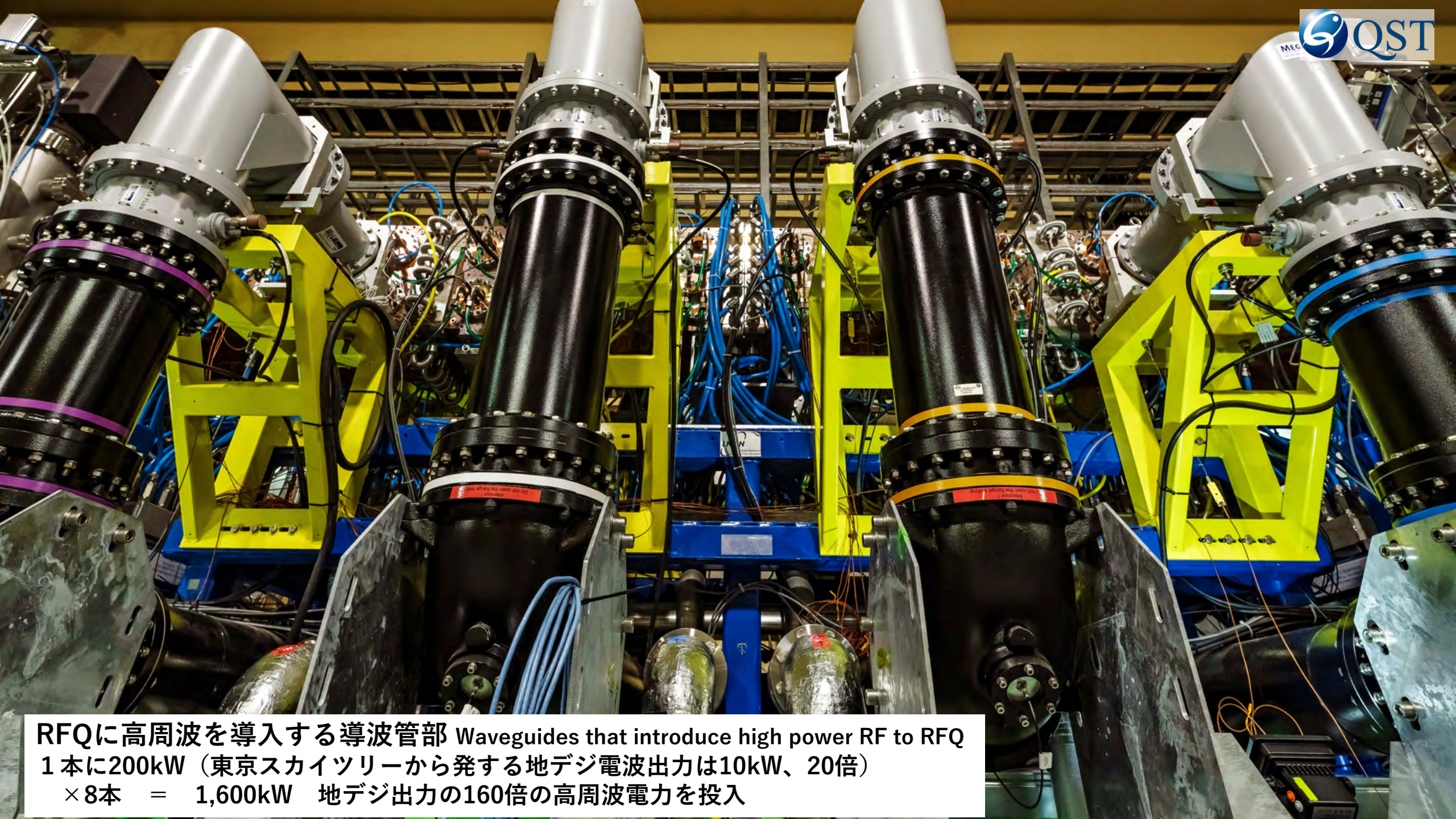


BA活動における大強度加速器開発と 広がる産業応用

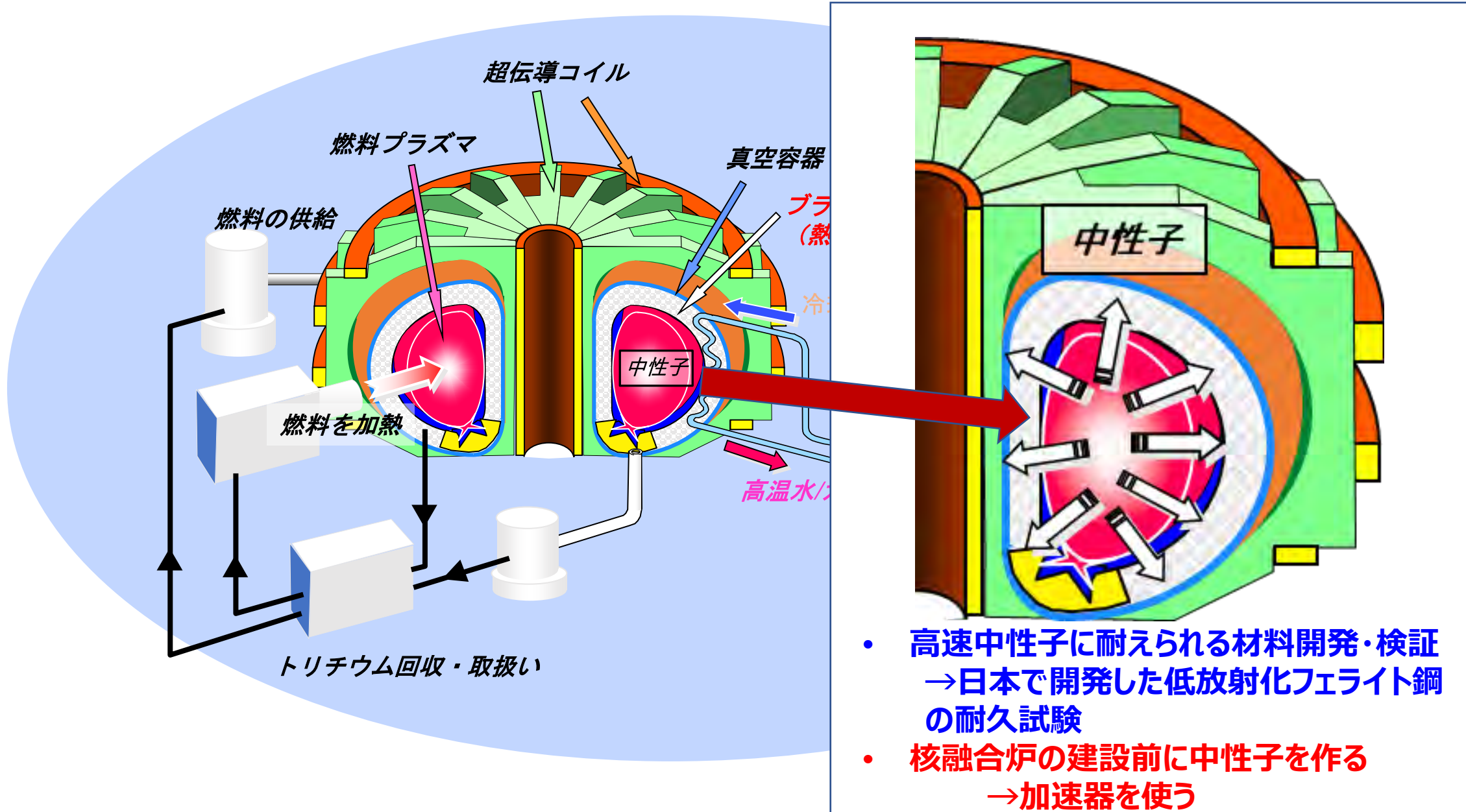
Development of high power accelerator in BA activities
and expansion to industrial applications

