



# IFMIF/EVEDA原型加速器(LIPAc)の RFQビームコミッショニング

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構  
六ヶ所核融合研究所  
IFMIF加速器施設開発グループ

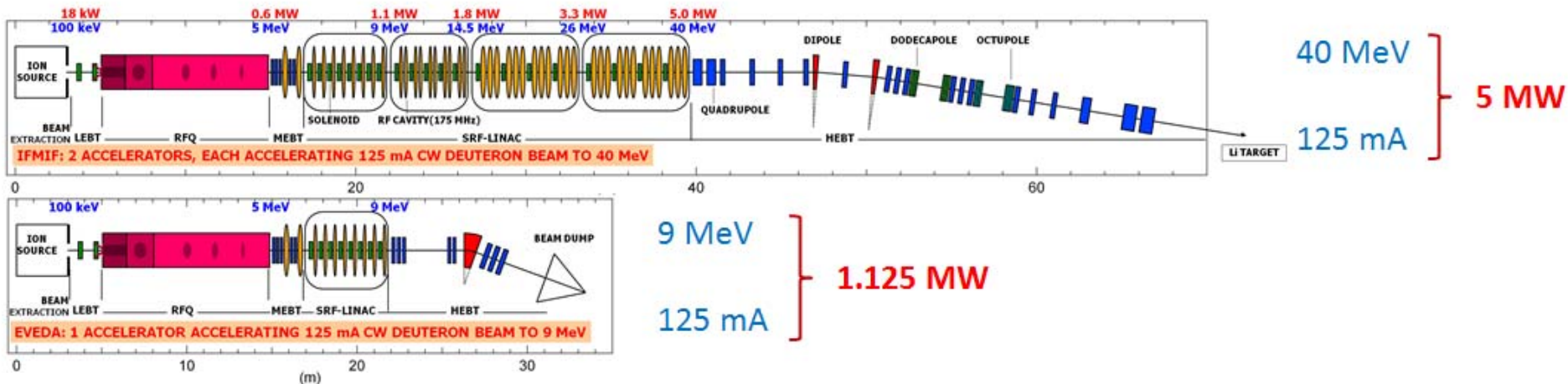
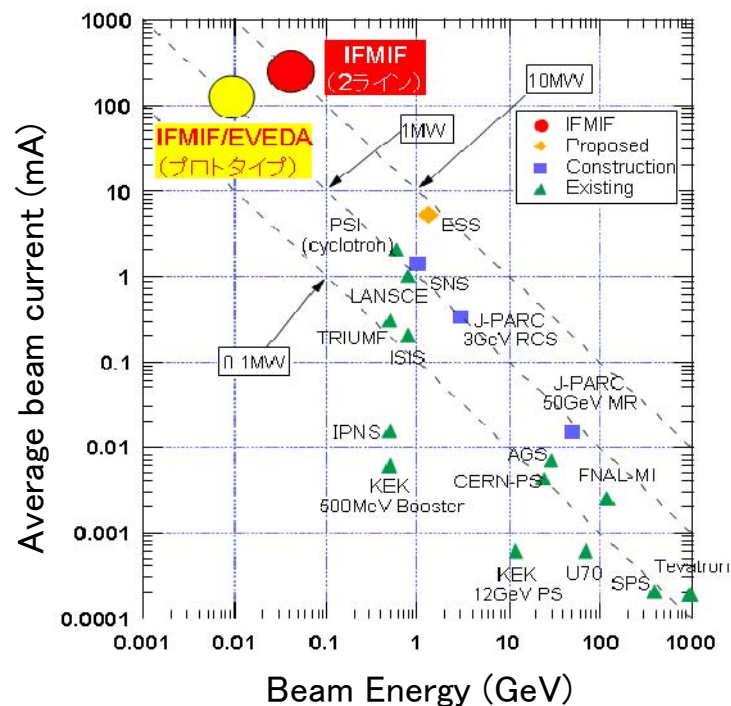
近藤 恵太郎

## IFMIF原型加速器 (LIPAc)

**$D^+$ , 9 MeV, 125 mA, CW (1.125 MW)**

IFMIF加速器の工学設計・工学実証活動 (IFMIF/EVEDA) の主要項目。2007年からBAの枠組みで日欧の国際協力として開始。

ビームエネルギーは低いが、これまでに類の無い大電流で定常運転の加速器



# IFMIF原型加速器(LIPAc)の構成



プロジェクト

- ◎加速器のサブシステムを各研究機関でR&D、製作、搬入
- ◎六ヶ所核融合研究所で組立・試験(中心はQST)
- ◎全体では日欧でほぼ半分ずつの貢献
- ◎13年間のプロジェクト期間(6年→10年→13年と延長)

**Injector**  
(Ion source + LEBT)  
(100 keV/D<sup>+</sup>140mA)

**Injector**  
CEA Saclay



**RFQ (5MeV/D<sup>+</sup>130mA)**

**RFQ**  
INFN Legnaro  
 **RFQ**  
QST

**SRF**  
(9MeV/D<sup>+</sup>125mA)

**MEBT**  
CIEMAT Madrid  
 **SRF Linac**  
CEA Saclay  
CIEMAT Madrid

**HEBT**  
CIEMAT Madrid

**BD**  
CIEMAT Madrid

**計測系**  
CEA Saclay  
 **計測系**  
CIEMAT Madrid

**クライオプラント**  
CEA Saclay

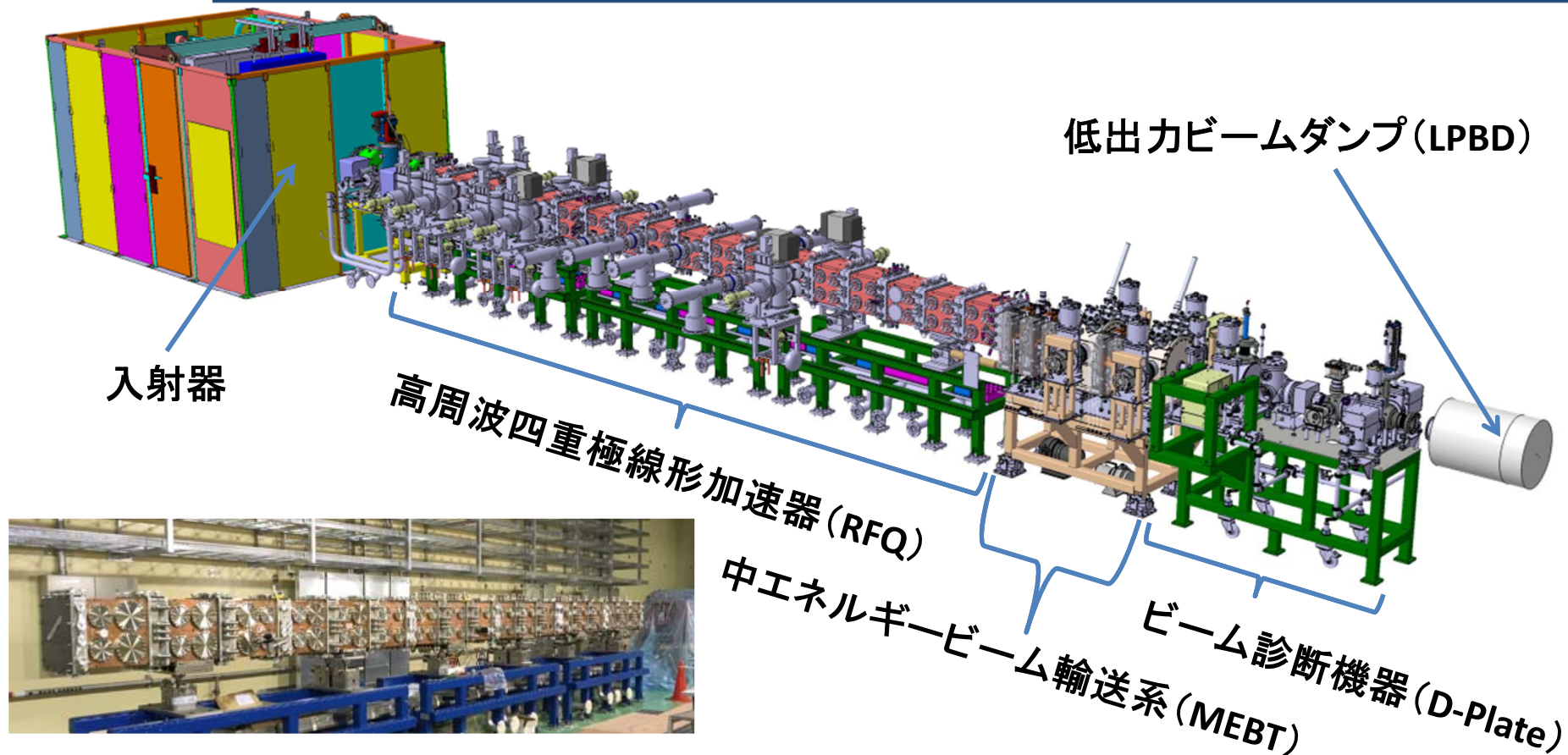
**RF システム**  
CIEMAT Madrid  
CEA Saclay, SCK Mol

