

# IFMIF原型加速器(LIPAc)の 高デューティビーム試験結果

赤木 智哉 for LIPAc Team  
量子科学技術研究開発機構 (QST)

第21回日本加速器学会年会  
山形テルサ, 2024年7月31日 - 8月3日



Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc)

Rokkasho Institute for Fusion Energy (BA Site)

赤木 智哉<sup>1,2</sup>, Florian Benedetti<sup>3,4</sup>, Yann Carin<sup>2,3</sup>, Janic Chambrillon<sup>3</sup>, Fabio Cismondi<sup>3</sup>,  
Herve Dzitko<sup>3</sup>, Dominique Gex<sup>2,3</sup>, 長谷川 和男<sup>1</sup>, David Jimenez Rey<sup>3,5</sup>, 近藤 恵太郎<sup>1</sup>,  
熊谷 公紀<sup>1,2</sup>, 増田 開<sup>1,2</sup>, Ivan Moya<sup>2,3</sup>, Francesco Scantamburlo<sup>2,3</sup>, 杉本 昌義<sup>1,2</sup>,  
IFMIF/EVEDA Integrated Project Team<sup>1-6</sup>

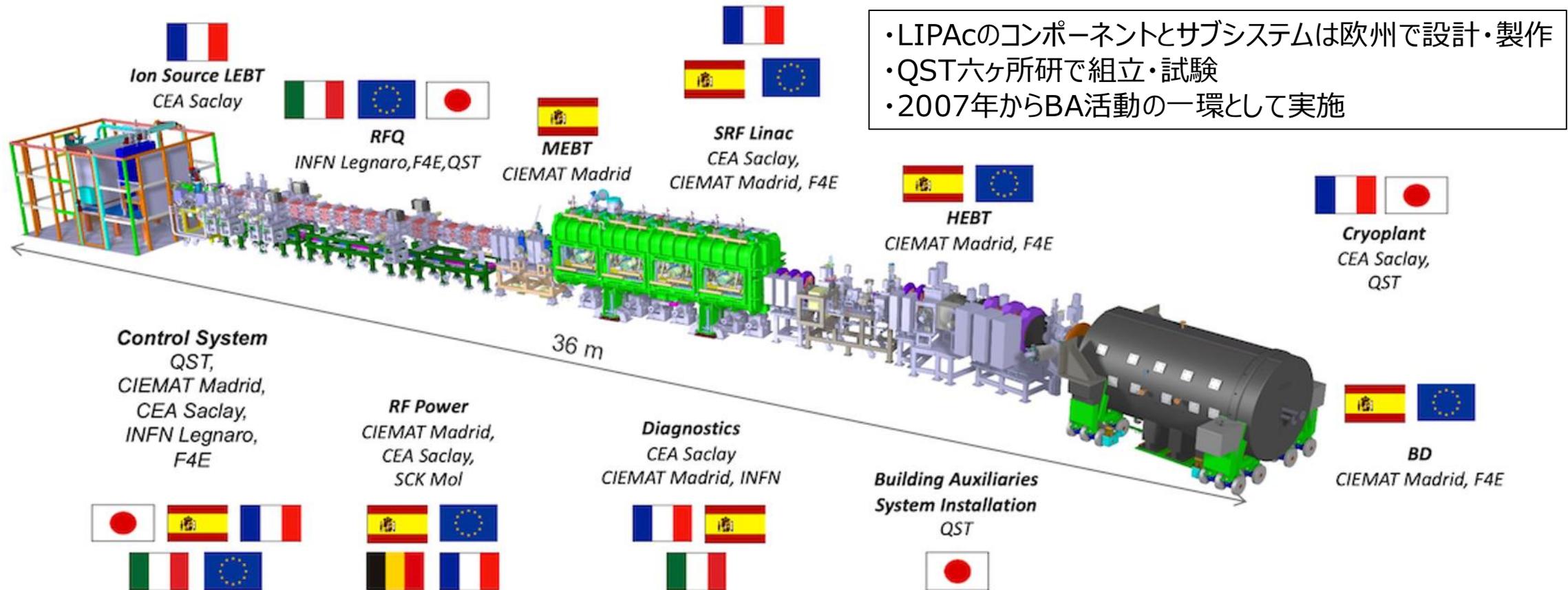
<sup>1</sup>QST, <sup>2</sup>IFMIF/EVEDA PT, <sup>3</sup>F4E, <sup>4</sup>CEA, <sup>5</sup>CIEMAT, <sup>6</sup>INFN

国際核融合材料照射施設(IFMIF):

重陽子加速器と液体リチウムターゲットを用いた強力中性子源

IFMIF原型加速器: IFMIF加速器の低エネルギー部分の実証

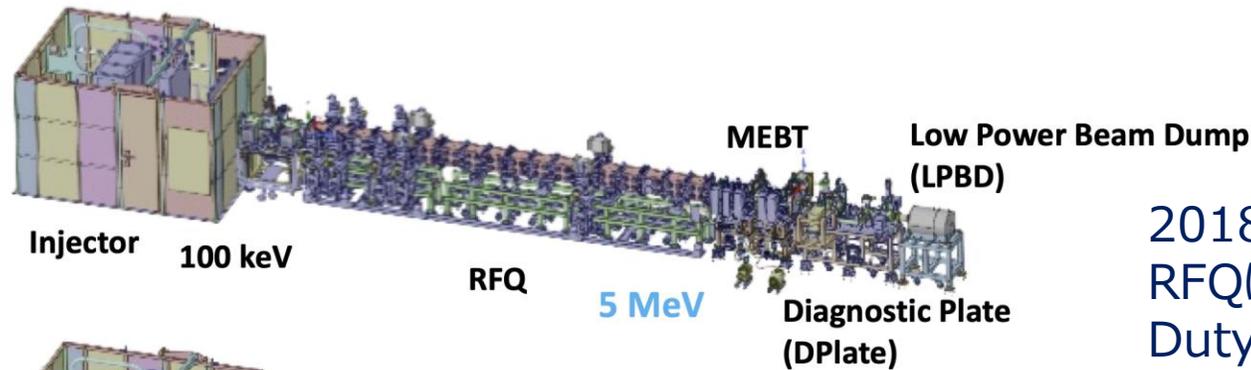
**IFMIF: 40 MeV, 2×125 mA, CW**  
**LIPAc: 9 MeV, 125 mA, CW**



- LIPAcのコンポーネントとサブシステムは欧州で設計・製作
- QST六ヶ所研で組立・試験
- 2007年からBA活動の一環として実施

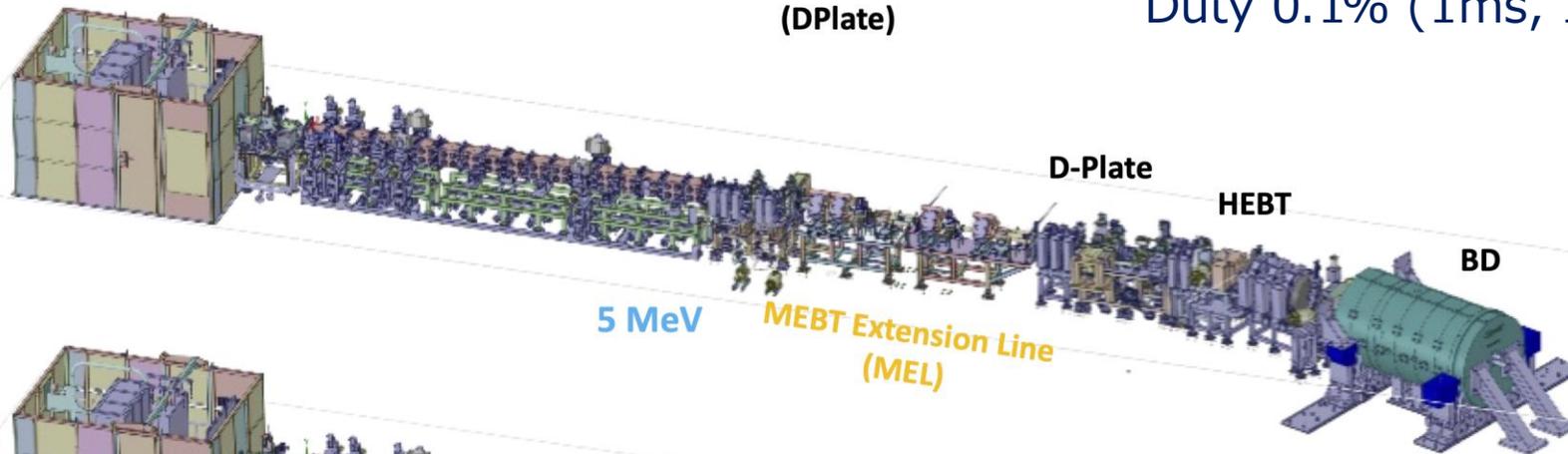
欧州との共同事業で青森県六ヶ所村においてコミッショニングが行われている  
 目標は**125 mA**の重陽子ビームを**9 MeV**まで加速し、**連続運転(CW)**を実証