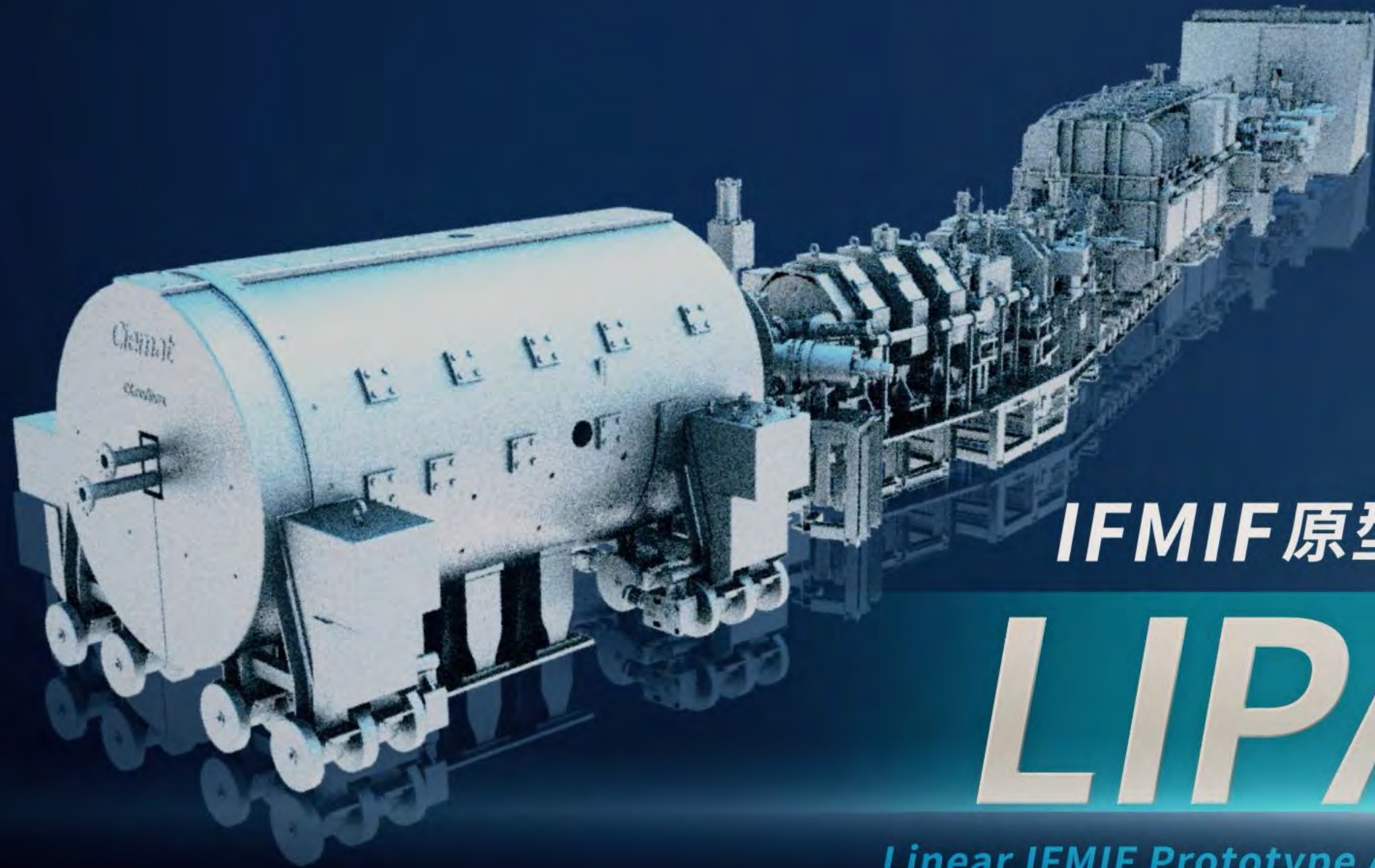
長谷川 和男
国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
六ヶ所研究所 核融合炉材料研究開発部

