

# BA活動における 大強度加速器の次なる挑戦・超伝導加速

The next challenge of the high-intensity  
accelerator in the BA activities: Superconducting Acceleration

近藤 恵太郎

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

六ヶ所フュージョンエネルギー研究所

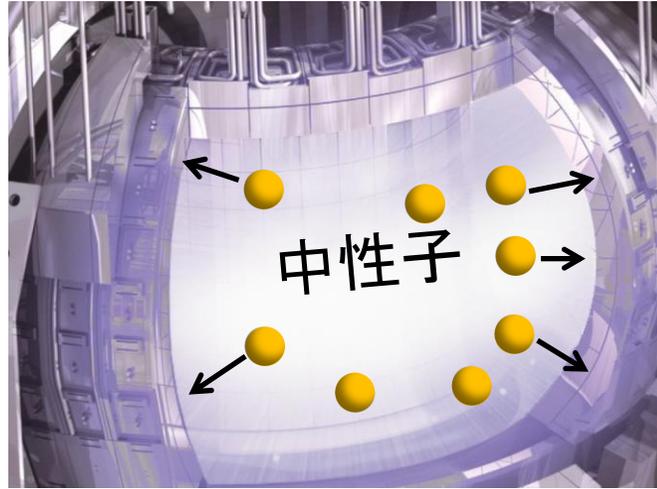
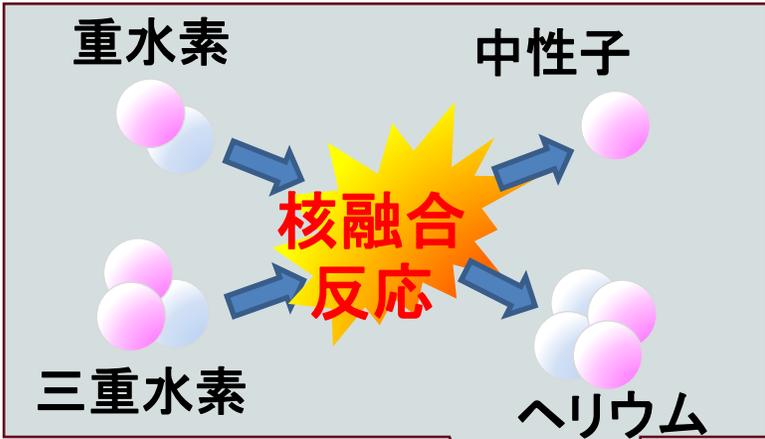
核融合炉材料研究開発部 IFMIF加速器施設開発グループ

ITER/BA成果報告会2024 (2025年1月30日)

六ヶ所研において組み立て中の超伝導加速器

# 核融合発電の原理と材料開発

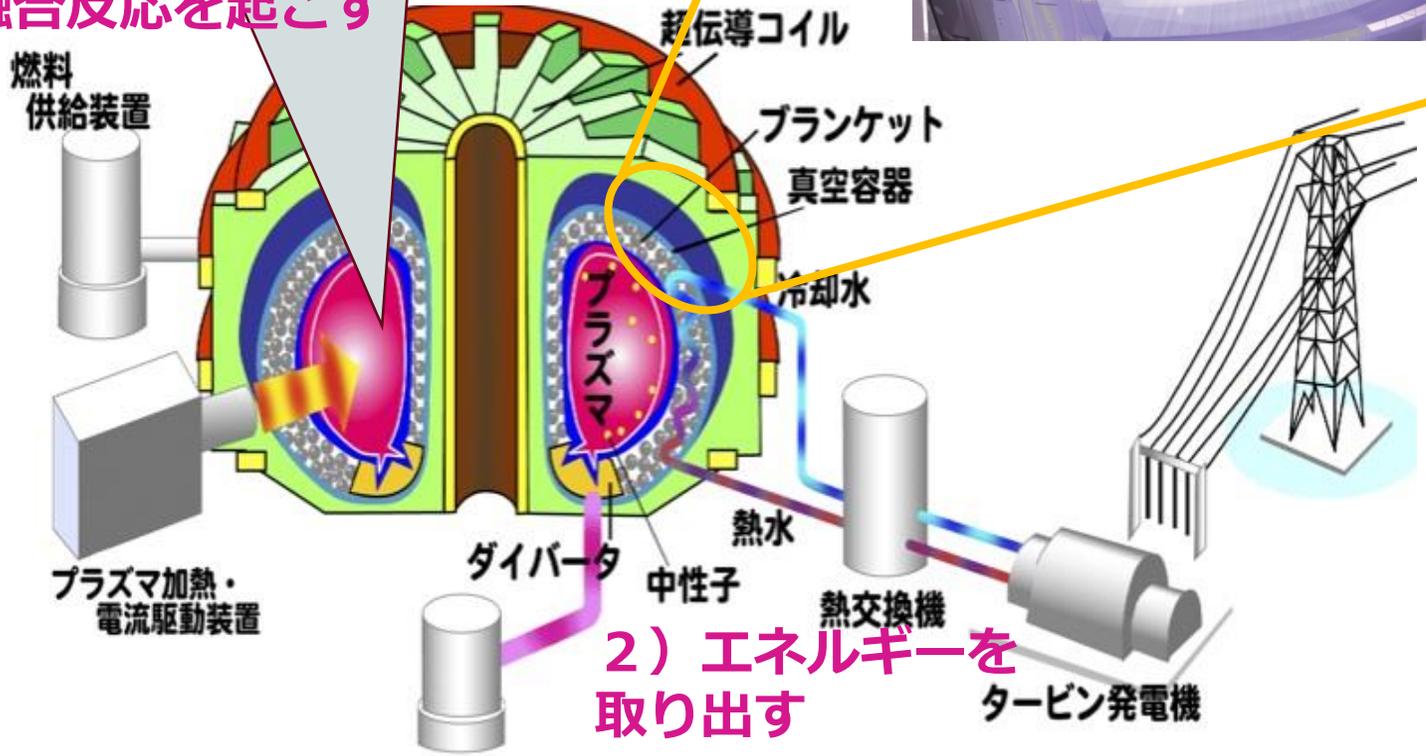
Fusion power generation and material development



高速中性子の照射を受けた材料には様々な変化が発生

- ・ もろくなる
- ・ 膨らむ
- ・ 放射化 等

## 1) 核融合反応を起こす



## 2) エネルギーを取り出す

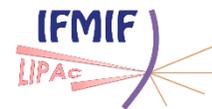


耐えられる材料の開発 (低放射化フェライト鋼)