## Phase B



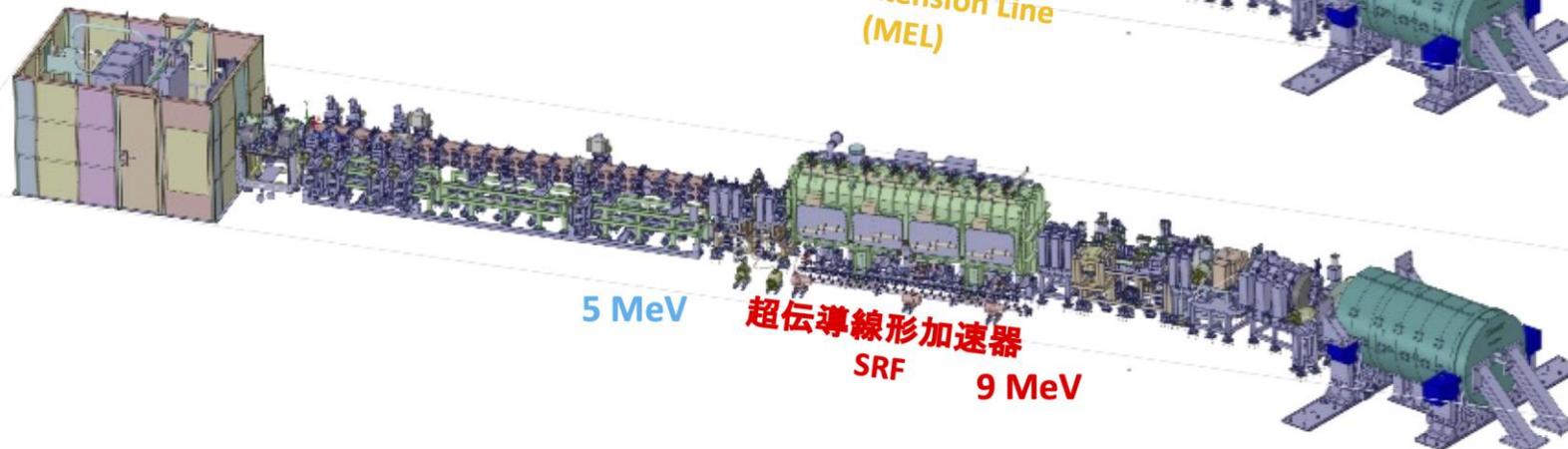
2018年6月に開始、2019年8月に完了  
RFQによる125 mA重陽子パルスビーム加速に成功  
Duty 0.1% (1ms, 1Hz)

