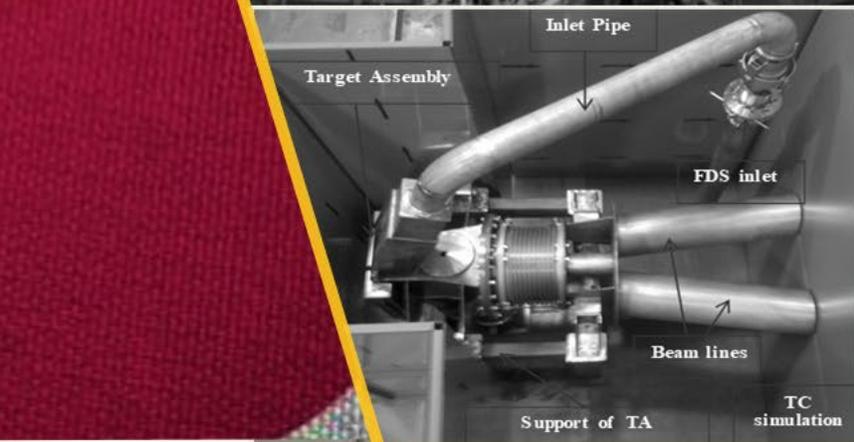
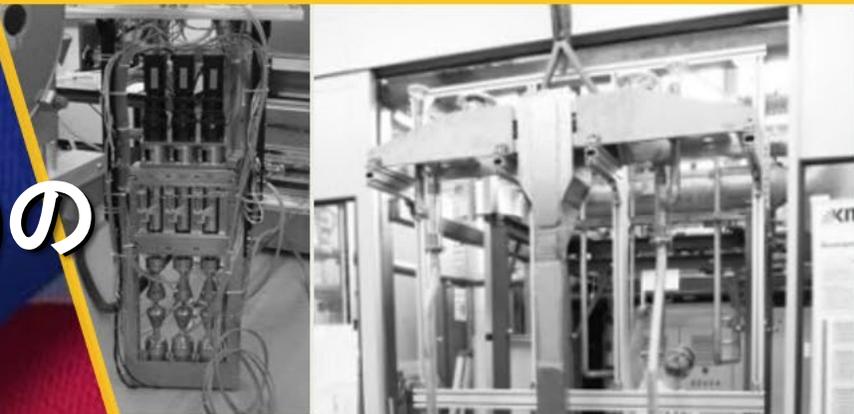


IFMIF原型加速器(LIPAc)の 実証試験の進展

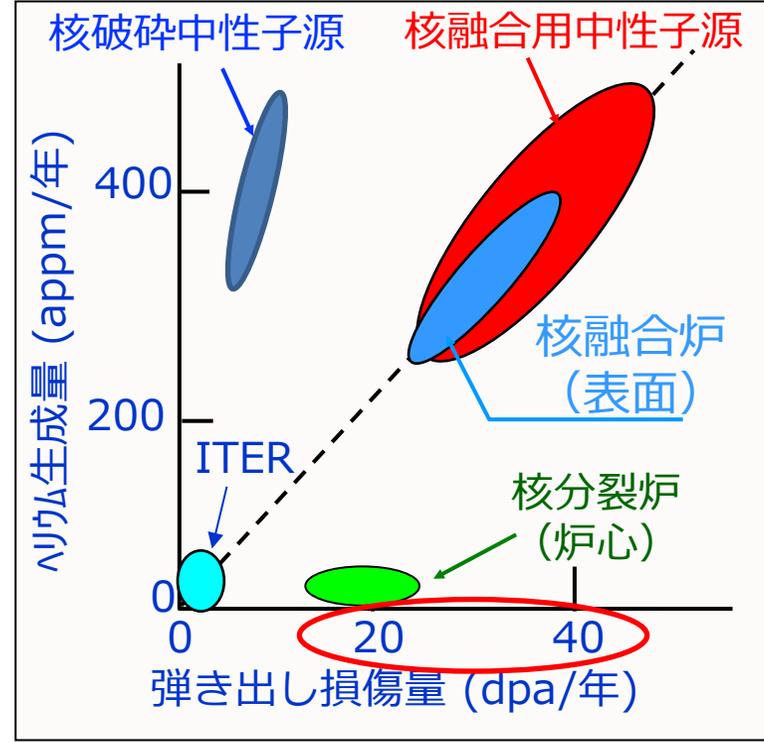
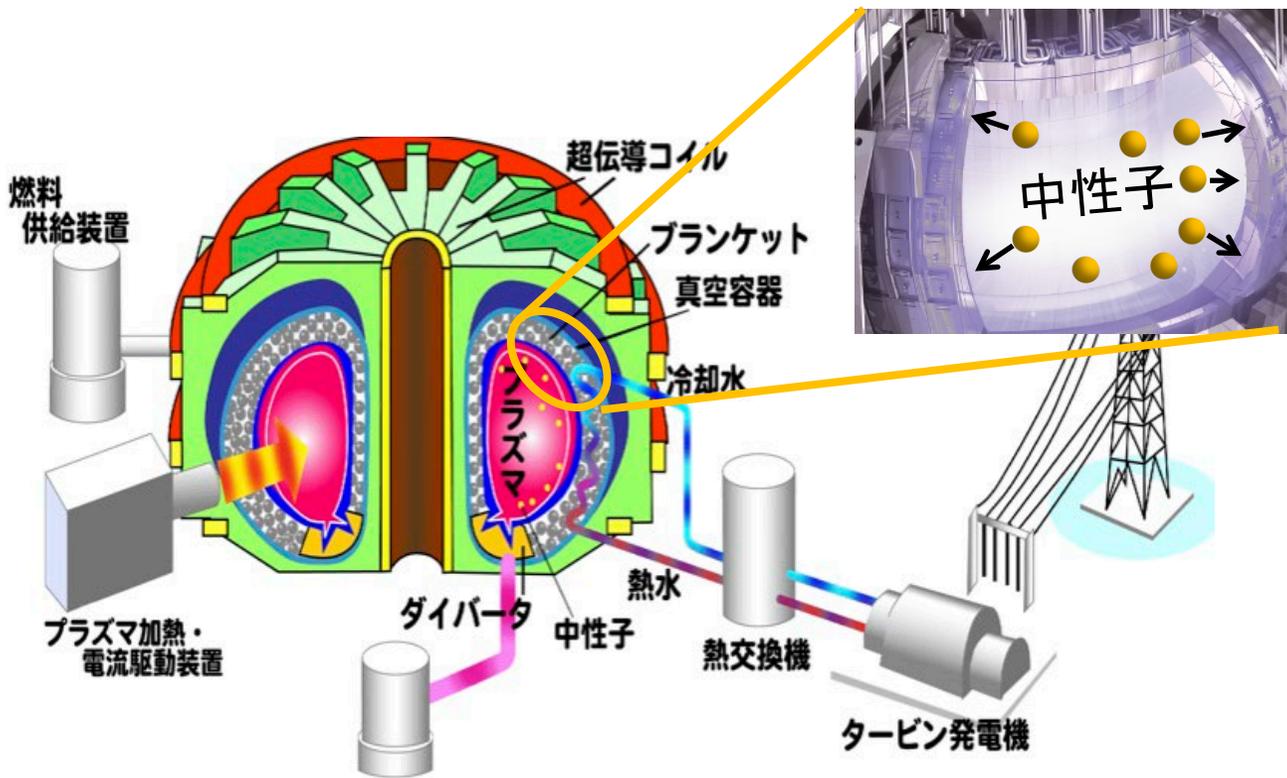
近藤 恵太郎 (QST)

IFMIF/EVEDA Integrated Project Team
(QST, F4E, IFMIF/EVEDA Project Team, CEA, CIEMAT,
INFN, SCK CEN, IFMIF-DONES)

第22回日本加速器学会年会
東京都市大学 – 2025年8月6日



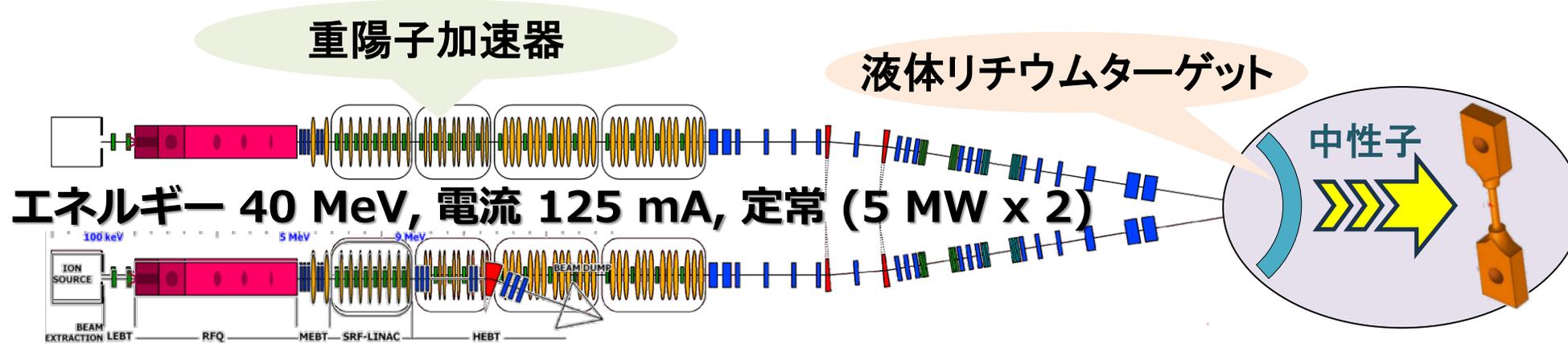
核融合炉で発生する14 MeV中性子の照射を受けた材料には様々な照射効果が発生
 (弾き出し損傷、ヘリウム生成、硬化、脆化、クリープ、放射化)
 ⇒ **耐えられる材料の研究開発を実施 (低放射化フェライト鋼)**