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

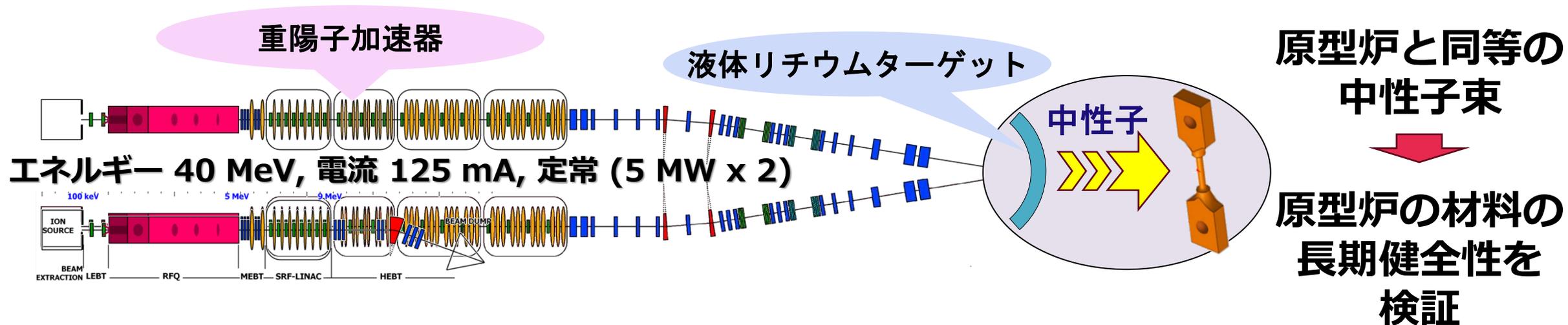
# 核融合原型炉開発のための中性子源

Neutron source for fusion demo reactor development



加速器駆動型の中性子源（国際核融合材料照射施設、IFMIF）

世界最大電流・最大パワーの重陽子加速器が必要



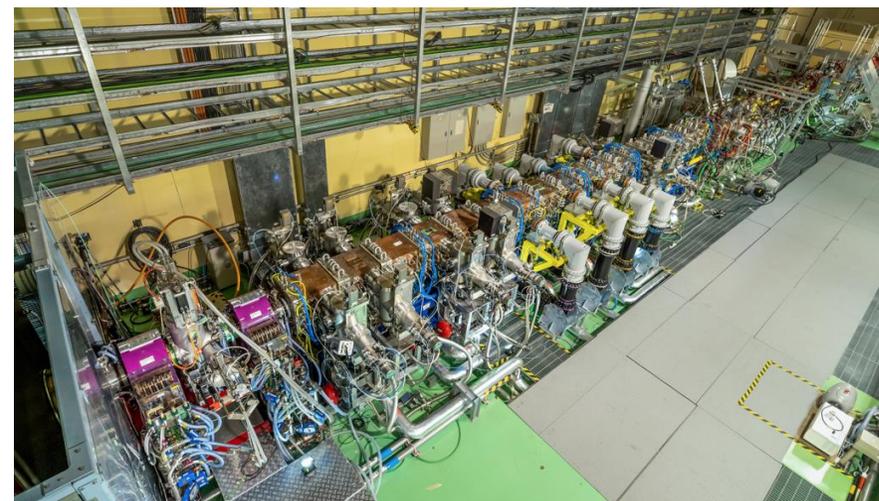
IFMIF原型加速器（LIPAc）

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

QST六ヶ所研で実証試験を実施中

中性子源用加速器の実用化のための技術実証を目指す



# LIPAc : IFMIF原型加速器

LIPAc: Linear IFMIF Prototype Accelerator



QST六ヶ所フュージョンエネルギー研究所で日欧共同で実証試験を実施中

世界最大電流 (125 mA), 連続(CW) 運転  
前人未到大電流・大電力 (1.125 MW) 領域に挑戦

イオン源

RFQ

5 MeV

超伝導加速器

高エネルギー  
ビーム輸送系

中間エネルギー  
ビーム輸送系

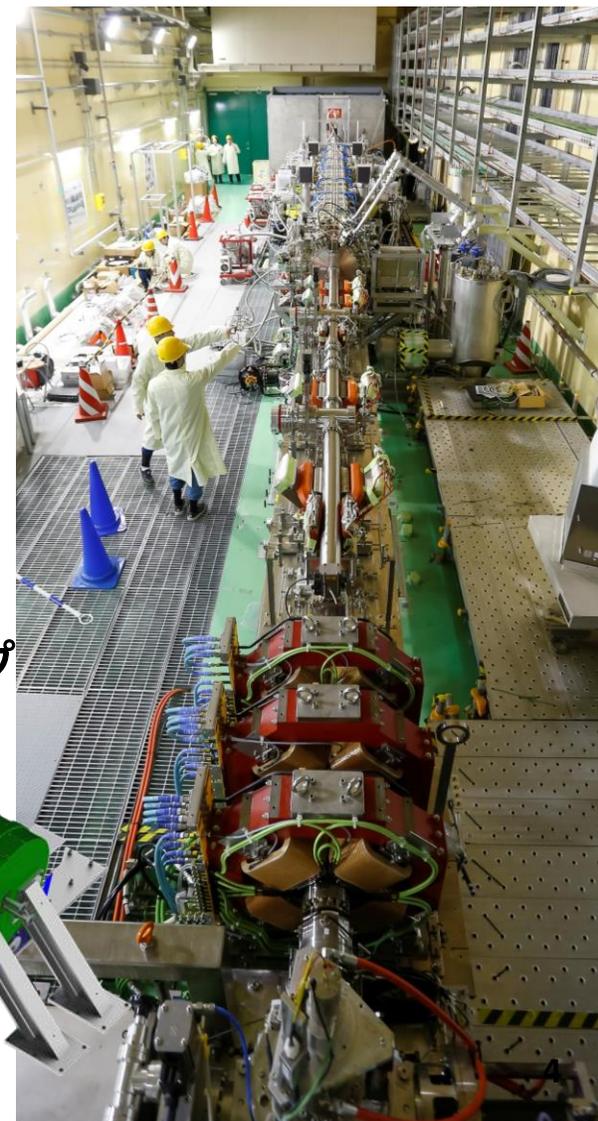
ビームダンプ

9 MeV

36 m