## Phase B+

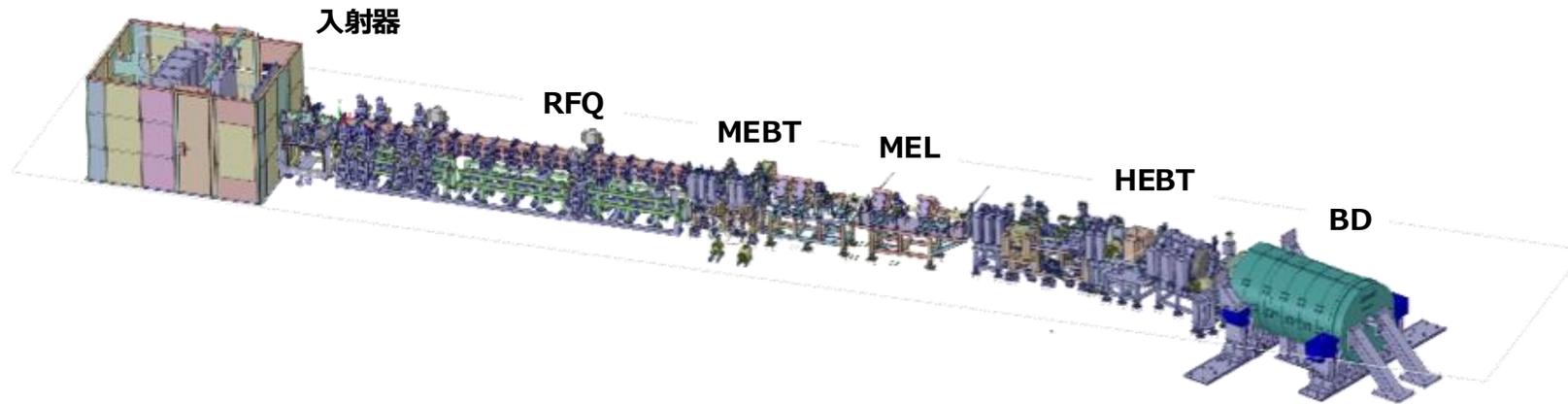


2021年7月開始  
2024年6月完了

## Phase C/D

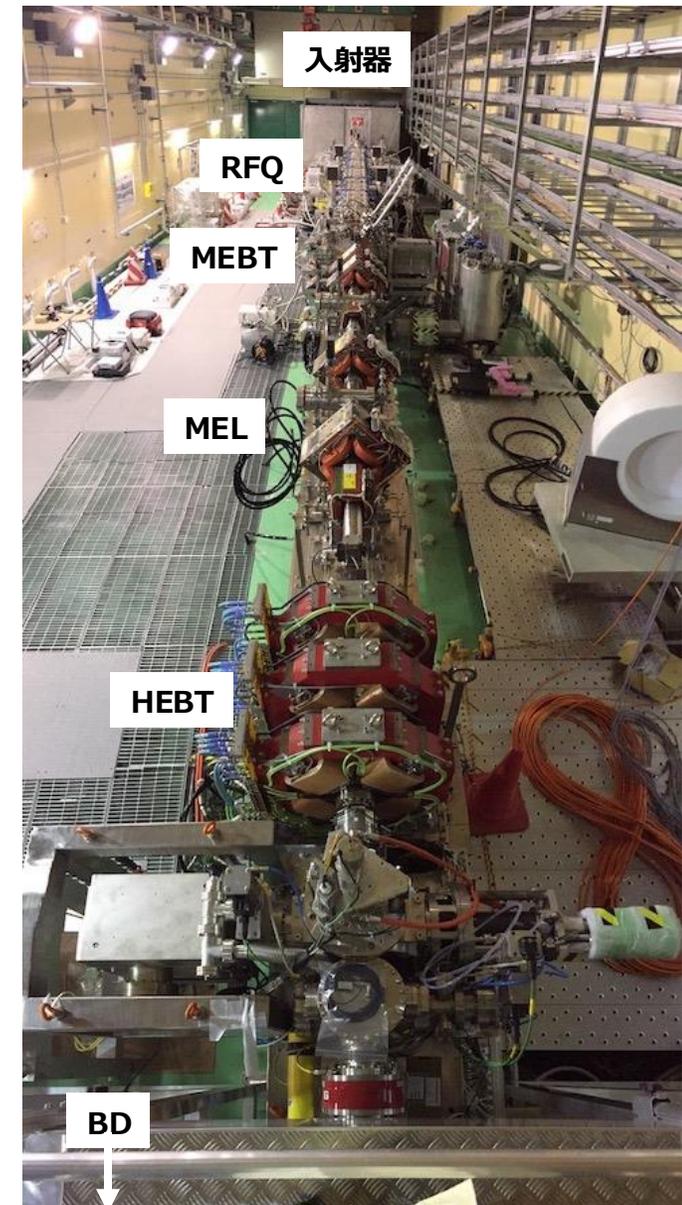


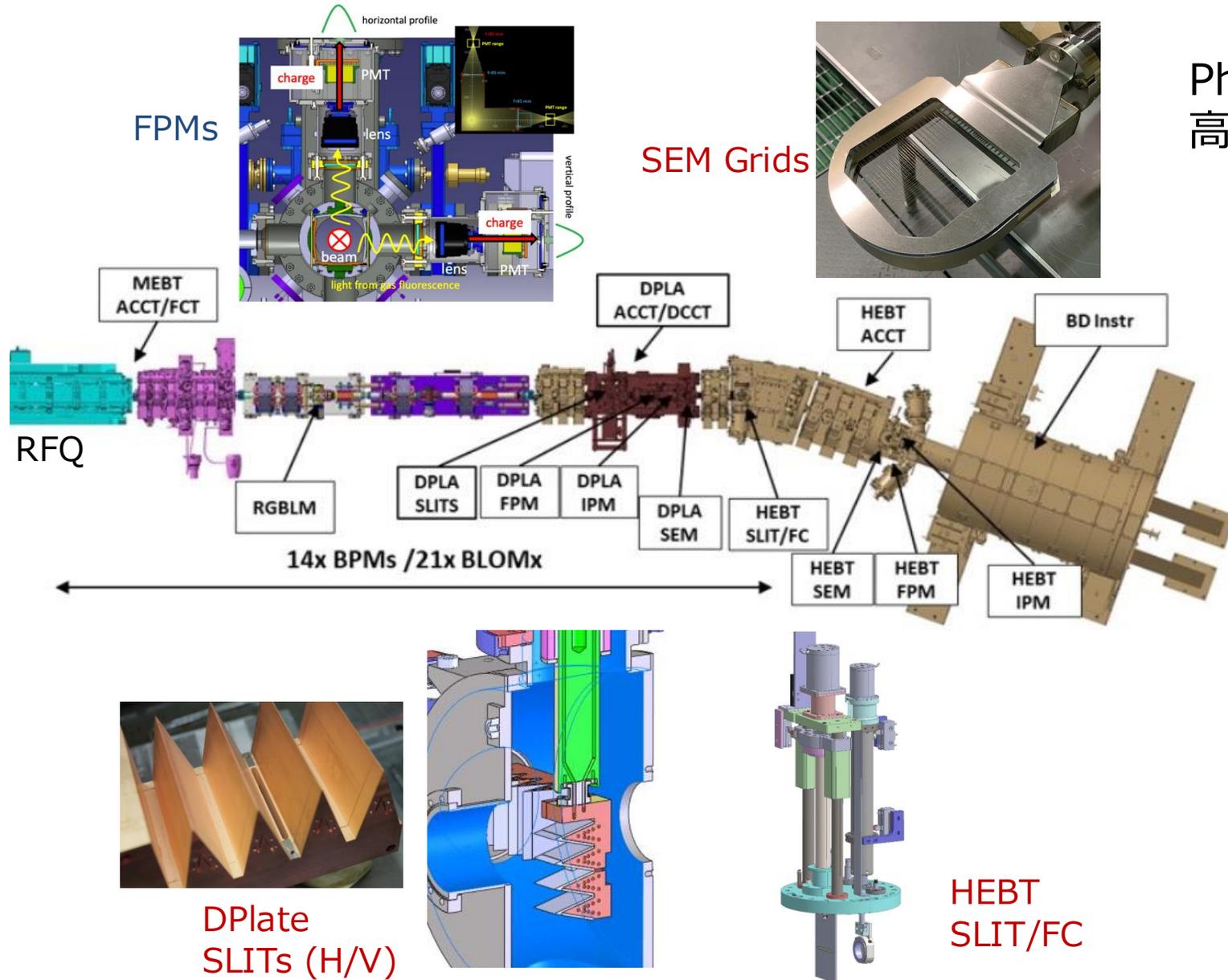
超伝導加速器による  
9 MeVまでの加速試験  
2026年開始目標



## Phase B+の目的

- RFQによる重陽子長パルスビーム加速の実証 (5 MeV, 125 mA, ~CW)
- (Phase Cで)SRFへ入射されるビームの特性評価
  - ステージ1: 低電流・低Duty試験 (2021年7月、11~12月に実施)
    - “プローブビーム”
    - 10 mA/2.5 MeV 陽子ビーム、20 mA/5 MeV 重陽子ビーム
    - ビームパルス 100  $\mu$ s/1 Hz (破壊型ビーム診断機器を使用可能)
  - ステージ2: D+ 125 mA・低Duty試験(2023年8月開始、12月完了)
  - ステージ3: D+ 125 mA・高Duty (~CW) 試験 (2023年12月開始)





Phase B+の目的：  
高dutyでの非破壊型診断系の動作検証

## 破壊型ビーム診断機器

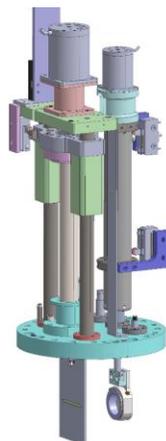
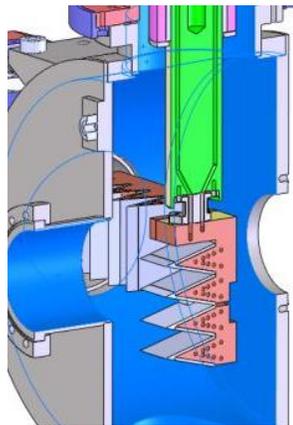
- SEM grids: Secondary Emission Monitor
- SLITs
- HEBT faraday cup

## 非破壊型ビーム診断機器

- CT: Current Transformer
- BPMs: Beam Position Monitor
- IPMs: Ionization Profile Monitor
- FPMs: Florescence Monitor
- RGBLM: Residual Gas Bunch Length Monitor
- BLoMs: Beam Loss Monitor



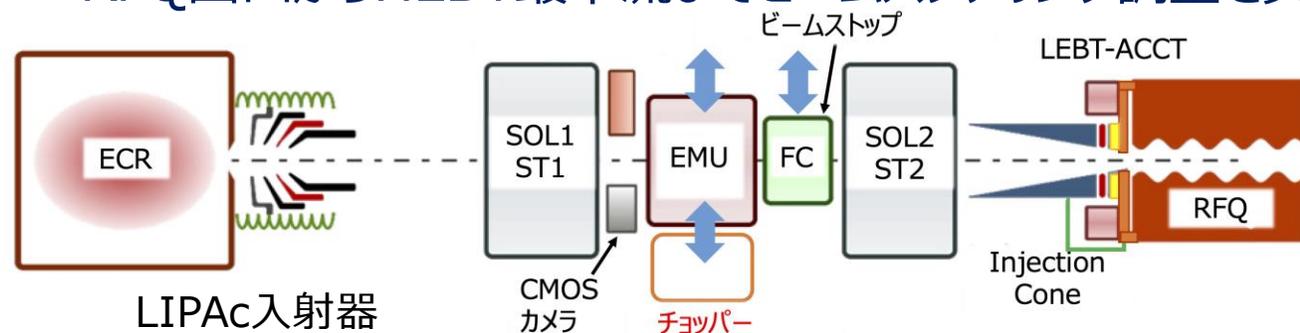
Dplate  
SLITs (H/V)



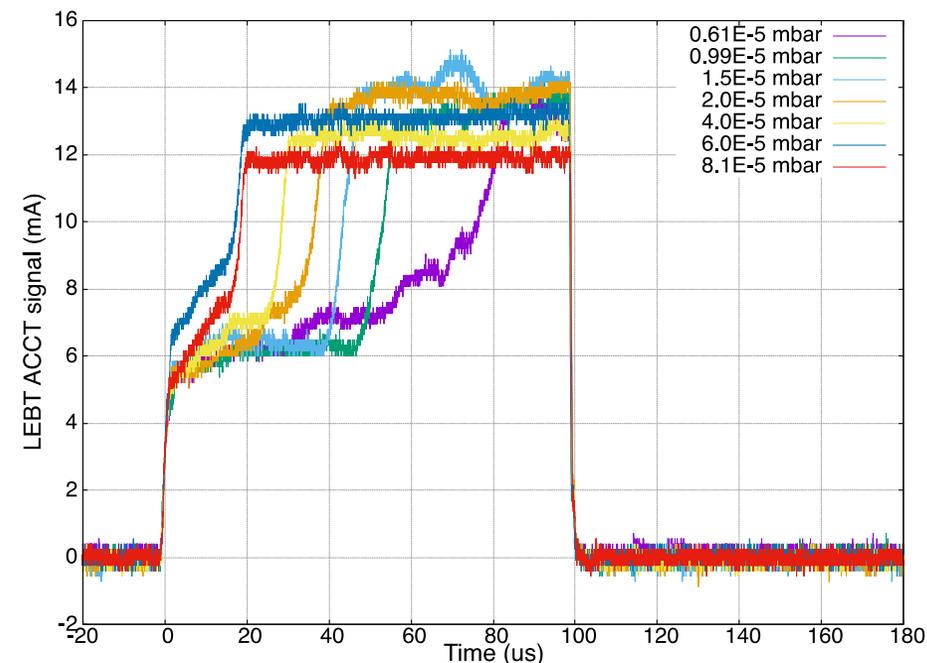
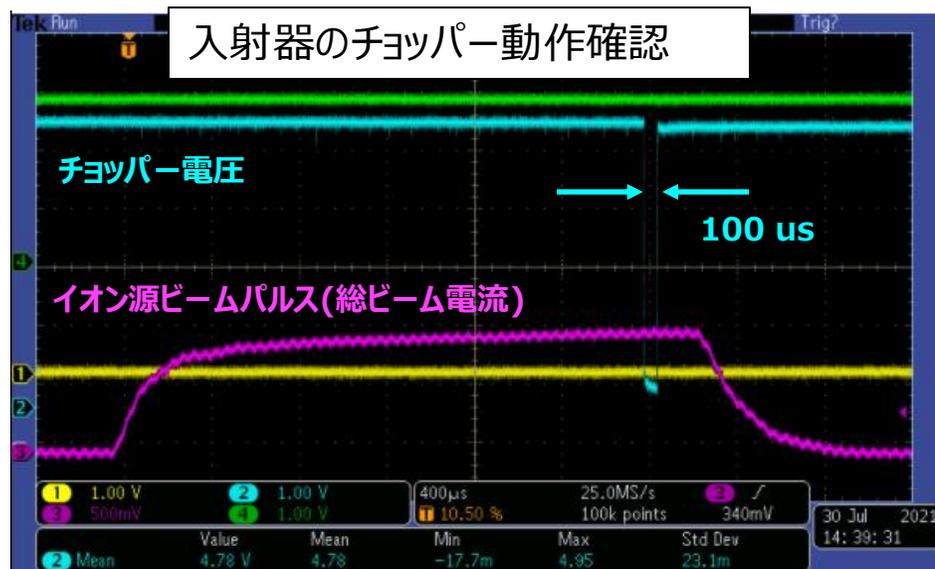
HEBT  
SLIT/FC

