

国際共同プロジェクトIFMIF原型加速器 (LIPAc)の開発

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
春日井 敦

赤木智哉^{A)}、蛭沢貴^{A)}、平田洋介^{A)}、一宮 亮^{A)}、近藤 恵太郎^{A)}、前原 直^{A)}、坂本 慶司^{A)}、
新屋 貴浩^{A)}、杉本 昌義^{A)}、ナスター ホアン^{B)}、カラ フィリップ^{C)}、
ジッコ エルベ^{C)}、ハイディングー ローランド^{C)}、フィリップス ガイ^{C)}

^{A)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST) /Rokkasho

^{B)} IFMIF/EVEDA Project Team

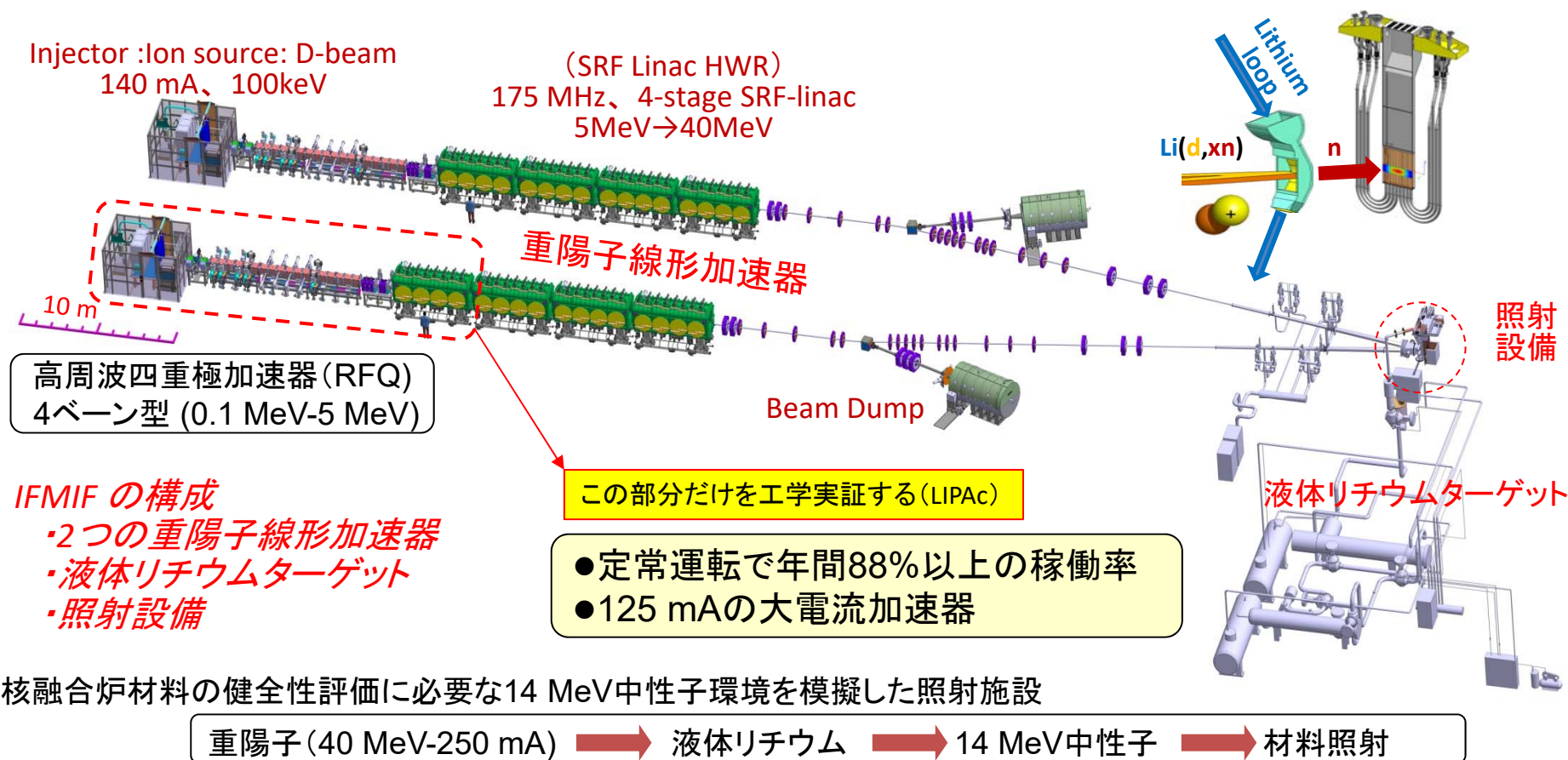
^{C)} Fusion for Energy (F4E)

- IFMIF原型加速器の概要
- IFMIF原型加速器の据付と初期試験結果(RFQ)
- クライオモジュールとクライオプラントの状況
- 今後の進め方
- まとめ

IFMIF (国際核融合材料照射施設)

IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility)

加速器駆動型中性子源 $\text{Li}(d,n)$ 反応による中性子
材料照射の研究開発、核融合炉の運転に必要な安全性、
材料、施設の許認可等に用いる



IFMIF原型加速器 (LIPAc) の構成

Linear IFMIF Prototype Accelerator



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⁺140mA)

Injector
CEA Saclay

RFQ (5MeV/D⁺130mA)

RFQ
INFN Legnaro

RFQ
QST

SRF
(9MeV/D⁺125mA)