UNIVERSIDAD DE GRANADA



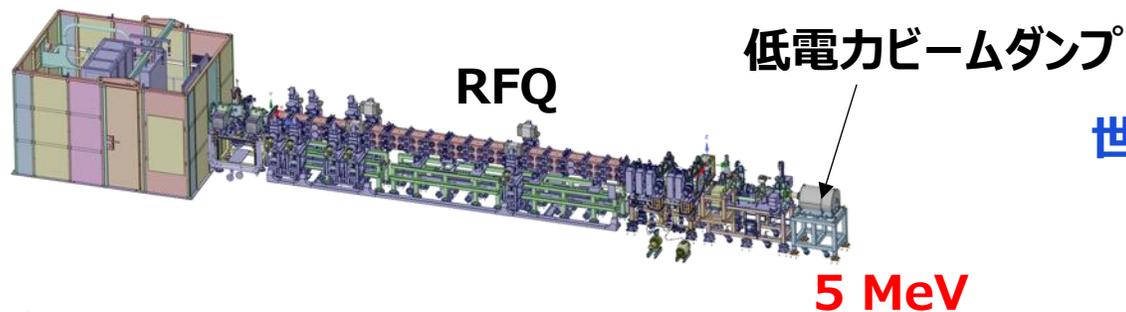
# LIPAc試験の3つの段階

3 steps in the LIPAc beam commissioning

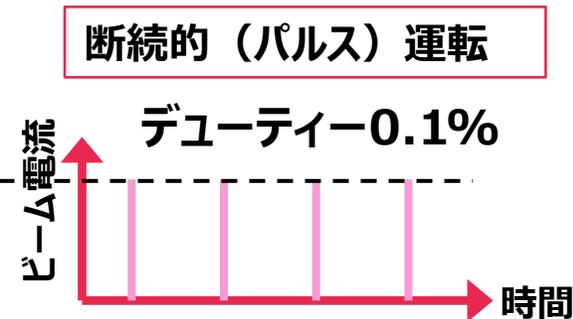
最終目標 (9 MeV, 125 mA, 連続運転) に向けて、段階的にアプローチ

## 第1段階

2019年7月完了  
RFQ・低デューティ

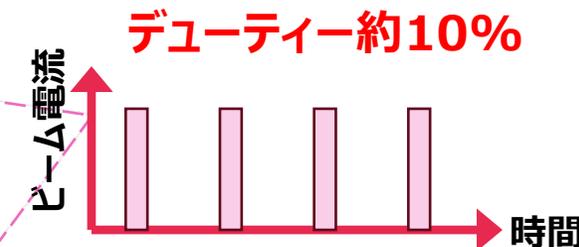


世界最大電流  
125 mA



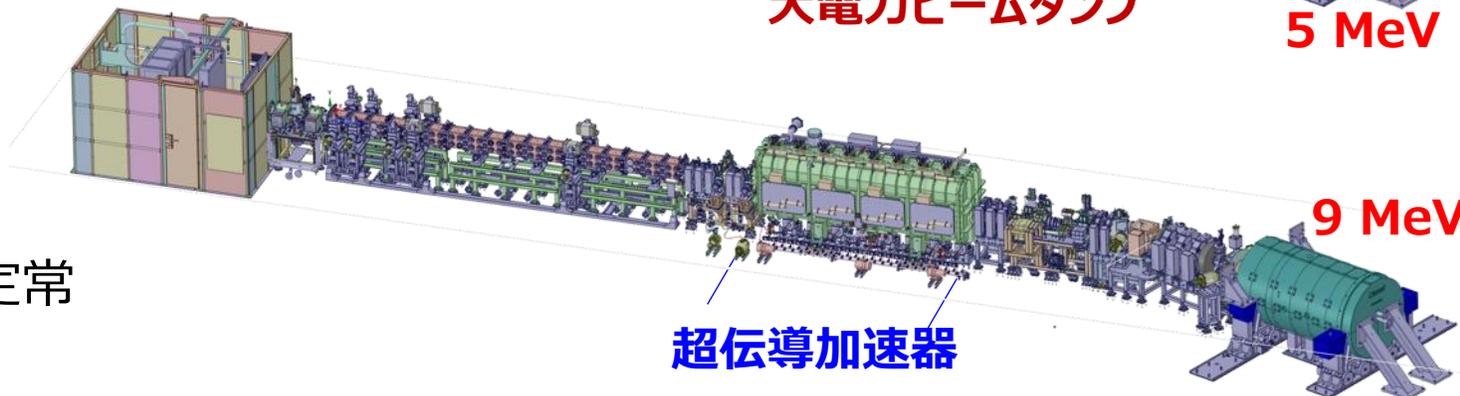
## 第2段階

2024年6月完了  
RFQ・高デューティ



## 第3段階

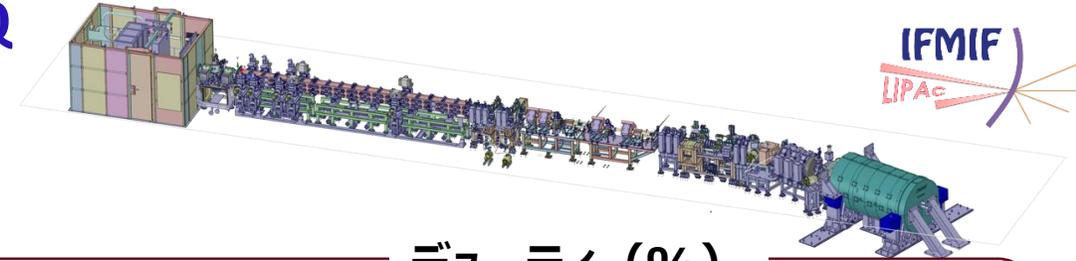
2026年～  
超伝導・  
低デューティ ⇒ 定常



# LIPAcの最新結果：RFQの大電力ビーム加速試験



Latest results: High-power beam acceleration by RFQ



加速されたビームの特性とシミュレーションとの比較



ビーム挙動の予測・制御の精度を向上

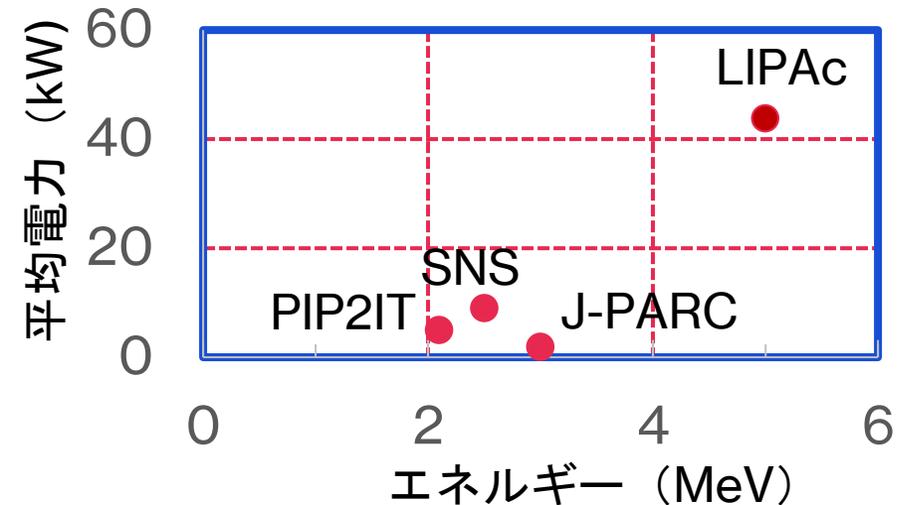
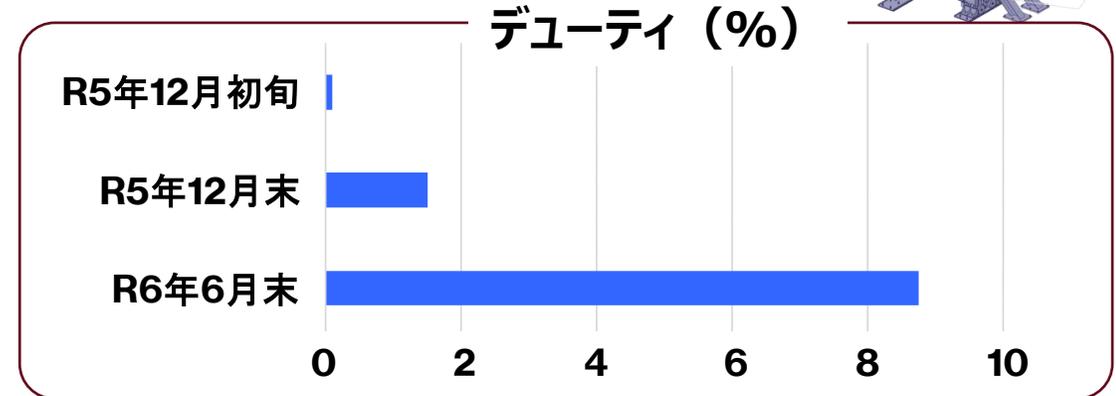


