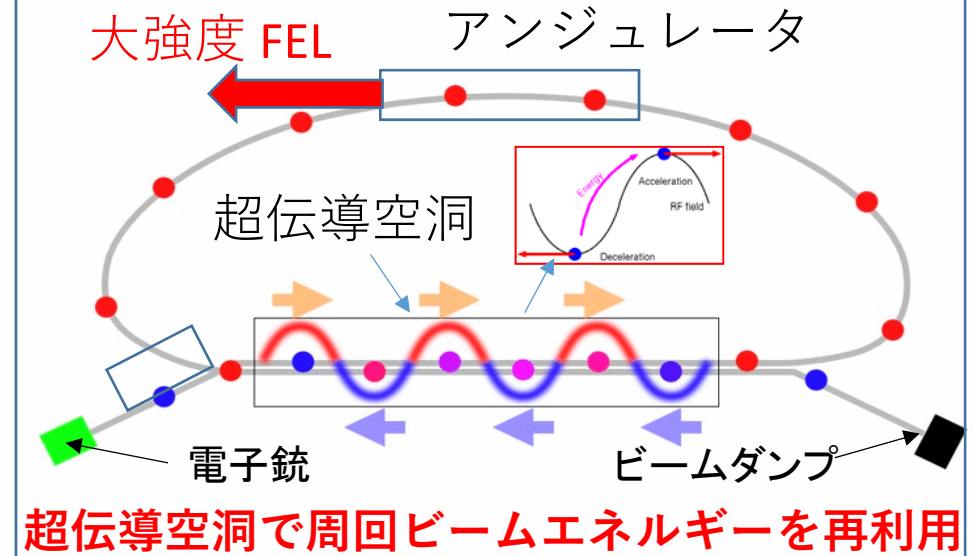


単一通過型



ライナック型のFELでは、電子ビームエネルギーのうち**90%以上のエネルギーがビームダンプに捨てられる。**

ERL(エネルギー回収ライナック)原理



ERLを使うことで、大電流ビームで、ビームエネルギーを高効率に高出力FELの生成を可能に。  
→**加工に必要な高平均FELの生成が可能。**

今迄超伝導空洞ERLで行われたFELは共振器型。

- ・ JAERI-FEL (日本)、(超伝導空洞) (2003)
- ・ Jlab-FEL (アメリカ) (超伝導空洞) (2005)

**我々の選択 → (単一通過型ERL-FEL)**

- ・ cERLの高品質ビームで高ゲインが実現可能と予想。 **世界初のERL型単一通過型FELの実証を目指す。**
- 特に**将来のERL型の高出力EUV-FEL光源、およびCW-XFEL光源へ拡張が可能。**
- ・ (他) **NEDOの期間が短く、共振器型に迂回するためのビームラインが建設不可のため。**



(1) 研究の概要

(2) cERL-FELの設計

- cERL-FELのsetup
- FELの計算結果

(3) 昨年夏までのcERL-FELのコミッショニング状況

- cERL-FELの建設
- ビーム運転と昨年夏までのコミッショニング結果

(4) FEL出力向上に向けた改良と今年2-3月の実験結果

(5) まとめ & 今後

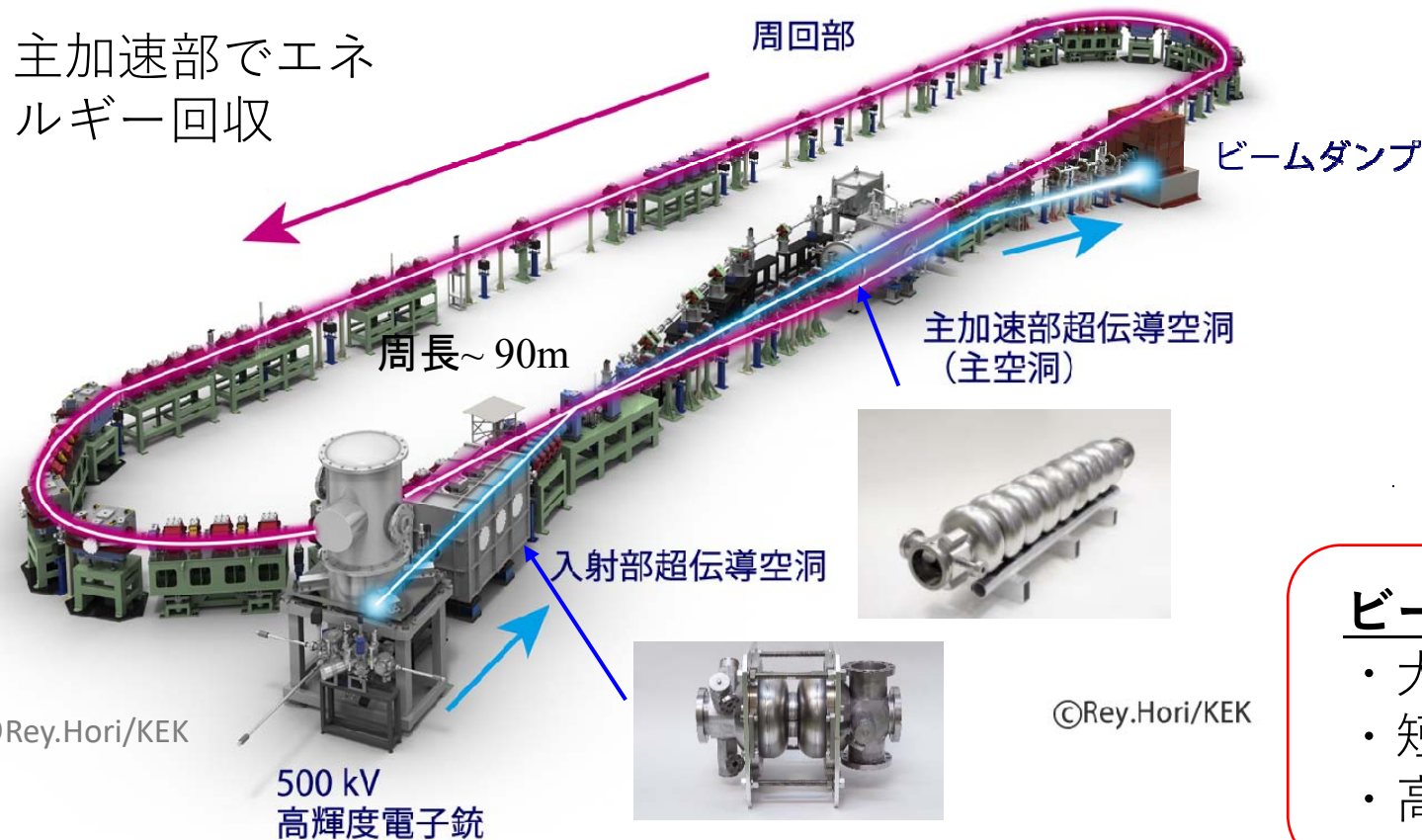
# Compact ERL

KEKで培ってきた高輝度電子銃と超伝導空洞技術で2013年に建設[1]。**2016年に1mAで100%のエネルギー回収を達成[2]。**2017年以降、現在はERLの産業応用を念頭に置いた超伝導加速器利用のための開発を行っている。

設計 現在

周回エネルギー	35 MeV → 17.5MeV
入射部エネルギー	5 MeV → 3~5MeV
ビーム電流	10 mA (初期ゴール)
規格化エミッタンス	0.1 – 1 mm·mrad
バンチ長 (バンチ圧縮時)	1-3ps (通常) 100fs (短バンチ)

RF frequency= 1.3 GHz



## ビーム特徴

- ・ 大電流 (1mA)
- ・ 短バンチ (<ps)
- ・ 高輝度(小さい)



高平均FELが可能。

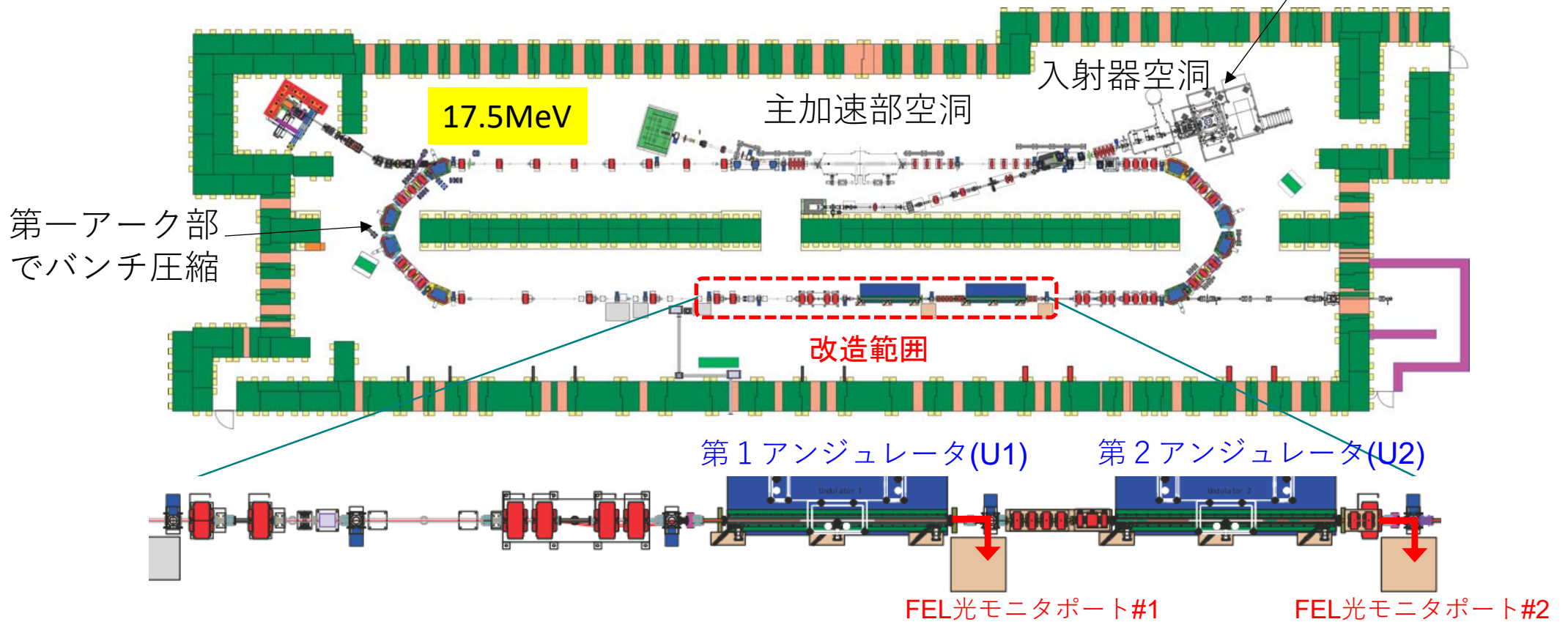
[1] M. Akemoto, *et al.*, "Construction and commissioning of the compact energy-recovery linac at KEK", Nucl. Instrum. Meth. A, **877**, 197-219 (2018)

[2] T. Obina, *et al.*, "1 mA Stable Energy Recovery Beam Operation with Small Beam Emittance", Proc. of IPAC2019, (Melbourne, Australia) p1482-1485, (2019)



# cERL-FELのsetup

500kV高輝度DC電子銃



## ビームパラメータ (設計値)

- 周回エネルギー: **17.5 MeV**
- 入射エネルギー: 5 MeV
- バンチ電荷: **60 pC**
- バンチ繰り返し: **81.25 MHz**
- バンチ長: 1 - 2ps (FWHM)
- エネルギー広がり: 0.1%
- 規格化エミッタンス: 3 mm mrad
- 平均電流: 1mA (CW) or 5mA (Burst)

## アンジュレータパラメータ

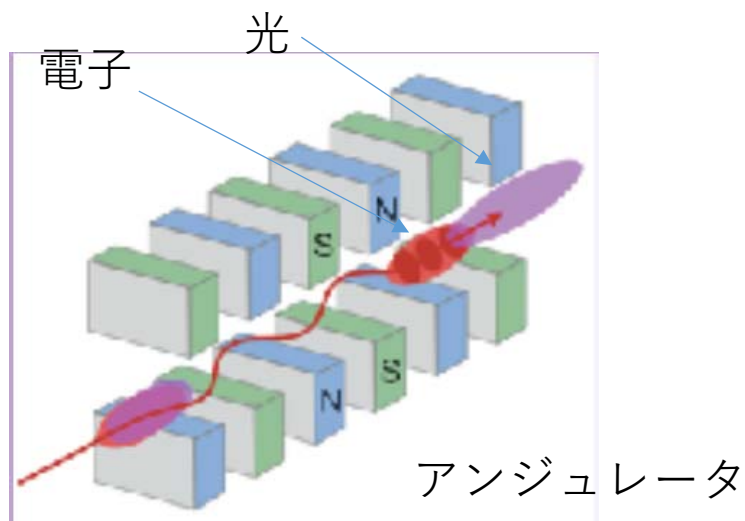
- 型(方式): プラナー (APU)
- アンジュレータ長: 2.976 m
- アンジュレータ台数: 2
- 磁場周期: 24 mm
- ギャップ: 10 mm (固定)
- 最大K値: 1.42
- FEL波長  **$\lambda_{FEL}$ : 10 - 20  $\mu\text{m}$**