SRF Linac

CEA Saclay

CIEMAT Madrid

HEBT

CIEMAT Madrid

BD

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

計測系
CEA Saclay
 CIEMAT Madrid

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

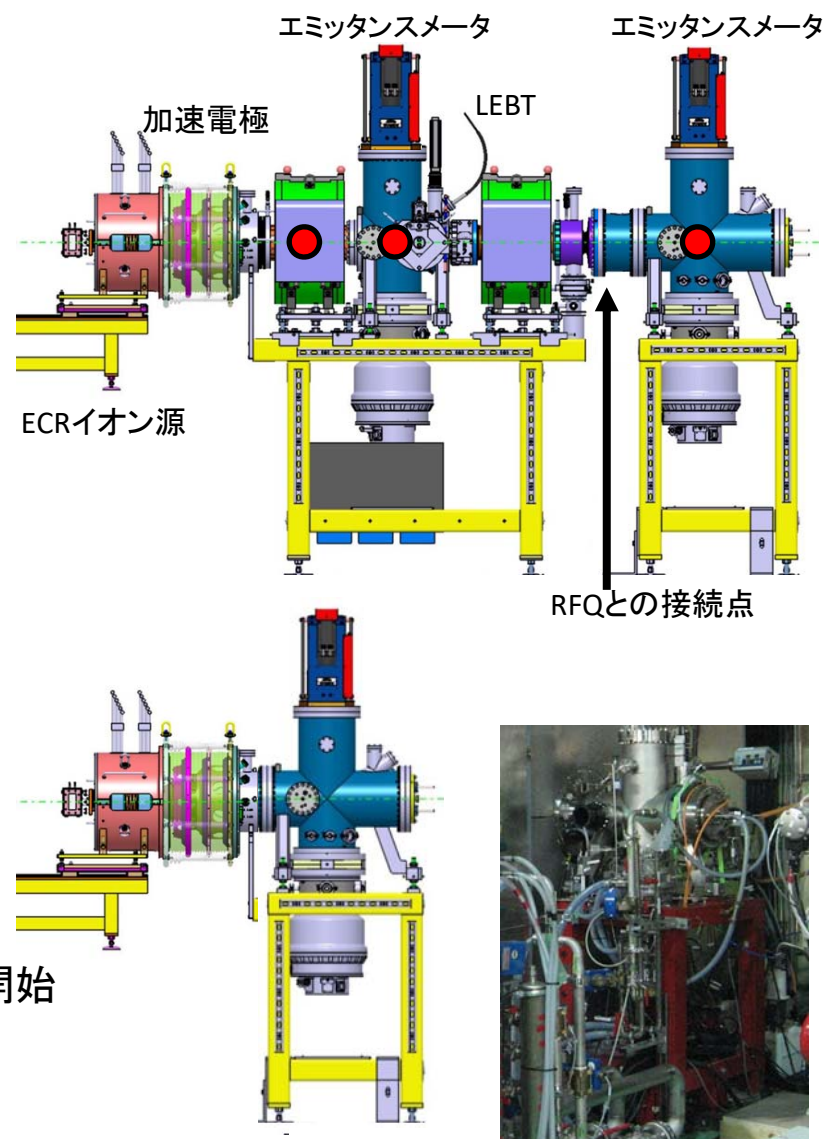
重陽子ビーム入射系の最初のマイルストーン達成



(2015年)
 原型加速器の最初のマイルストーンである
 D+で、加速エネルギー100keV、
 イオン電流140mA、CW、エミッタンス $<0.3\pi$ mm mrad
 を個別に達成

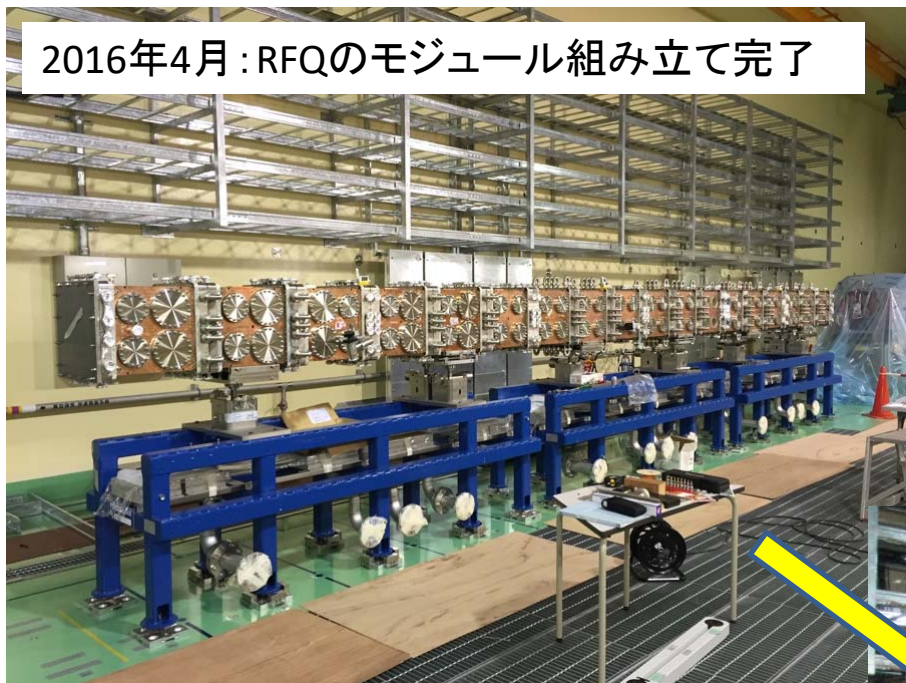
(2016年～)
 RFQ、MEBT、RFシステム、クライオシステム等の据付を開始

(2017年)
 ビームシミュレーションとの比較のため、
 イオン源単体のビーム特性試験を別途実施(3ヶ所でのエミッタンス計測)