## ステージ1：低電流、低DutyのH+/D+ビーム

- 2021年7月Phase B+試験を開始。約2週間でビームダンプへの陽子及び重陽子ビーム入射成功
- RFQ出口からビームダンプまでほぼ100%の重陽子ビーム輸送 (5 MeV/17 mA, 100us/1Hz)
- RFQ出口からHEBT最下流までビームステアリング調整を実施



空間電荷緩和のためにLEBTへのKrガス導入  
ビームパルス立ち上がり速度の改善(H+ビーム)



2021年12月以降、ビーム加速試験を一時中断して入射器とRFQのCWコンディショニング実施

## 入射器

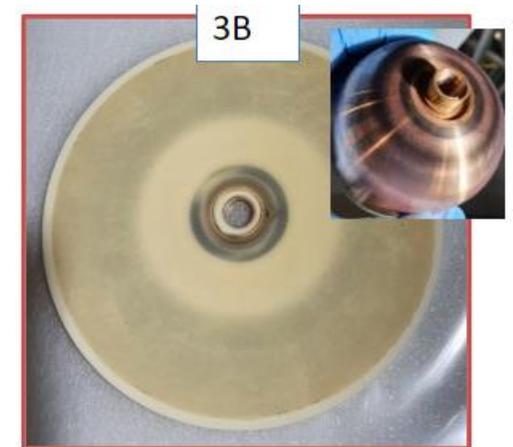
目標：総ビーム電流  $> 150 \text{ mA} \cdot \text{CW}$  に向けたコンディショニング

- 異なる引き出し穴径 ( $\phi 9 \sim 12 \text{ mm}$ ) のイオン源プラズマ電極を用いた系統的なCWビーム試験
- $\phi 11 \text{ mm}$  電極を用いて、総ビーム電流  $150 \text{ mA}$ 、重陽子割合  $91\%$ 、エミッタンス  $< 0.25 \text{ n mm mrad}$  ビームの生成を達成。

## RFQ

目標：重陽子加速に必要な空洞電圧  $132 \text{ kV} \cdot \text{CW}$  までのコンディショニング

- 定格電圧の約  $80\%$  ( $105 \text{ kV}$ ) においてCWでのRF入射を達成。
- 定格電圧  $132 \text{ kV}$  ではduty cycle  $25\%$  を達成。
- 2022年3月、RFQコンディショニング中にRFカプラにおいて真空リーク発生。
  - 8台全てのRFカプラをRFQから取り外して状態確認を実施。
  - 真空リークが確認されたカプラの真空側リングの溶融を確認。
  - マルチパクタリングによる発熱の影響と考えられる。



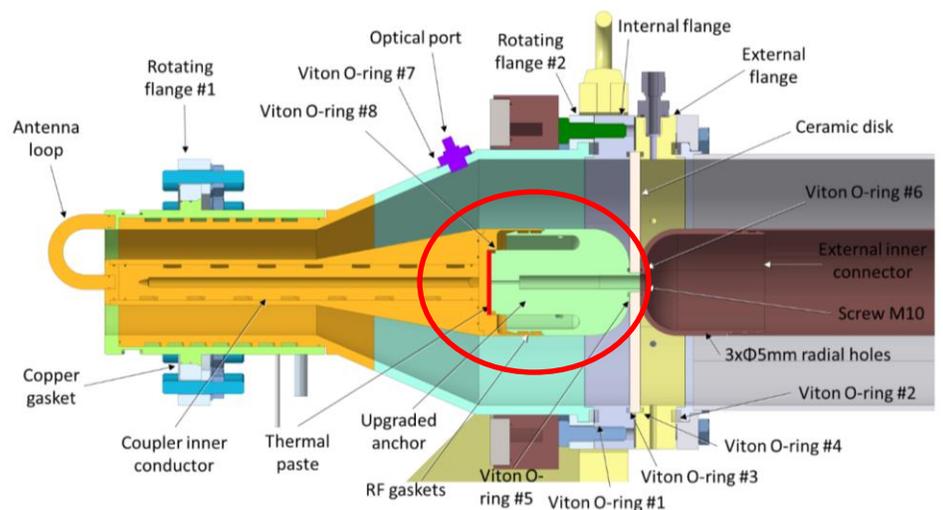
リングの溶融が見られた真空窓

## • 現行のOリングRFカプラの改良

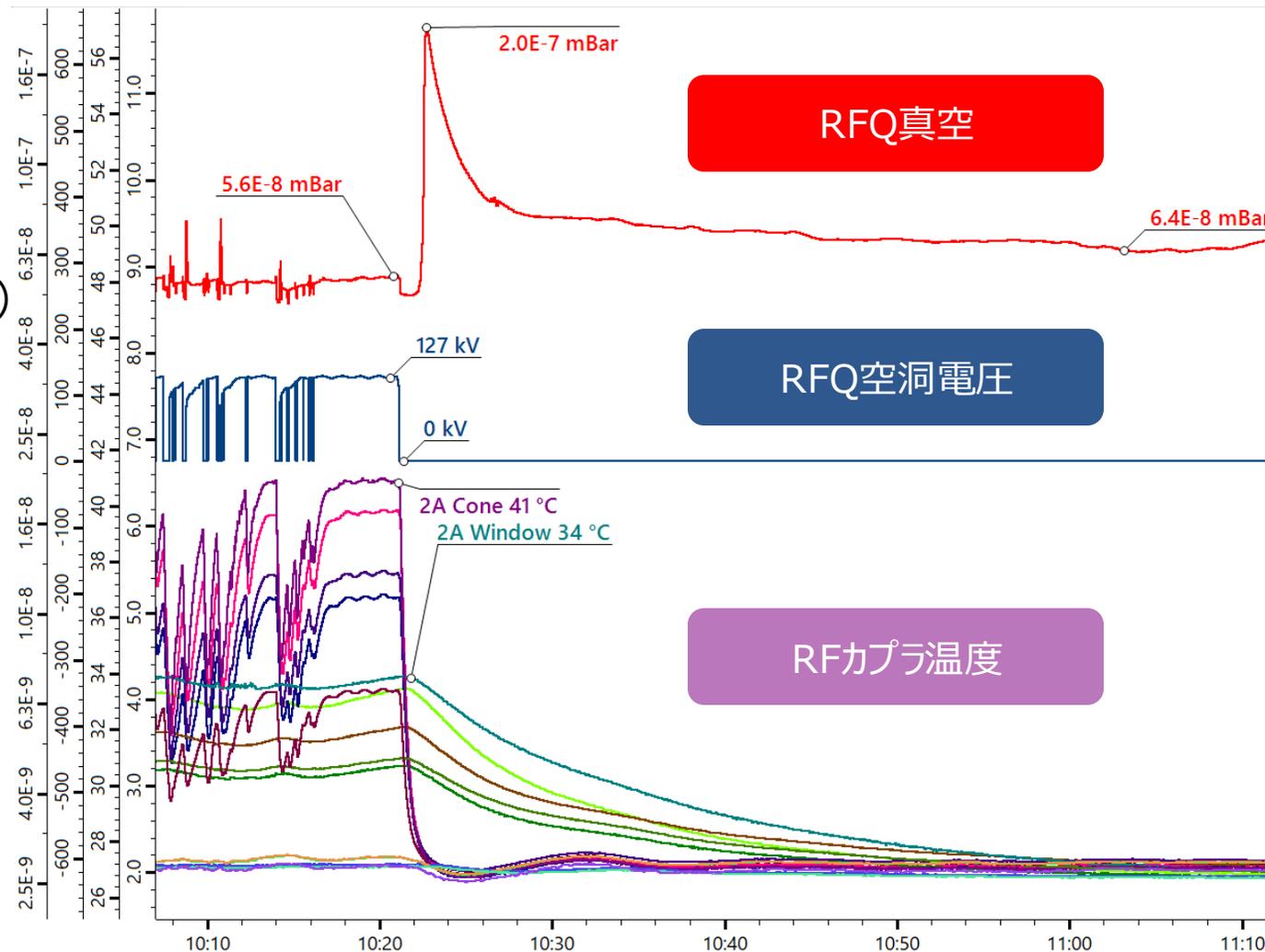
- 冷却能力を改良した内導体を製作
- 2023年6月にRFQコンディショニングを再開
- 並行して、内導体が真空窓にろう付けされているRFカプラの準備を進める