ITER/BA成果報告会2022
イイノホール 2022年12月22日



RFQに高周波を導入する導波管部 Waveguides that introduce high power RF to RFQ
 1本に200kW（東京スカイツリーから発する地デジ電波出力は10kW、20倍）
 ×8本 = 1,600kW 地デジ出力の160倍の高周波電力を投入





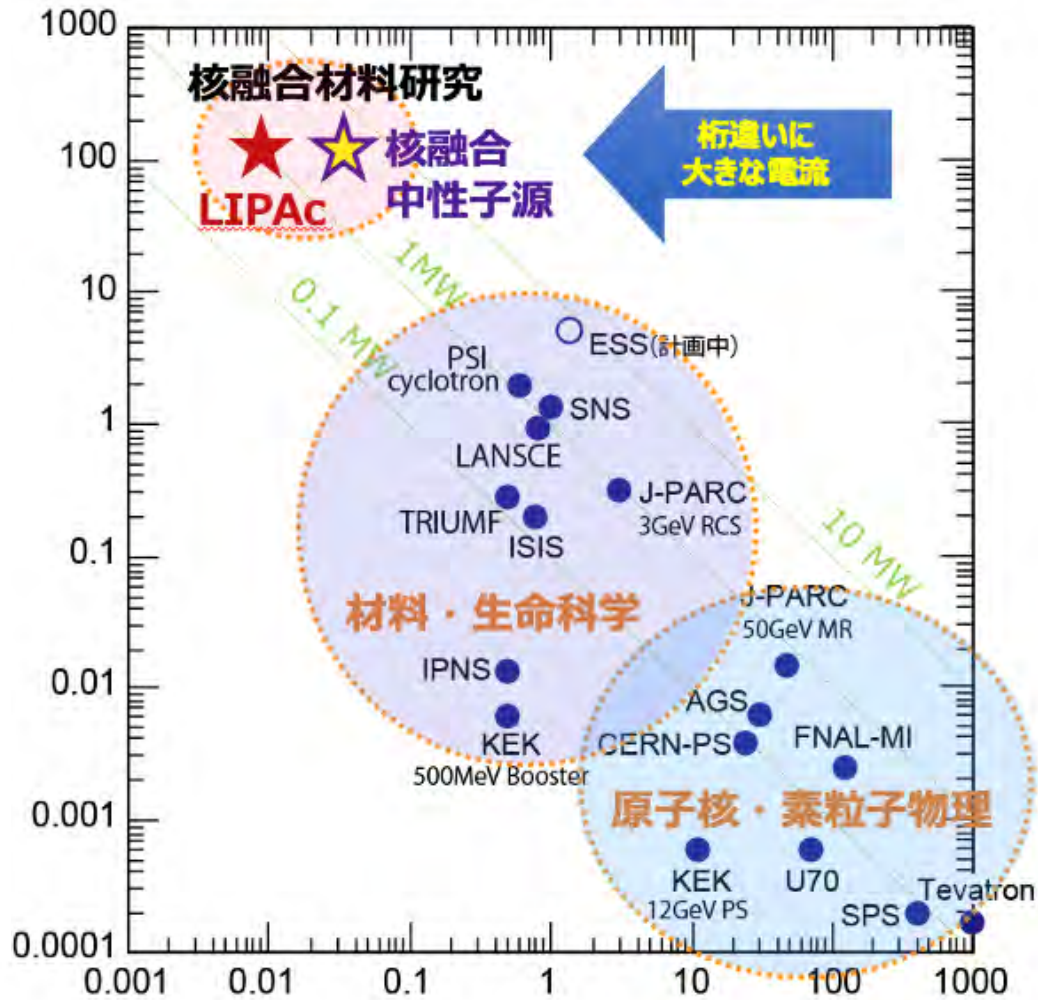
IFMIF原型加速器

LIPAC

Linear IFMIF Prototype Accelerator

前人未踏の大電流領域に挑戦

平均ビーム電流 [ミリアンペア]