RFQ, MEBT, 診断系、LPBDの据付

2016年4月：RFQのモジュール組み立て完了



MEBT



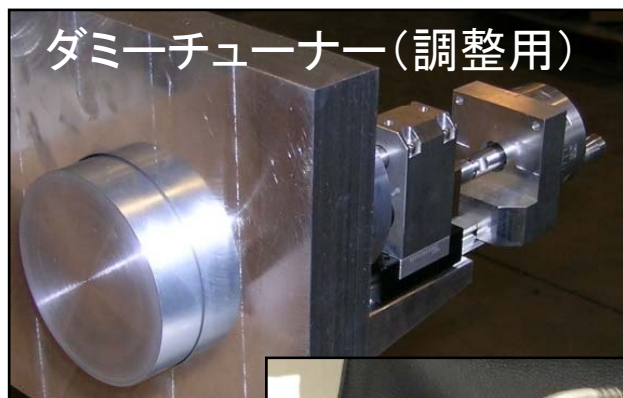
ビーム診断系



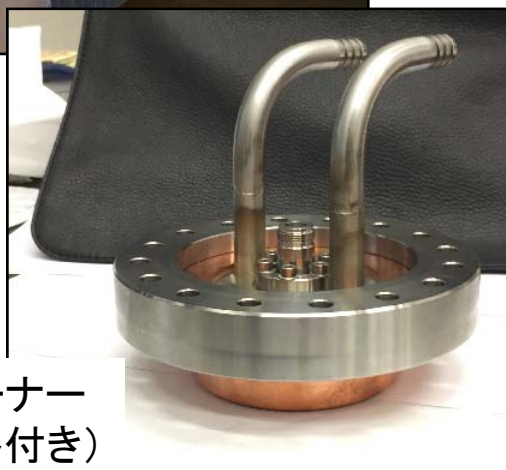
2017年6月：RFQの試験準備が完了



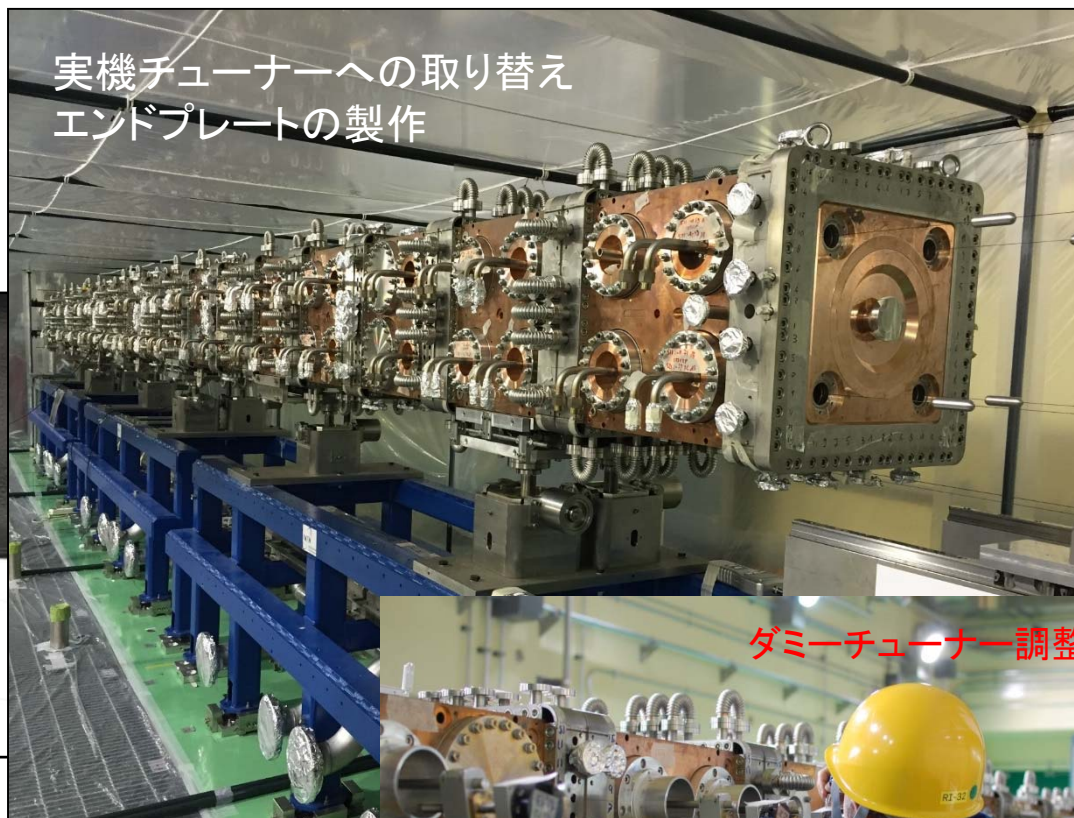
- RFQ、MEBT、ビーム診断系がビームラインに並ぶ
- RFQにRFカップラ、同軸導波管、真空排気系が接続される
- 冷却水系を整備
- MEBT、ビーム診断系、LPBDを整備



ダミーチューナー(調整用)



実機チューナー
(冷却ポート付き)



実機チューナーへの取り替え
エンドプレートの製作

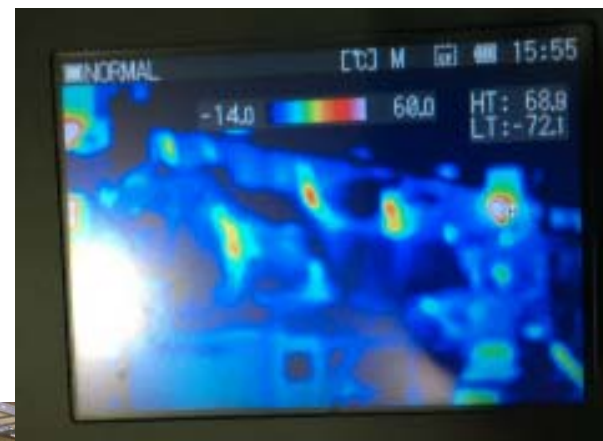


ダミーチューナー調整

- RFQの共鳴周波数の測定とRFQ内の電界分布測定、模擬チューナー(ダミーチューナー)を用いたチューニングを六ヶ所で実施。
- 約100個のダミーチューナーの挿入距離の最適化を実施。調整結果に基づき、実機用チューナーとエンドプレートを製作。
- 最終調整の結果、要求される共鳴周波数および設計通りの電界分布が得られたことを確認。