**建屋**  
空調、排水、冷却水  
制御システム、許認可  
据付・調整・運転  
QST

技術的目標

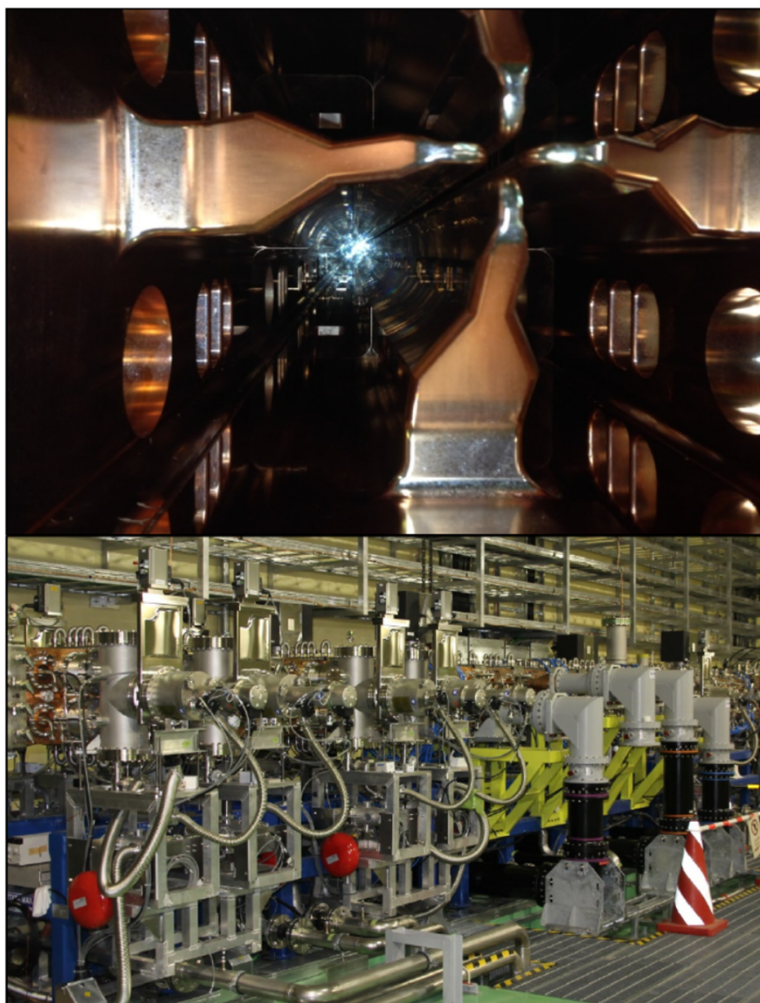
- ◎重陽子ビーム、9MeV、125mA、CWの実証
- ◎空間電荷効果の大きな低エネルギー部での大電流加速実証
- ◎中性子源ドライバーとしての高信頼性システムの検証

# RFQの実証試験(フェーズB試験)



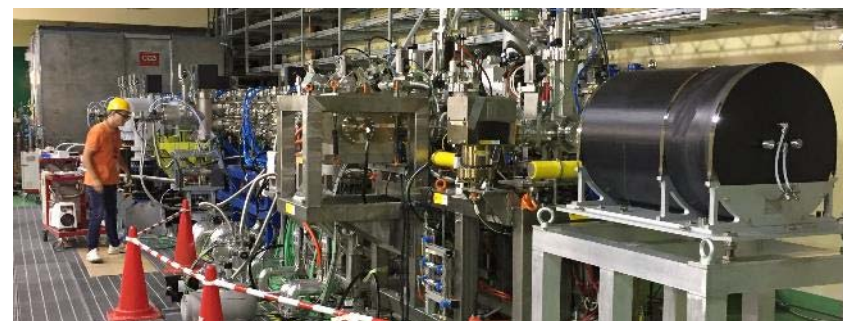
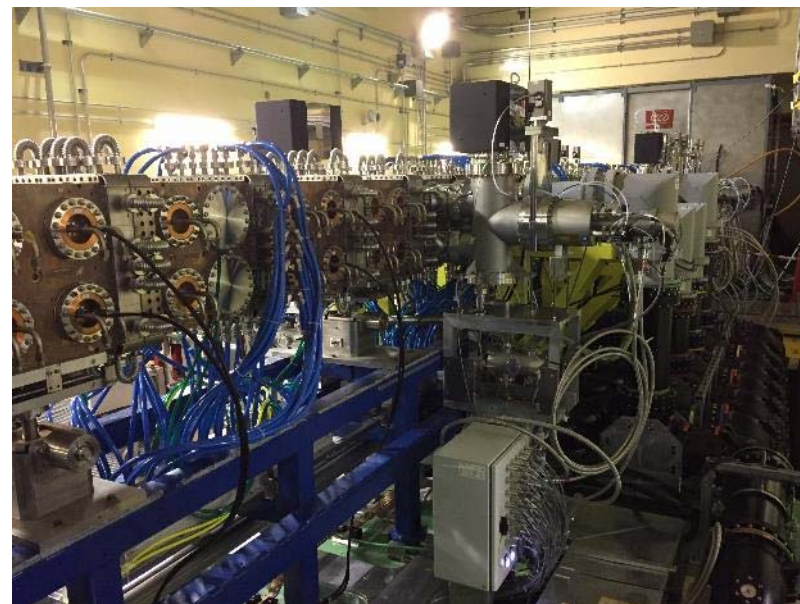
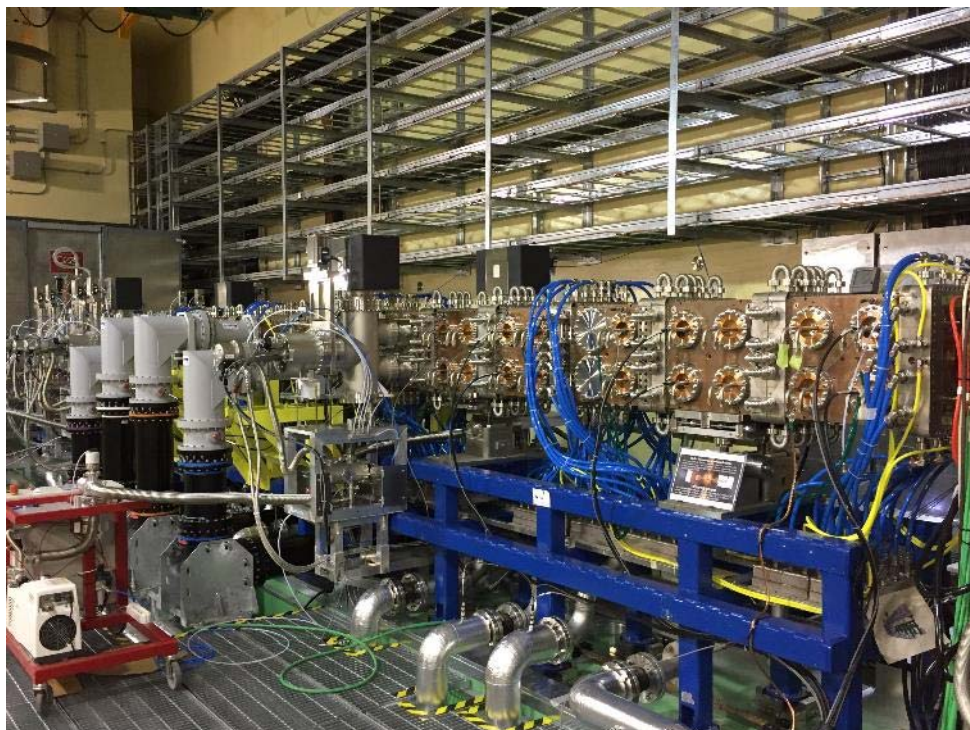
- 高周波四重極線形加速器 (RFQ) の試験を行う。
- 陽子ビームを2.5 MeVまで、重陽子ビームを5.0 MeVまで加速する。
- ビーム電流130 mAのビーム加速が行えることを実証する。
- フェーズB試験は低デューティーパルス(0.1%以下)のみで行う。
- 加速したビームは低出力ビームダンプ(LPBD)で受ける。

## IFMIF-EVEDA RFQ



Input/output Energy	0.1-5	MeV
Duty cycle	cw	
Deuteron beam current	125	mA
Operating Frequency	175	MHz
Length ( $5.7 \lambda$ )	9.78	m
Vg (min – max)	79 – 132	kV
R0 (min - max) $\rho/R0=.75$	0.4135 - 0.7102	cm
Total Stored Energy	6.63	J
Cavity RF power dissipation	550	kW
Maximum dissipated power	86	kW/m
Power density (average-max)	3.5-60	kW/cm <sup>2</sup>
$Q_0/Q_{sf}=0.82$	13200	
Shunt impedance ( $\langle V^2 \rangle / P_d$ )	201	k $\Omega$ –m
Frequency tuning	Water temp.	