ビームエネルギー[10億電子ボルト]

大電流化の課題

①大電流ビームの生成・加速

大電流の入射器
世界最大電流のRFQ
大出力高周波源

②連続加速（断続的でない）が可能な構造、工夫

超伝導加速構造
高い冷却能力、温度変化に追随する制御

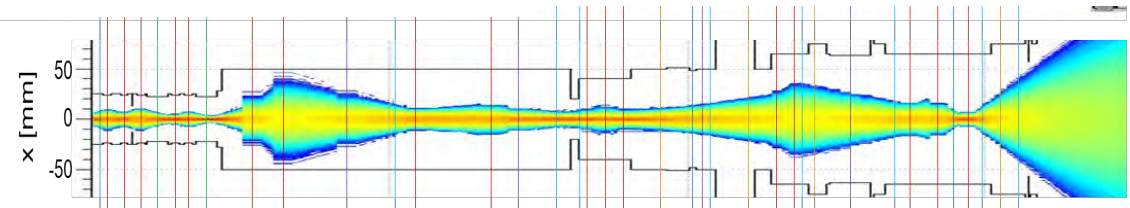
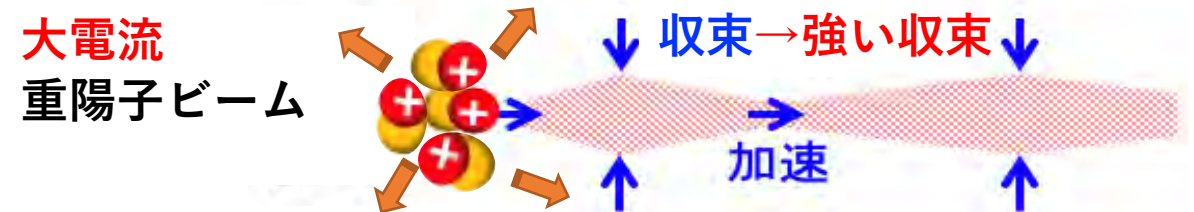
③ビームの広がり制御