長期影響の正確な評価には核融合炉と同等環境での中性子照射試験が必要
 ⇒ **D-Li反応を用いる加速器駆動型中性子源が最も有望**

IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility)

D-Li反応を用いる加速器駆動型の強力中性子源施設



原型炉と同等の
中性子束
(20 dpa/y)

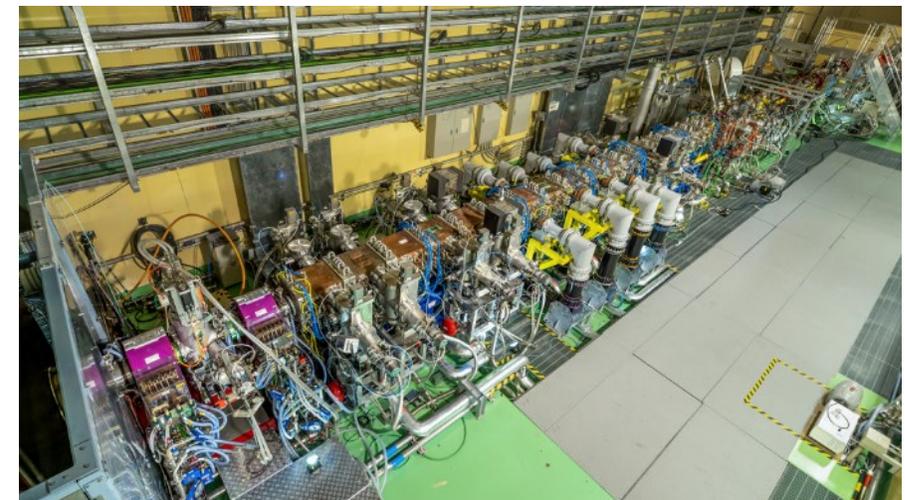


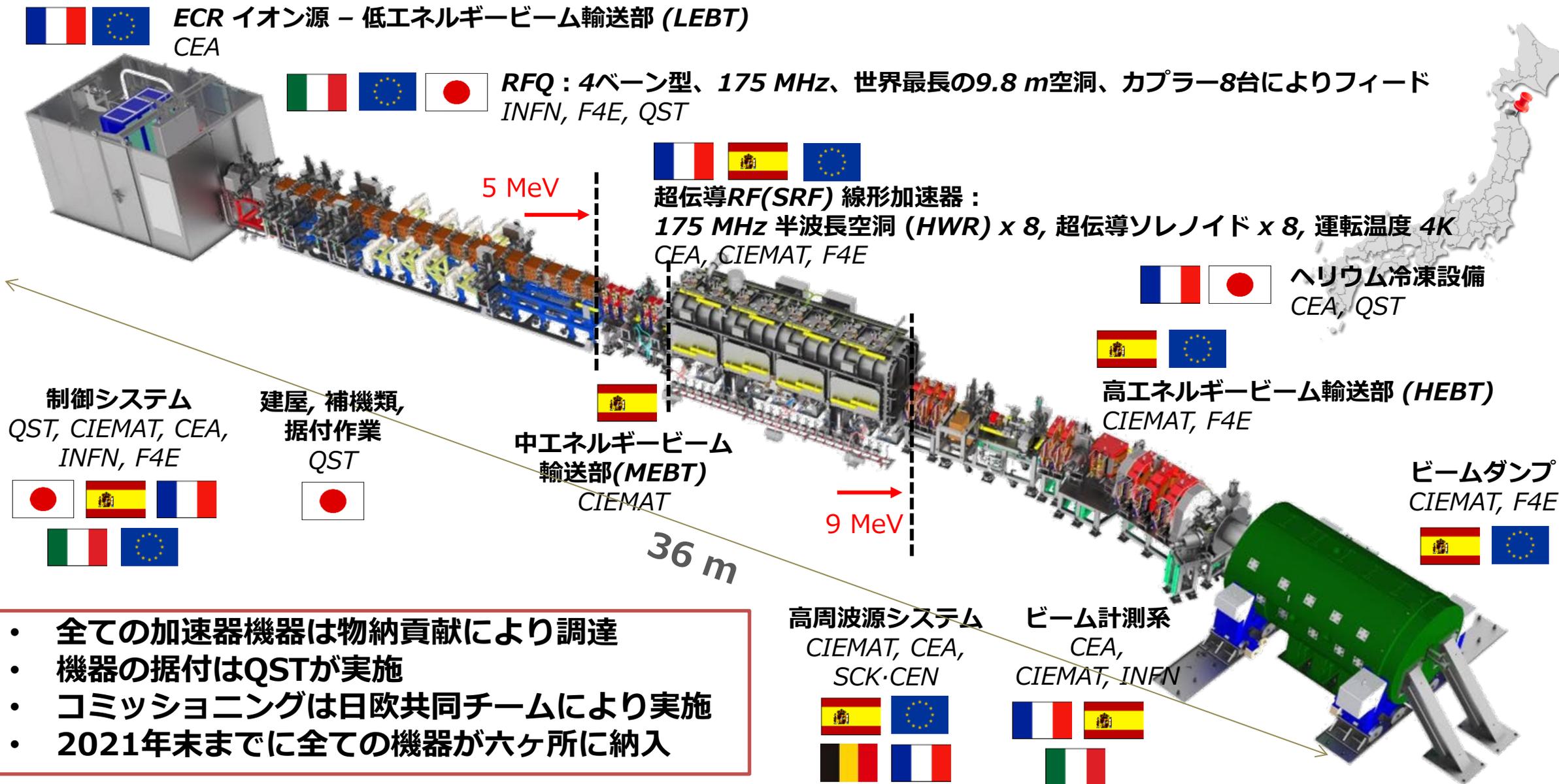
原型炉の材料の
長期健全性を
検証

IFMIF原型加速器 (LIPAc)

エネルギー 9 MeV, 電流 125 mA, 定常 (1.125 MW)

日欧の幅広いアプローチ (BA) 協定の基で、工学実証・工学設計活動 (EVEDA) の一環として実証試験を実施中
中性子源用加速器の実用化のための技術実証を目指す





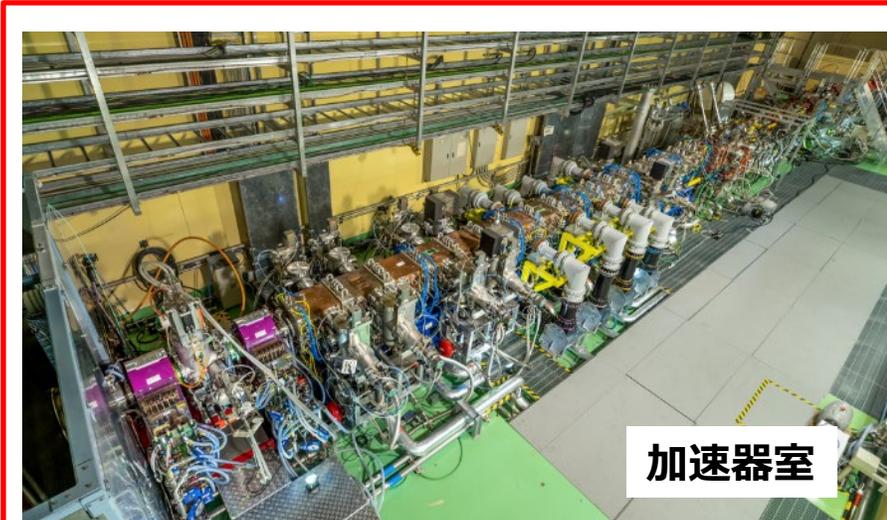
- 全ての加速器機器は物納貢献により調達
- 機器の据付はQSTが実施
- コミッショニングは日欧共同チームにより実施
- 2021年末までに全ての機器が六ヶ所に納入