# 加速器の据付完了(2017年7月)



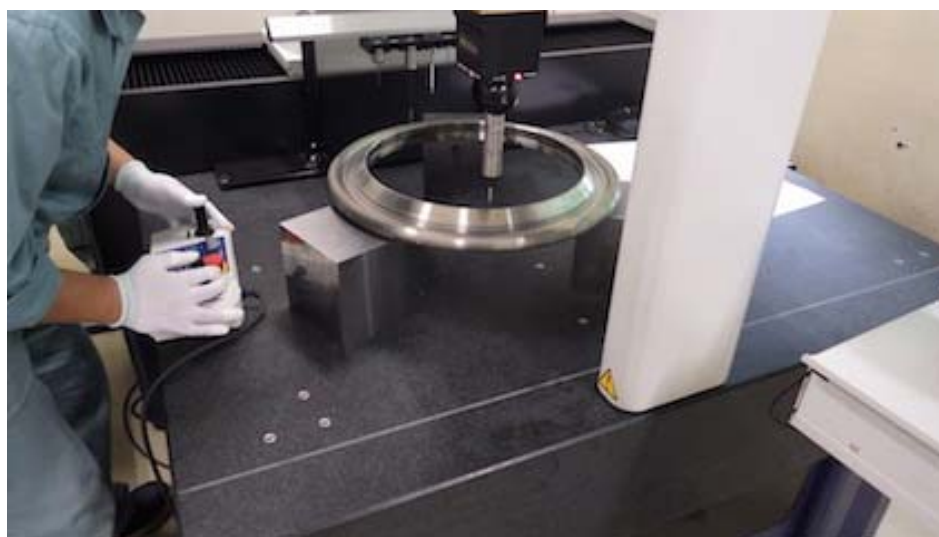
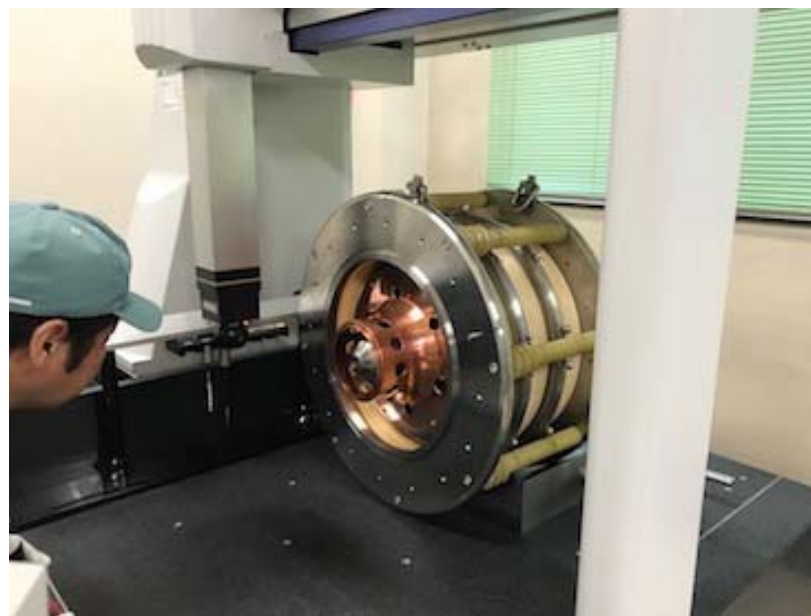
RFQ, MEBT, D-Plate, LPBDのビームラインが接続され、各サブシステムの真空系、冷却系の動作試験が完了。  
RFQに高周波を伝送する同軸導波管8系統の接続が完了。

# 入射器加速カラムの精密アライメント

実験結果と引き出し系のシミュレーション結果に不一致が見られたため、電極、加速カラムの詳細な3次元計測と精密アライメントを実施。

加速カラムの組み立ての際に、一部で設計者の意図しない寸法のずれが生じており、これが実験とシミュレーションの不一致の原因であったことが判明。

再アライメントした引き出し系では、シミュレーションとの一致が大幅に改善。実験結果のエミッタンスも改善し、75mAの最大引き出し電流で $0.23\pi$ .mm.mradが得られた。

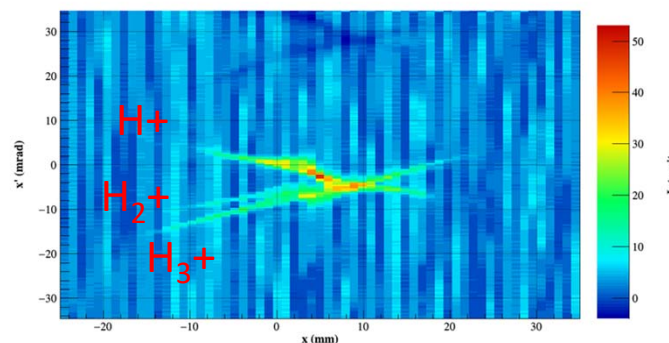
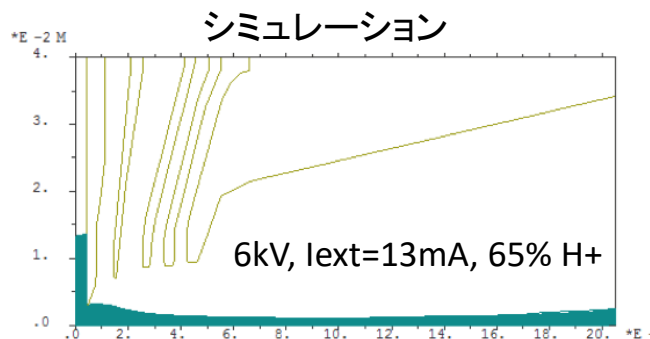


# RFQビーム試験用H<sup>+</sup>ビームの調整

- RFQの最初のビーム試験では、H<sup>+</sup>ビームを用いる。
- 最初のビームはできる限り電流値を下げる。
- そのため、穴径6mmのプラズマ電極を新規製作し、予備試験を実施。

φ6mm

(1) 13mA

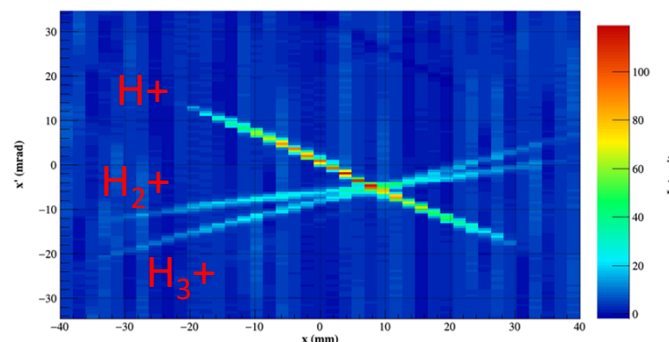
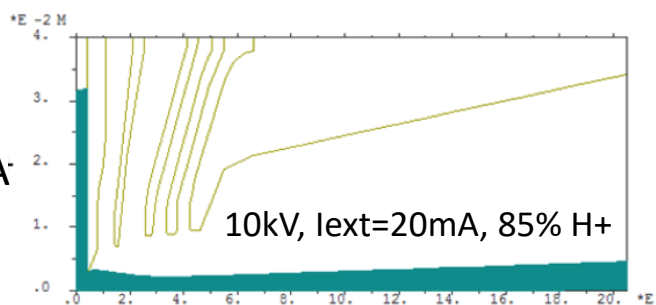