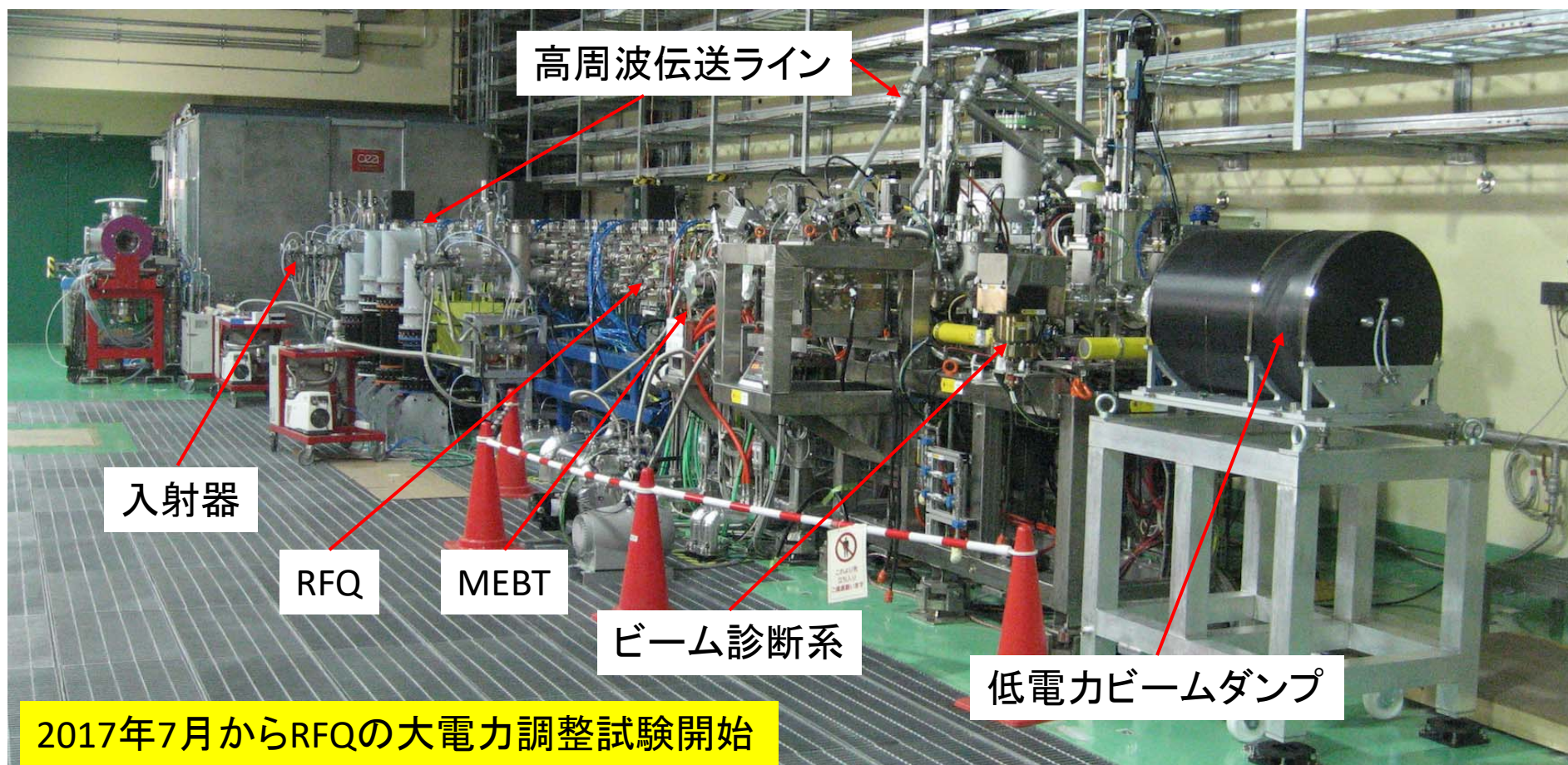
RFQのベーキング

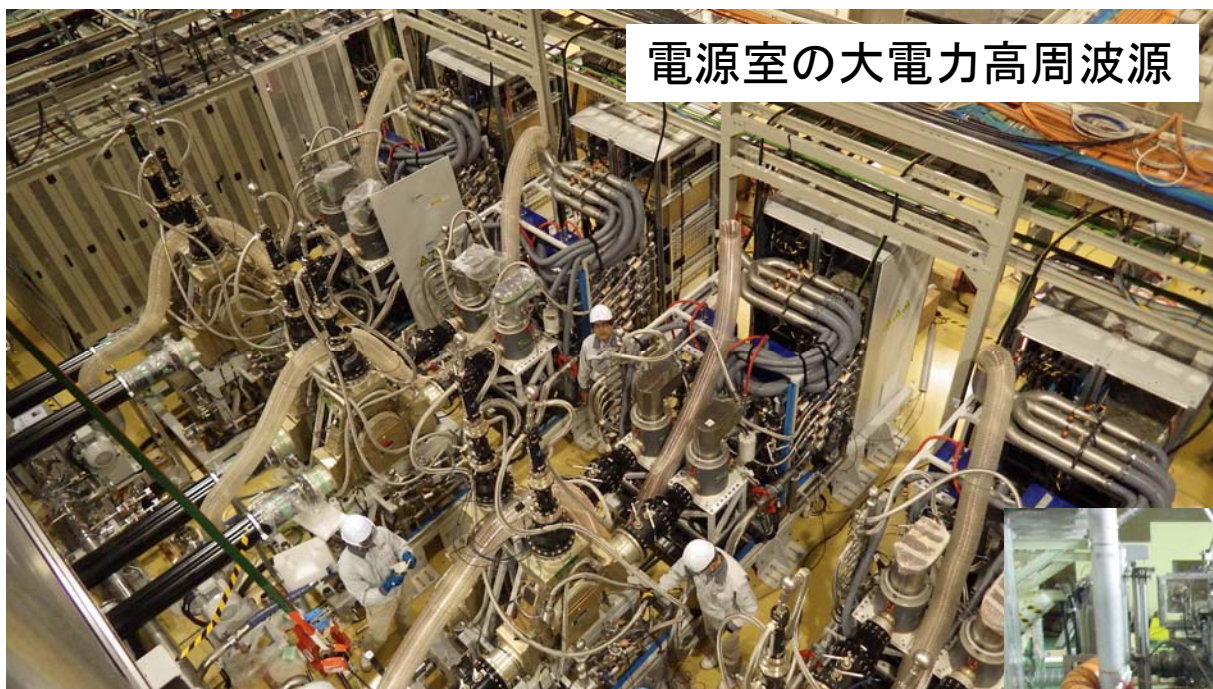
- ・2016年12月にRFQのベーキングを実施
- ・断熱材でRFQを全て覆い140°Cの熱風を送り込み、RFQの外側を加熱。内部は真空排気。
- ・全体を100 °Cに約1週間保持するため、昼夜連続ベーキングを行い12月28日に終了