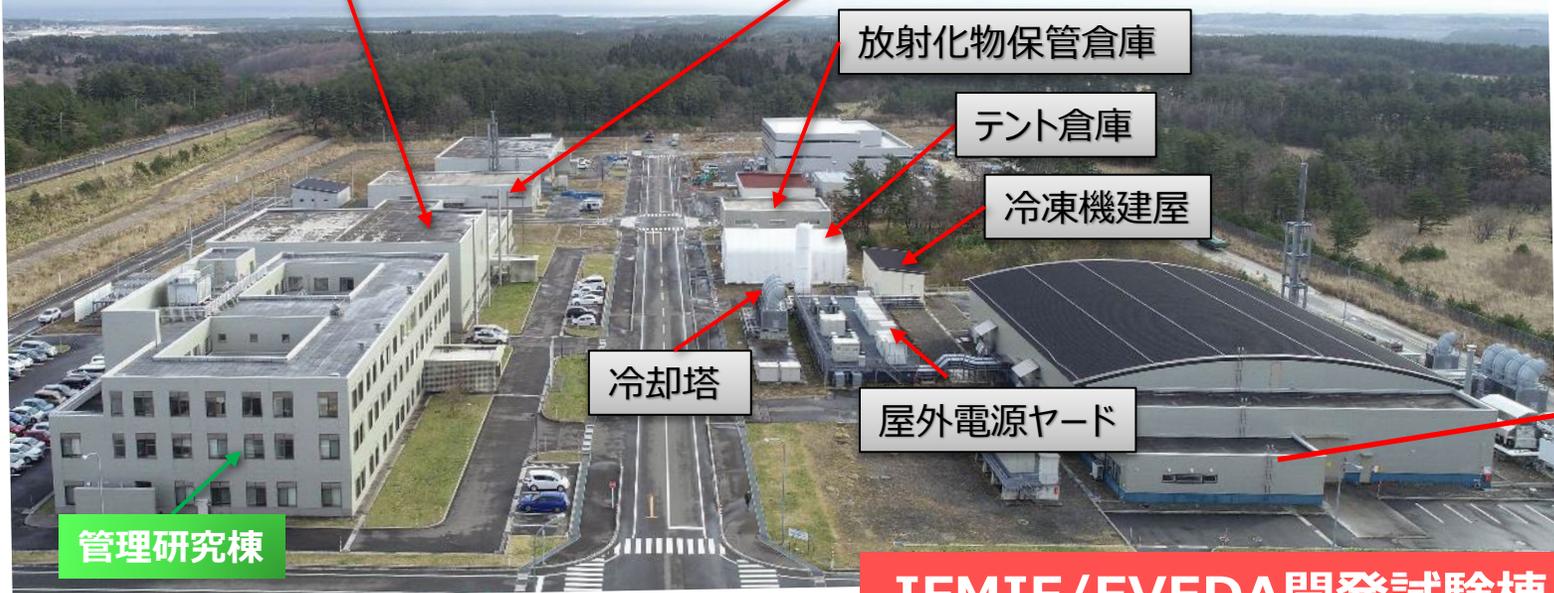
中央制御室



共同研究棟 (SRF組立作業)



加速器室



放射化物保管倉庫

テント倉庫

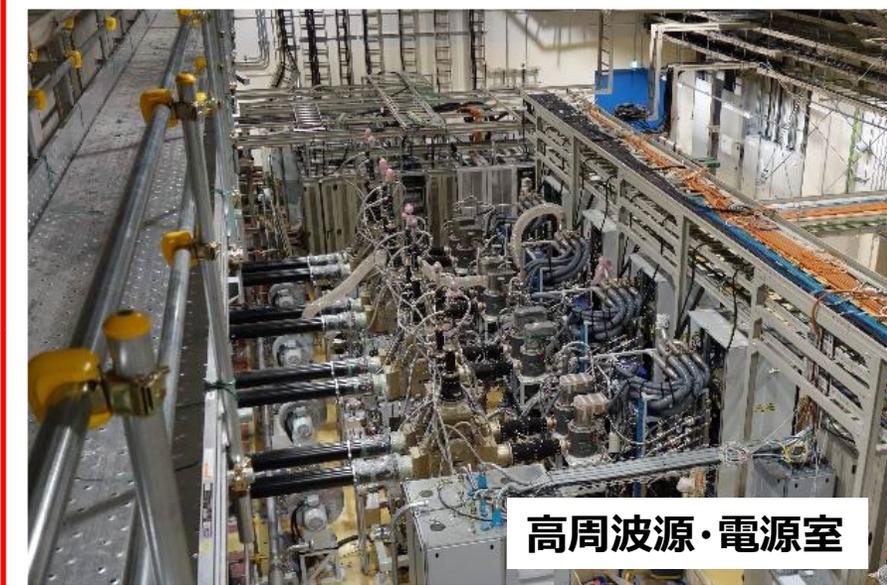
冷凍機建屋

冷却塔

屋外電源ヤード

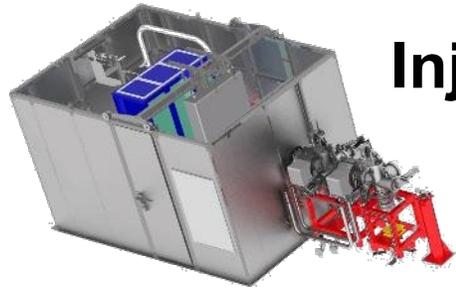
管理研究棟

IFMIF/EVEDA開発試験棟



高周波源・電源室

最終目標 (9 MeV, 125 mA, CW加速) に向けて、段階的にアプローチ



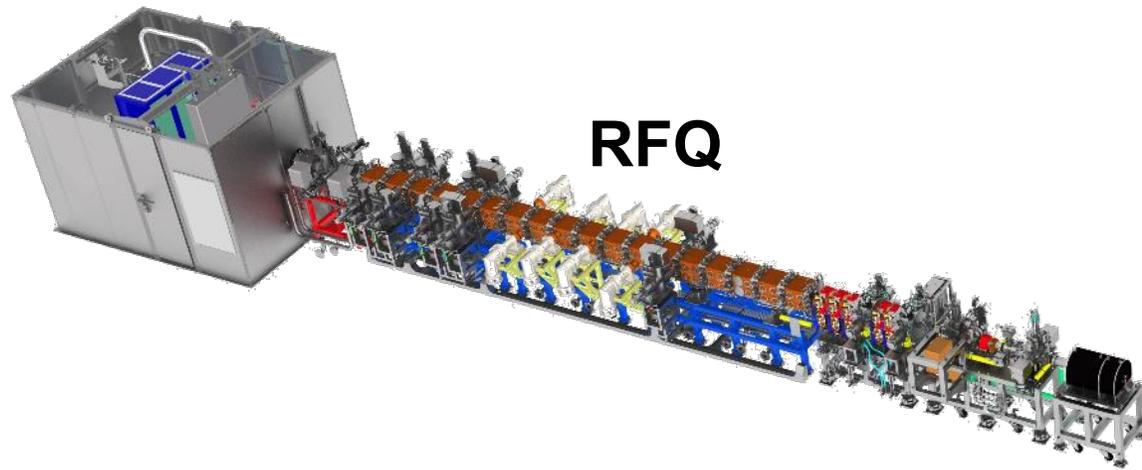
Injector

- 2014年11月4日陽子ビーム初加速
- 2015年7月7日初重陽子ビーム加速

Phase-A: 100 keV, d+, CW (DC)