高度なビーム粒子シミュレーション
収束機構の最適化

大電流

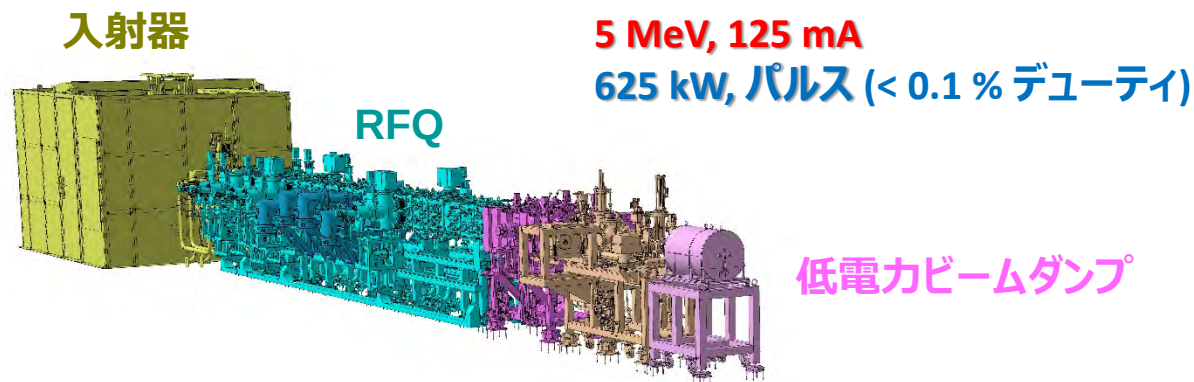
重陽子ビーム

自身の電荷で強い反発



LIPAcの収束とビームシミュレーションの例

RFQの低電力試験 2019/08完了



入射器

連続

0.1 MeV, 125 mA
12.5 kW, 連続

2015年4月 - 2017年8月

入射器

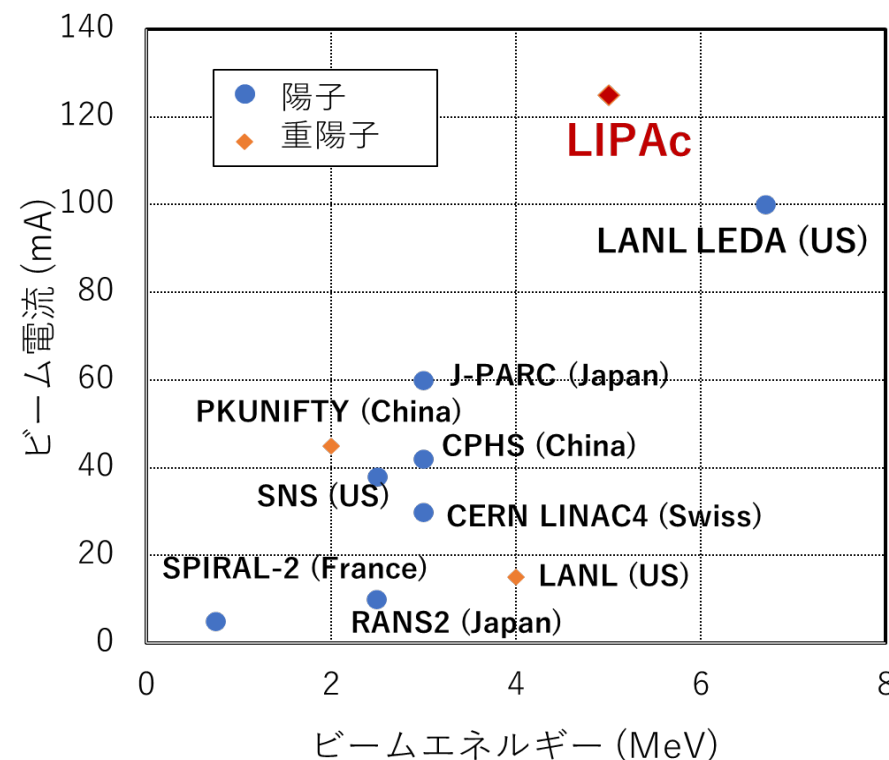
RFQ

低電力ビームダンプ

パルス

5 MeV - 125 mA
625 kW - パルス

2018年6月 - 2019年8月



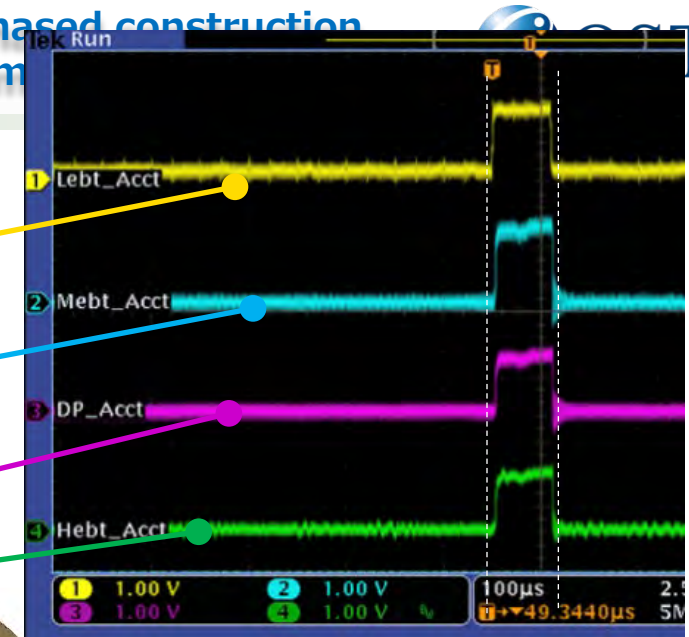