# cERL-FELの特徴 (計算結果)

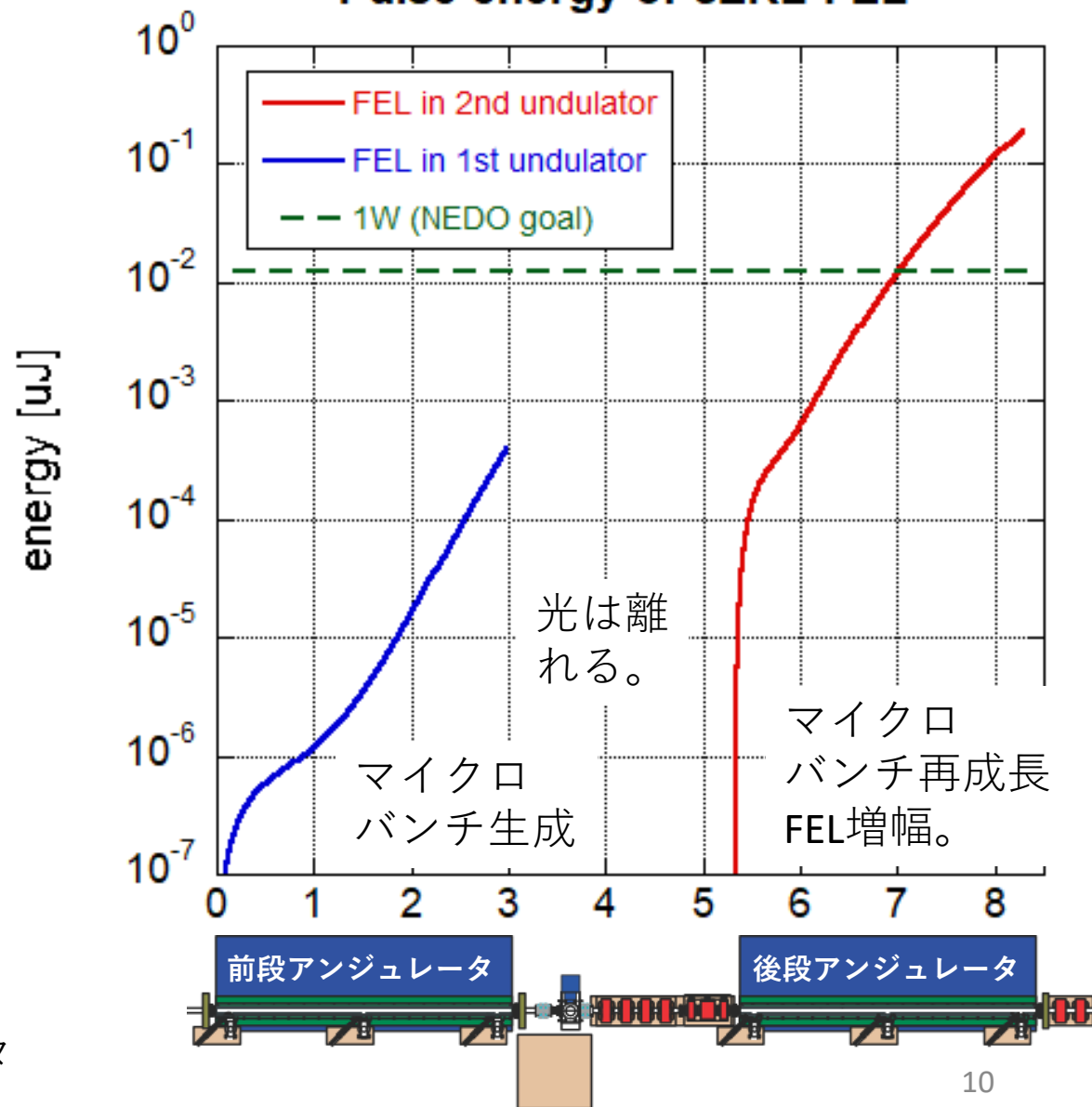
## cERL-FEL光の成長

Calculated by Genesis  
R.Kato

- 電子バンチに形成されるマイクロバンチと光の相互作用により、光パルスが成長
- cERL-FELの場合、光は電子バンチを大きく追い越し、アンジュレータ間では、前段アンジュレータからの光が一旦、電子バンチから切り離される
- 但し、後段アンジュレータでは、前段ですでに電子バンチに形成されたマイクロバンチから次の光パルスがさらに成長。FEL増幅が進む。
- 理想的な電子ビーム性能が実現されれば、平均出力は約10W程度となる

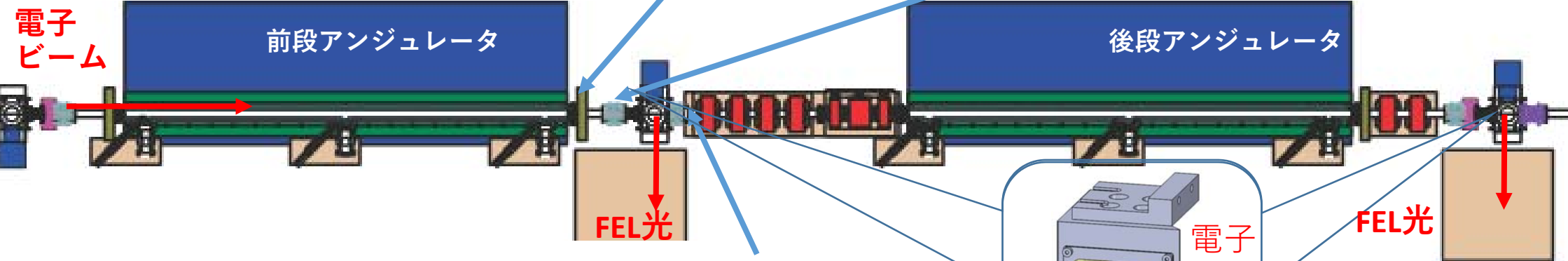
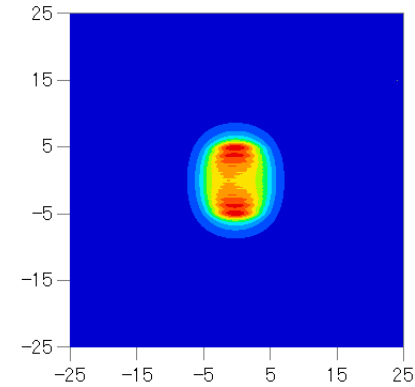
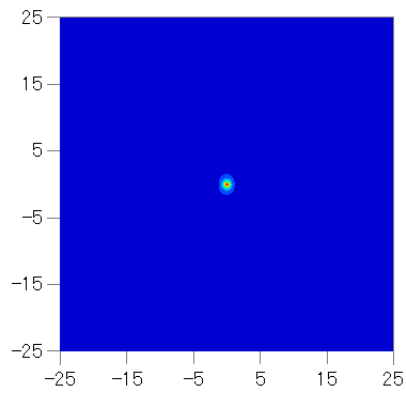


## Pulse energy of cERL-FEL

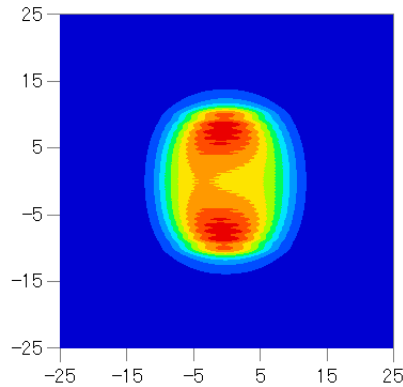


# FEL光の空間プロファイルと光取り出し

- アンジュレータ内では、光ガイド効果により、小さな空間サイズを保つ
- アンジュレータからでると、光ガイド効果がなくなり、回折効果により広がり始める



- アンジュレータ内では垂直方向のビームサイズが小さいため、垂直方向の発散角が大きい
- 取り出しミラーを用いて光を取り出す。電子ビームは取り出しミラーの直径8mmの穴を通過する。



穴あき横はねミラーにより広がった光を取り出す。

(1) 研究の概要

(2) cERL-FELの設計

- cERL-FELのsetup
- FELの計算結果

(3) 昨年夏までのcERL-FELのコミッショニング状況

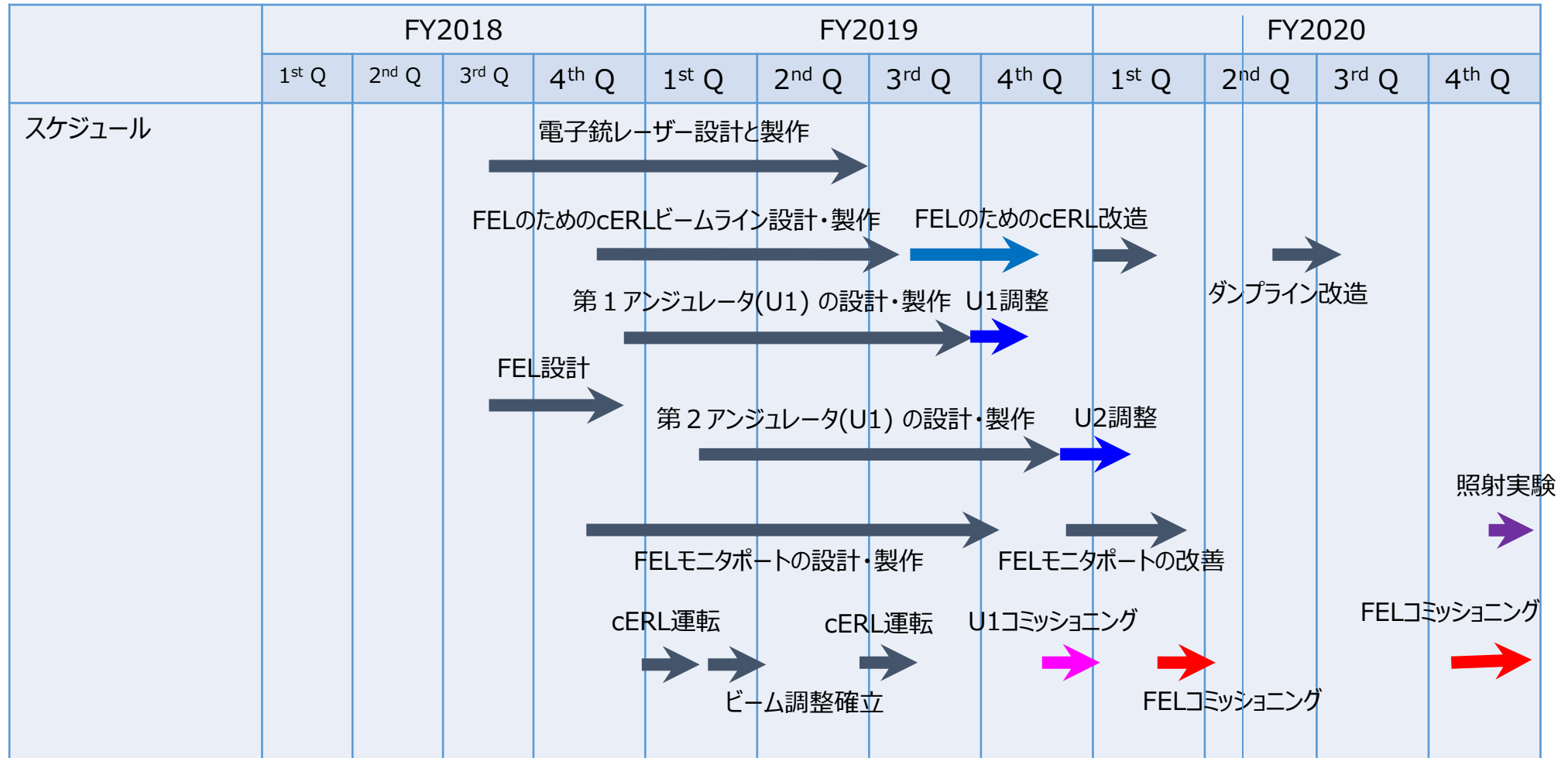
- cERL-FELの建設
- ビーム運転と昨年夏までのコミッショニング結果

(4) FEL出力向上に向けた改良と今年2-3月の実験結果

(5) まとめ & 今後

# 建設 + コミッショニング スケジュール

cERL-FEL計画のスケジュール (2018年12月~2021年3月)