2017年8月完了

最終目標 (9 MeV, 125 mA, CW加速) に向けて、段階的にアプローチ



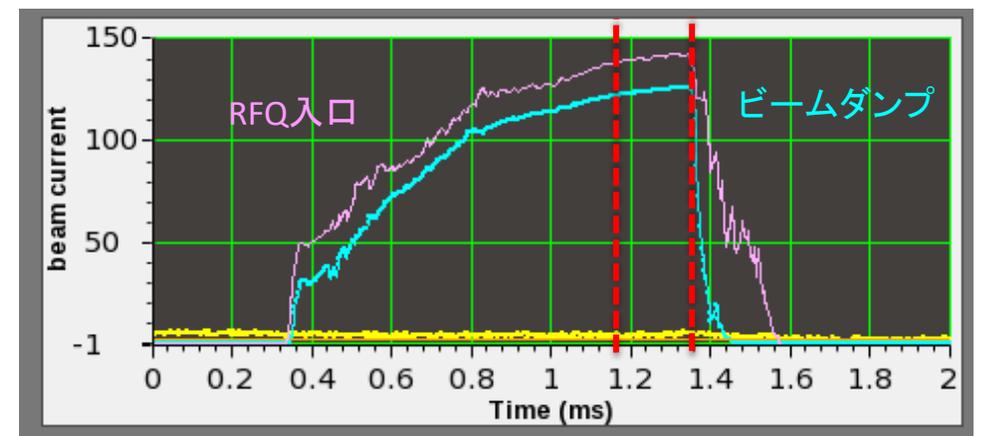
RFQ

- ・2018年6月13日陽子ビーム初加速
- ・2019年3月11日初重陽子ビーム加速
- ・2019年7月、125mAパルスビーム加速に成功

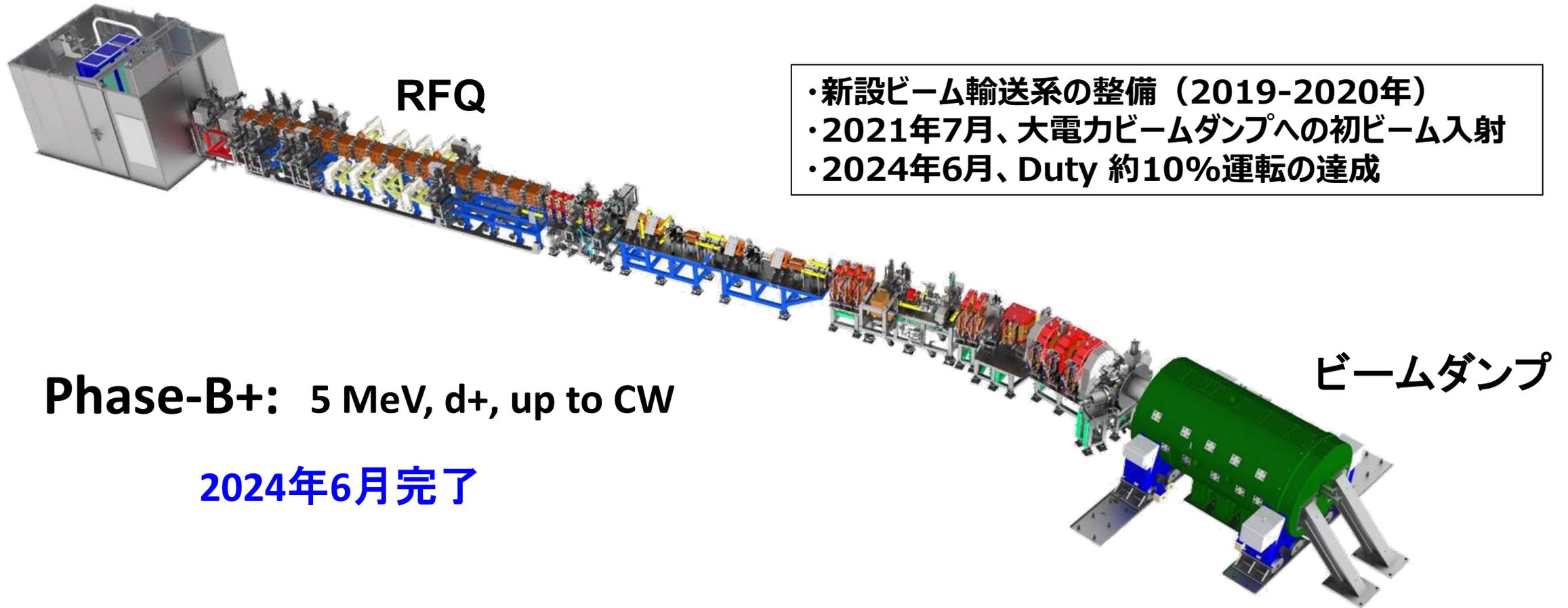
Phase-B: 5 MeV, d+, duty 0.1% (1 ms/1 Hz)

2019年8月完了

LEBT ACCT	MEBT ACCT	DPLATE ACCT	LPBD
141.687 mA	126.878 mA	126.305 mA	125.053 mA



最終目標 (9 MeV, 125 mA, CW加速) に向けて、段階的にアプローチ



RFQ

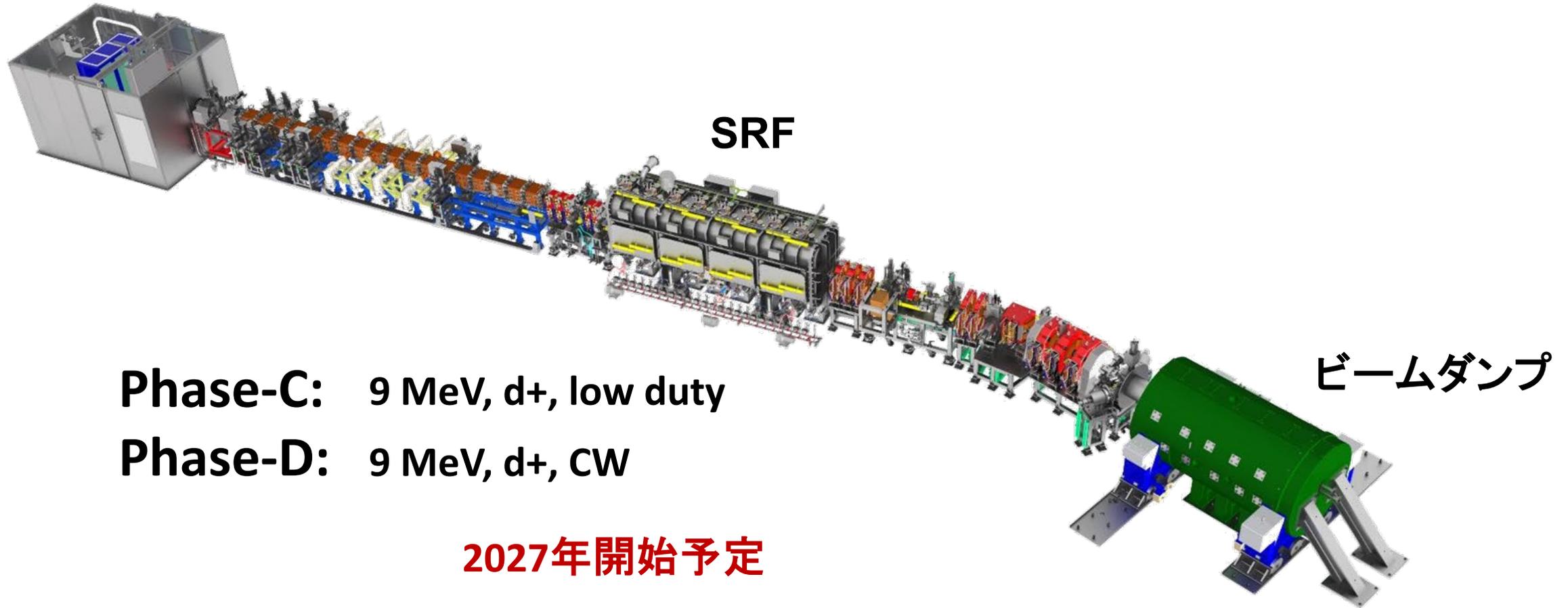
- ・新設ビーム輸送系の整備 (2019-2020年)
- ・2021年7月、大電力ビームダンプへの初ビーム入射
- ・2024年6月、Duty 約10%運転の達成

Phase-B+: 5 MeV, d+, up to CW

2024年6月完了

ビームダンプ

最終目標 (9 MeV, 125 mA, CW加速) に向けて、段階的にアプローチ



Phase-C: 9 MeV, d+, low duty

Phase-D: 9 MeV, d+, CW

2027年開始予定

フェーズB+のコミッショニングは3つのステージから構成

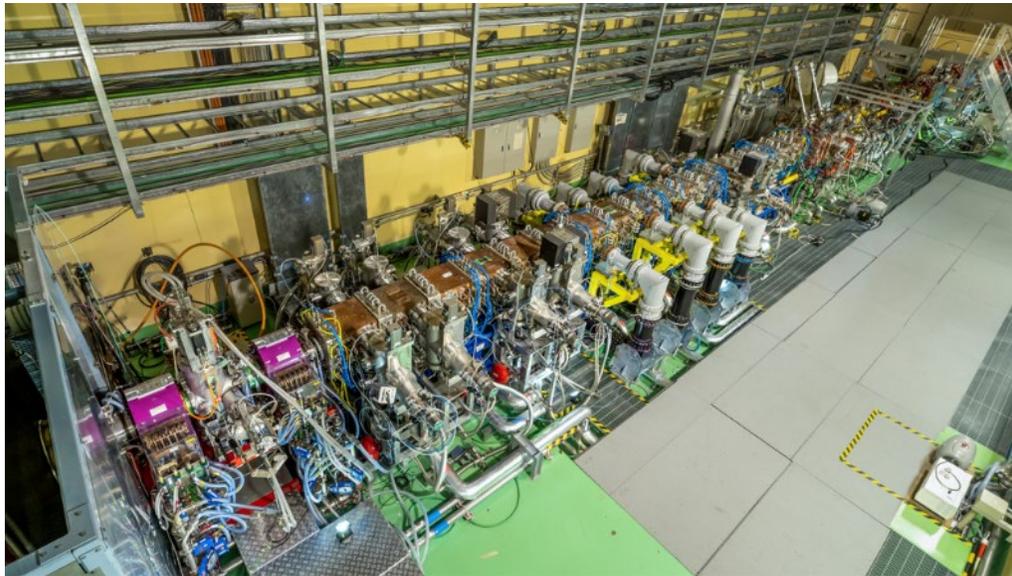
- **ステージ1**：低電流、低デューティのH+/D+ビーム（プローブビーム） → 2021年12月完了
電磁石、ビームダンプ、ビーム計測器の動作確認 → RFQ RFカプラーの過熱と真空リークへの対応
- **ステージ2**：定格電流（125 mA）、低デューティのD+ビーム → 2023年8月開始、12月完了
様々なビーム輸送モード（異なるバンチャー設定）の試験とビーム特性評価、
BPM最適化、縦方向エミッタンス測定、非破壊型プロファイラの試験、など
- **ステージ3**：定格電流（125 mA）、高デューティのD+ビーム
→ 2023年12月開始、2024年6月完了