IFMIF原型加速器の試験準備完了

入射器、RFQ、高周波伝送ライン、MEBT、ビーム診断系、低電力ビームダンプを
ビームラインに設置し、RFQの高周波試験の準備が完了。





電源室の大電力高周波源



200kWの4極管
(テトロード)の
調整

175MHz-200kW-CW(約1.5時間)の出力を8系統のRF源について、ダミーロードを用いて確認。

大電力高周波源の調整試験完了後、8系統の9インチ同軸導波管及びエルボを高周波源からRFQまで地下ピットを通して接続完了

RFシステムのケーブルは約450本、総延長15km
加速器システムのケーブルは約580本、総延長26km



RFQの初期調整試験結果



2017年7月13日にRFの1系統のみRFQに入射

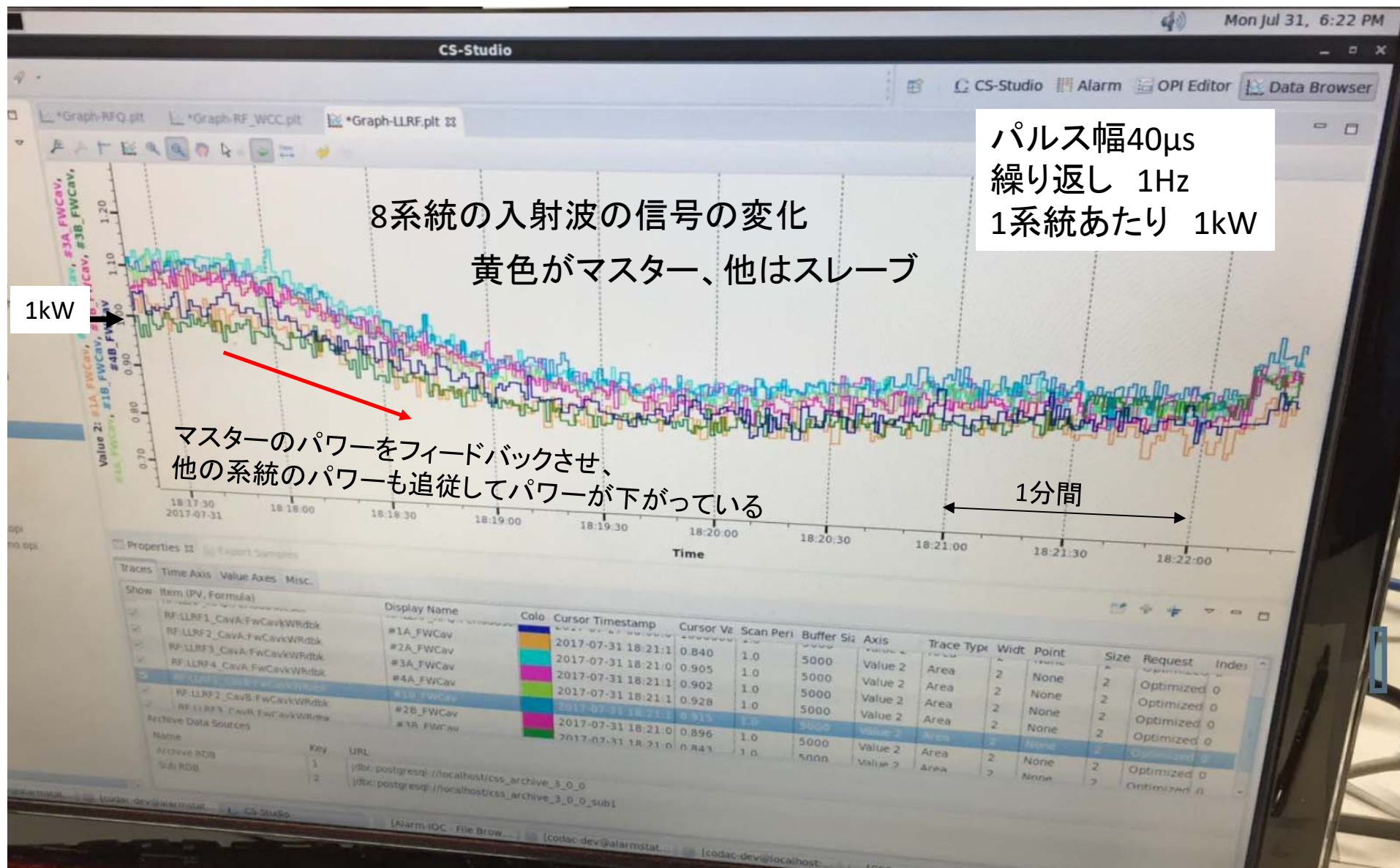
- ・低電力(数kW)、短パルス(15 μ s)、低デューティ(2Hz)
- ・ \sim 10%の空洞への入力、 \sim 70%の同じラインからの反射、 \sim 20%他のラインへの結合
- ・RFQ内部の真空度の変化確認

- 8系統のRFの同期を調整し、すべての同時入射成功(2017年7月31日)
- White Rabbitを用いて、LLRFの出力をnsオーダーで同期させることができた。

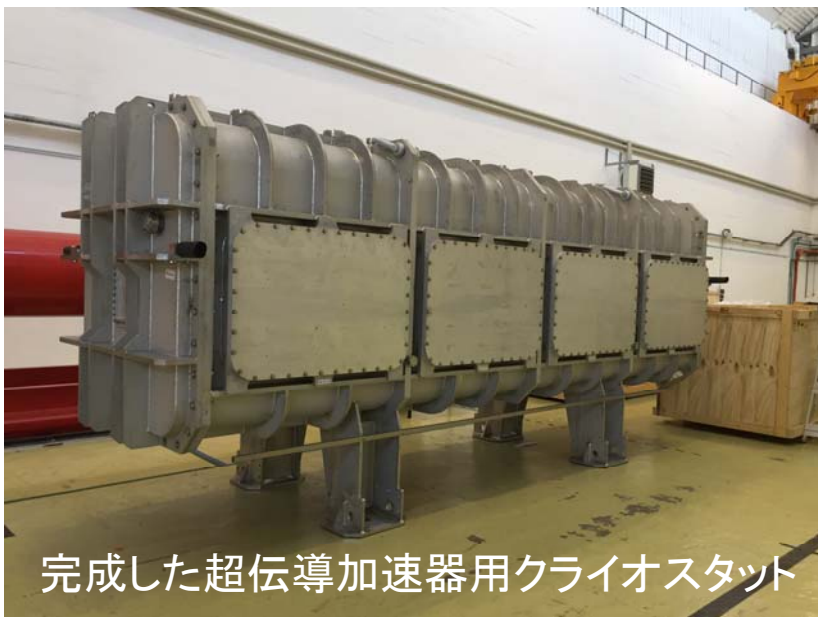


10月から24時間運転によるRFコンディショニングを実施予定(12月までの予定)

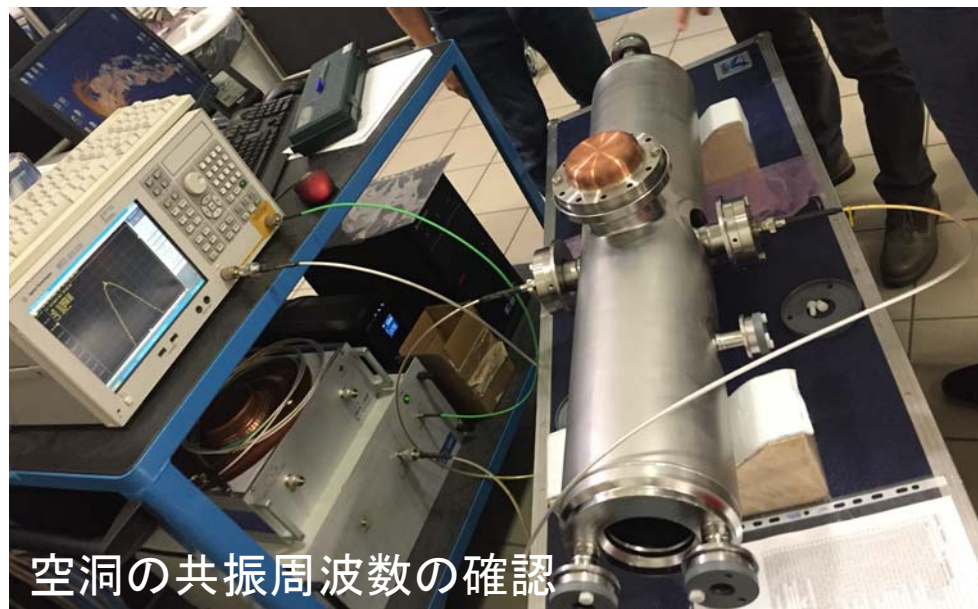
8系統同時入射(7月31日午後6時)