昨年の加速器学会でここまで報告：

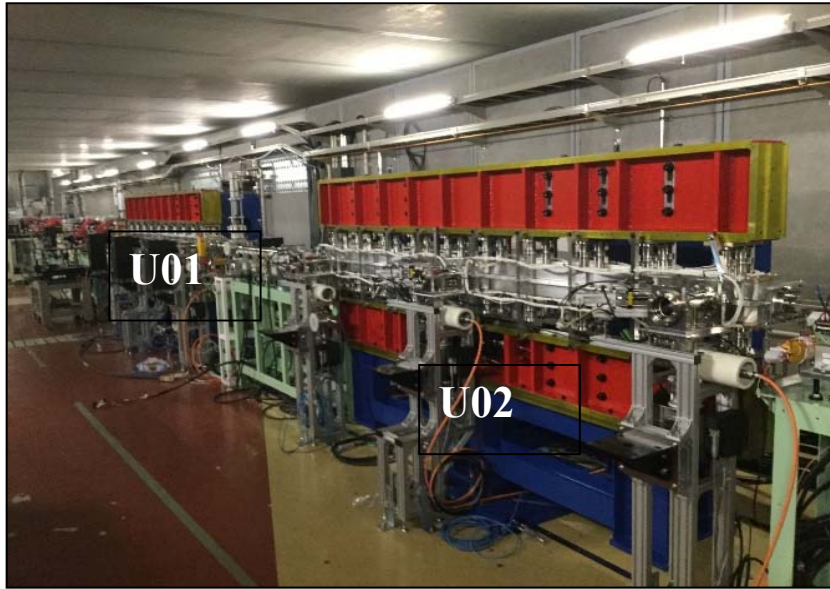
**THOT07 加藤 龍好, 他、cERLを用いた中赤外自由電子レーザーの開発とその光発生実験**  
 1台目、2台目からバンチ圧縮した際の光信号を得ることができた。



# cERL-FELのアンジュレータ

MOP048 土屋公央、他 「cERL-FEL用タンデムアンジュレータの運転状況」

・固定Gapのスライド方式 (APU)を採用 → コンパクトで安価なアンジュレータの開発



K値 max



磁石列 (上)

e-



磁石列 (下)

K値 減少



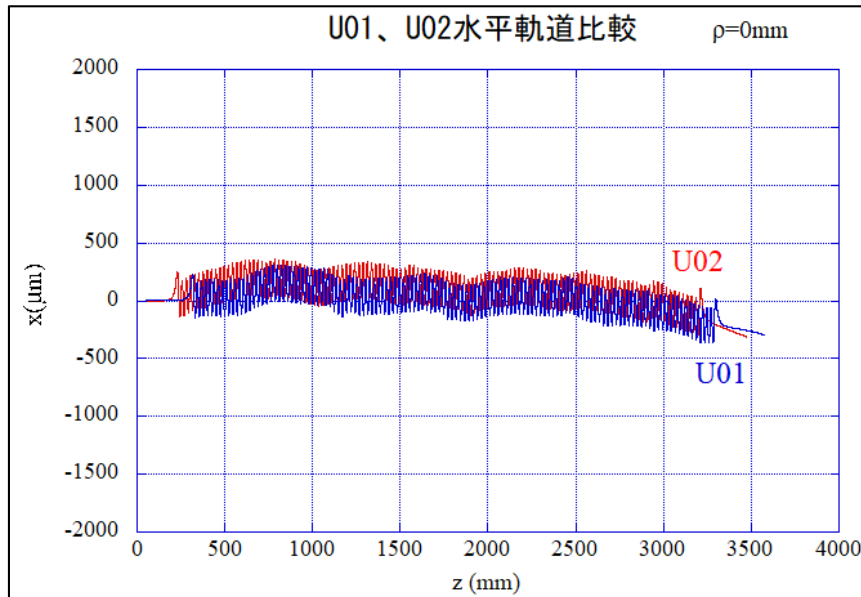
10mmのgapに固定。gap可変機構がなく、構造がシンプルになった。

→ 構造物の軽減を実現。コストと納期を短縮。

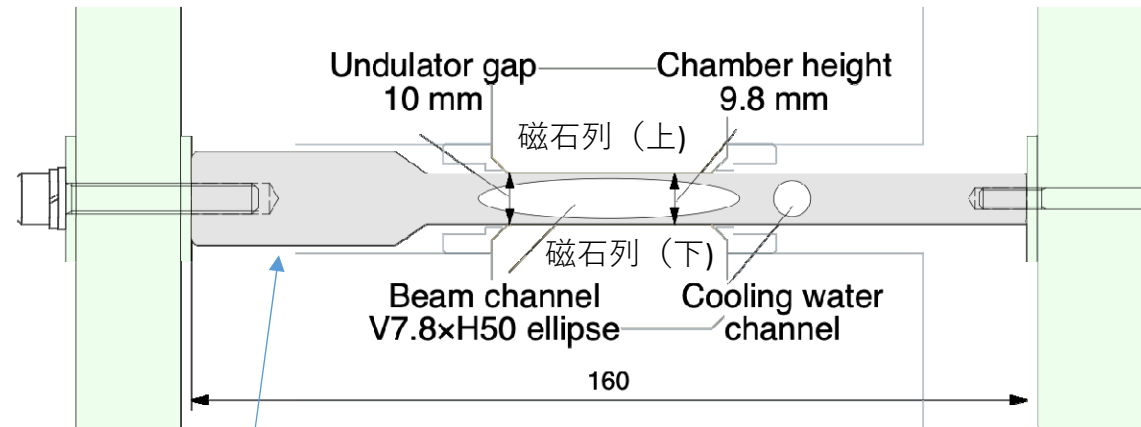
e-



下をスライド



磁場測定結果から、ビーム軌道を計算。ビーム軌道で数100μm以下に抑えられている。磁場調整はOK.



真空チャンバー：

磁石列(下)とは隙間50μmを確保。

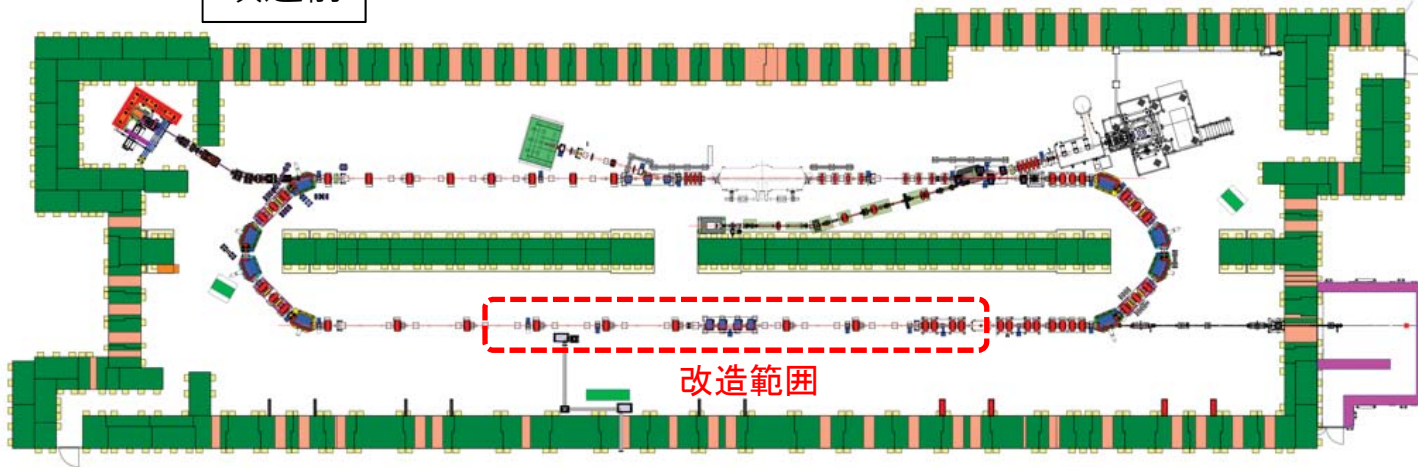
スムーズにスライド可

# cERL-FEL建設

2020年度 加速器学会

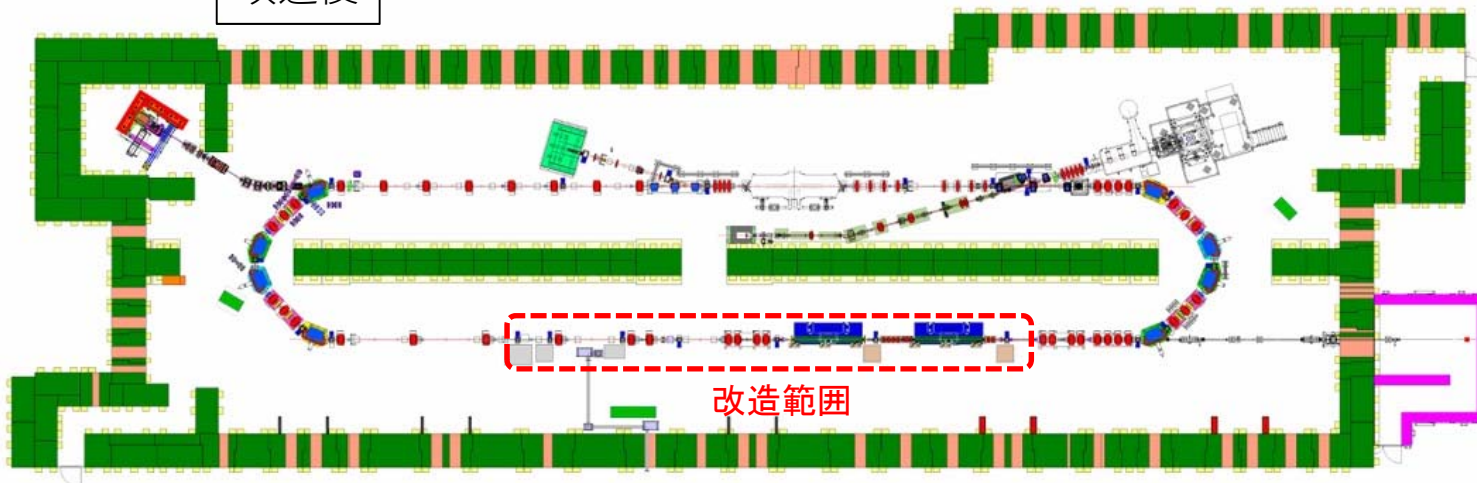
THPP65 : 東直、他「cERL-FELの建設」にて詳細報告

改造前



IR-FEL建設期間  
2019年10月 - 2020年5月

改造後



改造部の機器撤去 (2019年12月初)



電磁石の設置 (2019年12月末)



U1設置 (2020年1月)



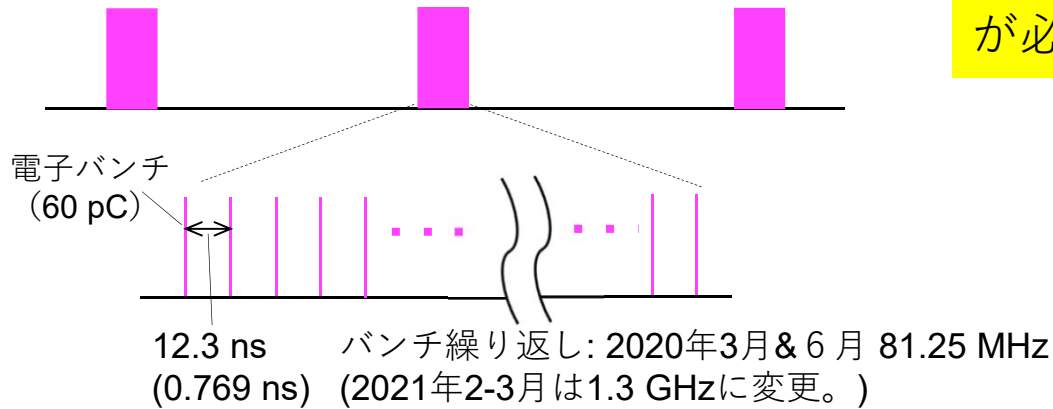
U2設置 (2020年4月)