## • CWに向けたコンディショニング

- 短期間でビーム試験再開に必要な条件に到達(stage2開始)
- 2023年12月にDuty 27%に到達
- しかし発熱は解消せず、再び真空リークの兆候(右図)
- **Dutyを最大10%に制限する判断**



改良型RFQ用OリングRFカプラ



## ステージ2：定格電流(125 mA)、低DutyのD+ビーム

パルス幅：～100  $\mu$ s、繰り返し：～1 Hz

ビーム電流：HEBTで約115 mAを達成

### MEL上流やMEL下流部で予期していなかった粒子損失を確認

→ 5 MeVのD+ビームにおける四極電磁石のFRINGE磁場の影響の検討 (シミュレーション)

- Hard-Edge(HE)モデルとFringe field(FF)モデルの計算結果の比較

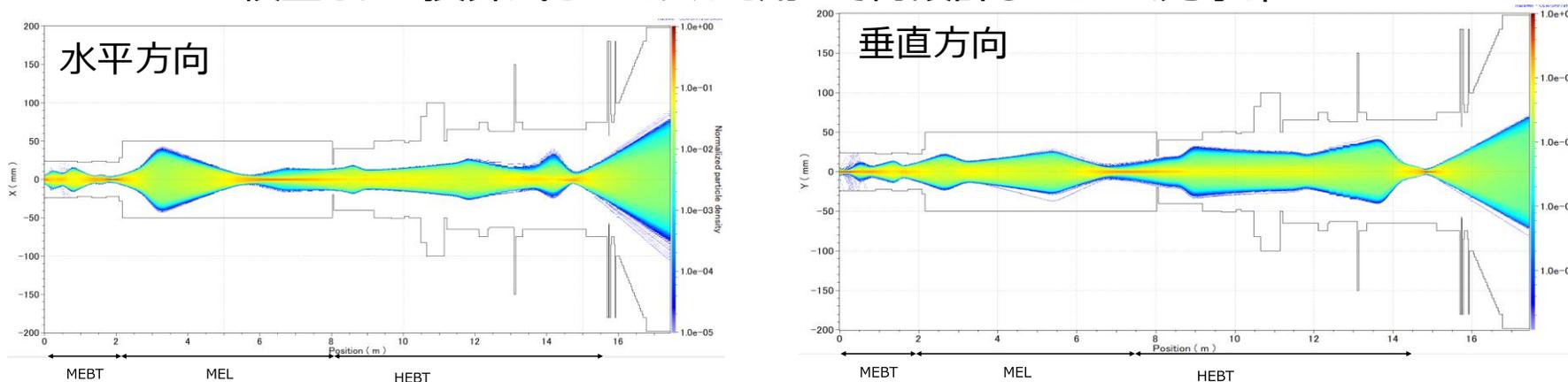
→ ビームを用いて四極電磁石の磁場勾配(T/m)と励磁電流(A)の換算式の較正試験を実施  
(J. Hyun et al., IPAC'24)