デューティ 1~5%から開始し、可能ならCWまでデューティを引き上げる

デューティの限界範囲と最大値は、RFQのRFコンディショニングとカプラーの熱挙動を見ながら決定

通算8か月間
以上に渡る
ビーム試験

2023/8~12
2024/3~6



試験中のIFMIF原型加速器

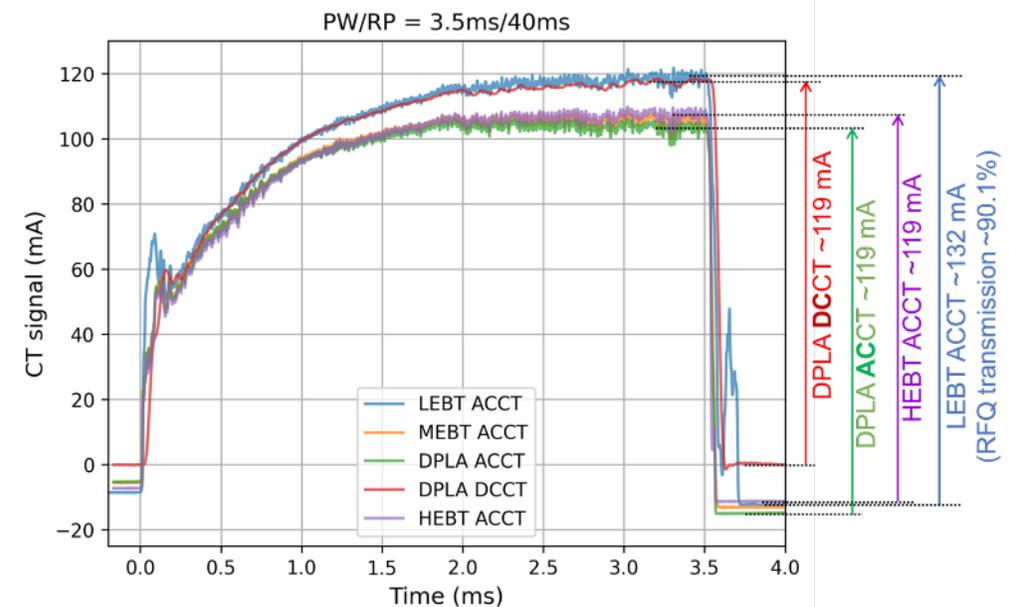
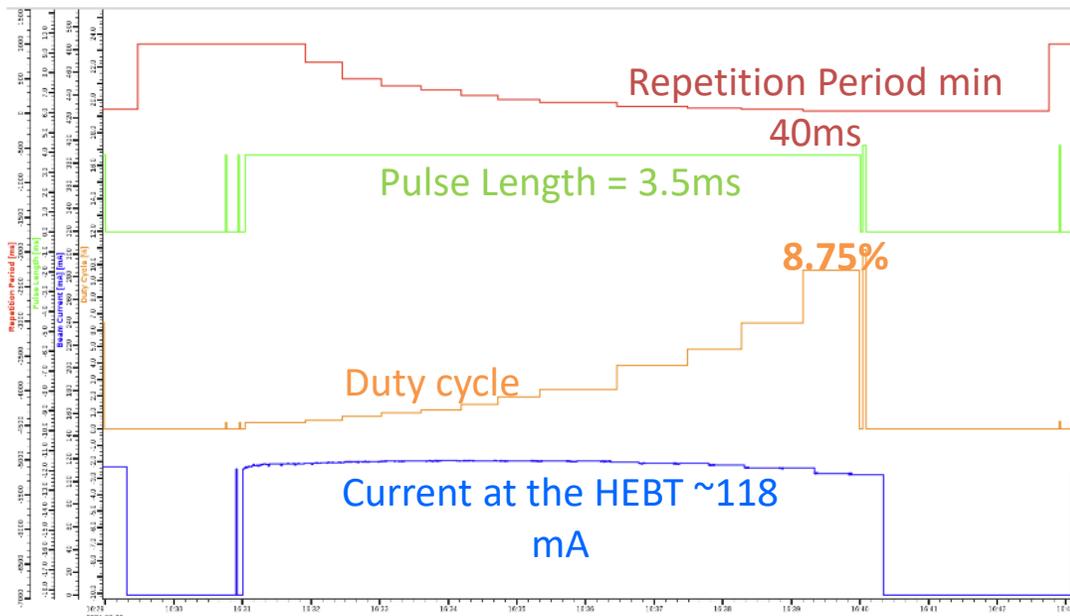


試験中の遠隔（中央）制御室

2024年6月末に大電力ビームダンプを組み合わせた長パルス重陽子ビーム試験を完了

ステージ3 (目標) : 定格電流 (125 mA), 高デューティ (<10%)

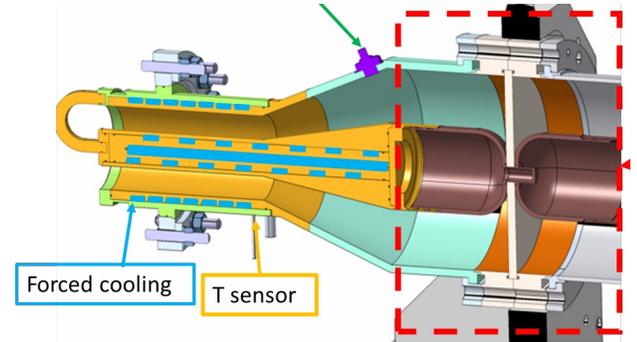
- ビーム加速の**最大duty**は**8.75 %** (パルス幅3.5 ms、パルス繰り返し周期40 ms、継続時間約1分間) RFQの真空度や温度はほぼ定常。ビーム電流は約119 mA、RFQのビーム透過率は90.1%。
- **RFQの平均ビーム電力 : 40~45kW**
- RFQ空洞のコンディショニングは重水素加速電圧の約80%でCWに到達、重水素加速電圧ではDuty 27%まで到達したが、カップラーの過熱が発生。
- 現行RFカップラーがDuty向上の阻害要因であることが明確となった。



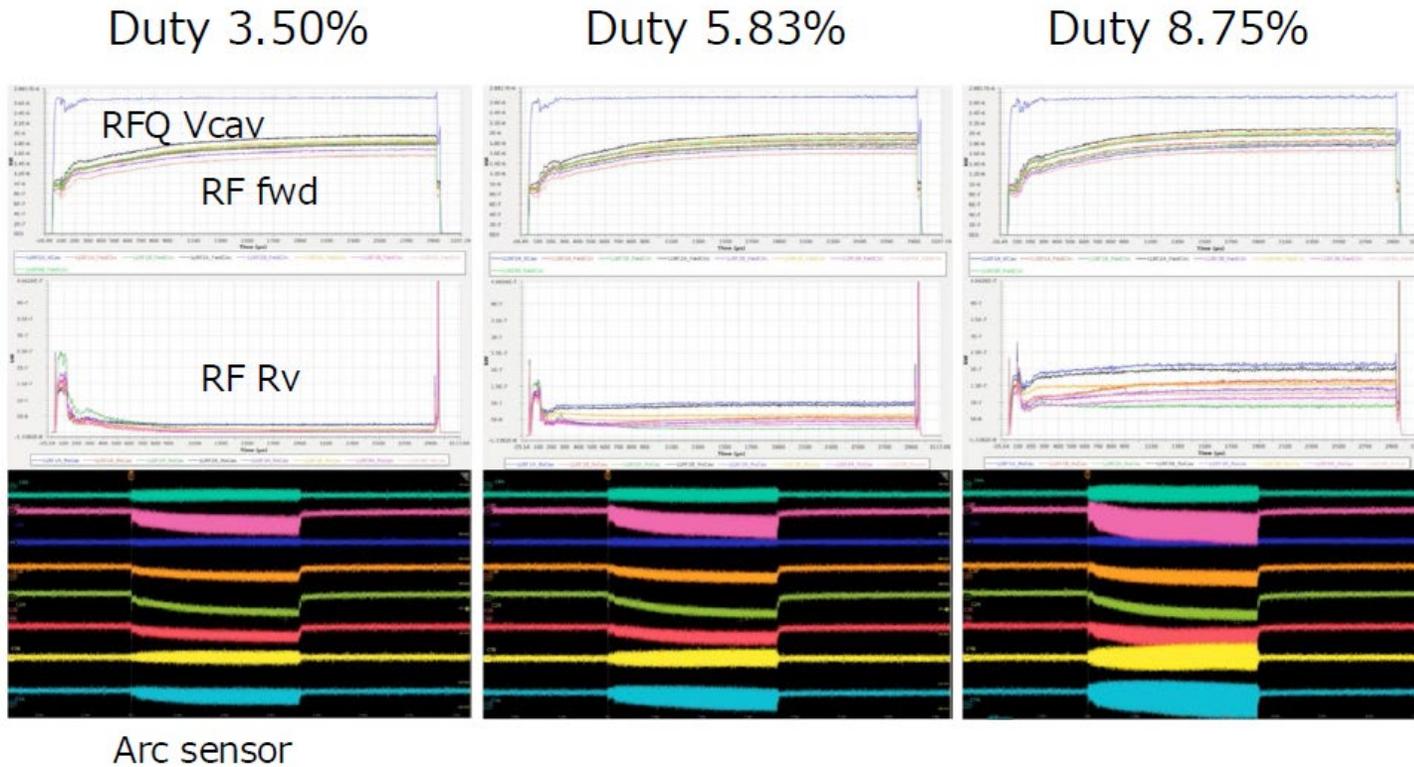
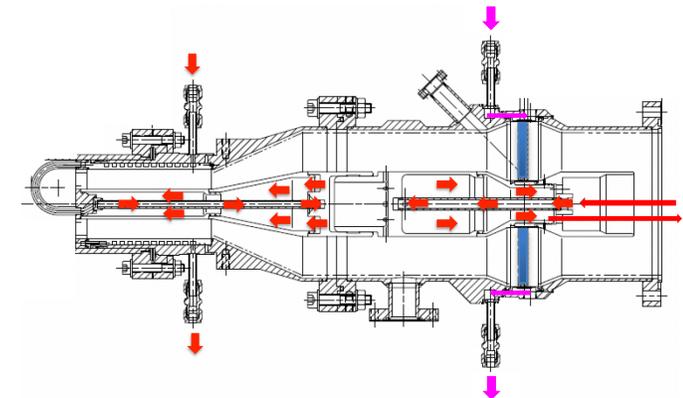
- 10%以上のデューティ向上は、現行のRFカップラーでは困難であることを確認。
- 長パルス、高デューティにおいて、マルチパクタリングがカップラ間で異なる速度で変化するため、各RF系統でアンバランスが生じていた。結果として、空洞温度や真空度が定常に至る前にRF系のインターロックで停止してしまう。