Emittance  
0.085πmm mrad

H<sup>+</sup>比  
60-70%

RFQ入口電流  
7.8-9.1mA

(2) 20mA



Emittance  
0.103πmm mrad

H<sup>+</sup>比  
75-85%

RFQ入口電流  
15-17mA

- 調整試験の結果、最初のH<sup>+</sup>ビームとして穴径6mmの電極を用いた引出し電流13mA, 25mA, 30mAの3つのパラメータを用意。
- 非常に良いオプティクスが得られた。



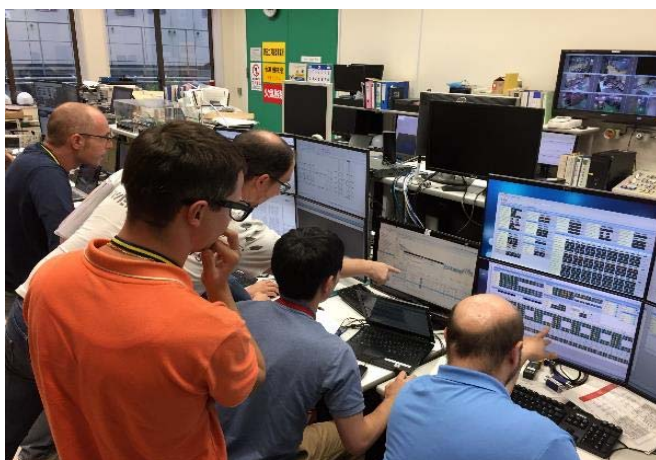
RFQ空洞にRFを入射し、空洞内部のコンディショニングを行う。短パルスから段階的に約800kW CWまでパワーを上げる。

日欧共同の実験チームにより、2017年7月10日コンディショニング試験を開始。

RFQ空洞へのRF初入射: 2017年7月13日

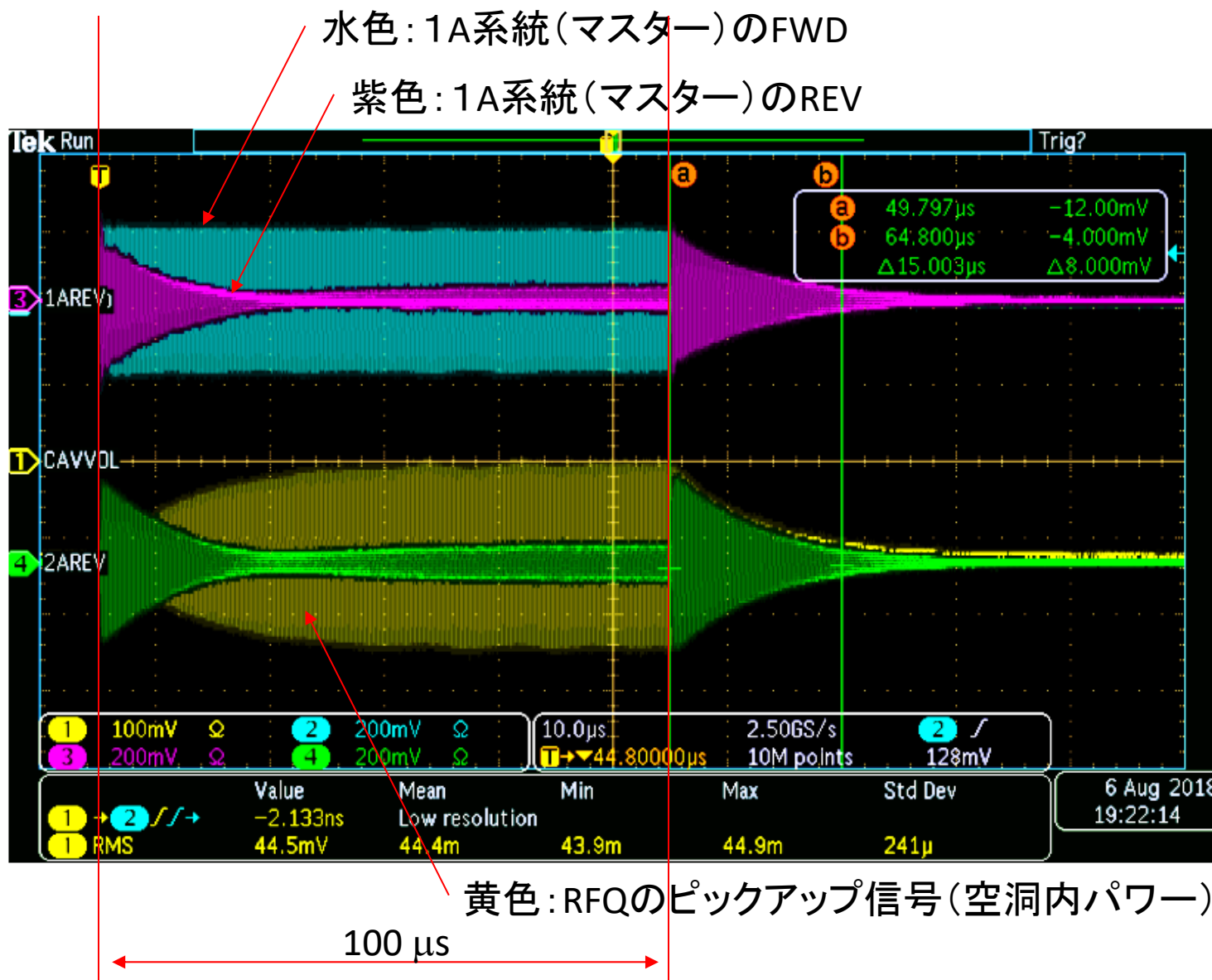
RFモジュール8系統の同期入射に成功: 2017年7月31日

LLRFはフルデジタル方式。2系統以上の同期入射では、White Rabbitと呼ばれるサブナノ秒精度でのマスタースレーブ同期を実現するタイミング分配ネットワーク技術を用いて8系統のLLRFを同期。