# 運転スキーム

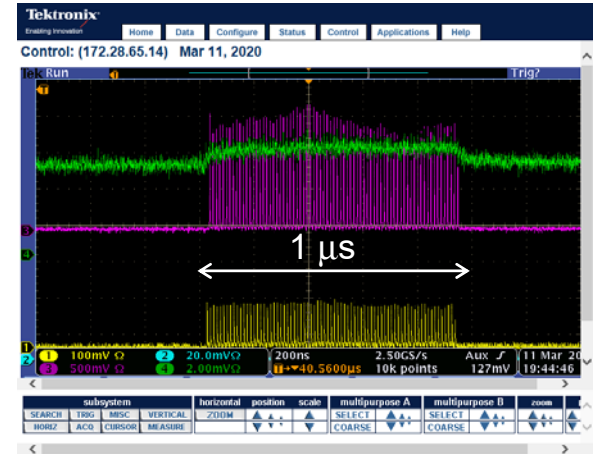
## FEL運転におけるcERL電子ビームの時間構造

### バーストモード (FEL&ビーム調整)

マクロパルス幅: 0.1 - 1  $\mu$ s at 1 - 5 Hz

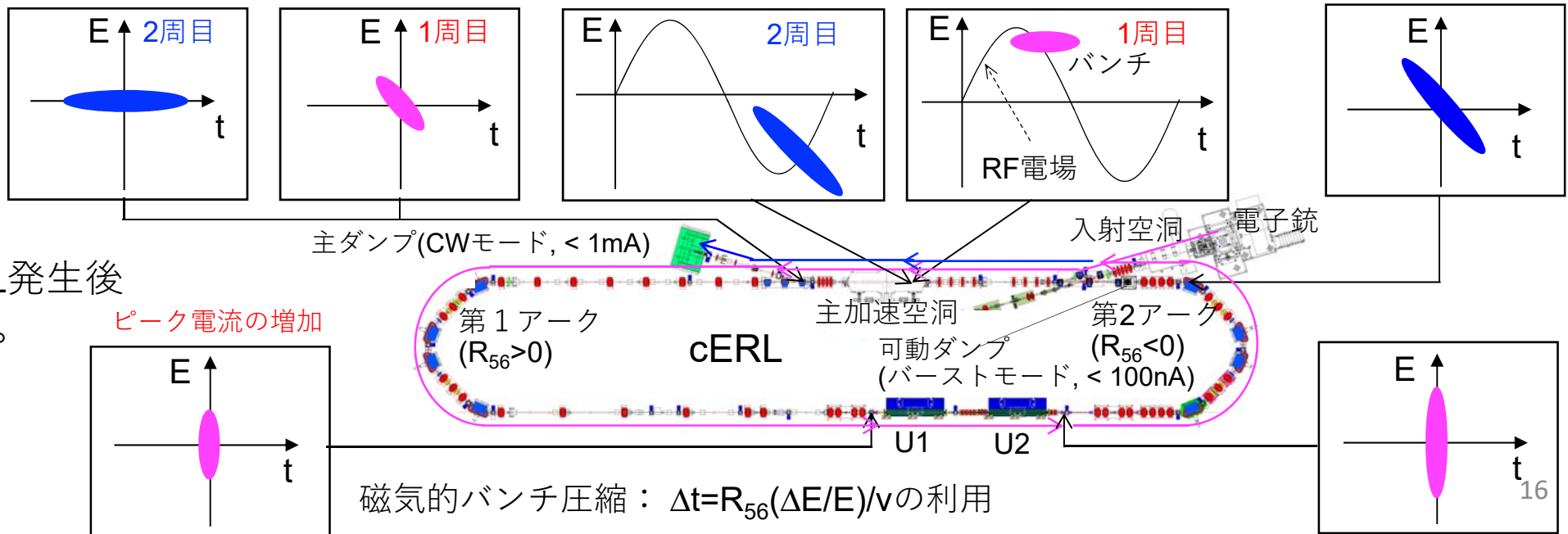


ビーム調整にはバーストモードが必須。



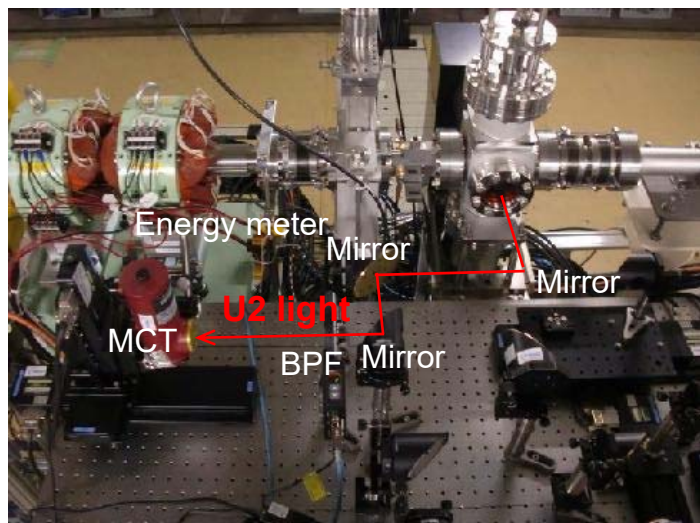
生成された電子バンチ列の例 (2020年3月を例)  
2021年2-3月は1.3GHzで 100nsのマクロパルスに変更。

## FEL運転におけるビーム制御方法





# 昨年の夏までのコミッショニング結果 (2020年6月)

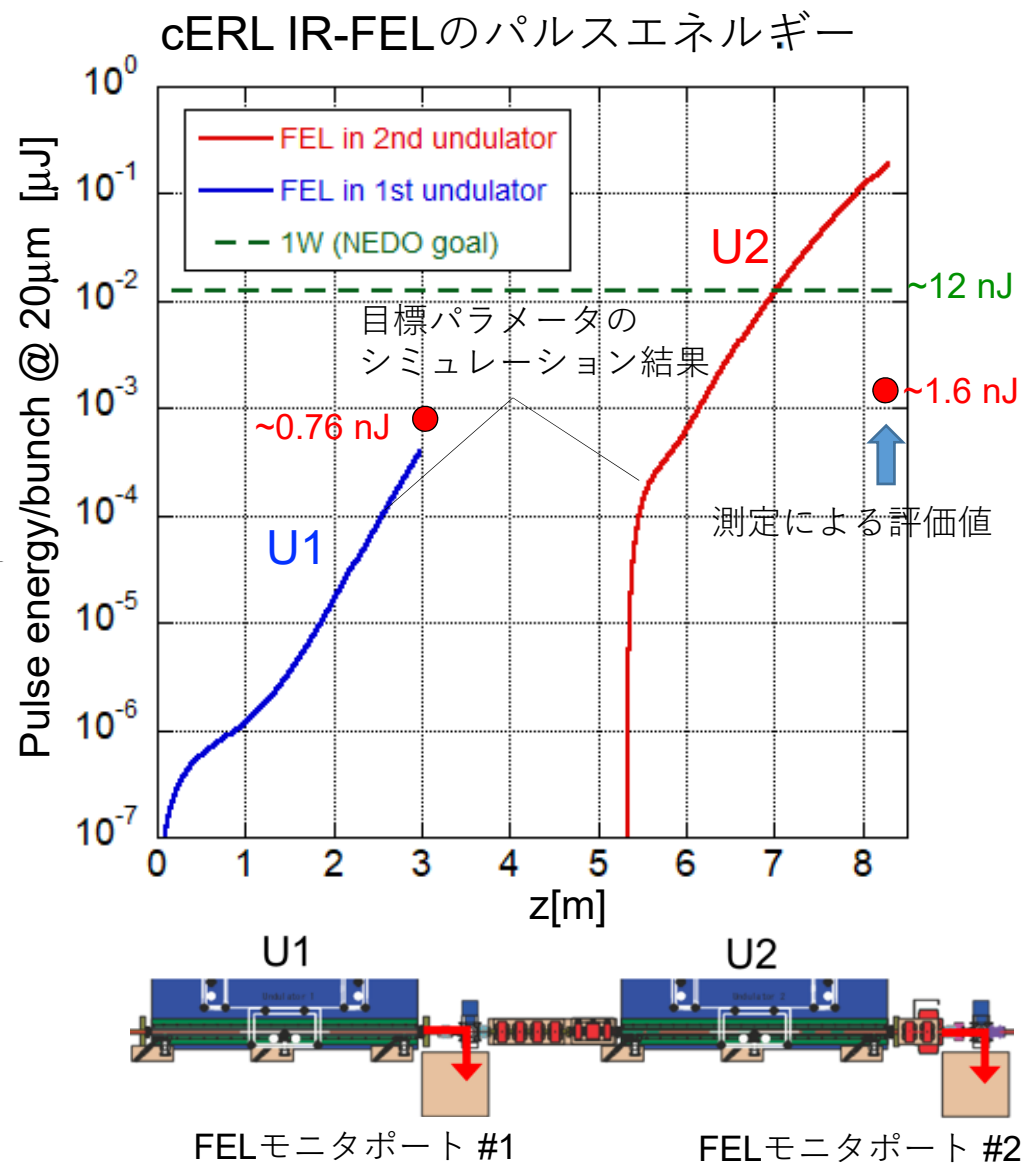


第2アンジュレータ (U2) からのFEL光モニターポート

ビームパラメータの比較

パラメータ	目標	2020.6
ビームエネルギー	17.5 MeV	17.6 MeV
バンチ電荷	60 pC	60 pC
バンチ長(FWHM)	0.5 - 2 ps	3 - 5 ps
エネルギー広がり	0.1%	~ 0.3%
規格化エミッタンス	3 mm mrad	3 - 10 mm mrad

バンチ圧縮しきれてない??