→ 高duty運転用のカップラーの準備をビーム試験と並行して実施。

現行カップラー（Oリング使用）



高duty用カップラー（ロウ付け型）

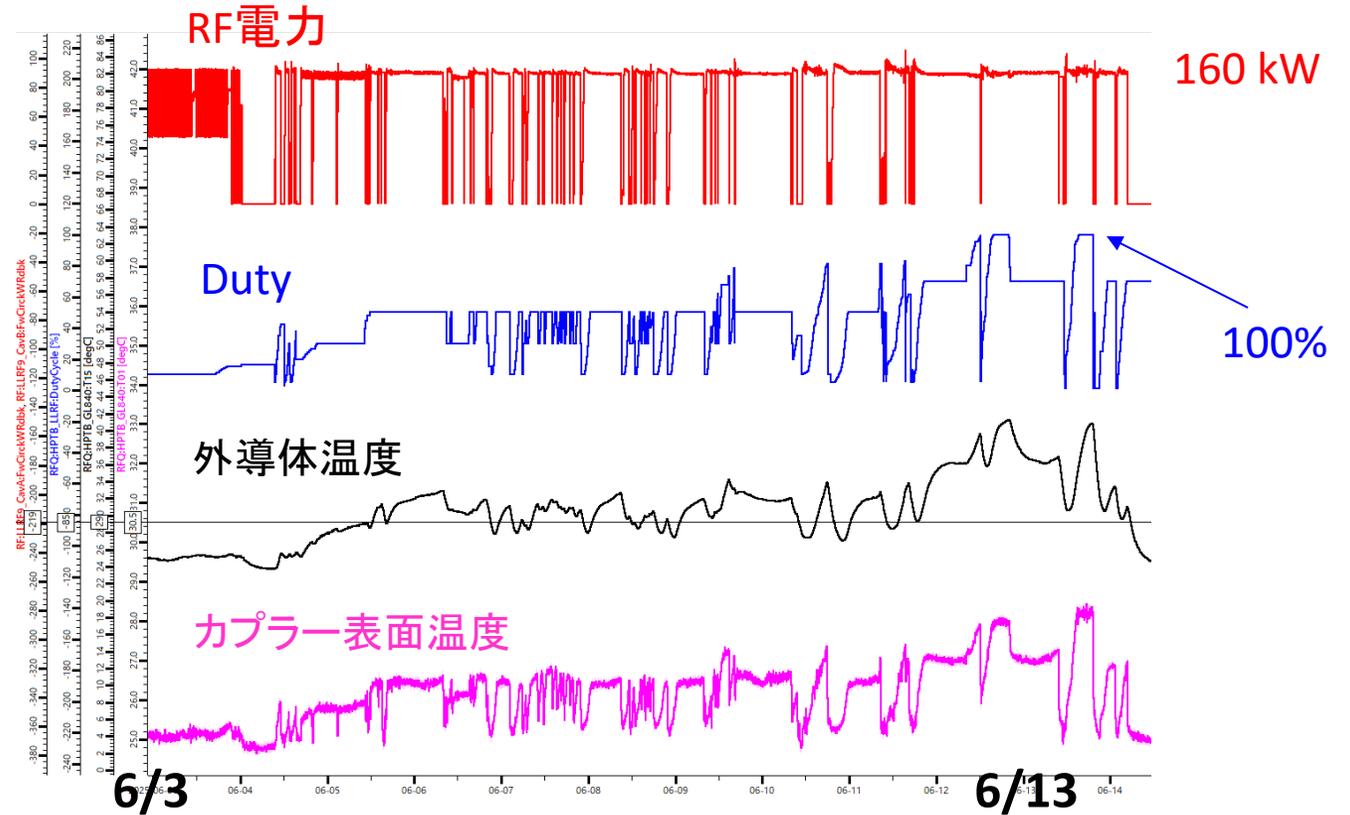


- 高Duty運転用カプラー（ロウ付け型カプラー）の大電力試験を開始。2023年度に試験用結合空洞を改良、2024年7月より大電力高周波入力試験を開始。
- 現在までに4式について**定格約190 kW、CWでの3~4時間連続動作を達成**。現在、3組目の試験を準備中。今後、残り2組4式の試験を進め、RFQ空洞への取り付けとRF入射を目指す。