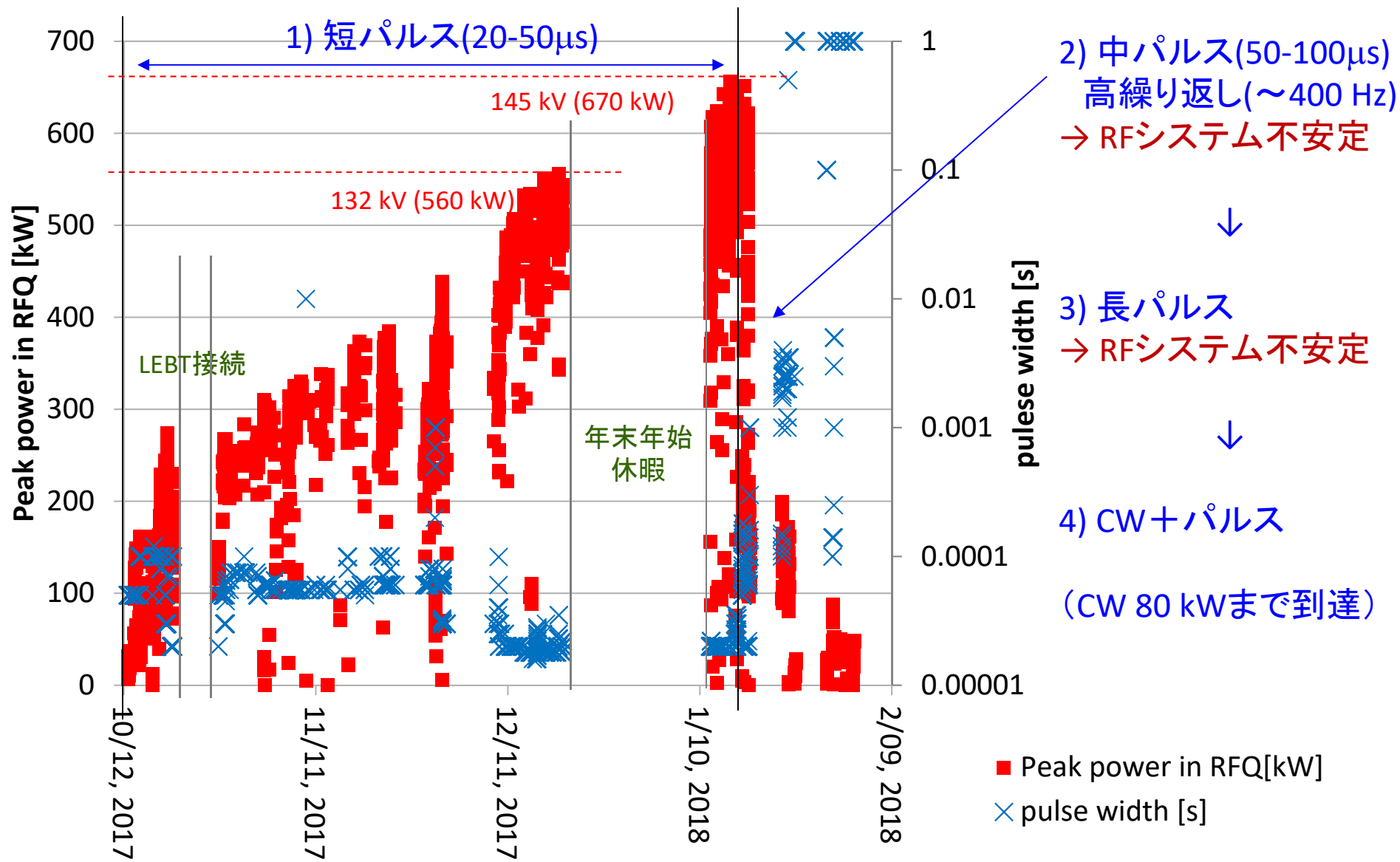


10月より24時間体制でRFQのRFコンディショニングを開始。

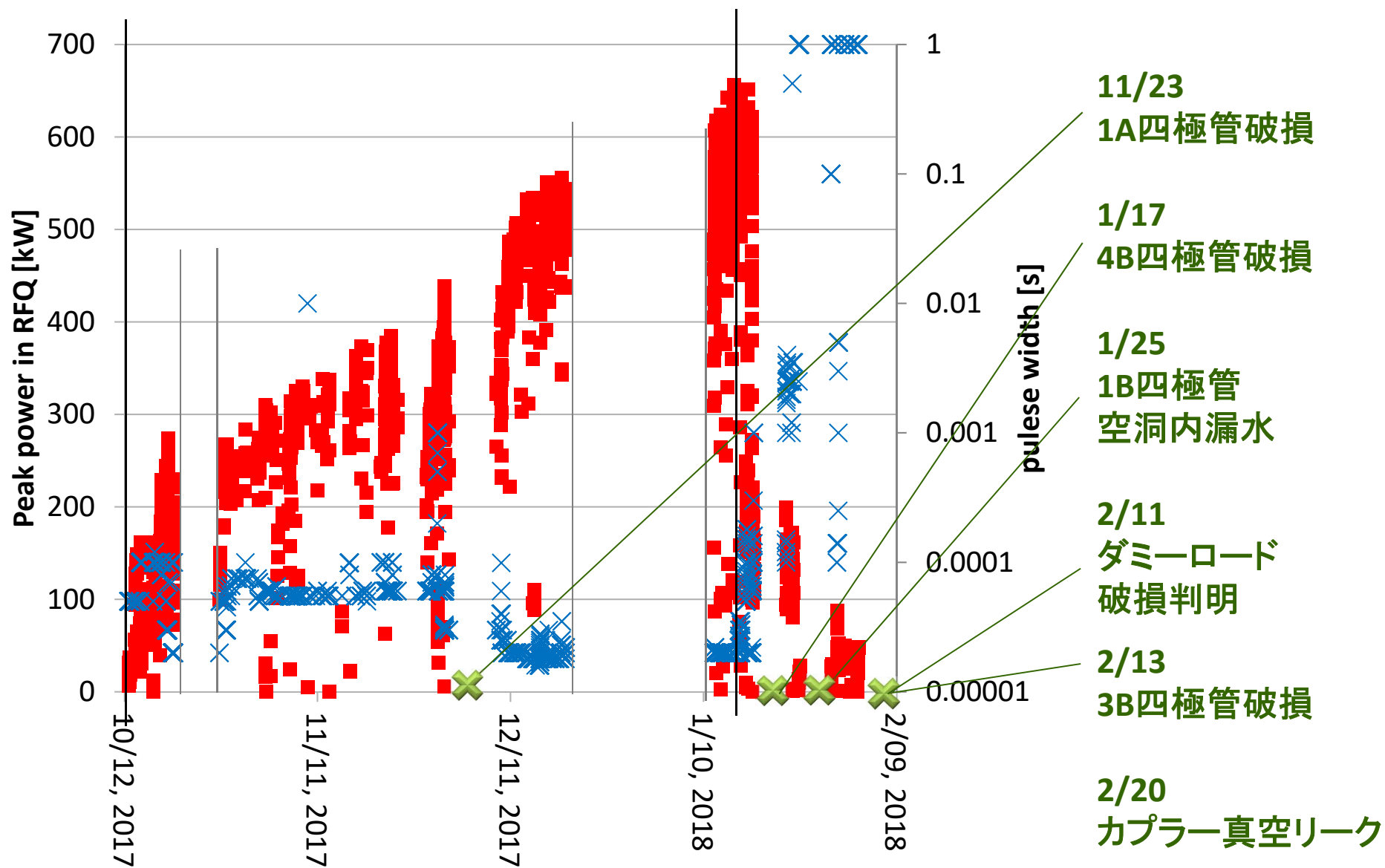
# RFQ RFコンディショニング時のRF信号



# RFQ RFコンディショニングの推移



# RFQ RFコンディショニングの推移

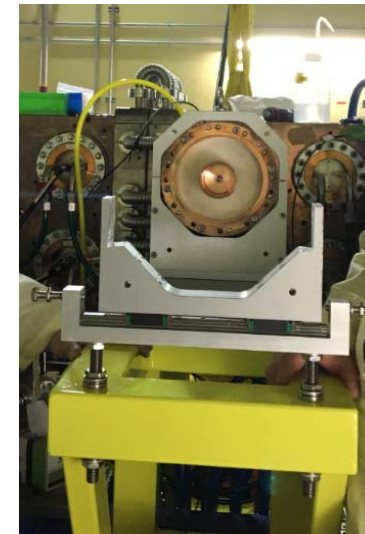
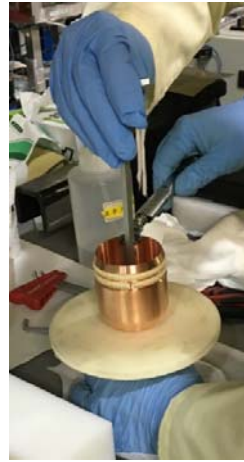


## カップラー真空窓の破損(4/15)

- 4/10、RFコンディショニングを再開したが、4/15(日曜日)、RFカップラーの1つの真空窓(アルミナ)が破損し、空洞が大気圧になる重大トラブルが発生。
- 空洞のコンディションを劣化させないため、グループ員に休日出勤を要請して緊急作業を実施。カップラーを取り外してフランジで閉止。
- 約6時間の大気曝露があった。