少しずつデューティ比を向上

2024年6月末に約120 mA、最大デューティ比8.75%の重陽子ビーム加速を達成！

RFQの平均ビーム電力：40～45kW  
稼働中のRFQとしては世界最大

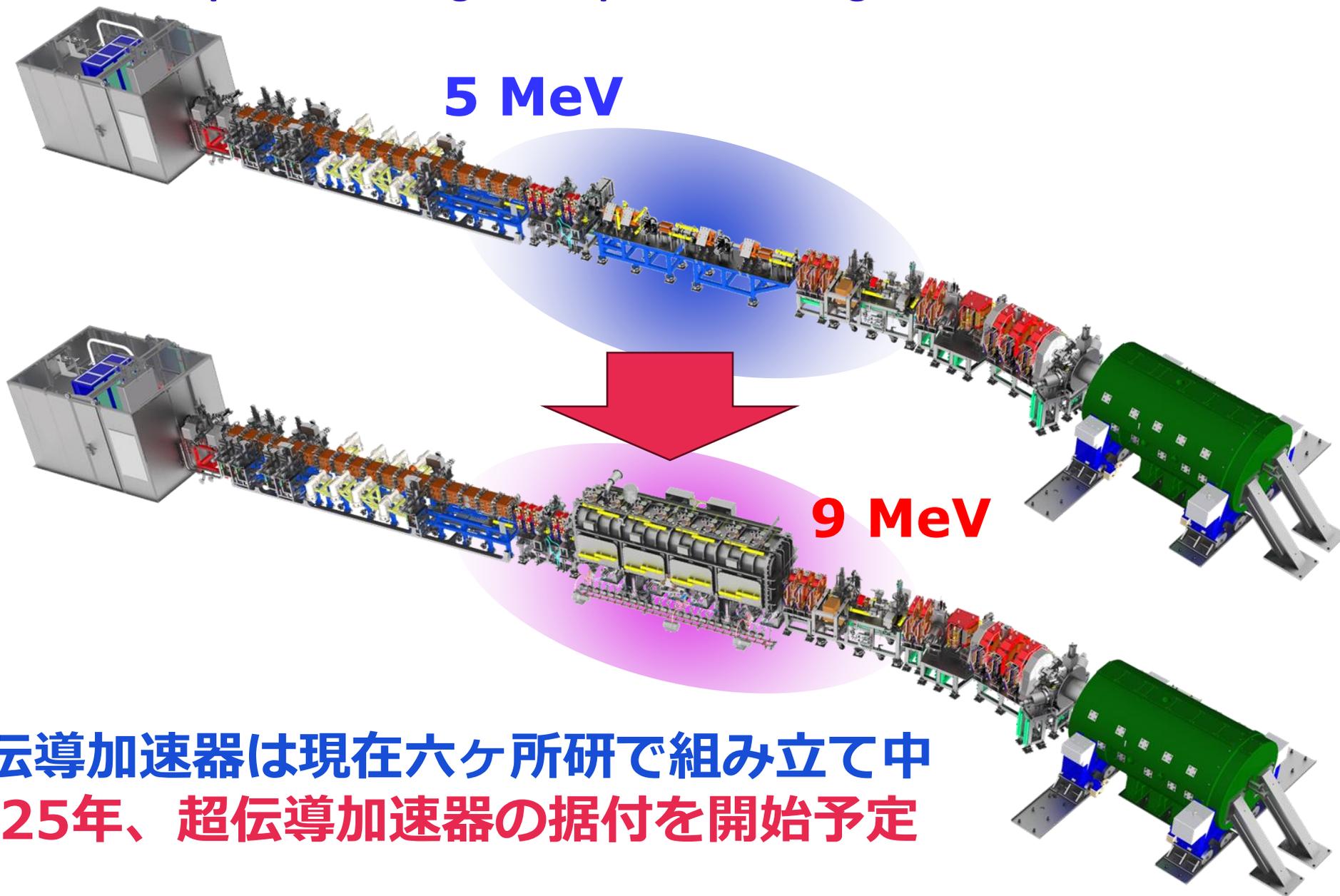
中性子源用RFQ加速器の動作を実証  
後段の超伝導加速器の試験への見通し



現在運転中の主なRFQの出力電力

# LIPAcは最終段階：超伝導加速器の試験へ！

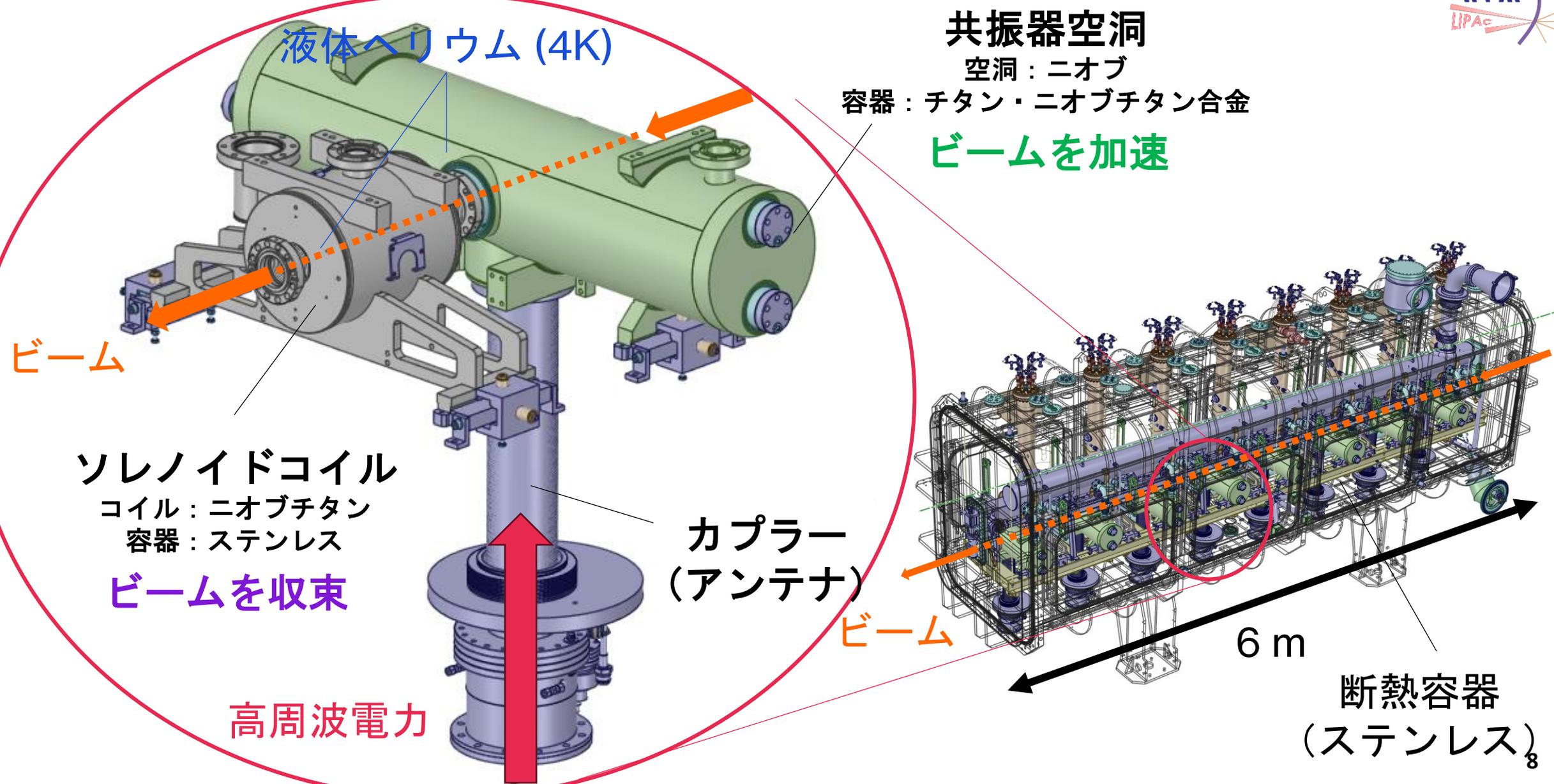
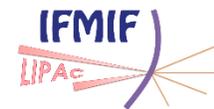
LIPAc is in the final phase: testing the superconducting accelerator!



超伝導加速器は現在六ヶ所研で組み立て中  
2025年、超伝導加速器の据付を開始予定

# LIPAcの超伝導加速器の仕組み

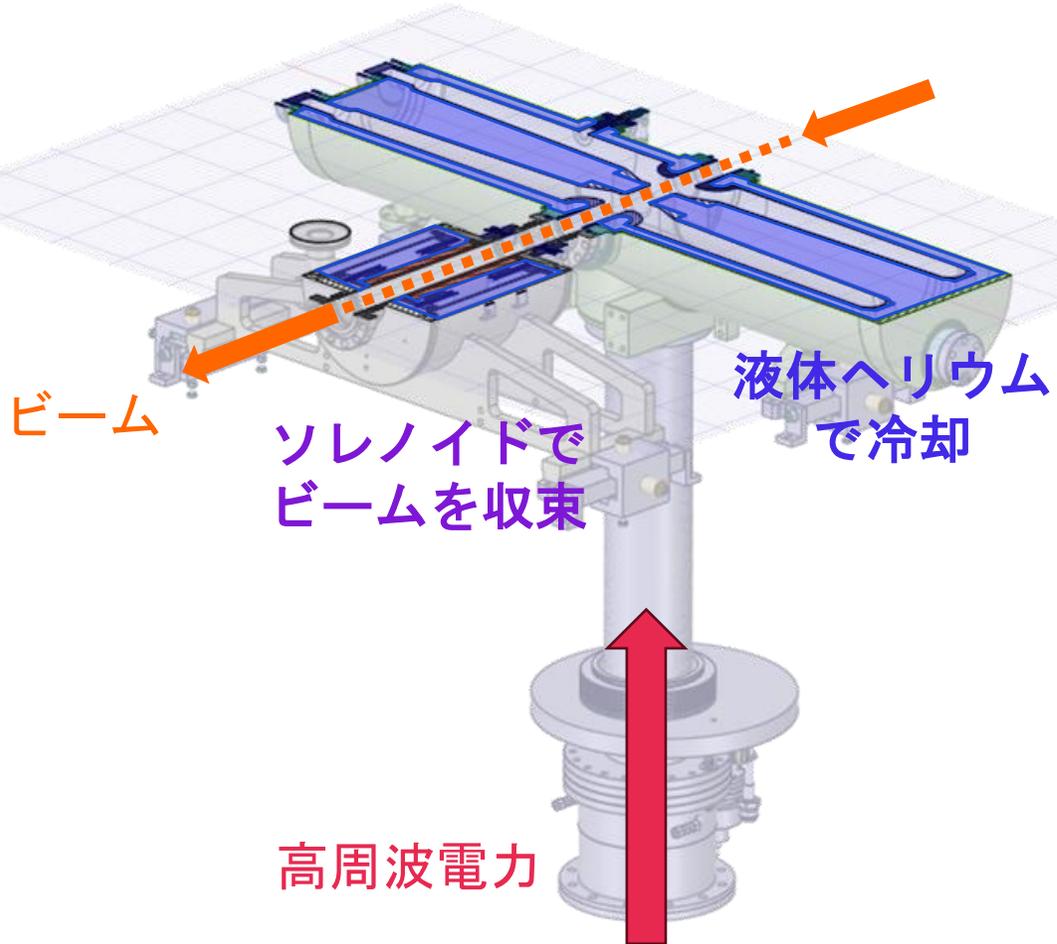
How LIPAc's superconducting accelerator works



# 前人未到大電流・定常加速への挑戦

Challenge to achieve unprecedented high current and steady-state acceleration

空洞でビームを加速



## 超伝導を加速器に用いる利点

空洞での高周波損失が非常に小さい

⇒ 高加速電界での定常 (CW) 運転の可能性

## 超伝導加速における3つの挑戦

### 1. 高い加速電界

特殊な製造技術・清浄度の維持

### 2. 極低温

液体ヘリウムによる 4 K 冷却

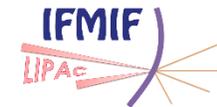
### 3. 大電流・定常 (CW) 運転

ビーム電力・高周波電力が非常に大きい  
これらの熱影響の低減・制御  
収束用ソレノイドの一体化



# 高い加速電界を作る：クリーンルームにおける組立作業

Creating high acceleration electric fields: Assembly work in clean rooms



- ・ 加速空洞内部の塵・微粒子は厳禁  
(電界放出が起こり、加速性能が劣化)
- ・ 加速空洞内面の作業は**クリーンルーム内で実施**
- ・ 微粒子は徹底的に除去 ⇒ 作業前に超純水で洗浄
- ・ 高真空・清浄度を保つための様々な工夫