超伝導加速器の製作状況



完成した超伝導加速器用クライオスタット



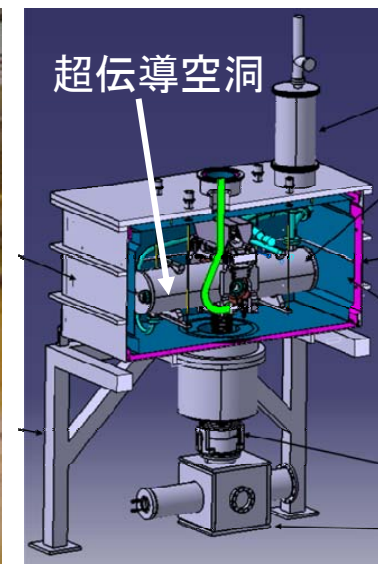
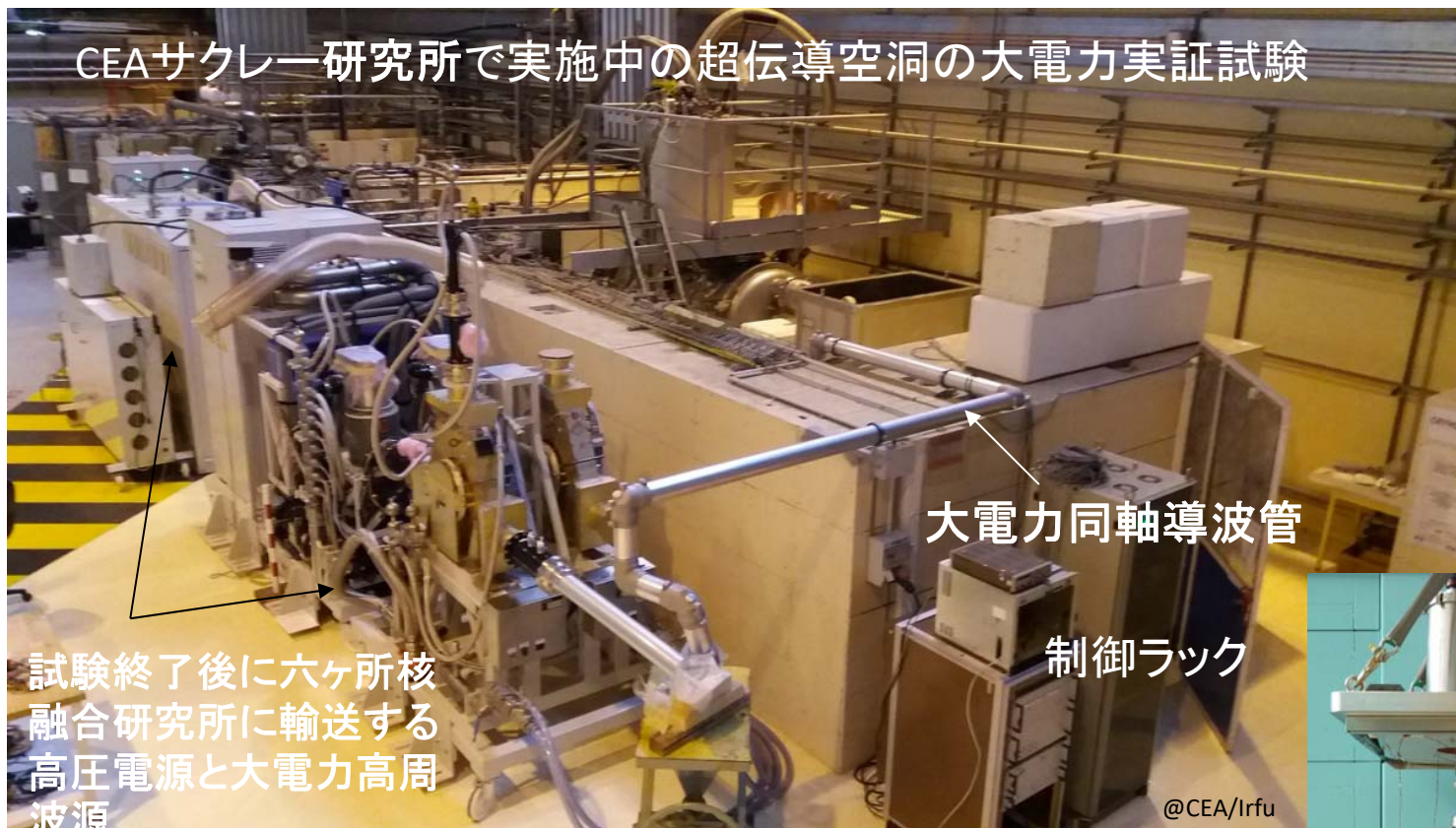
空洞の共振周波数の確認

- HWR実機空洞は順次製作中。8式全部製作が完了するのは2018年2月末の予定。
- クライオスタットや熱シールドなどの内部コンポーネントはほぼ調達完了。
- スペインCIEMAT担当のソレノイドコイルと電流リードが遅れている(2018年6月予定)
- 2018年10月から六ヶ所核融合研究所に設置するクリーンルームにおいて、組立を開始。
- 2019年4月からビームラインに据付開始予定。

六ヶ所核融合研究所においてクラス100のクリーンルームを今年度準備予定
クライオモジュール組み立て及び性能確認においてKEKの協力

超伝導空洞の大電力実証試験

CEAサクレー研究所で実施中の超伝導空洞の大電力実証試験



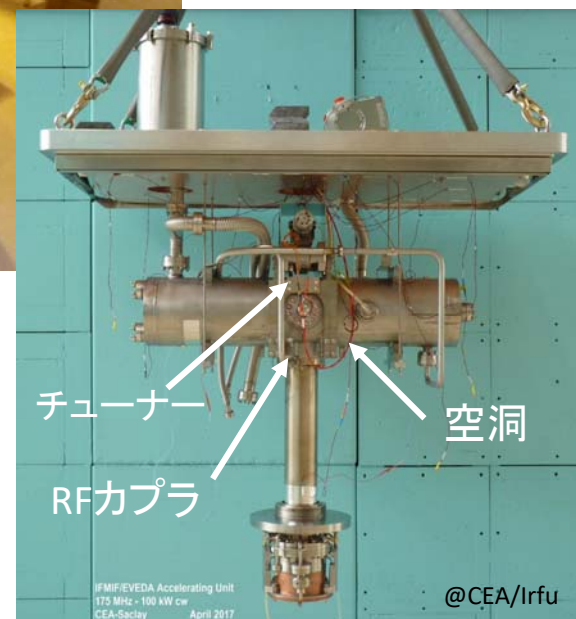
試験終了後に六ヶ所核融合研究所に輸送する
高圧電源と大電力高周波源

大電力同軸導波管

制御ラック

@CEA/Irfu

- 2017年4月にCEAサクレー研究所において、チューナー、RFカプラを組合わせた大電力実証試験を実施(プロトタイプ)
- 4.5MV/mの加速電界を安定に達成
- 実機空洞についても11月に試験を実施予定