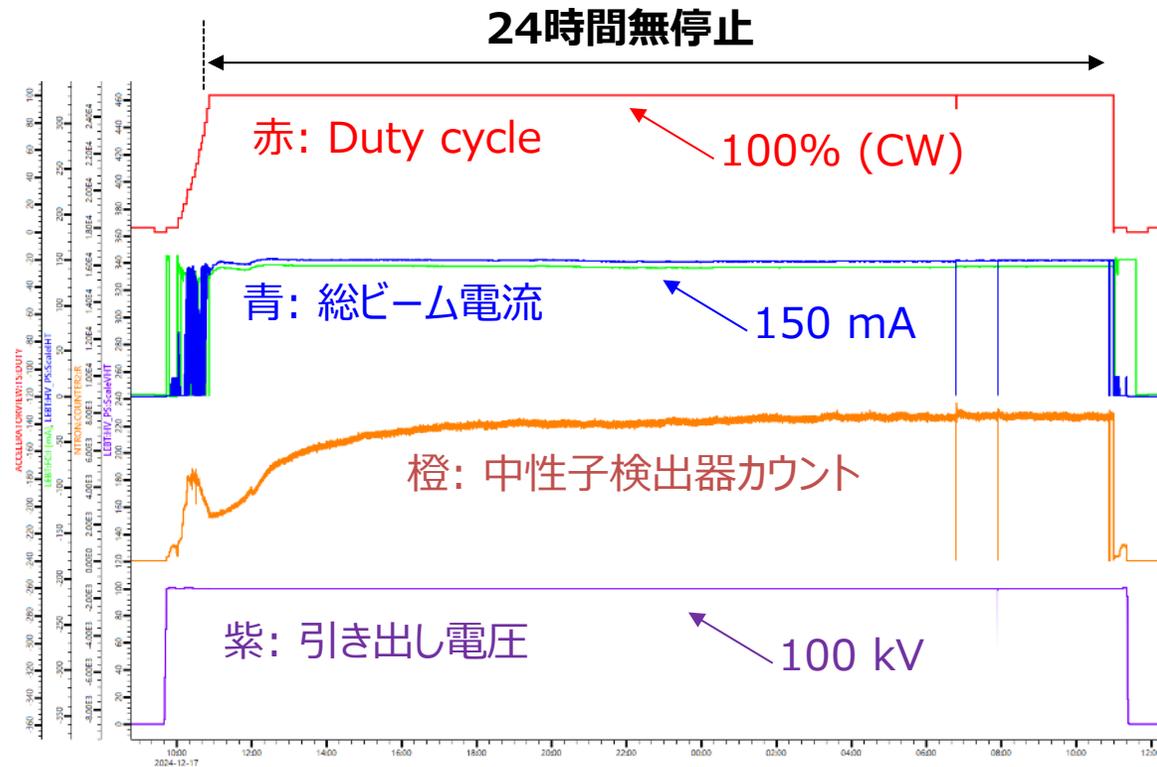
試験用結合空洞 ロウ付け型カプラー

ロウ付けカプラーの大電力試験の様子

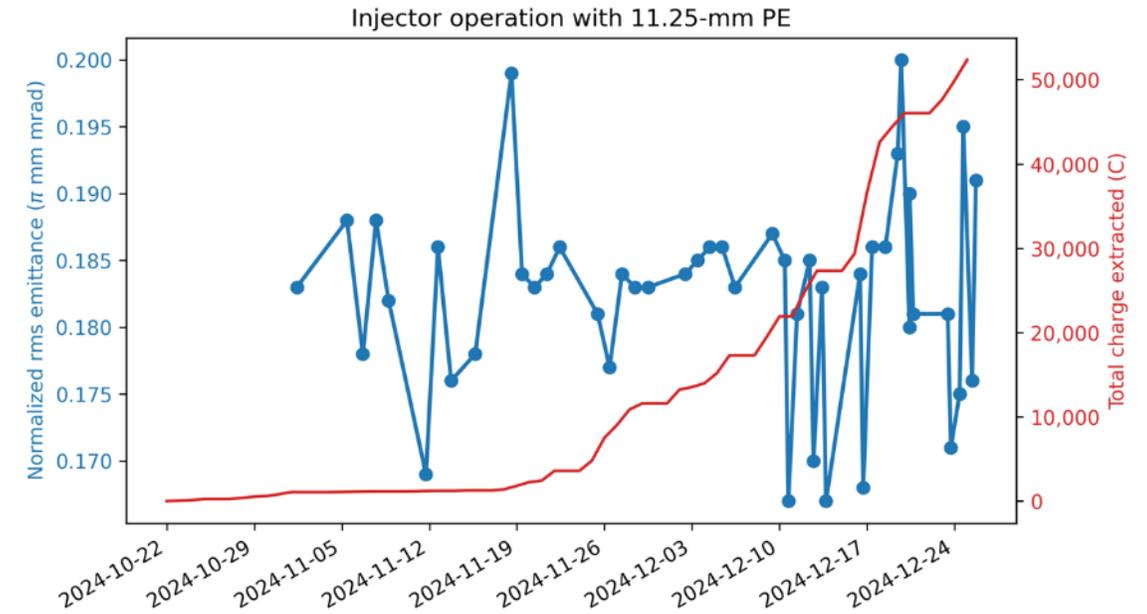


ロウ付けカプラーの大電力試験時のトレンド。10日ほどでCWに到達。

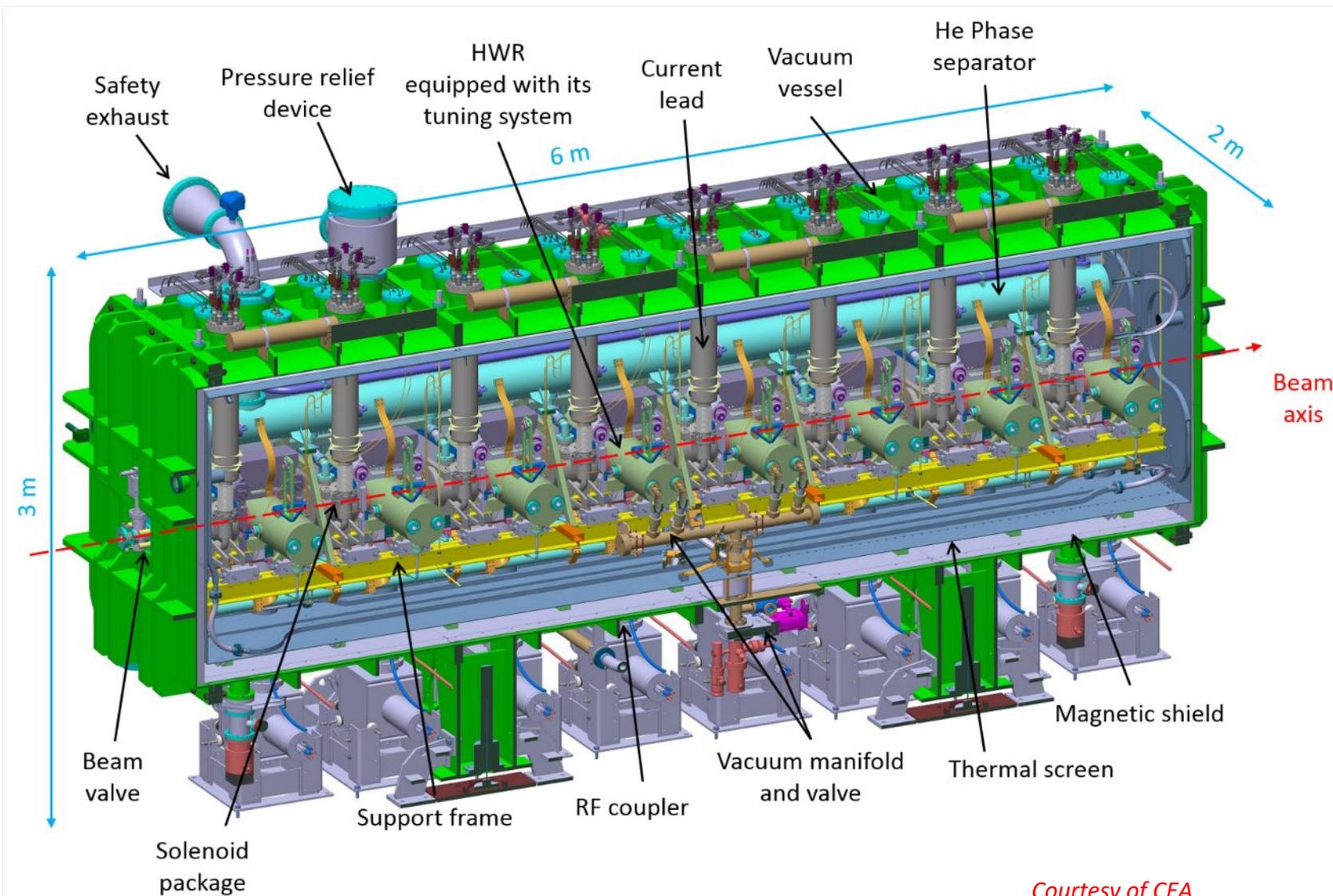
- RFQにビームを供給する入射器の大電流・CW (DC) 長時間運転試験を2024年12月に実施。
- 大電流での安定性向上のための電位固定の改良や、運転調整方法の工夫により、**総電流約150 mAで低エミッタンスの重陽子ビームの24時間連続でのCW運転に初めて成功。**
- エミッタンスと位相空間分布の時間変化、及びその原因について、検討を進めている。



入射器の長時間大電流・定常運転試験時のトレンド



入射器の長時間大電流・定常運転試験時のエミッタンス測定値の推移



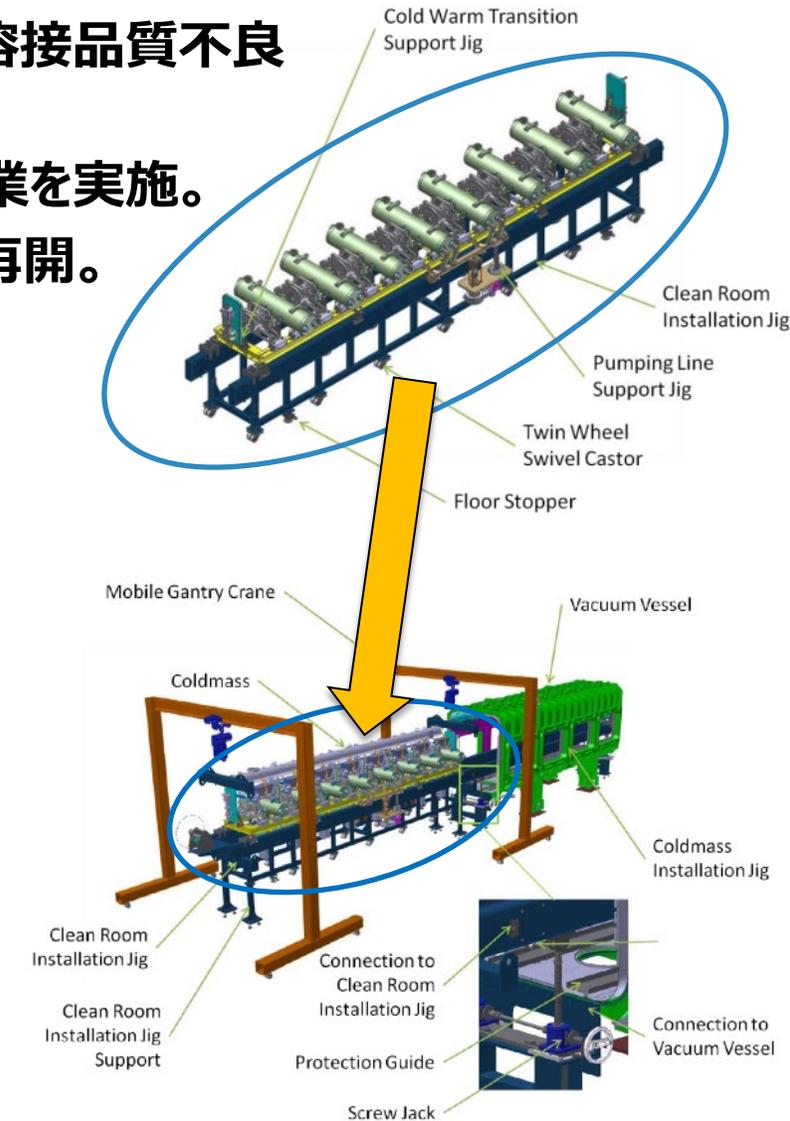
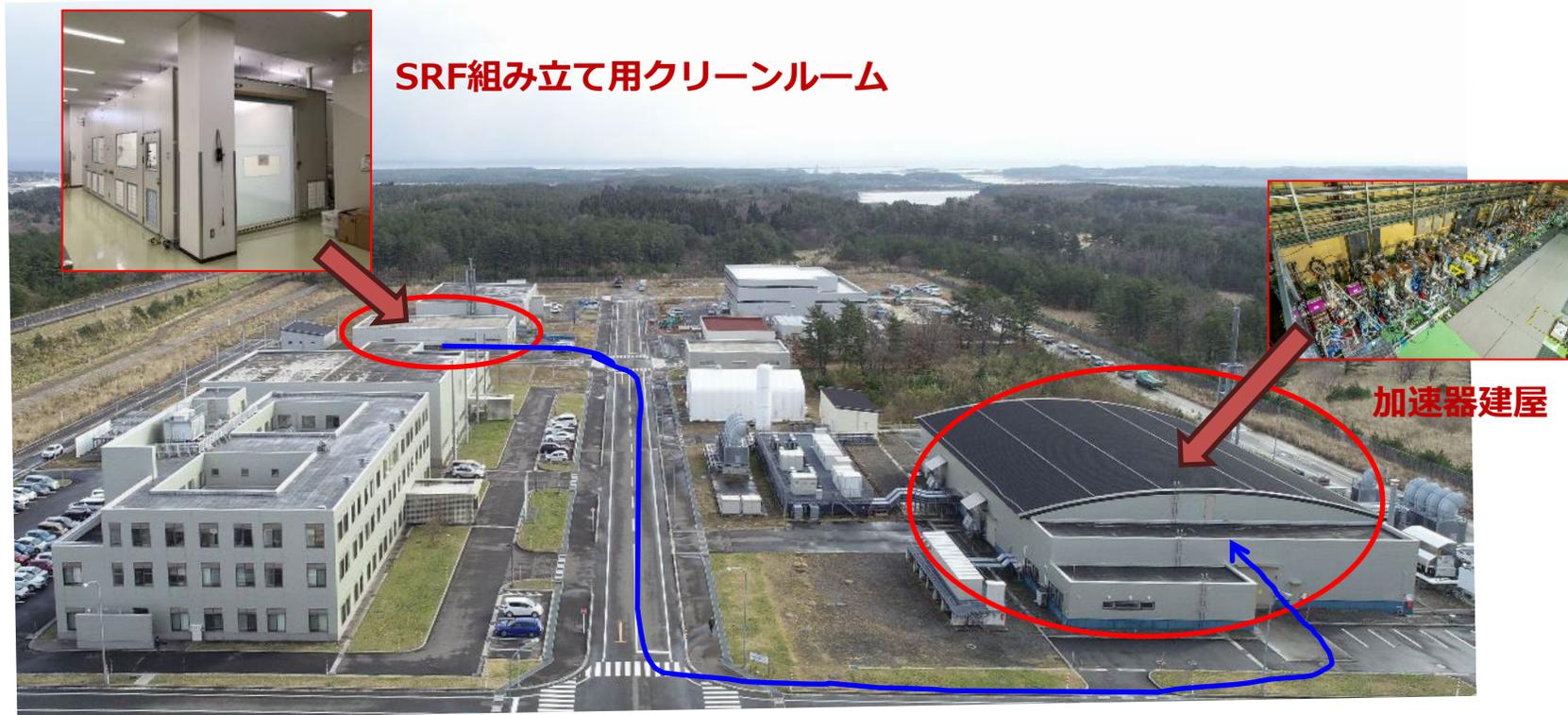
Courtesy of CEA