較正された換算式を用いたFFモデルでの計算結果と測定結果を比較

→ 較正後のFFモデル計算とビームサイズの測定結果が良く一致

→ 粒子損失を抑えるようにビーム光学系を再設計

### 較正された換算式とFFモデルを用いて再設計したビーム光学系

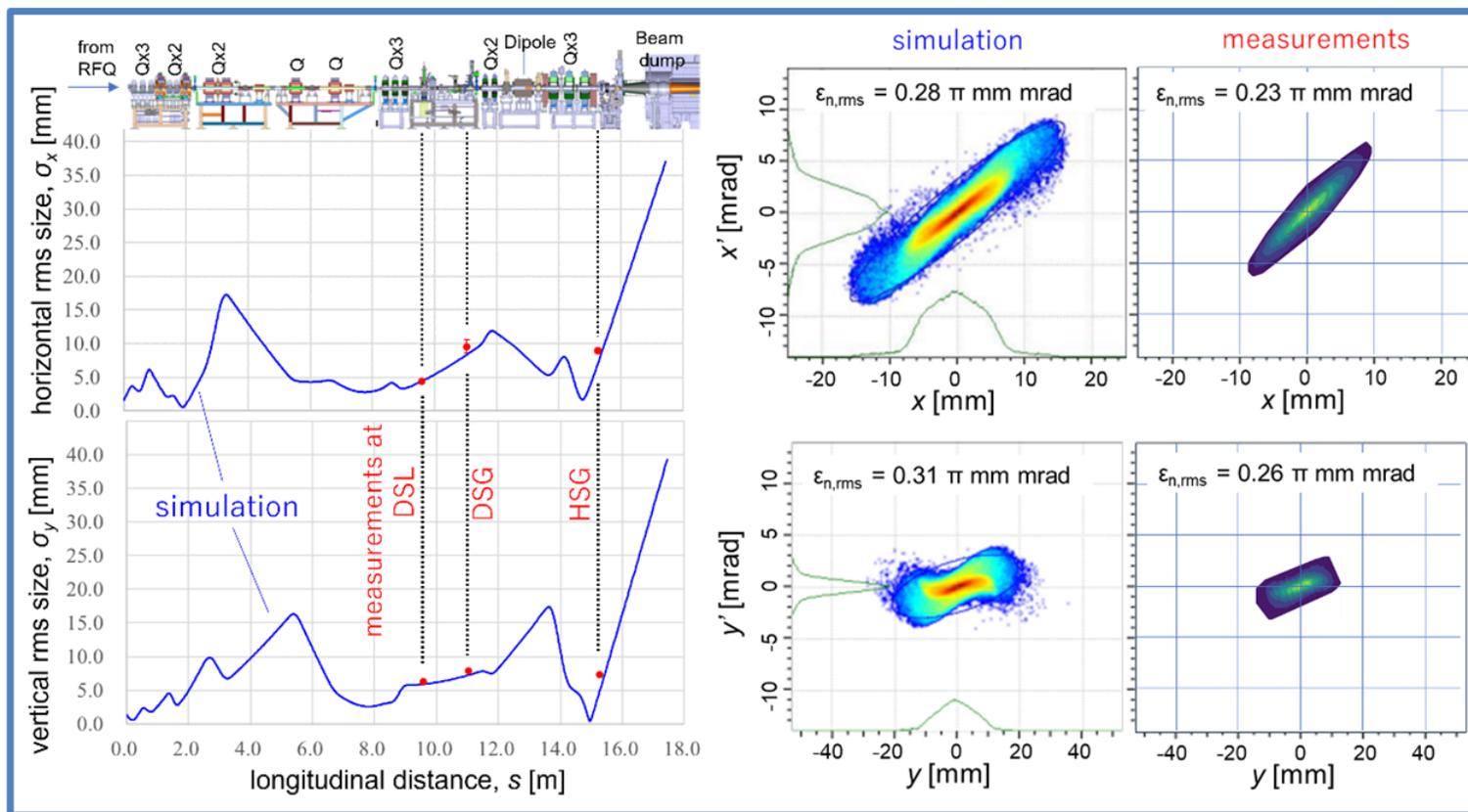


## ステージ2：定格電流（125 mA）、低DutyのD+ビーム

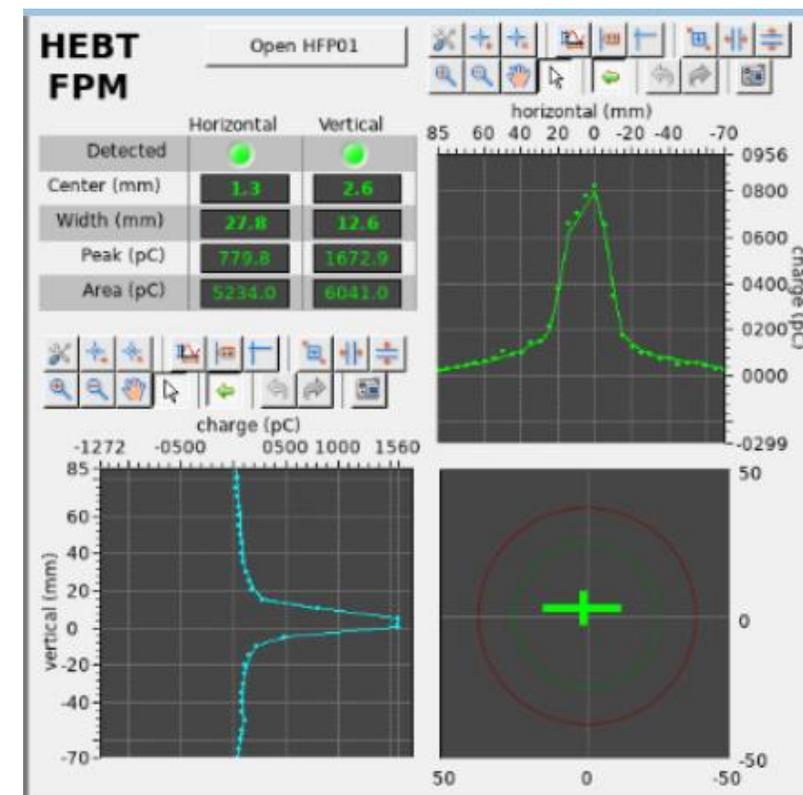
パルス幅：～100  $\mu$ s、繰り返し：～1 Hz

ビームプロファイル・エミッタンス測定、非破壊型ビーム位置モニタ・ビームロスモニタなどの動作確認を実施

DPlateにおけるエミッタンス測定結果と計算の比較



HEBT-FPMで測定された  
ビームプロファイル

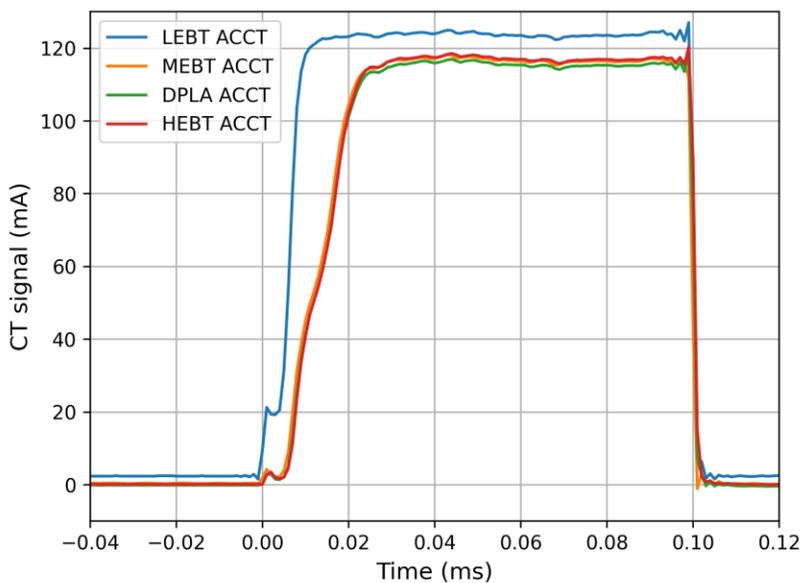


## ステージ3 : 定格電流 (125 mA) 、高DutyのD+ビーム

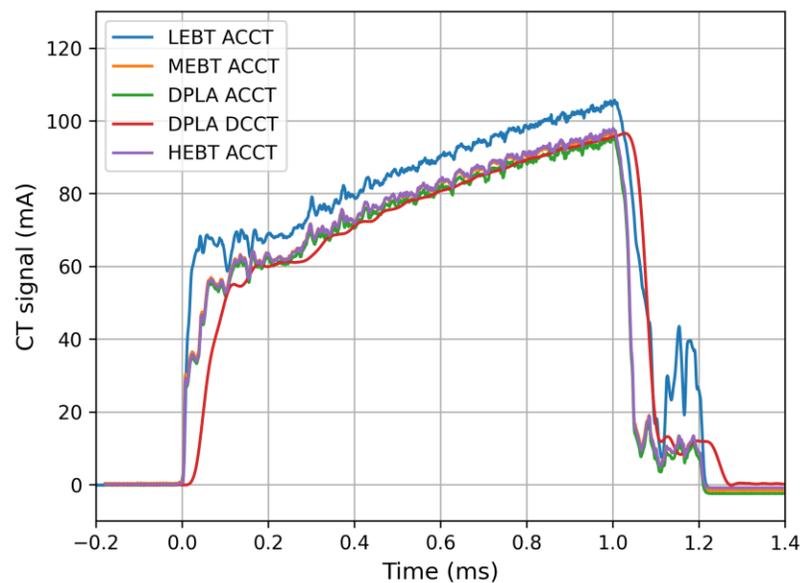
チョッパーをビームラインから引き抜き、イオン源のビームパルス幅を調整し高Dutyを目指す。