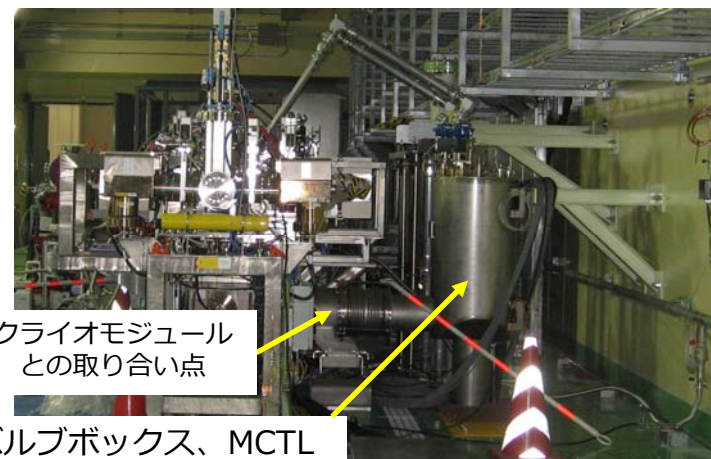
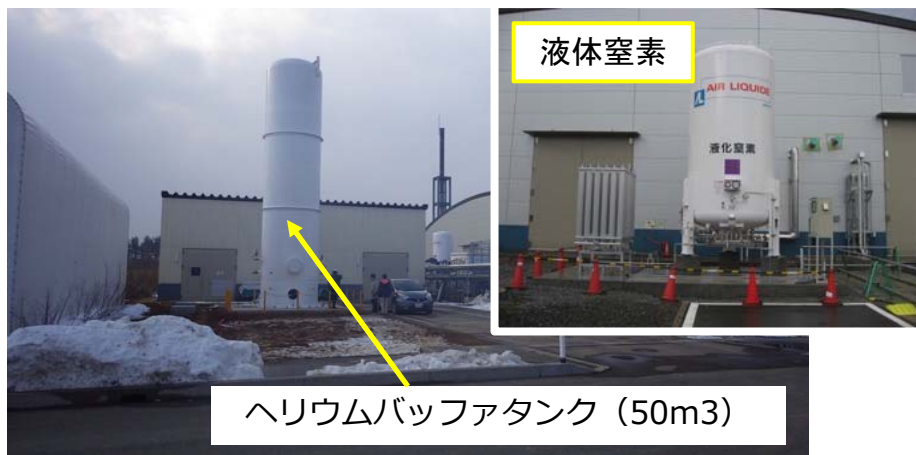
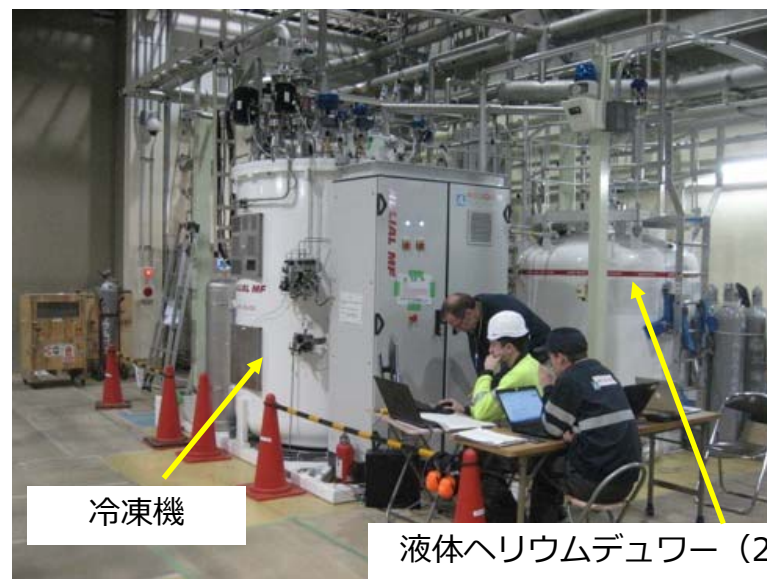