2台目のアンジュレータでの調整が6月は難航。

U2のパルスエネルギーの成長率が低く、U2でのパルスエネルギーが十分でなかった。

(1) 研究の概要

(2) cERL-FELの設計

- cERL-FELのsetup
- FELの計算結果

(3) 昨年夏までのcERL-FELのコミッショニング状況

- cERL-FELの建設
- ビーム運転と昨年夏までのコミッショニング結果

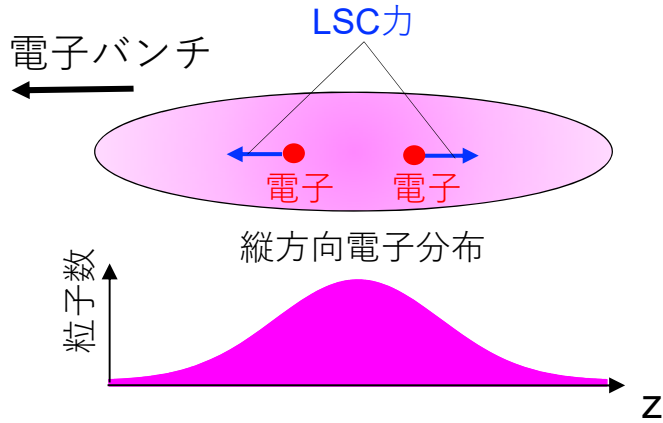
(4) FEL出力向上に向けた改良と今年2-3月の実験結果

(5) まとめ & 今後

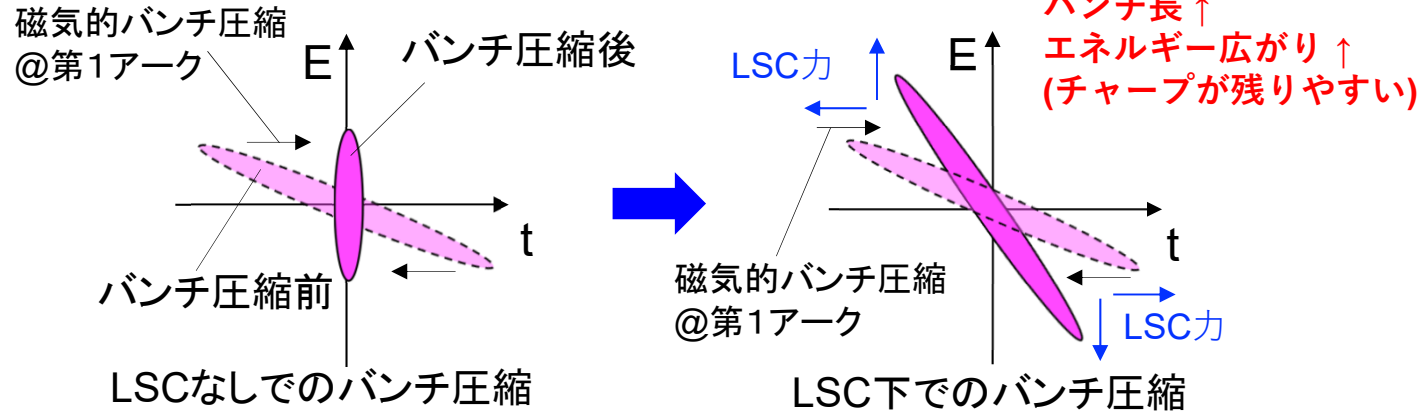


# (問題点)周回部の空間電荷効果の影響

## 縦方向空間電荷(LSC)効果

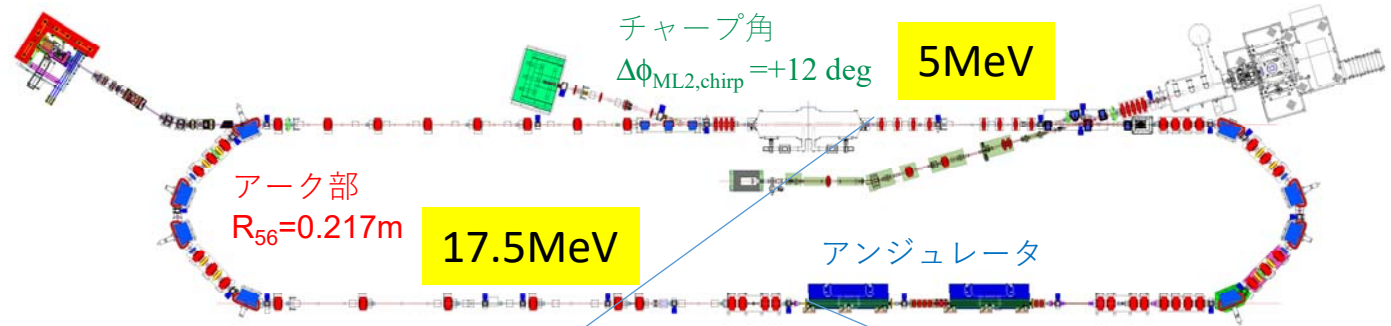


## cERLにおけるLSCの影響

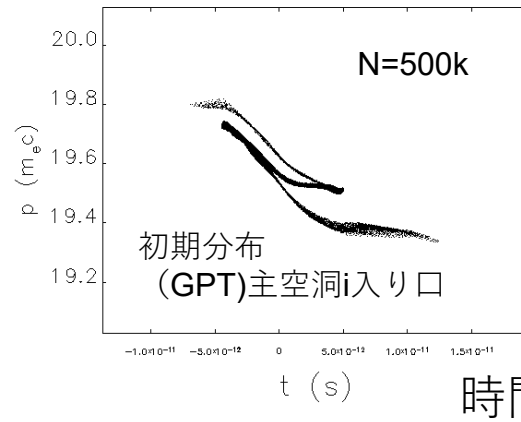


空間電荷効果を入れたGPTによるアンジュレータ入り口までの輸送計算結果。

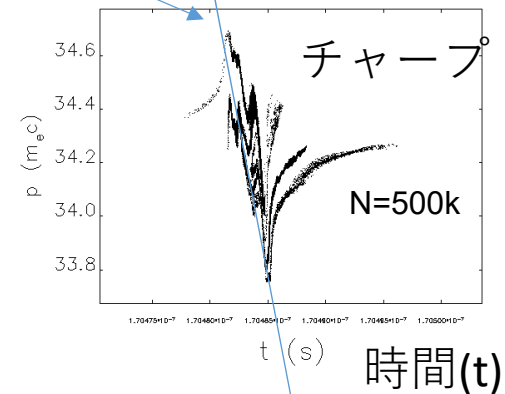
バンチが折り重なって圧縮されている。バンチ圧縮を最適化しても、まっすぐにならず、チャープがどうしても残ることがわかった。



エネルギー(E)



エネルギー(E)



アンジュレータ直前

$\sigma_t = 1.21 \text{ ps}$   
 $\sigma_p = 0.420 \%$

cERLでは周回部でも強い空間電荷効果があることがシミュレーションから示された。

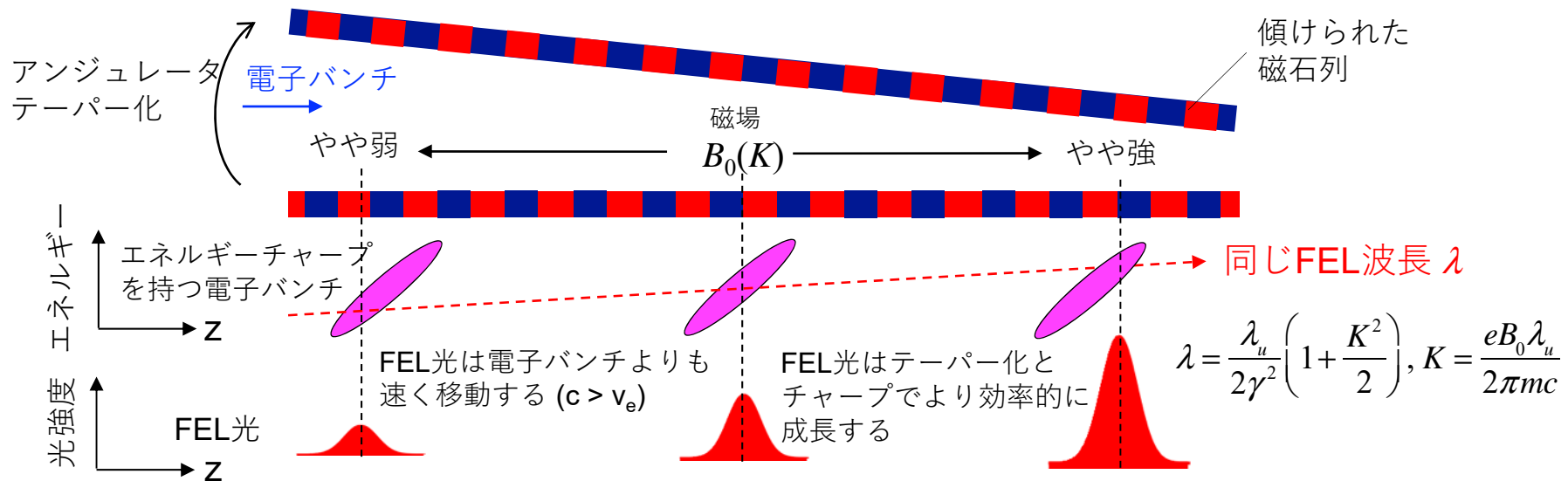
低エネルギービームでは空間電荷によって高エネルギービームよりもビーム制御が難しい。

# ( 解決策 ) アンジュレータのテーパー化

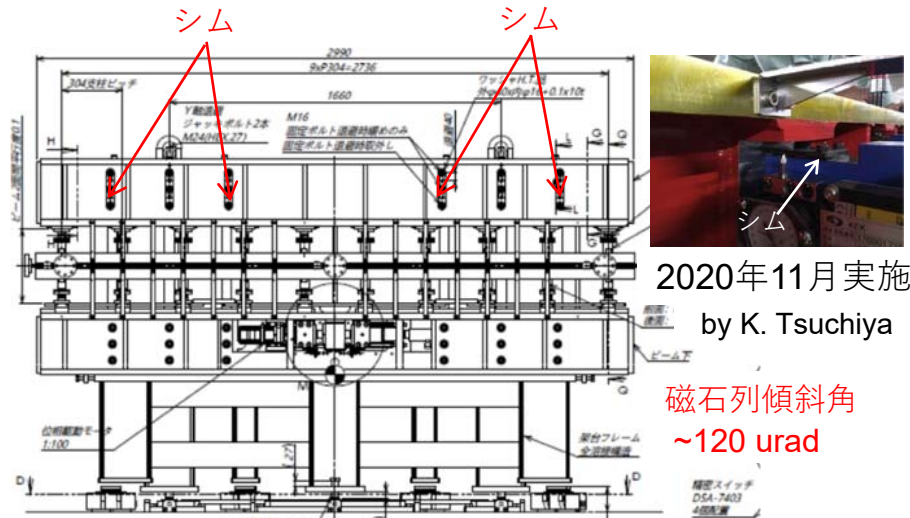
THP028 本田洋介、他 「cERL赤外自由電子レーザーにおけるテーパーアンジュレータの検討」

MOP048 土屋公央、他 「cERL-FEL用タンデムアンジュレータの運転状況」

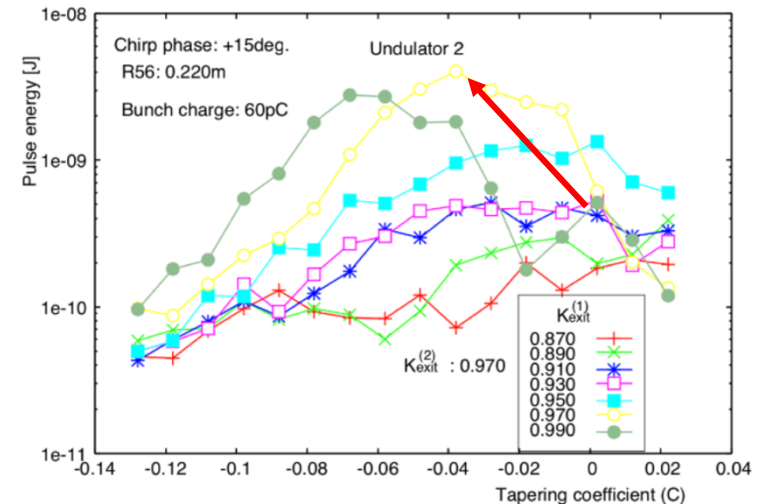
## アンジュレータテーパー化によるFEL性能の改善



トラッキングの電子分布を入れて各テーパーとK値を変えた場合のsimulation結果



アンジュレータテーパー化のためのシム挿入作業

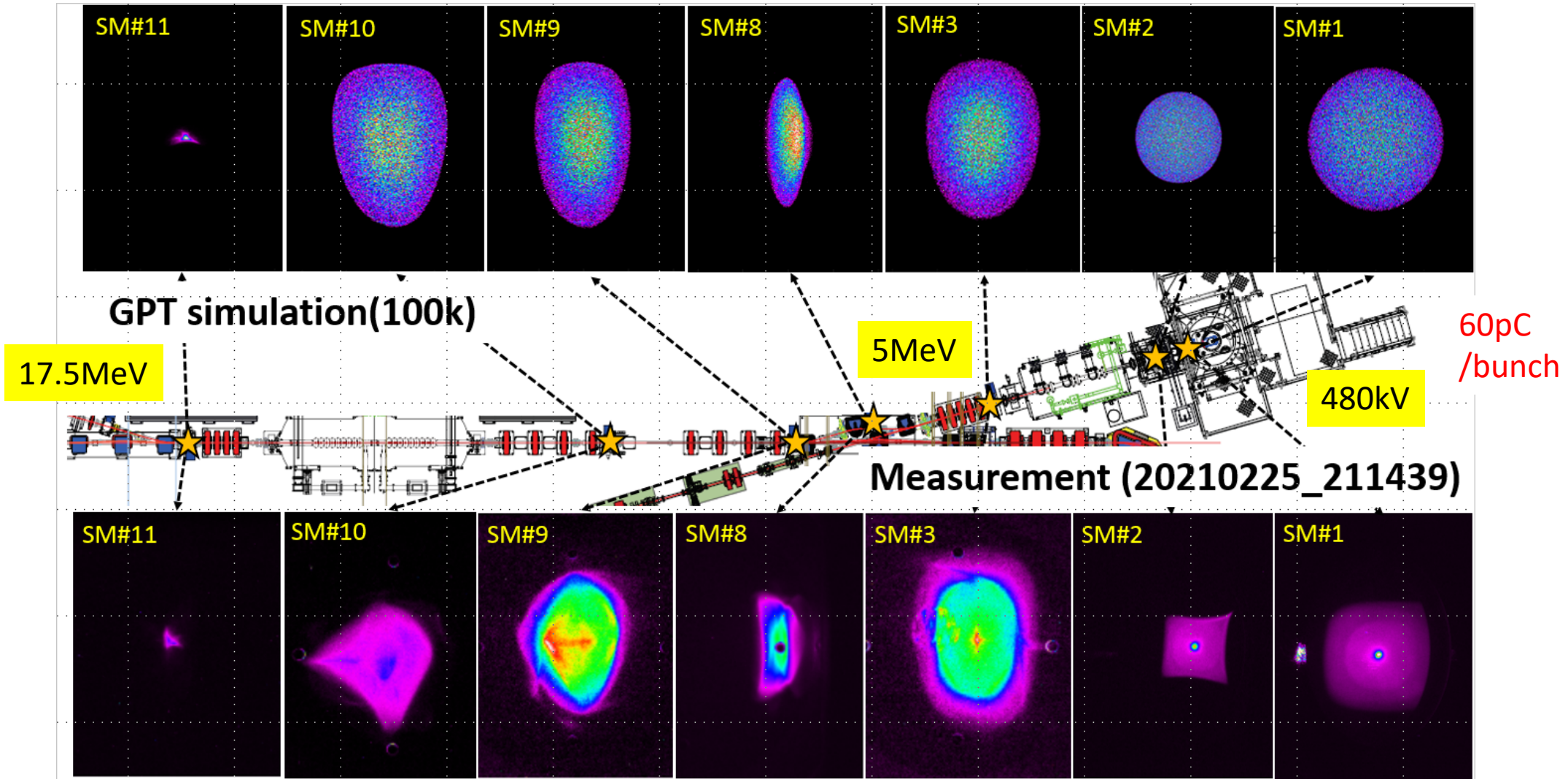


最大8倍の強度増強が見込まれる。

アンジュレータのテーパー化は空間電荷効果支配の下でFELのパルスエネルギーを改善する可能性がある。

# 入射部のビーム調整(2021年2月～3月)

THOB03 田中織雅、他 「コンパクトERLにおける中赤外自由電子レーザー運転のための入射器の最適化」



主空洞出口(A2)でのエミッタンスと測定結果

設計値(60pC/bunch):

$1.74 \pi \text{ mm mrad (h)} / 1.92 \pi \text{ mm mrad (v)}$ .