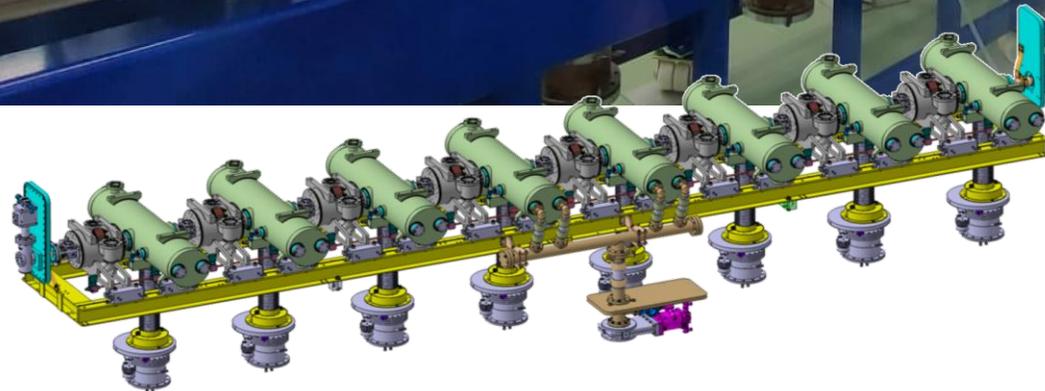
加速空洞と高周波カプラーの結合

六ヶ所研に設置された超伝導加速器組み立て用クリーンルーム

# 超伝導加速の心臓部の組立完了！

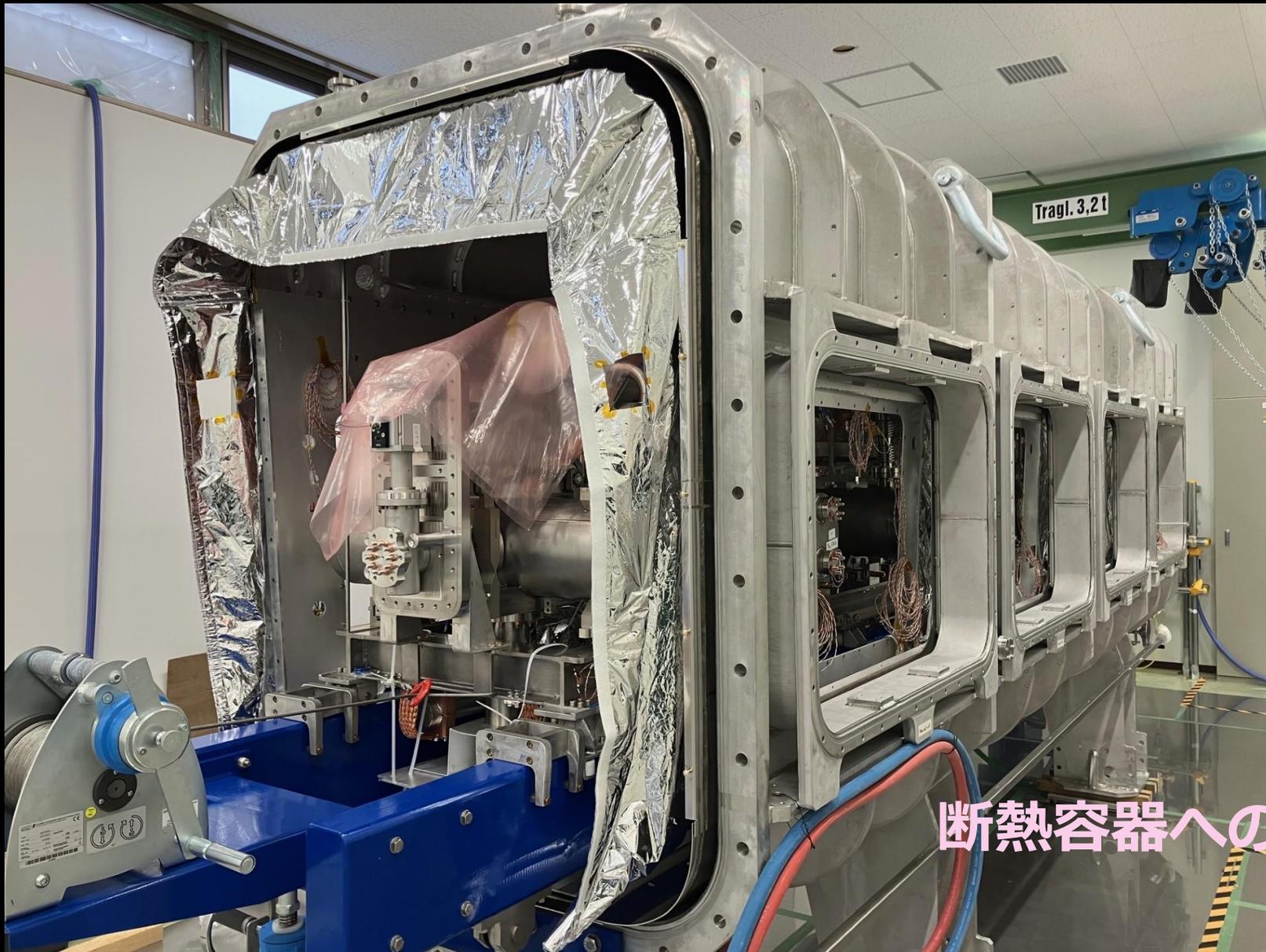
Assembly of the heart of the superconducting accelerator is completed!