チョッパー無の場合、D+ビーム電流が徐々に上がっていき  
パルス幅 > 2 ms程度でプラトーに到達  
→チョッパーの有/無でLLRF調整の再調整を実施

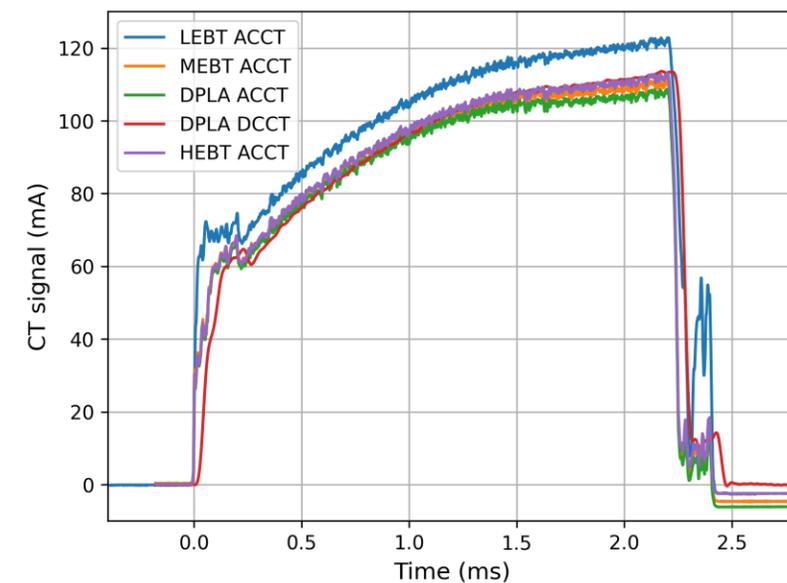
ビーム電流波形  
チョッパー有の場合

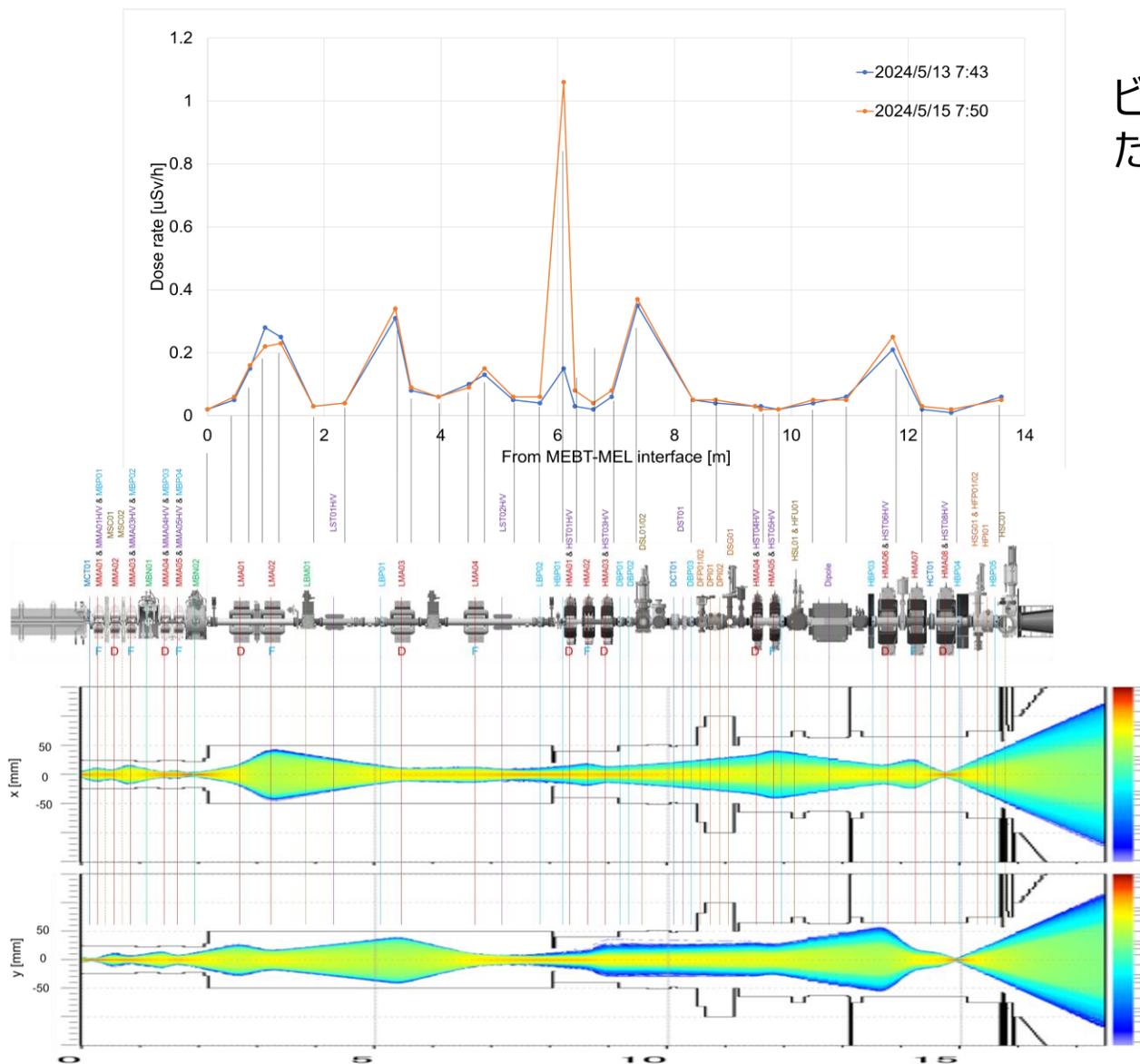


ビーム電流波形  
チョッパー無の場合

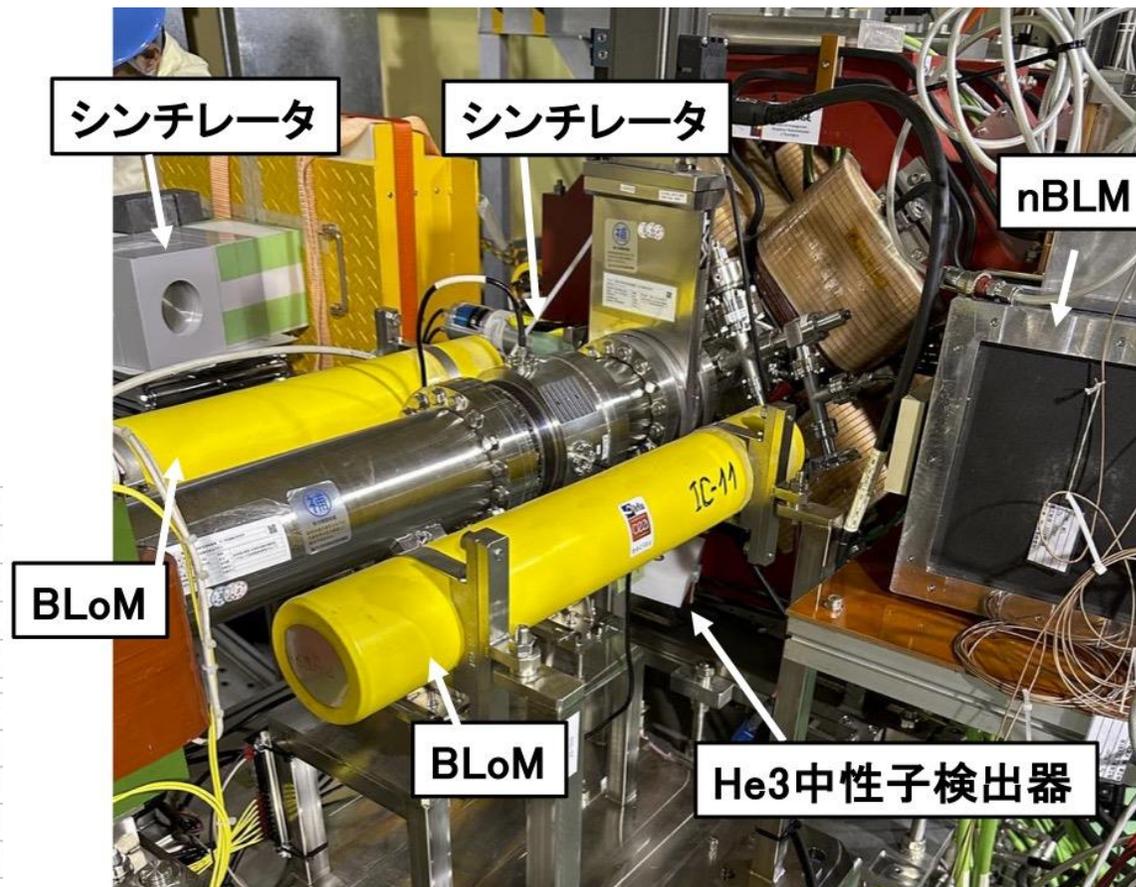


ビーム電流波形  
チョッパー無の場合

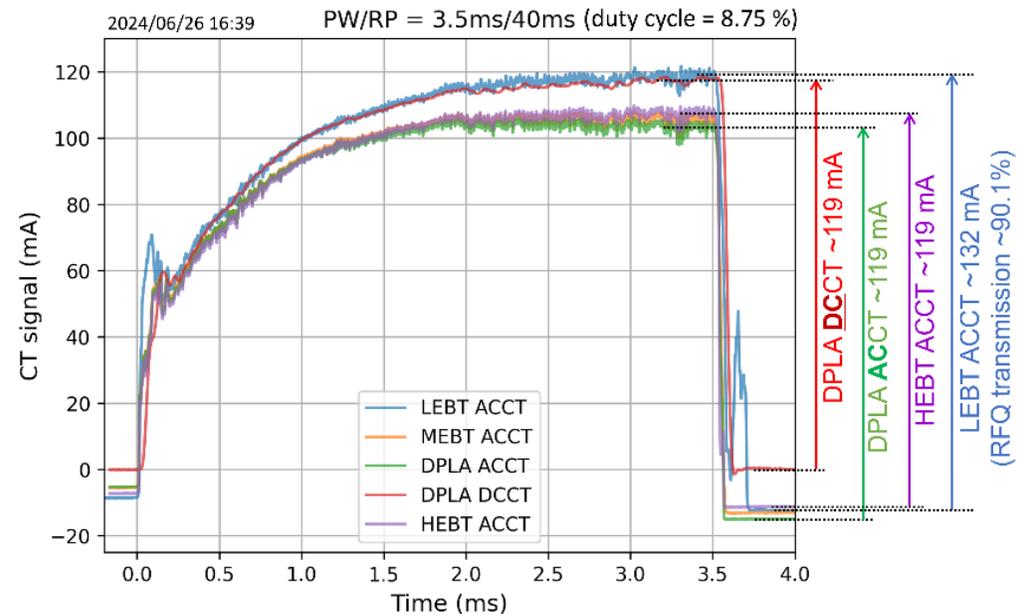
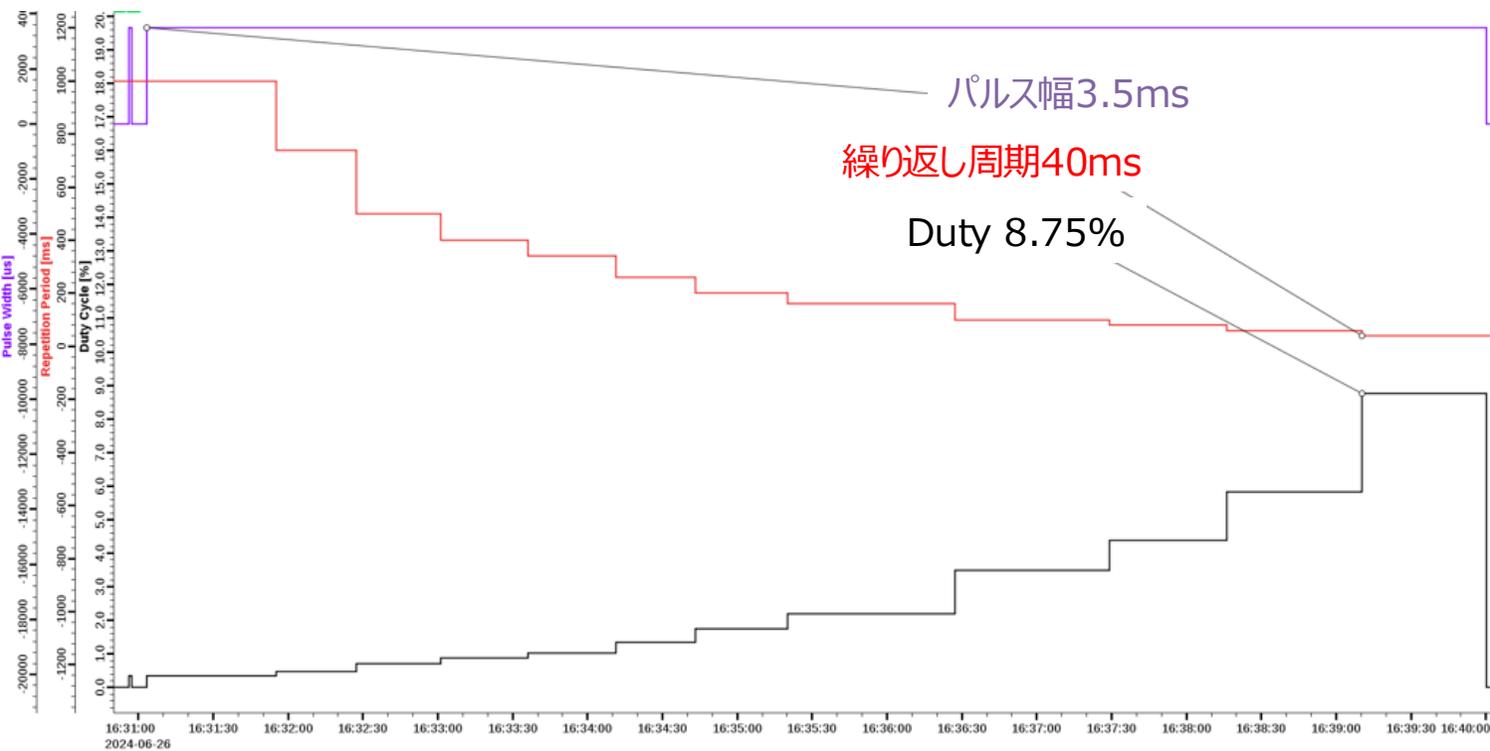




ビーム光学系再設計後も残っていたビームロスについて調査するため、Dutyを上げながらさまざまな条件で放射線計測を実施。



最大でDuty 8.75% (パルス幅3.5 ms、パルス繰り返し周期40 ms)を達成  
 ビーム電流はHEBTで約119 mA、RFQのビーム透過率は約90%  
 真空、ビームロスモニタ、ビームプロファイル等のデータを取得、現在解析中



Duty 8.75%達成時の  
ビーム電流波形

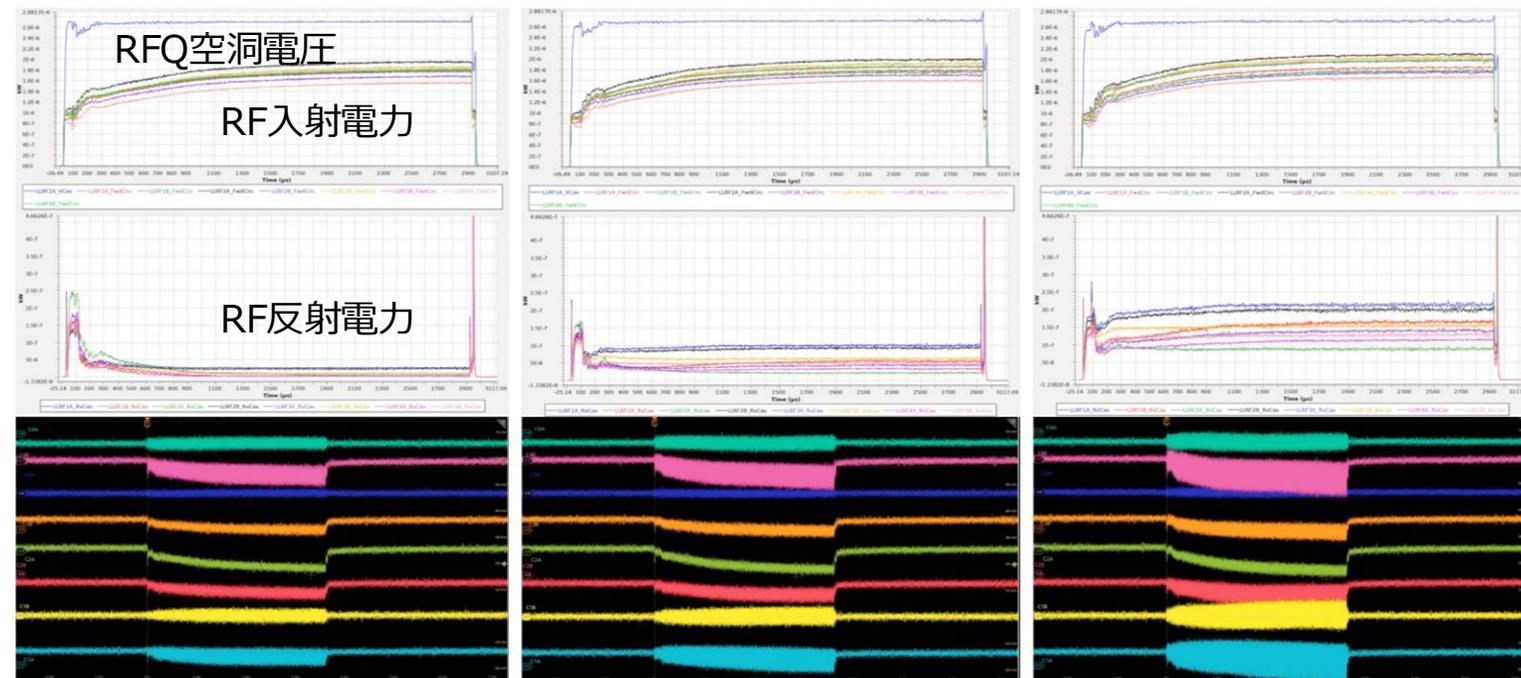
## 課題

- これ以上の長パルス化あるいは高duty化は、現行のOリング式RFカプラーでは困難であることを確認。
- 長パルス、高Dutyにおいて、マルチパクタリングがカプラー間で異なる速度で変化するため、各RF系統でアンバランスが生じる。結果として、空洞温度や真空度が定常に至る前にインターロック停止してしまう。**ろう付けカプラーに交換してもマルチパクタリングの対策は必須。**