測定結果(60pC/bunch):

$2.87 \pm 0.03 \pi \text{ mm mrad (h)} / 1.57 \pm 0.02 \pi \text{ mm mrad (v)}$

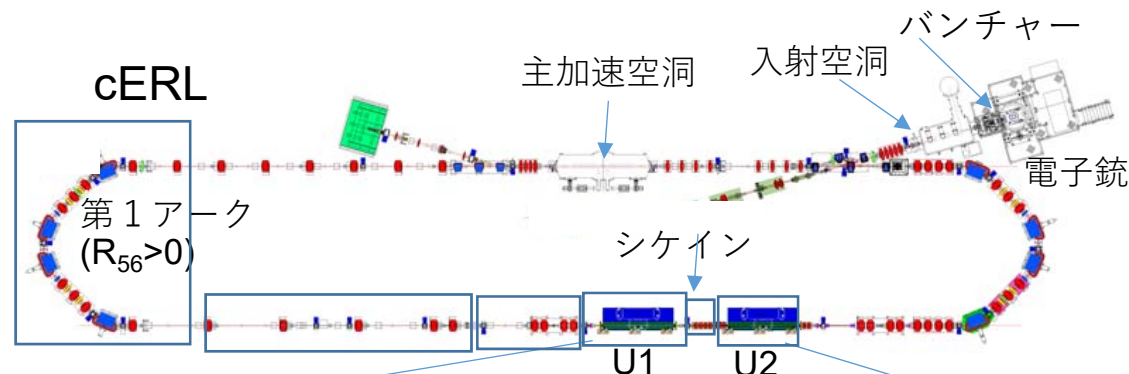
- ビームプロファイルはシミュレーションと良い一致を示している。
- 空間電荷を考慮した計算結果でビームが設計通り輸送されているのがわかる。
- エミッタンスもFELの設計値を満たしている。



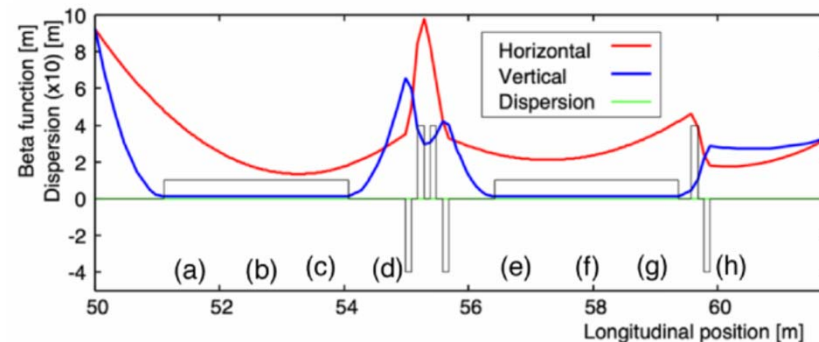
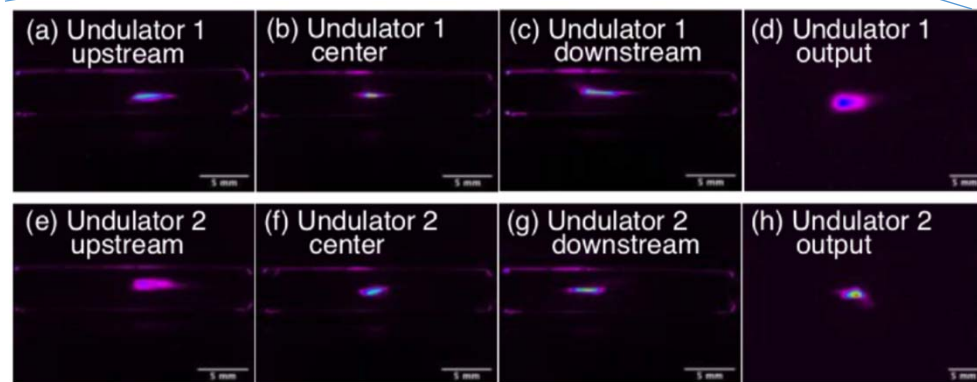
# FEL向上への周回部ビーム調整方法

## 主な調整方法

- 第一アーケ部 $R_{56}$  + 6極調整
- アンジュレータ前軌道調整 + optics matching
- アンジュレータ間の軌道調整 + optics matching + シケイン調整
- アンジュレータ内軌道調整 + optics matching
- 主空洞位相調整 + 入射空洞 + バンチャー位相調整。

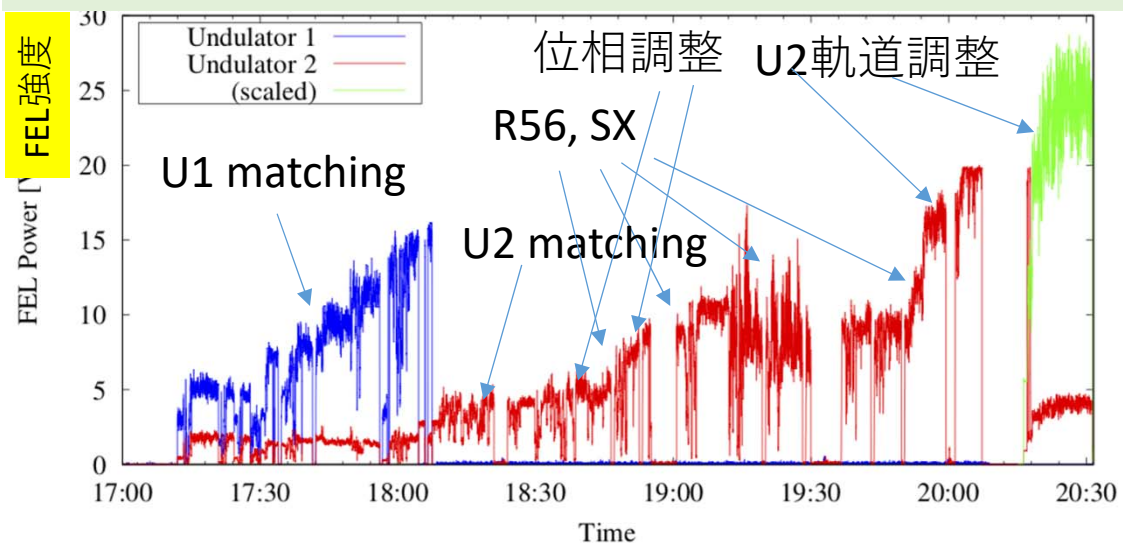


各調整で4パラメータ以上の調整が必要。各調整をAIを用いて、**U2のFELの強度が最大になるように自動化。**



AI調整後のundulator内ビームプロファイル。設計通りの光学関数に合わせることができた。

**ビーム調整能力と速度が劇的に向上し、FEL強度向上**

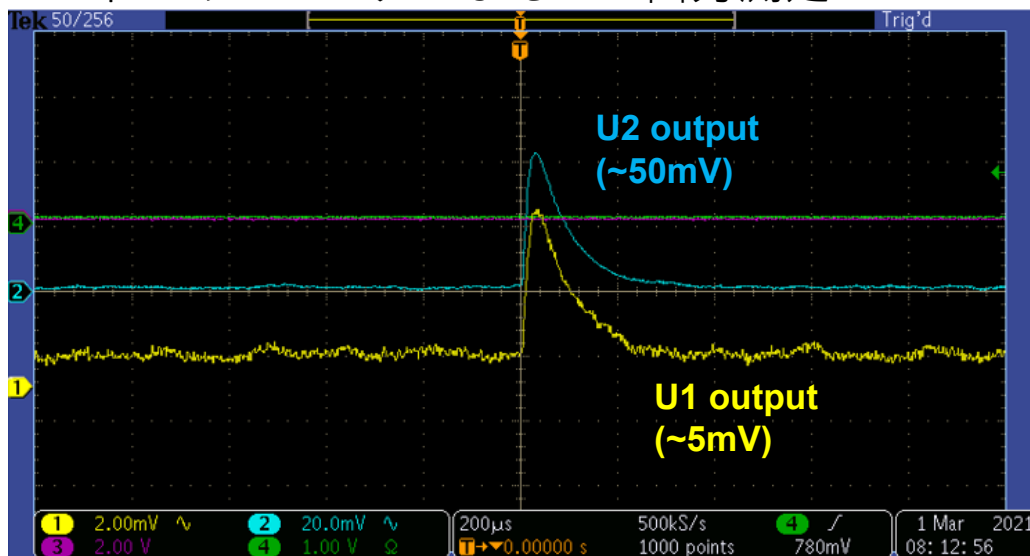


MOP029 本田洋介、他 「cERL赤外自由電子レーザーのための電子ビーム輸送調整」

WEOB03 帯名崇、他 「ベイズ最適化によるcERLビームの自動調整」

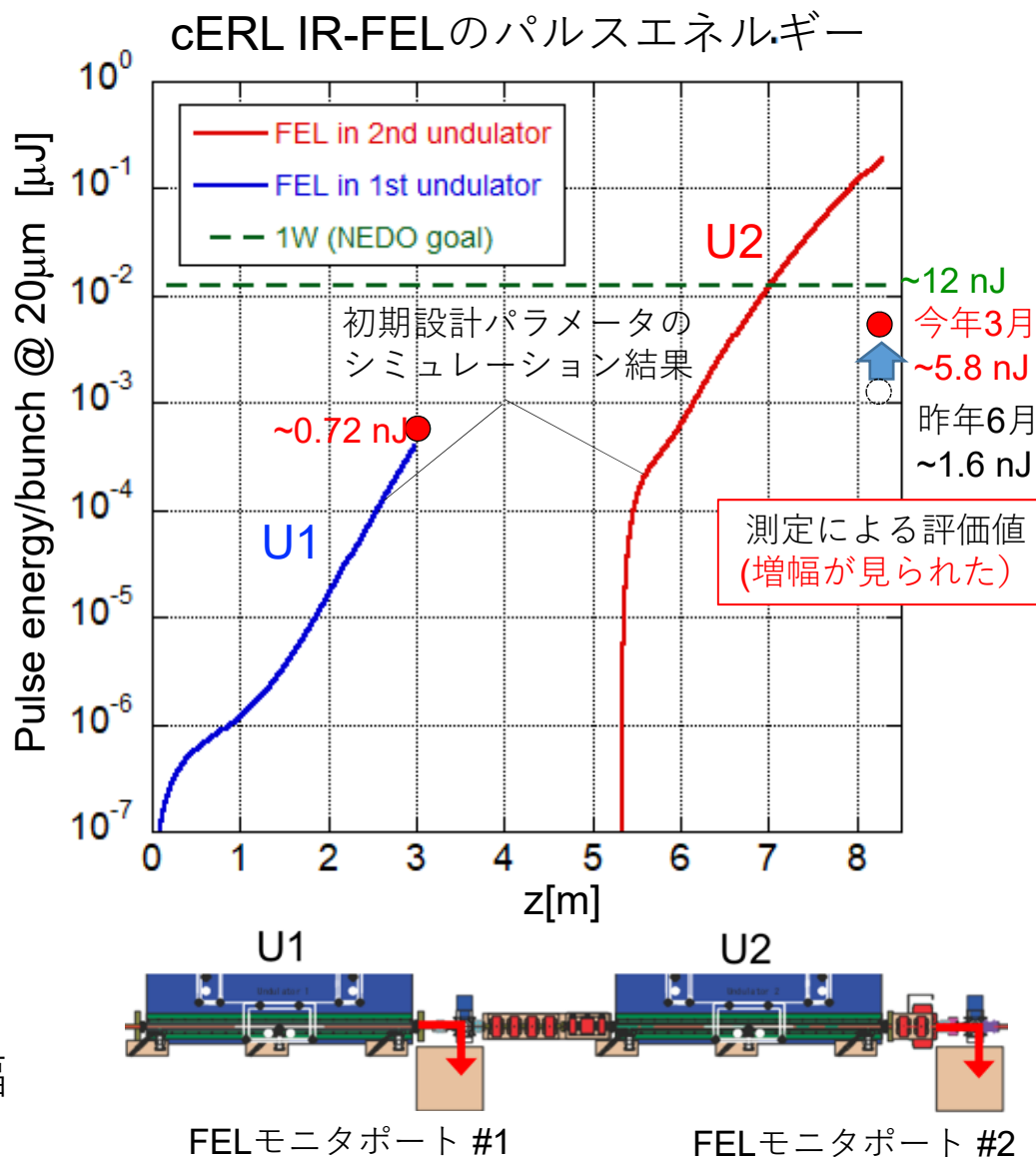
# FEL出力向上結果 (2021年2-3月)

エネルギーメータによるFEL出力測定



パラメータ	現在 (2021.3)
ビームエネルギー	17.6 MeV
バンチ電荷	60 pC
バンチ長(FWHM)	2 ps (0.6 ps structure)
エネルギー広がり	0.6 % (chirp あり)
規格化エミッタンス	5.6/5.1 mm mrad (h/v)

ビームパラメータの測定値は大きいですが、結果、光増幅が大きくなっている。縦方向の位相空間分布を調べ、分布込みの計算でFEL強度計算を行うのが今後の課題。



U2のパルスエネルギーが約4倍増大。U1のパルスエネルギーと比べて1桁近く成長している。設計81.25 MHzの繰り返し運転とすると、0.5W(1W級)のFELまでU2で増幅を確認した。