# カプラー1A、1Bの分解と再組付け(4/18-21)





2017/11/16 初雪



2017/12/12

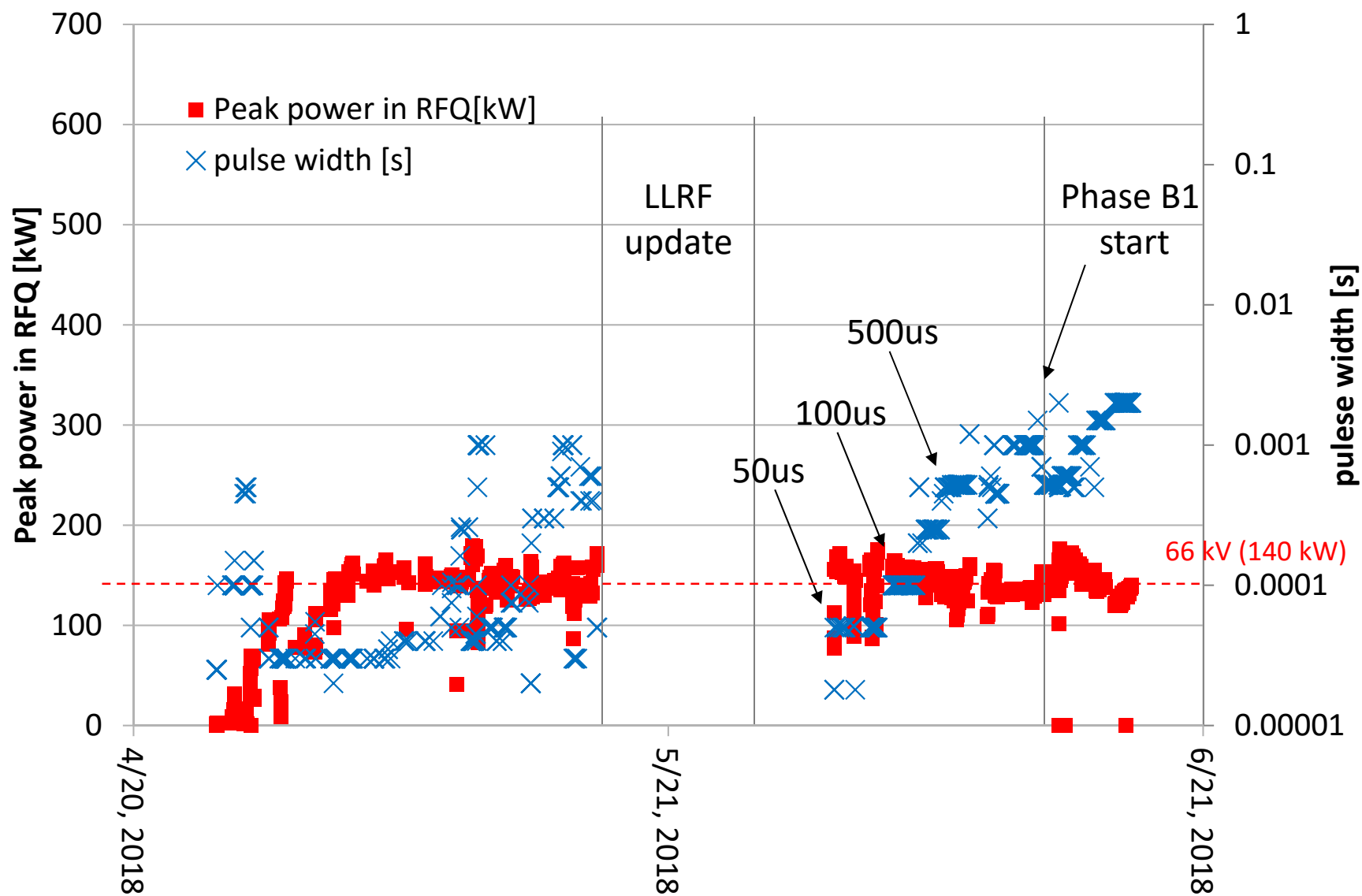


2018/2/15



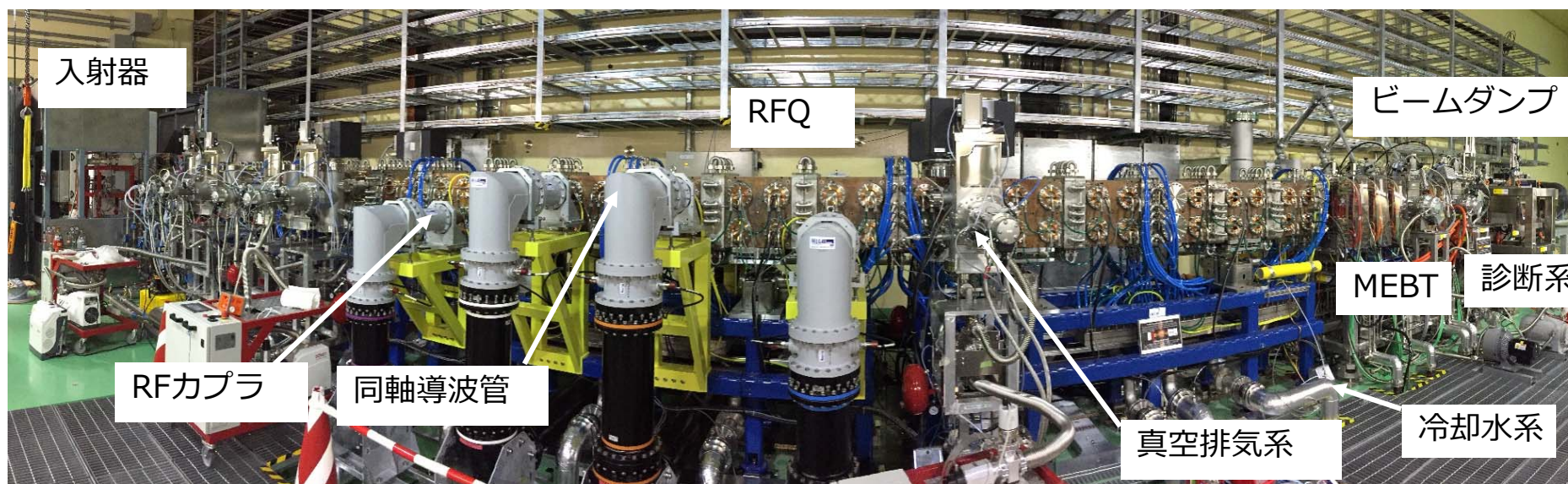
2018/4/22

# RFコンディショニングを再開(4/27~)





# 日欧共同のビーム試験と準備

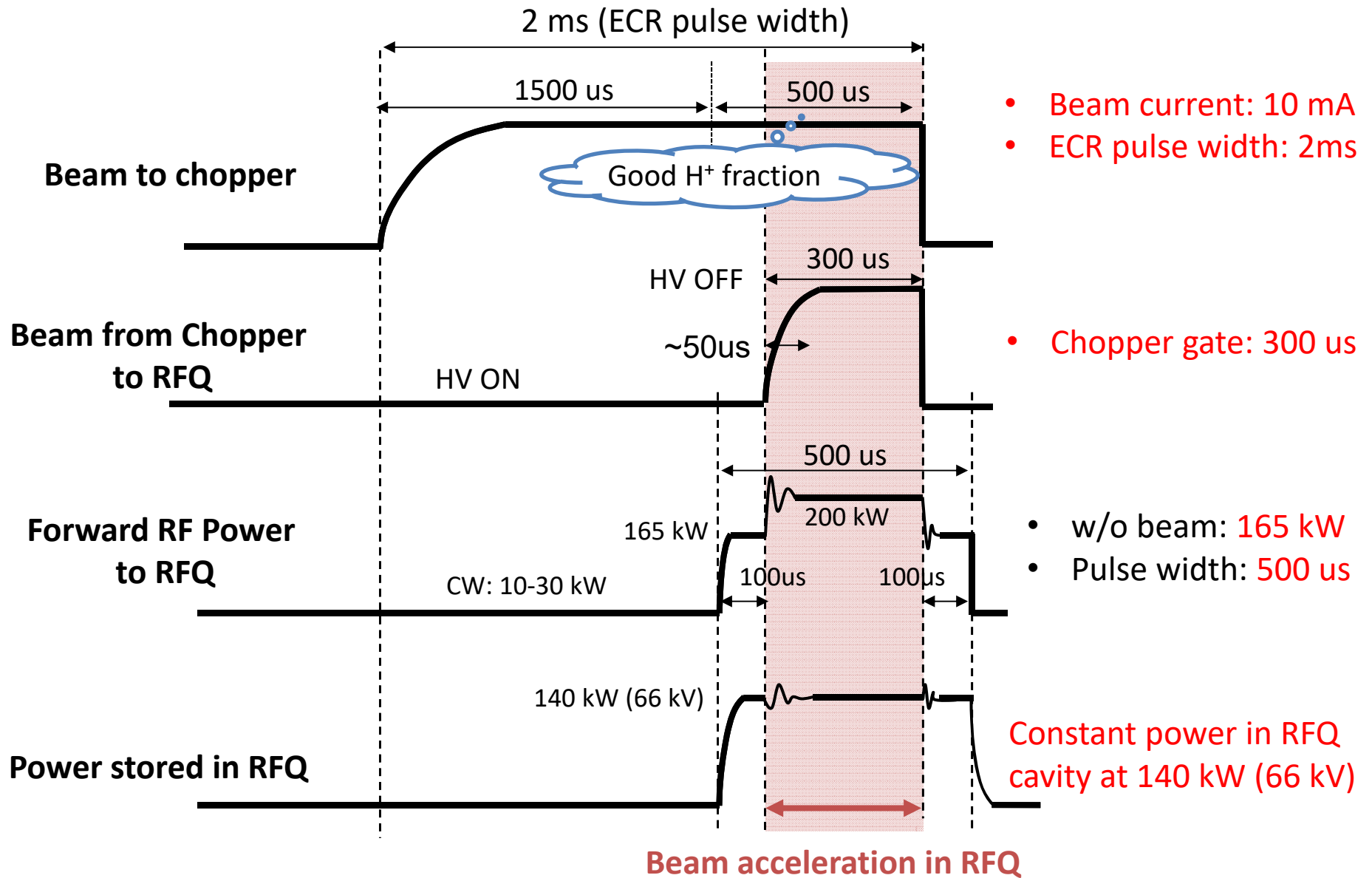


ファーストビーム試験時の様子

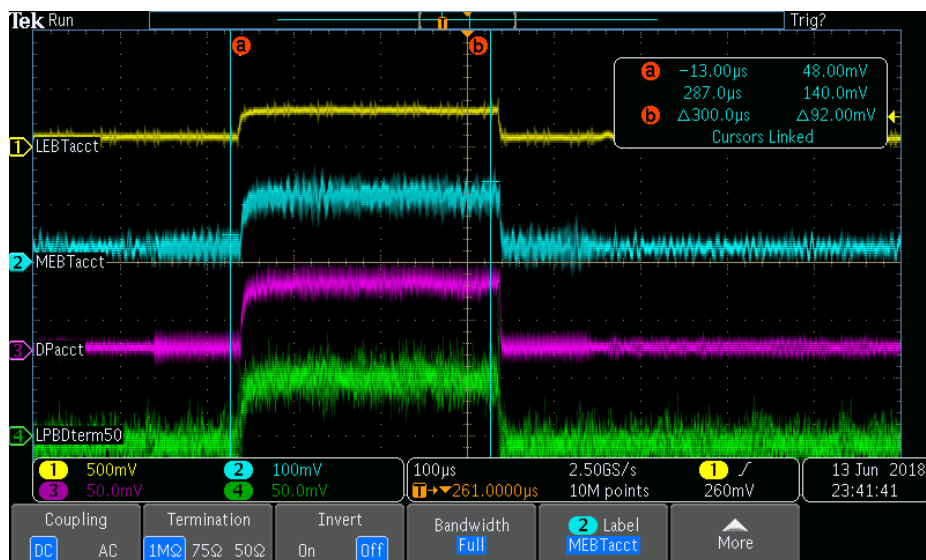
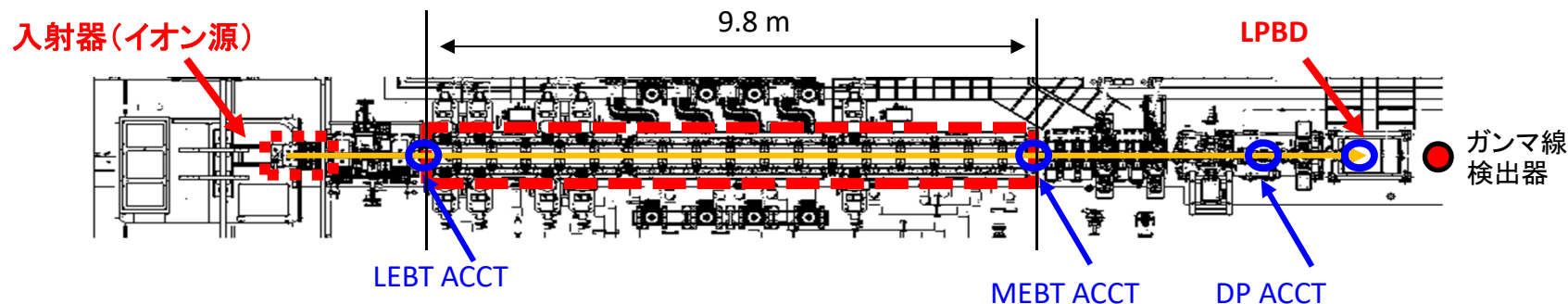


ファーストビーム当日の朝ミーティングの様子

# 陽子ビーム(パルス)加速のためのタイムチャート



# First beam (2018/6/13)

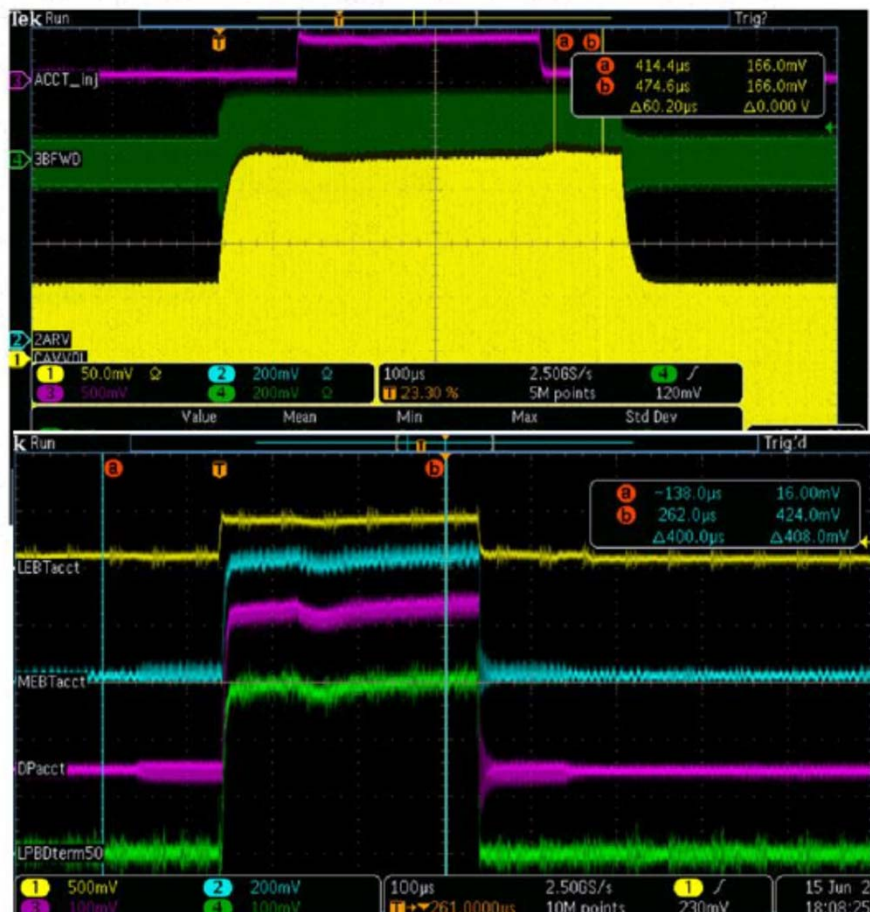


- RFは電圧フィードバックなしでベーン間電圧70 - 75 kVで入射。
- 入射器の条件
  - 引き出し電流 13 mA
  - チョッパゲート幅 300  $\mu$ s
  - 繰り返し 1秒
- 15時ごろ、RFQに初入射。LEBT ACCTでは波形が観測されたが、透過を確認できず。
- LEBTのソレノイドとステアラーを調整したところ、16時半ごろに初めてLPBDへの到達を確認した。この時のビーム電流は以下のとおり。
  - LEBT-ACCT 5.3 mA
  - MEBT-ACCT 1.7 mA (30%)
  - beam dump 1.2 mA (20%)

# 初ビーム加速試験成功



# Second beam (2018/6/15)



- RFは電圧フィードバックをONにし、ベーン間電圧を70 kVでロック。
- LEBTのソレノイドとステアラー(特に垂直方向)を調整したところ、透過率が向上。この時の電流は以下の通り。
  - LEBT-ACCT 7.4 mA
  - MEBT-ACCT 6.3 mA (85%)
  - beam dump 5.4 mA (72%)
- 上記の調整後のLEBTのパラメータは以下の通り。
  - Sol1=90A
  - Sol2=186A
  - Steerer1Hor=-20A, Steerer1Ver=**80A**
  - Steerer2Hor=-20A, Steerer2Ver=20A.