全体設計はCEA

	調達責任	請負企業
HWR空洞	CEA	Zanon
パワーカプラー	CEA	CPI
ソレノイド	CIEMAT	Elytt energy
カレントリード	CIEMAT	Elytt energy
モジュール組立	F4E	RI

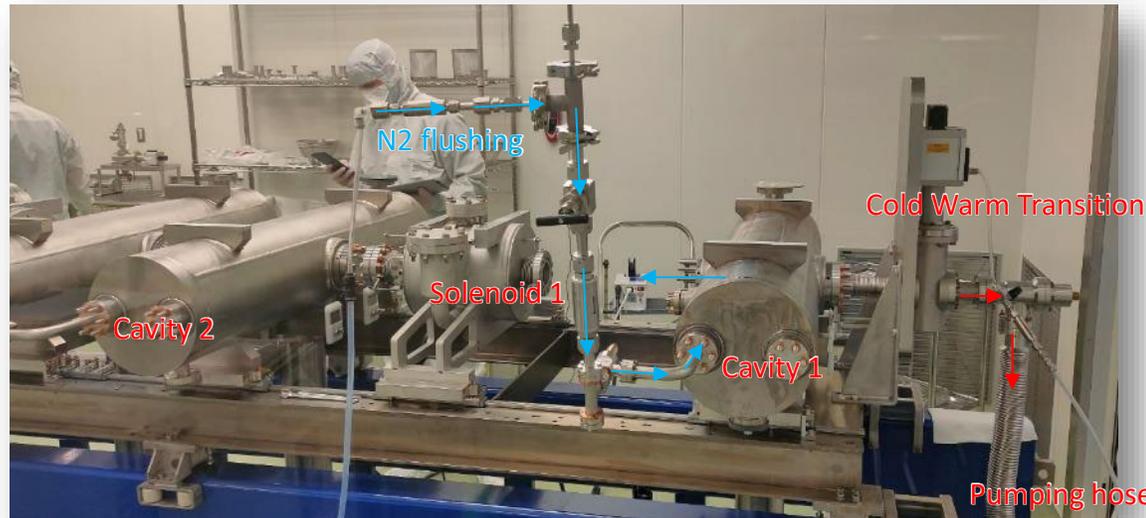
HWR	175 MHz
β	0.094
E_a	4.5 MV/m
Q_0	1.4E9
Solenoid	6 T
$\int B \cdot dl$ on axis	1 T.m
Field at Cavity flange	< 20 mT

- SRFクライオモジュール輸送時のリスク低減のため、モジュールの組立は六ヶ所研で実施。
- 専用クリーンルームを構築。2019年から作業を開始したが、ソレノイドの溶接品質不良問題、真空リーク、新型コロナ等のために中断。
- 欧州内でソレノイドの溶接補修、冷凍試験を実施後、日本で高圧洗浄作業を実施。
- 2024年3月末までにソレノイドの補修、高圧洗浄作業を完了し、組立を再開。





加速空洞と高周波カップラーを接続



空洞とソレノイドを接続



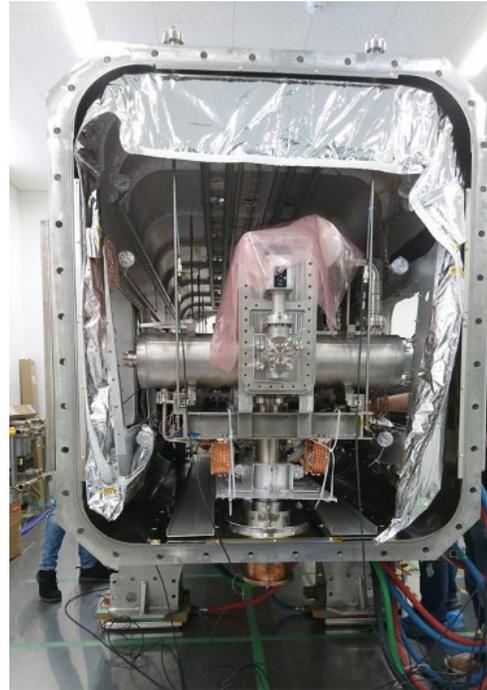
組立が完了したストリング

J. Chambrillon, LCWS2024



ヘリウム冷媒配管の組立が完了した
コールドマス

- 2024年9月にクリーンルーム内におけるstring assembly（ビームラインを構成する空洞、ソレノイドコイル等の機器全式の接続作業及び真空漏洩試験）を完了。
- クリーンルーム外へ搬出後、ヘリウム冷媒配管の組立作業を実施。
- 2025年1月にコールドマスのクライオスタット内への挿入を無事に完了。



クライオスタットへのコールドマス挿入が完了



クライオスタットへのコールドマスの挿入作業

- 共同研究棟からIFMIF/EVEDA開発試験棟の輸送を2025/3/18に実施。
- 共同研究棟建屋搬入口から建屋前の移動はエアキャスターを利用。
- 建屋間の移動はラフタークレーンで吊ってトレーラーに積載して運搬。
- IFMIF棟建屋前から加速器室までの移動は電動チルローラーを利用。



- 加速器室搬入後、カレントリード挿入作業を開始したが、磁気シールドとの干渉、ガス配管の破損が判明し、作業を中断。現在、修理作業を実施中。
- 9月末ごろにビームライン本設位置へ移動、ケーブル配線や冷凍配管作業を実施予定。
- 今年度中のカレントリード挿入、モジュールの完成とビームラインへの接続を予定。



- IFMIFの研究開発は現在、工学実証・工学設計活動（EVEDA）の段階にあり、IFMIF原型加速器（LIPAc）の実証試験がQST六ヶ所研において進行中。
- LIPAc RFQは定格電流で約10%デューティ比のビーム加速に成功。一方、CW運転に向けてはRFカプラーがボトルネックであり、ロウ付け型カプラーの大電力試験を実施中。
- LIPAc イオン源は総電流約150 mAで低エミッタンスの重陽子ビームの24時間連続でのCW運転に成功。
- 超伝導（SRF）加速器の組立は大きく進展。2025年度中の完成、2026年中の冷却開始を目指している。
- LIPAcは、核融合中性子源A-FNS/DONESに向けた加速器の要素技術や信頼性を実証し、リスクを低減するために重要。

材料試験用中性子源の実現を通じて、核融合炉エネルギーの実用化へ貢献