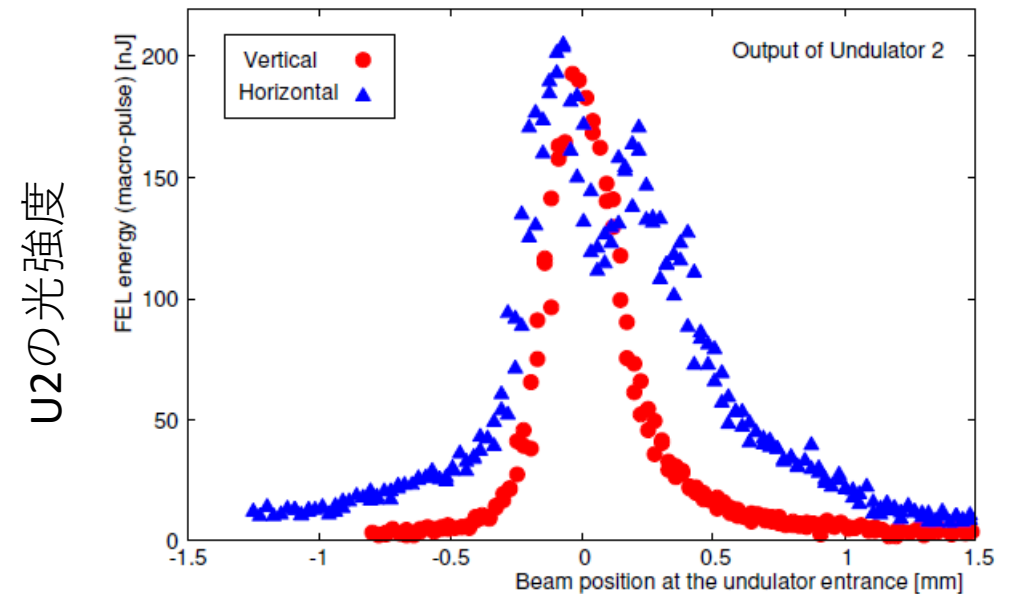
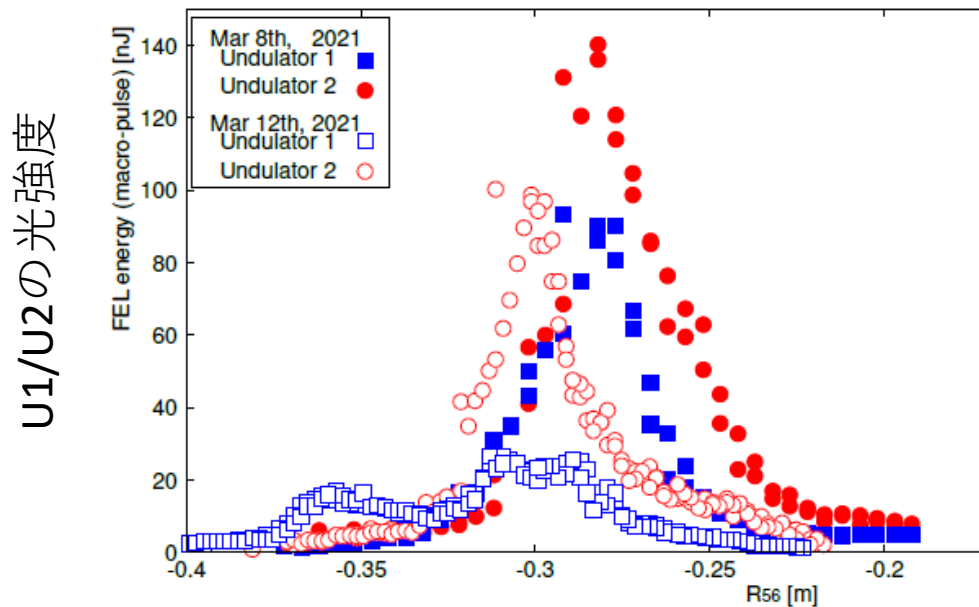


# 今期の測定光の特徴

周回部のR56スキャン結果  
バンチ圧縮の高価で1台目、2台目も  
強度が大きく増幅していることがわかる。

ビーム軌道スキャン結果

Steeringによりアンジュレータ(U2)入り口の  
軌道を水平および垂直に振った際の強度分布

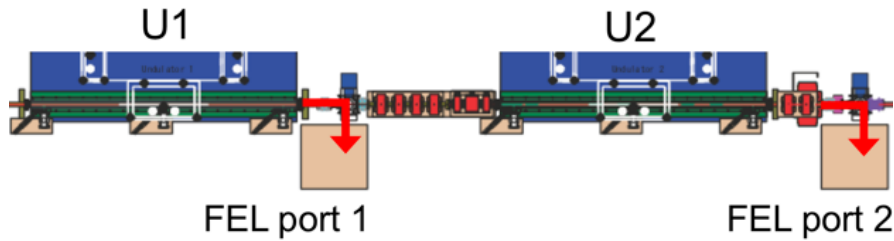


- 得られたU1,U2光はR56によるバンチ圧縮に敏感である。→コヒーレント自発光 and/or FEL増幅
- さらに、U2の増幅光はアンジュレータ入射軌道に敏感(2020.6月にはなかった。) →コヒーレント自発光だけでは説明がつかない。
- U1→U2への光増幅は軌道に沿って光と電子の相互作用によりFEL増幅している状況ではないかと示唆される。

TUP028 島田美帆、他 「コンパクトERLアーク部のR56測定」

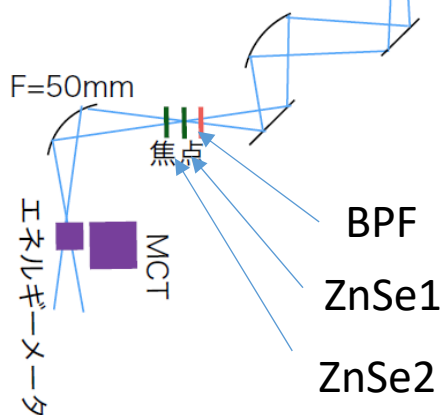
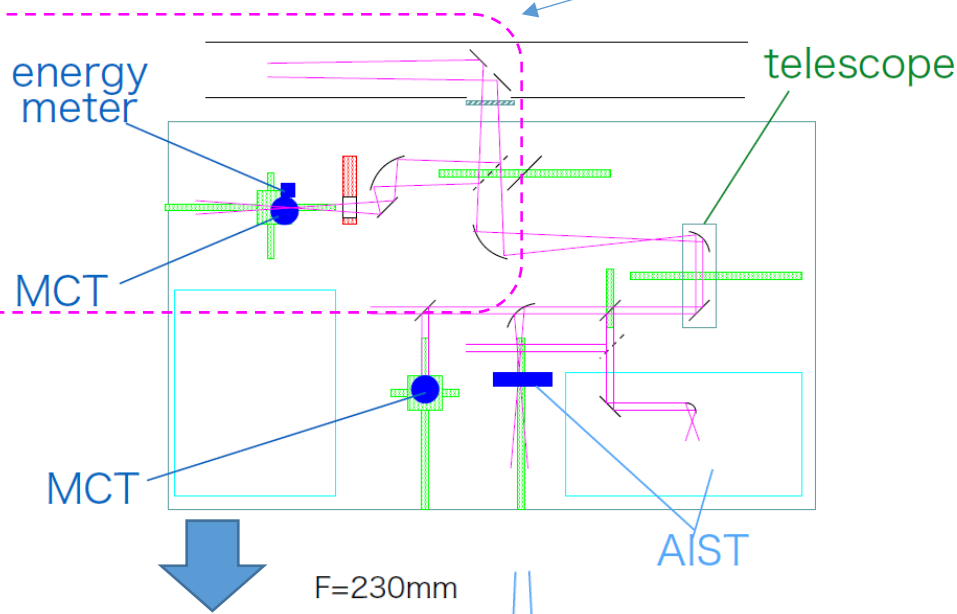
THP028 本田洋介、他 「cERL赤外自由電子レーザーにおけるテーパアンジュレータの検討」

# アンジュレータスライド時の光波長可変性

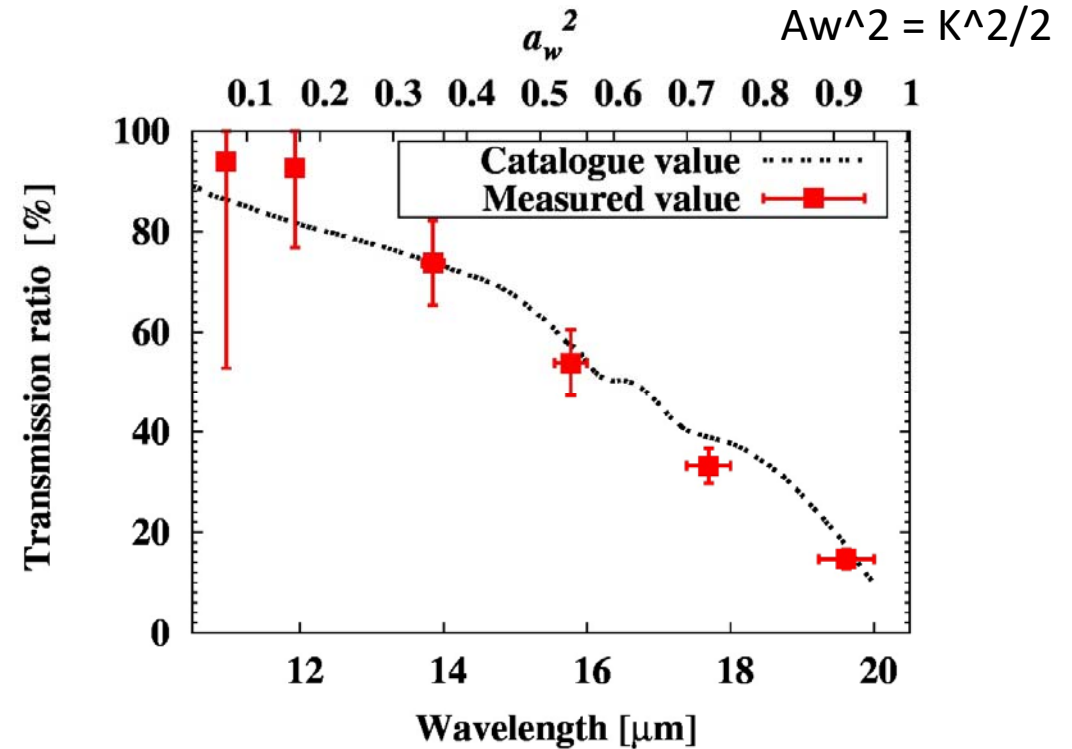


磁石列をスライドさせK値を変えたときの設計波長に対するZnSeの透過率測定結果と実際のZnSeの透過率（カタログ値）の波長依存性

U2からの光



アンジュレータのK値を変えながら、ZnSe1をon/offし、透過率を測定。



ZnSeの透過率と測定した透過率が一致している。

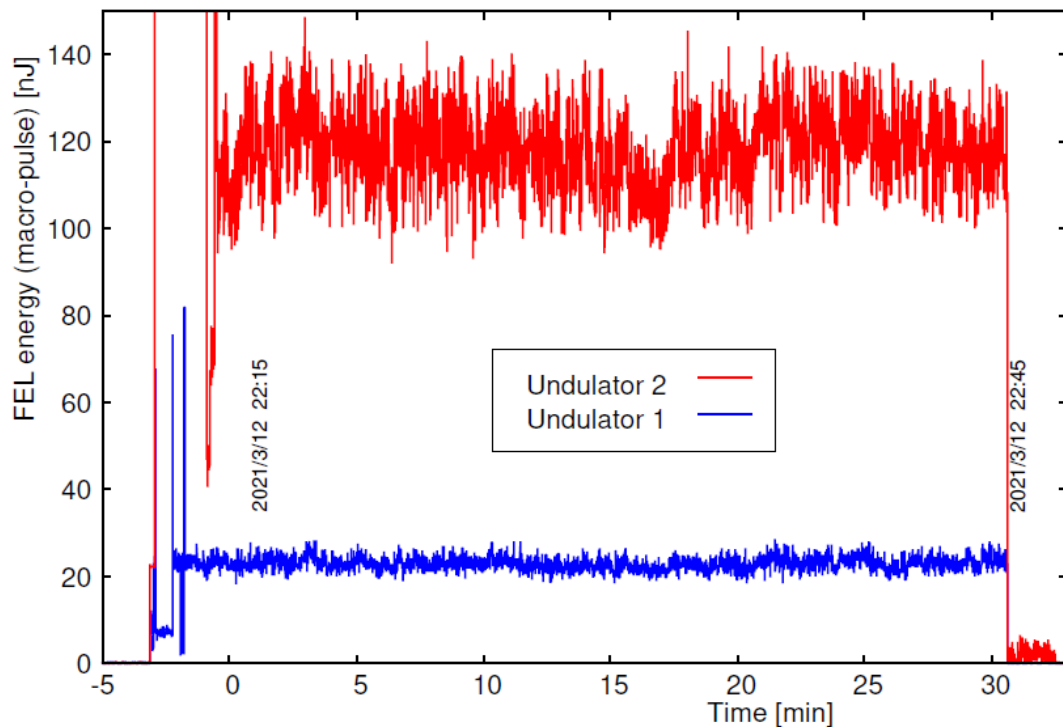
アンジュレータにより得られた光の波長が20 μmから11 μmまで変化していることが分かった。