# Third beam (2018/7/13)



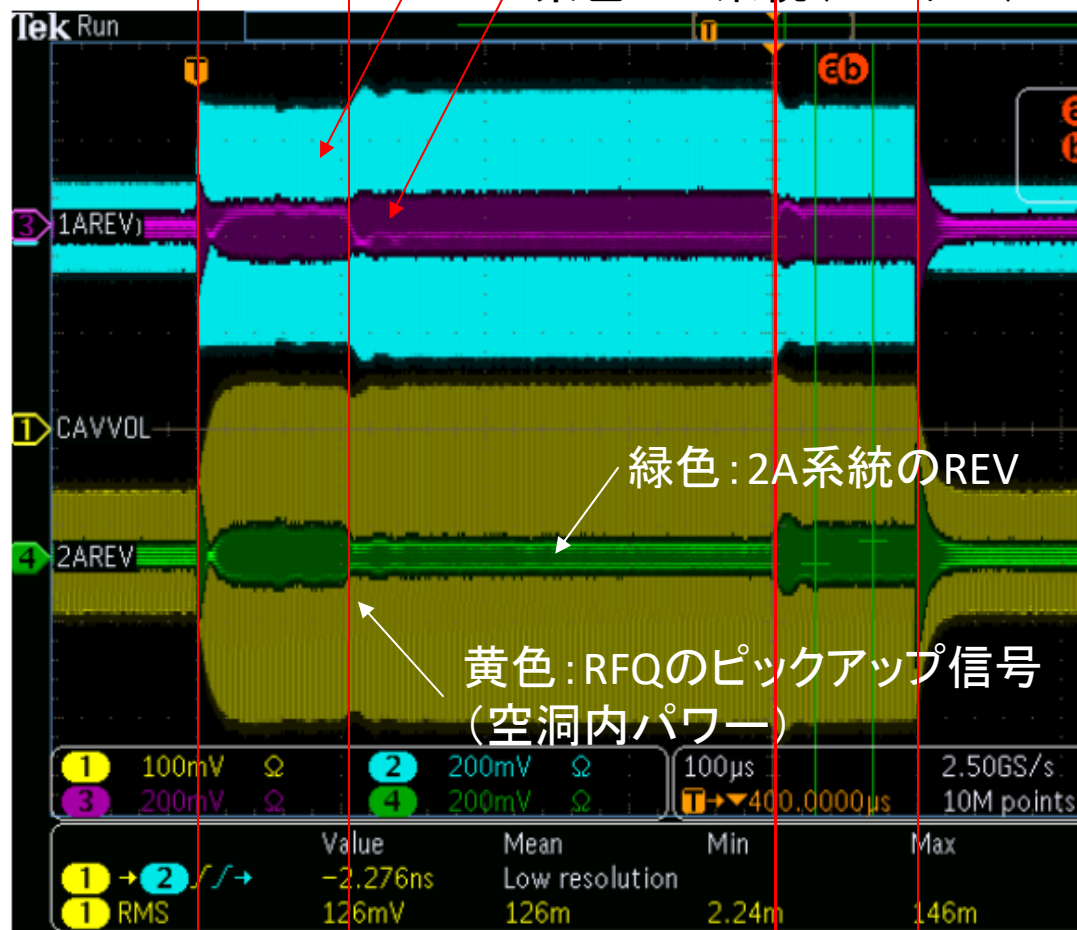
- 6月18日にRFシステムの一部に不具合が発生、ビーム試験を中断。
- 6月22日にRFシステムに高圧を供給する遮断機の1つ(ABBノルウェイ製)に不具合が発生、1系統のRFをONにすることができなくなった。
- 6または7系統のRF入射によるビーム加速にトライするが、難航。7月13日に7系統RF入射による加速に初めて成功。

- 入射電流の増加
  - 引き出し電流 $I_{\text{ext}}=13 \text{ mA}, 20 \text{ mA}, 30 \text{ mA}, 40 \text{ mA}$ (今週予定)
  - 50 mA以上はプラズマ電極の交換が必要。
- LEBTソレノイド、ステアラーの調整によるRFQ透過率の最適化
  - 引き出し電流30 mA時、RFQ透過率95%
    - LEBT-ACCT: 21.9 mA
    - MEBT-ACCT: 20.7 mA (95%)
    - LPBD: 20.8 mA (95%)
- ベーン間電圧を変化させたときのRFQ透過率の測定
- TOFによるビームエネルギー計測
  - 最確値は2.52 MeV
- 各種診断系の動作試験(BPM、FPM、IPM、SEM Grid、RGBLM)
  - BPM、FPMは正常に動作している。
  - IPMは調整中。SEM Gridは信号が見えたが、不具合発生。
- MEBTマグネット、ステアラーの最適化

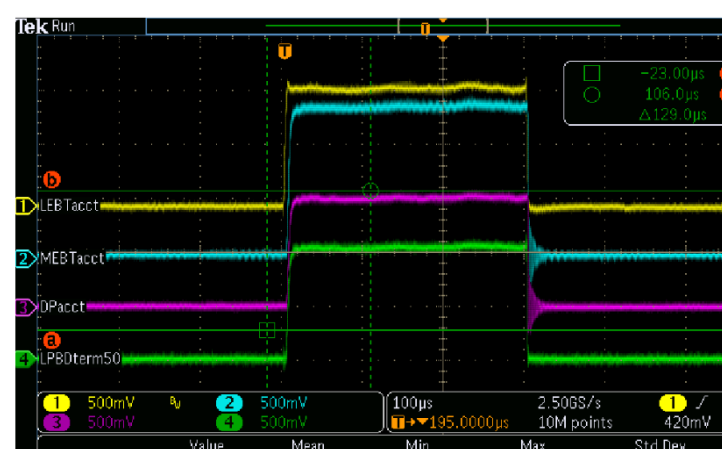
# RFQ パルスビーム試験時のRF信号

水色: 1A系統(マスター)のFWD

紫色: 1A系統(マスター)のREV



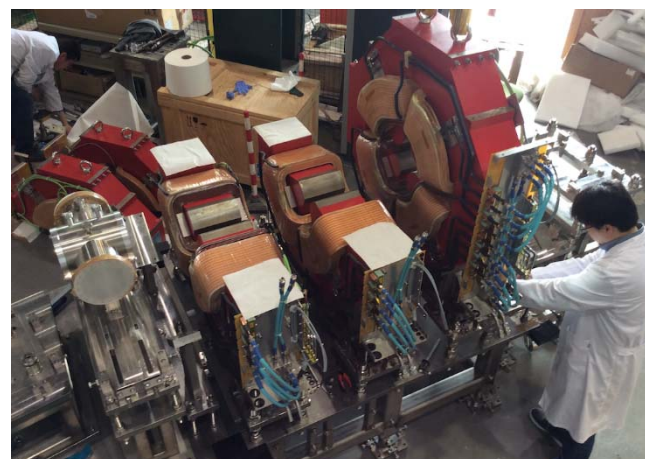
20 mAビーム加速時のACCT波形





- 水素ビーム試験
  - RFQ透過率が最大の時、LEBTステアラー設定値が過大
    - イオン源かLEBTのアライメントに問題がある可能性
    - 9月～10月に再アライメントを予定
  - SEM Gridによるエミッタンス測定
    - SEM Gridの修理が必要？
  - MEBTバンチャーの試験
  - 定格電流(65mA入射)での試験
- 重水素ビーム試験
  - 重水素ビームレベルまでのRFコンディショニングが必要
    - RFシステムの反射インターロック問題、パルス入射時の運転領域の問題を解決する必要がある

# 後段加速器機器の製作状況



- 超伝導SRFの空洞、ソレノイド、カプラーは製作最終段階。まもなく六ヶ所研に向けて輸送。
- 六ヶ所研では、SRF組み立てに向けてクリーンルームの製作が進行中。10月上旬竣工。
- HEBT、BDは完成。7月末にスペインから出荷、9月中旬に六ヶ所研搬入予定。
- BDの据付を10月、HEBTの据付を11月に実施予定。→ **詳細は施設紹介ポスター(FSP015)**

- IFMIF/EVEDA原型加速器は、2017年7月までにRFQ、MEBT、D-Plate、LPBD、RFシステムの据付を完了。
- 2017年7月末、RFQへの8系統RFの同期入射に初めて成功。
- RFQのRFコンディショニングを2017年10月から本格的に開始。12月末までに短パルスで重水素加速に必要なベーン間電圧を達成。
- 2018年4月までにCWで80 kWまでのコンディショニングを実施。しかし、種々のトラブルのため、頻繁な中断。
- 2018年6月13日、RFQによる水素ビームの初加速に成功。水素ビーム試験を継続し、20 mAのパルスビームの加速でRFQ透過率95%を達成。
- 今後、定格電流までの水素ビーム加速試験の後、重水素ビーム試験に移行予定。今年度中に130 mA加速の実証を目指す。
- 2020年1月のSRFまでの統合試験開始に向けて、後段加速器機器（SRF, HEBT, BD）の製作も進行中。まもなく六ヶ所研に搬入される。
- 現在、2025年までのBAの延長（BAフェーズII）を日欧で議論中。この期間に9 MeV, 125 mA, CW加速の実証を行う計画。