- 冷却水によるRFQチューニングは、インターロックでビームが1s以上停止すると困難。その場合、低Dutyから上げ直しが必要。
- ビームをONのまま支障なく、パルス幅/繰り返し周波数を変えられるようにタイミングシステムの改良も必要。

Duty 3.50%

Duty 5.83%

Duty 8.75%



RFカプラーアークセンサ

2024年6月末：フェーズB+試験完了

2024年秋：クライオモジュールを加速器室に移動

2025年3月末：クライオモジュールが完成

2026年初め：クライオモジュール冷却開始

2026年：ビーム試験開始



六ヶ所研のクリーンルーム内  
接続された超伝導空洞とソレノイド8式



解体が始まったMEL  
電磁石半割作業

- QST六ヶ所研において、IFMIF原型加速器（LIPAc）のコミッショニングを日欧の国際協力で進めている。
- 2024年6月末に高dutyビーム試験（Phase B+）を完了
  - Duty 8.75%、ビーム電流 約119mAを達成
  - 高duty化に向けた課題を確認
- 並行して組み立て作業を行なっている超伝導線形加速器(SRF)を今年度後半から、加速器室に据付開始する予定

This work was undertaken under the Broader Approach Agreement between the European Atomic Energy Community and the Government of Japan. The views and opinions expressed herein do not necessarily state or reflect those of the Parties to this Agreement.