# 光出力の安定性 (2021年3月)

FEL出力の安定度評価 (波長 $20\ \mu\text{m}$ )

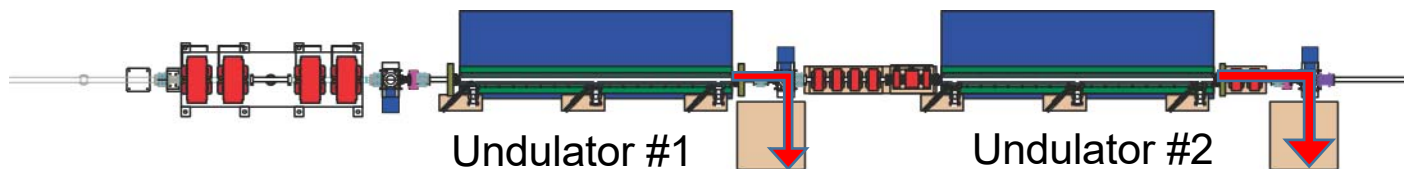
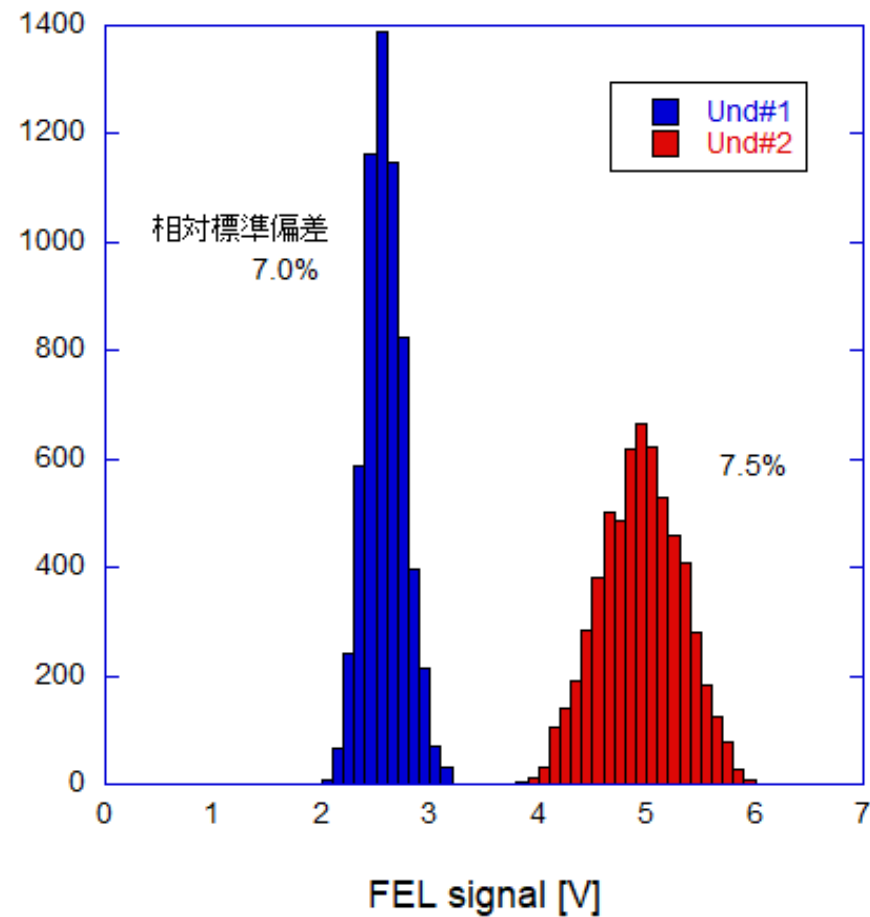
FEL光の強度は7%程度で安定

130 pulses average



30分のトレンド

Histogram (Average of 130 pulses)



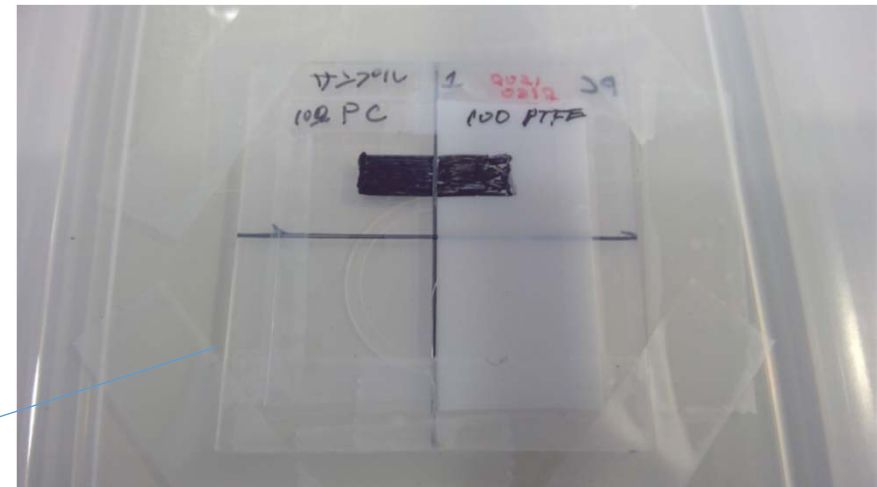
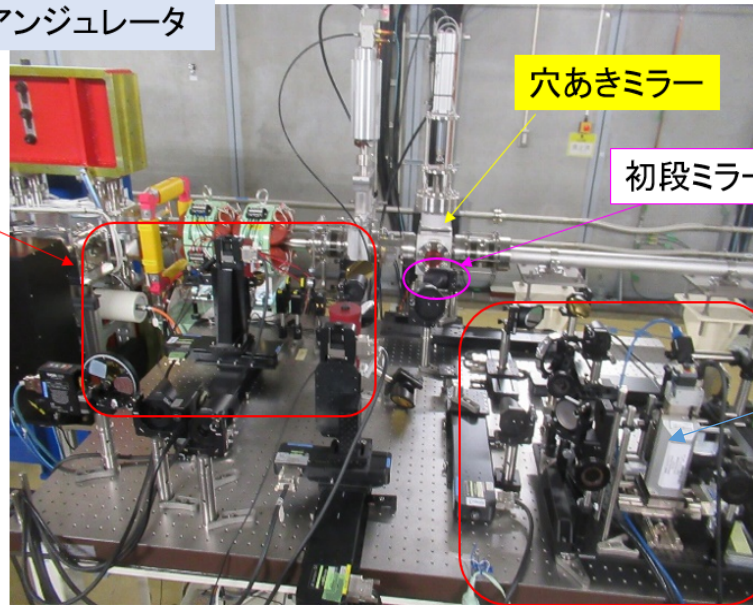
# cERL-FEL光を用いた材料照射実験

Done by  
M. Kakehata

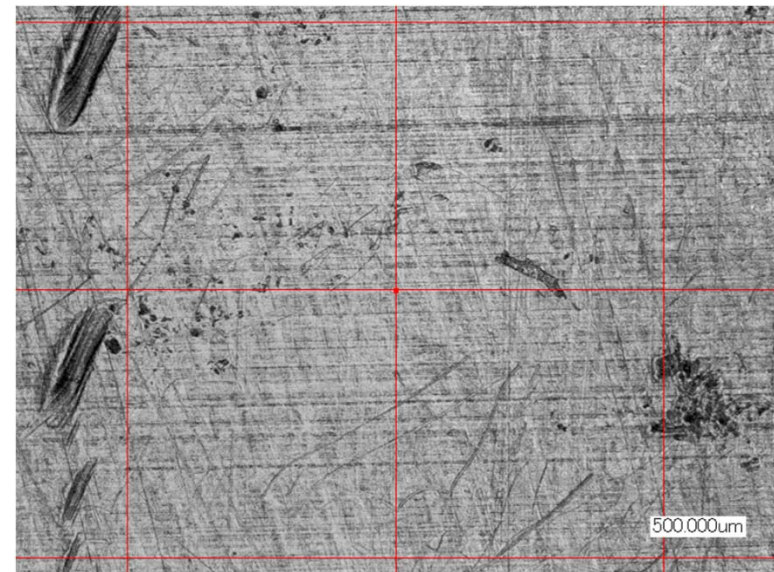
強度up後の初めての照射実験。  
180nJ/macropulse , 波長20 $\mu$ m

用いたサンプル。PTFEは19.3 $\mu$ m付近が吸収強い。

2台目アンジュレータ



PTFEへのFEL照射後の顕微鏡写真



集光点での光ビームサイズ( $1/e^2$ )は設計値の50 $\mu$ m  
に対し、実測値では400 $\mu$ mと大きな値であった。

この後、focusしたサンプルの場所にテフロン(PTFE) (厚さ100 $\mu$ m)への照射実験も行った。

残念ながら、照射後に大きな変化が見られず。

今後、照射部での光をさらに絞ると同時にさらにmacropulseの強度と繰り返しを上げていく。最終的にCWのERL運転での平均強度を上げて同実験を行っていく。



# まとめ & 今後

- cERLにおけるIR-FEL開発はNEDOプロジェクトの一環として進められ、IR-FELのコミッショニングを行った。
- 昨年6月はU2での光の成長がほぼなかったため、FELの性能向上を図るために、アンジュレータのテーパー化、さらにAI導入によるビーム調整能力の向上などを行った。
- その結果、U1に対し、U2は一桁増幅した信号が得られ、最終的に1電子バンチあたり約5.8nJのFELパルスエネルギーを得ることができた。
- CWモード換算で約0.5Wとなり、11 $\mu$ m～20 $\mu$ mの波長可変性も確認され、NEDOプロジェクト目標をおよそ達成できた。
- 今後、CWモード等でエネルギー回収も行い、パルス数を上げて高出力FEL運転を目指す。

## 謝辞

- 本発表は、NEDOプロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の成果に基づいています。
- 本研究の一部は科研費(18H03473)のサポートを受けております。
- cERLの運転、冷凍機シフトに関わった皆様に感謝いたします。



# 関連発表

- 口頭発表
  - THOB03 田中織雅、他 「コンパクトERLにおける中赤外自由電子レーザー運転のための入射器の最適化」
  - WEOB03 帯名崇、他 「ベイズ最適化によるcERLビームの自動調整」
- ポスター発表
  - TUP023 田中織雅、他 「cERL入射器ビームのエネルギーチャープおよび縦方向電子分布における誤差の影響」
  - MOP048 土屋公央、他 「cERL-FEL用タンデムアンジュレータの運転状況」
  - TUP049 中村典雄、他 「IR-FEL高出力運転に向けたcERLダンプラインの改造とビーム輸送スタディ」
  - THP050 江口柊、他 「コンパクトERL-FEL用アンジュレータのビーム軌道補正」
  - TUP028 島田美帆、他 「コンパクトERLアーク部のR56測定」
  - WEP028 本田洋介、他 「cERLにおけるテラヘルツ回折放射プロファイルの観測」
  - THP028 本田洋介、他 「cERL赤外自由電子レーザーにおけるテーパアンジュレータの検討」
  - MOP029 本田洋介、他 「cERL赤外自由電子レーザーのための電子ビーム輸送調整」
- 施設報告
  - TUP058 加藤龍好、他 「KEK Compact ERLの現状」

# 超伝導加速器利用推進チーム(2019-2020)

## High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

M. Adachi, D. Arakawa, S. Eguchi, M. Fukuda, T. Furuya, K. Haga, K. Harada, N. Higashi, T. Honda, Y. Honda, T. Honma, X. Jin, E. Kako, Y. Kamiya, R. Kato, H. Kawata, Y. Kobayashi, Y. Kojima, T. Konomi, H. Matsumura, S. Michizono, C. Mitsuda, T. Miura, T. Miyajima, H. Miyauchi, Y. Morikawa, S. Nagahashi, H. Nakajima, N. Nakamura, K. Nakanishi, K. Nigorikawa, T. Nogami, T. Obina, F. Qiu, H. Sagehashi, H. Sakai, M. Shimada, T. Shioya, M. Tadano, T. Tahara, T. Takahashi, R. Takai, H. Takaki, O. Tanaka, Y. Tanimoto, K. Tsuchiya, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Umemori, M. Yamamoto

## National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

R. Hajima, K. Kawase, R. Nagai, M. Sawamura, M. Mori, N. Nishimori

## National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

T. Sato, M. Kakehata, H. Yashiro

Hiroshima University M. Kuriki

National Institute of Technology, Akita College F. Sakamoto

SLAC Nora Peak Norvell

Institute of Modern Physics (IMP) CAS China Zong Yang