## 空洞8台とソレノイド8台の真空部分を無事接続



# 極低温を作る：超伝導加速器の組立作業

Making cryogenic temperatures: assembly work for superconducting accelerator



断熱容器への挿入完了！

# 超伝導加速器の移動

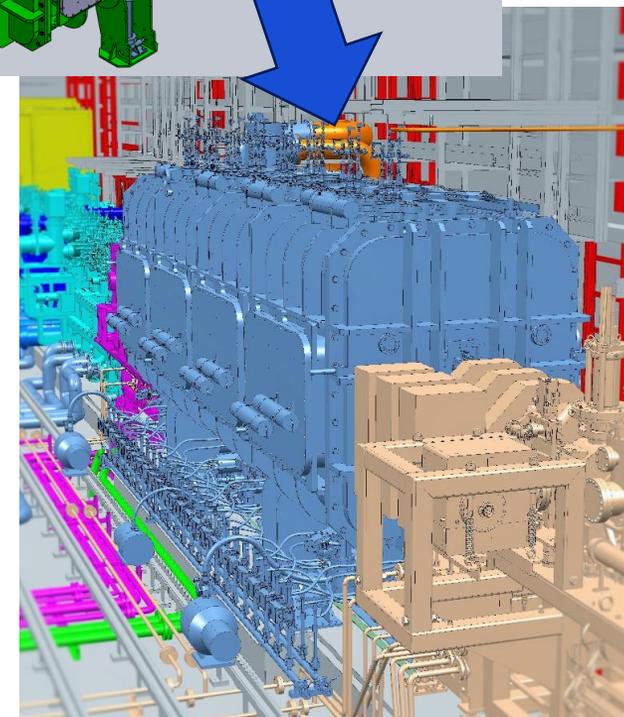
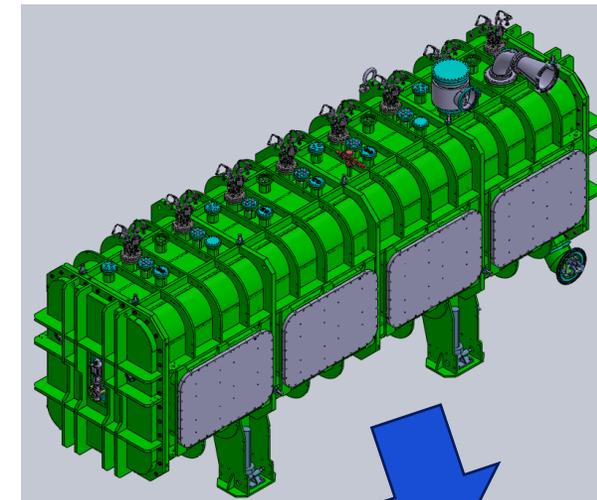
Moving superconducting accelerator

完成後の超伝導加速器の重量は12トン！ 圧縮空気で浮上させて移動



# 超伝導加速器の運搬と統合試験準備

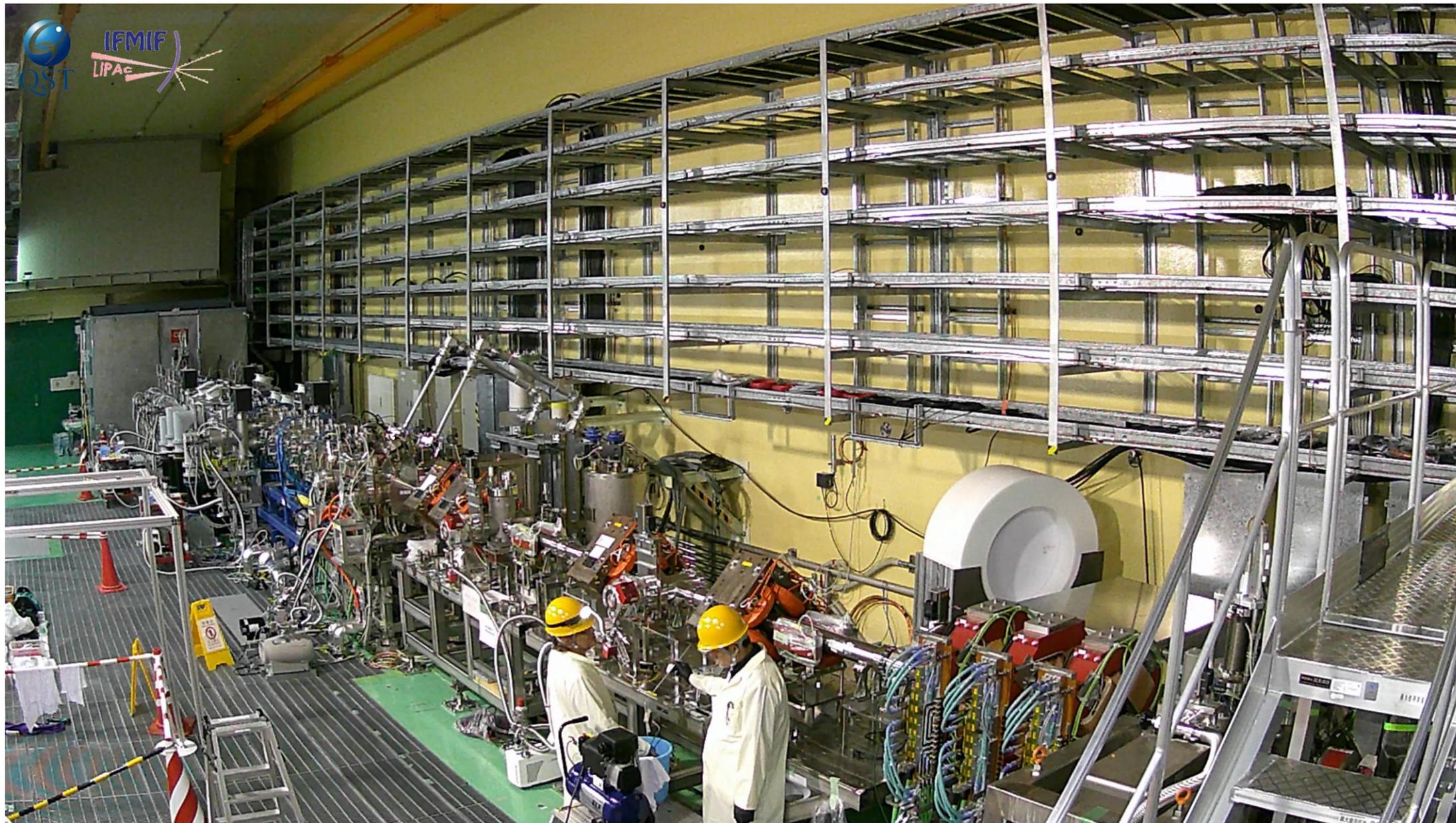
Transport of superconducting accelerator and preparation for integration tests