IFMIF/EVEDA Accelerating Unit
175 MHz - 100 kW cw
CEA-Saclay April 2017

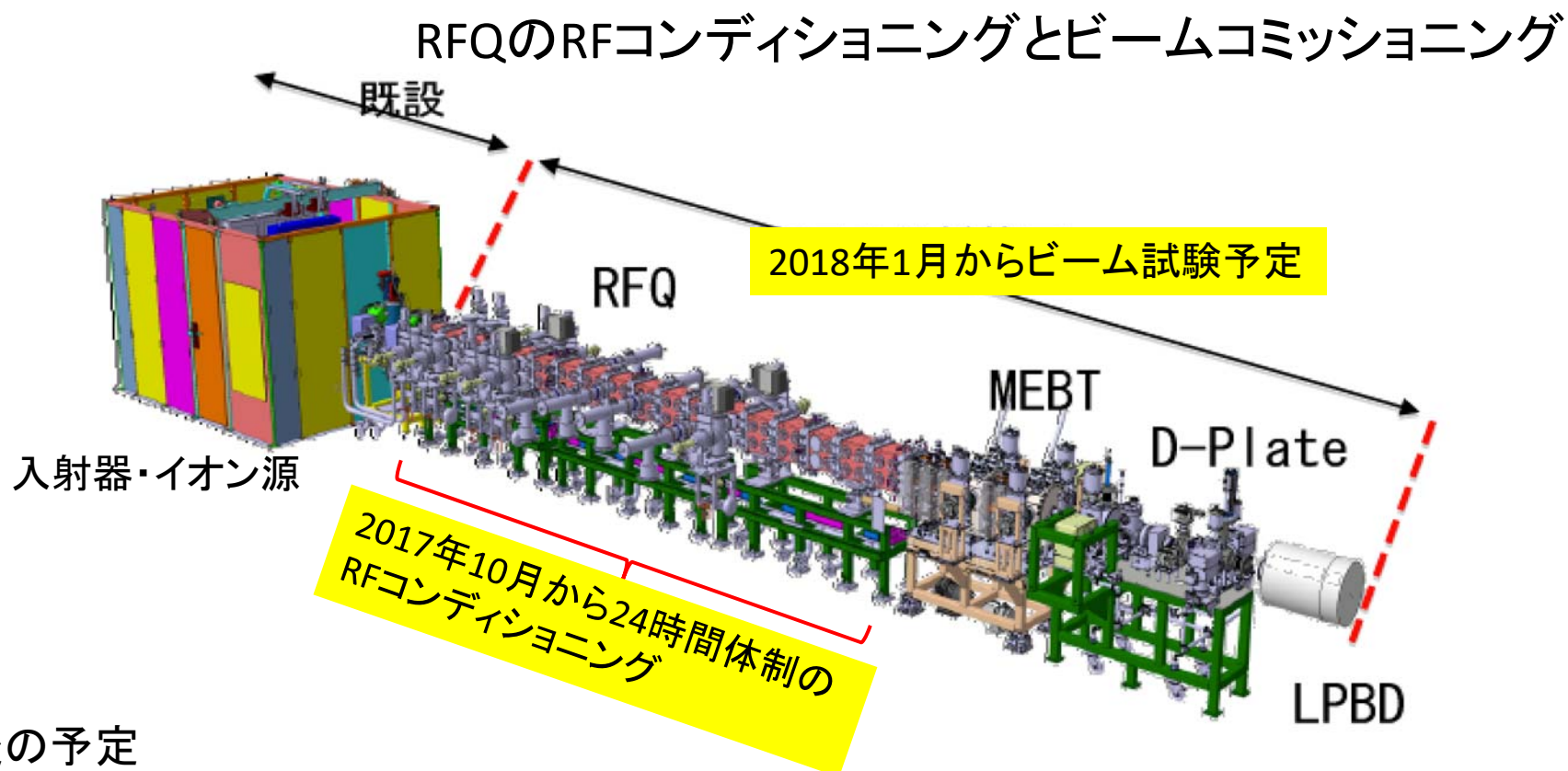
@CEA/Irfu

クライオプラントの据付調整

2017年2月に据付完了。4月に試運転を完了。予定通りの冷却性能を確認。
青森県における完成検査の準備中(冷凍保安規則)。8月末申請予定。



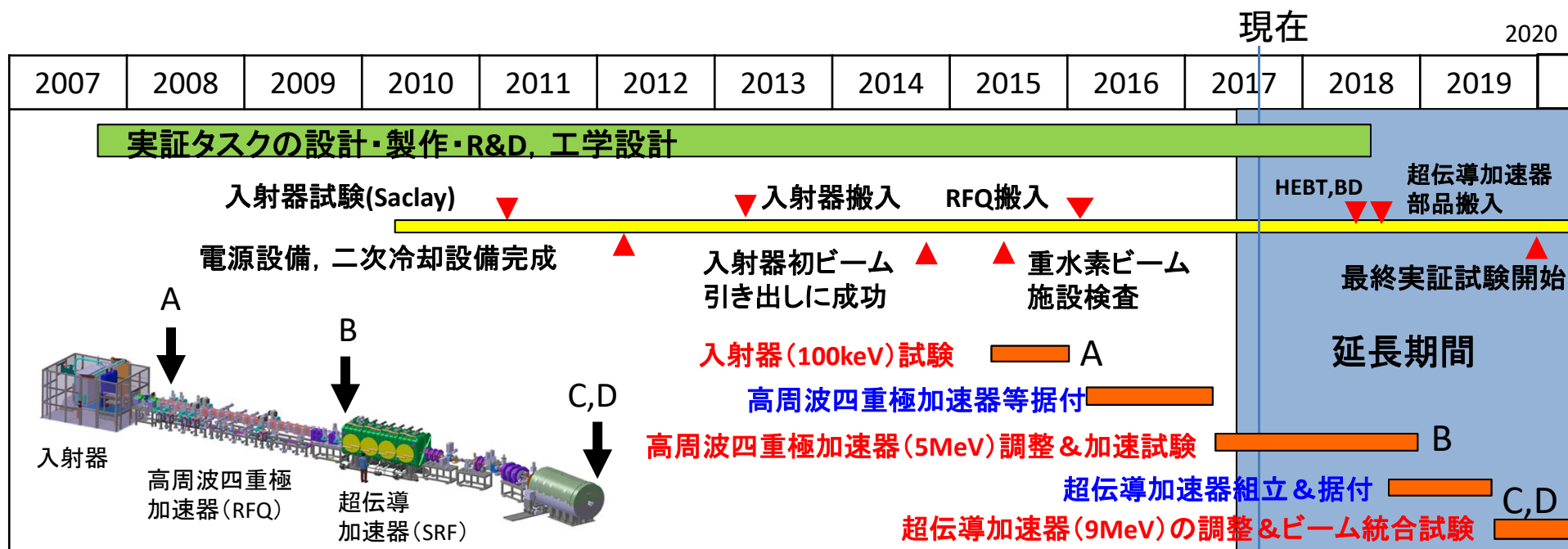
今後の進め方



今後の予定

- ・7月～ RFQの高周波試験(チェックアウト、RFモジュールの同期)
- ・9月～ 受電系及び各機器の定期検査
- ・10月～ RFQの高周波コンディショニング(24時間体制)
- ・12月 クライオプラントの試運転
- ・1月～ RFQビームコミッショニング(24時間体制)

プロジェクト完了までのスケジュール



- 2017年7月: RFQの高周波入射試験を実施
- 2018年5月: HEBT及びBDがスペインより搬入予定
- 2018年10月: 超伝導加速器の組立を六ヶ所核融合研究所にて実施予定
- 2019年4月: クライオモジュールをビームラインへ組み込み
- 2019年8月: クライオモジュールの調整及びコンディショニングを開始
- 2020年1月: RFQ及び超伝導加速器を接続した状態でビーム統合試験の開始
- 2020年3月: プロジェクトの終了
- 2020年4月~: 新しい枠組みでの日欧協力を模索(5年間を目処)、その後、核融合中性子源の建設へ

- RFQ、MEBT、診断系、低電力ビームダンプ、高周波源、クライオプラントが据付完了。
- RFQのRFエージング調整試験を7月から開始。7月31日に8系統の同位相同時入射を実証。
- 1月からRFQのビームコミッショニング開始予定。
- 超伝導空洞の製作継続中。2017年4月にプロトタイプ空洞の大電力実証試験をCEAサクレー研究所で実施。実機は11月予定。
- 液体ヘリウム製造設備の据付・性能運転が完了。8月末に完成検査審査申請予定。

これまで動きが鈍かったIFMIF原型加速器の進展が、ここ2～3年で急速に進展した。
大電流重陽子加速器の開発に向け、国内の大学、研究機関、産業界と協力していきたい。