2026年の統合試験開始に向けて、着実に準備が進行中。  
超伝導加速器の初冷却は重要なマイルストーン！

# 加速器室での統合作業が進行中

Integration work in the accelerator room is underway



# 加速器室での統合作業が進行中

Integration work in the accelerator room is underway



# 超伝導加速に向けた挑戦と課題

## Challenges and Issues for Superconducting Acceleration



### 超伝導加速における3つの挑戦

#### 1. 高い加速電界を作り出す

清浄度を維持しながら組立を完了。

#### 2. 極低温を作り出す

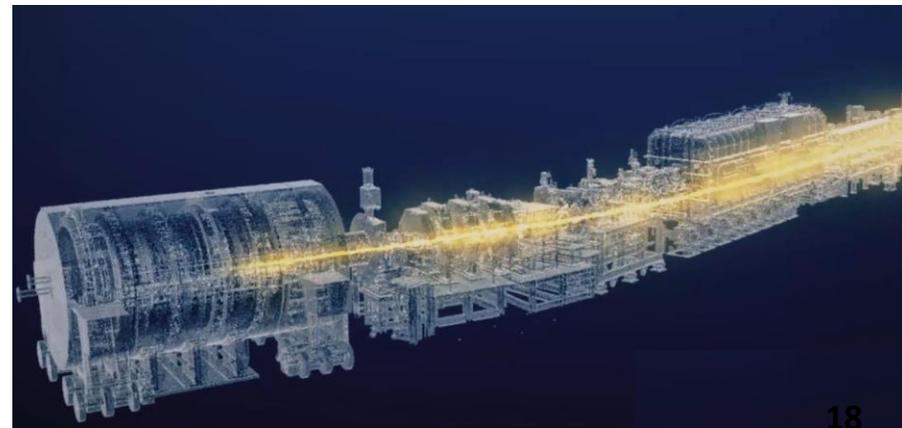
断熱容器の組立はまもなく完了。

**大きな加速器全体の均一な冷却制御などは最初の重要な実証課題。**

#### 3. 大電流・定常 (CW) 運転

RFQから超伝導加速器に供給するビームの品質評価を完了、試験開始に目途。

**大電流ビーム・大電力高周波の制御が課題**  
**大電流・定常化に向けて、ビーム加速試験を一步ずつ進め、目標達成を目指す。**



# 中性子源の実現に向けた大強度加速器の開発が進展



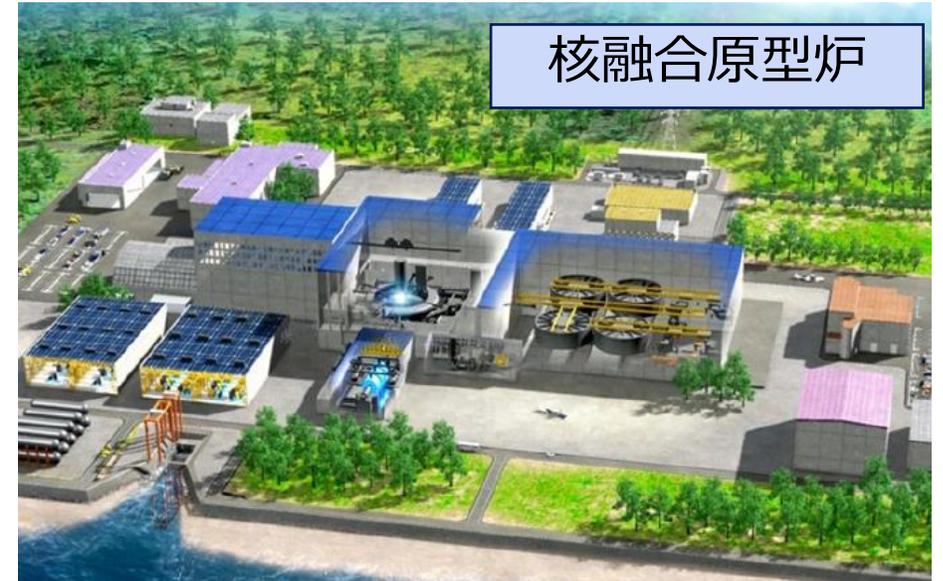
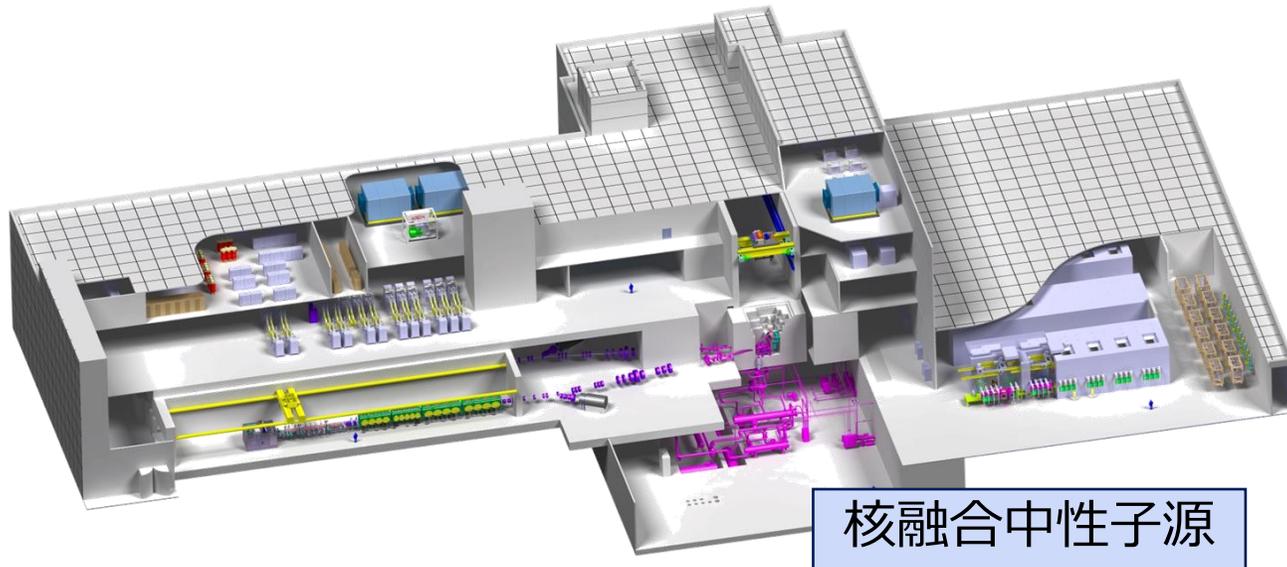
Development of high-intensity accelerator progresses toward realization of Neutron Source



IFMIF原型加速器LIPAcの実証試験は、定格電流で約10%デューティ比の運転に成功し、RFQによる世界最大電力のビーム加速を実証

超伝導加速器の組立も大きく進展し、2025年度には統合試験の準備を本格的に開始。2026年の統合試験開始に向けて前進。

材料試験のための中性子源の実現を通じて、原型炉計画へ貢献。



# 超伝導加速器の組立にご協力いただいた国内企業

Domestic companies that cooperated in the assembly of the superconducting accelerator



株式会社

ミラプロ



Fujikin

NAGAKI



株式会社ウィックス



HITACHI  
Inspire the Next

マルイ鍍金工業株式会社



株式会社NAT



AIRTECH



株式会社大湊精電社



日揮グループ



美和電気工業株式会社



新開トランスポートシステムズ



DYNATEC  
株式会社ダイナテック



附田建設株式会社

TSUKUDA construction Co., Ltd.



興研株式会社



Air Liquide



# ご清聴ありがとうございました

## Thank you for your attention