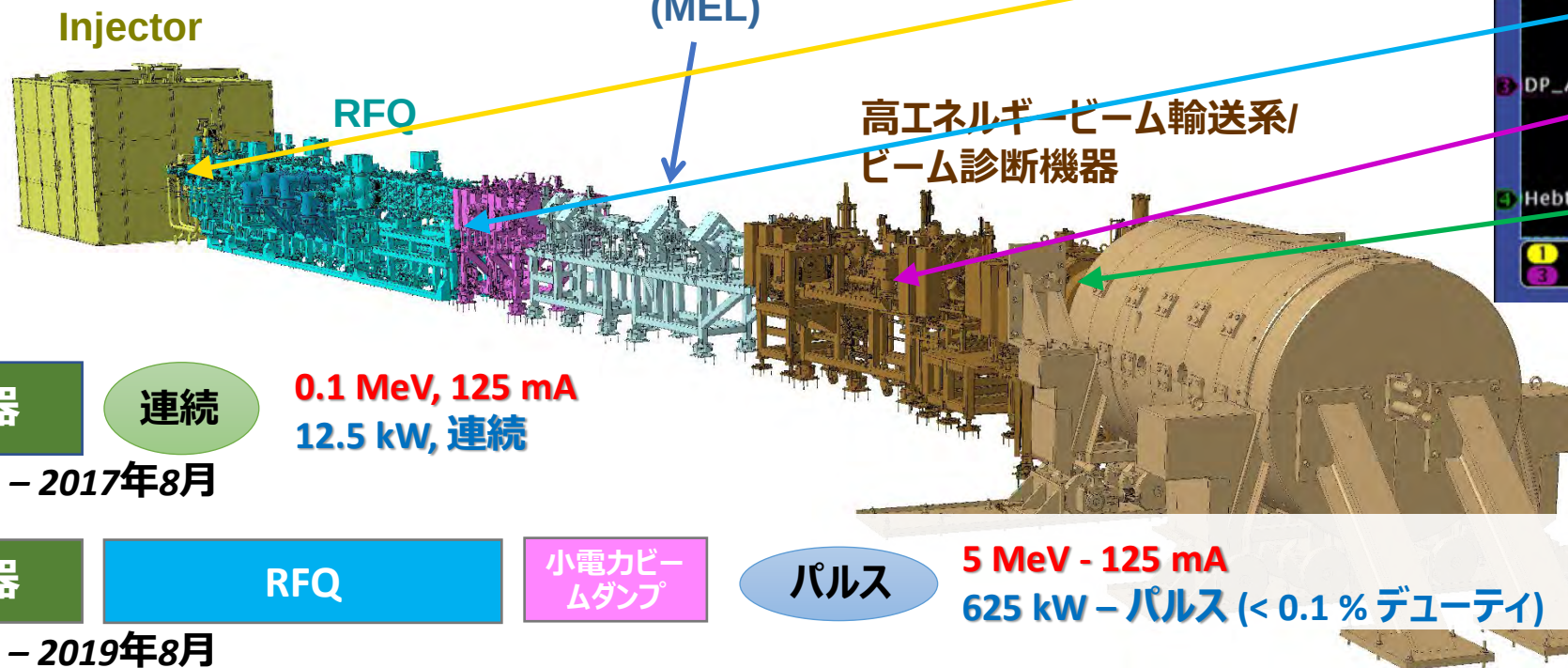
RFQ による125 mA* のD⁺ビーム加速に成功
(2019年8月9日) (*マクロパルスの電流値)
(世界最高電流)

LIPAcの段階的建設・ビーム試験（2）

LIPAc Phased construction
and beam

RFQの大低電力試験 進行中

中間エネルギー延長ビーム輸送系
(MEL)



加速試験時のビーム波形
RFQの下流からダンプまで
ほぼ100%到達

入射器

連続

0.1 MeV, 125 mA
12.5 kW, 連続

2015年4月 - 2017年8月

入射器

RFQ

小電力ビーム
ダンプ

パルス

5 MeV - 125 mA
625 kW - パルス (< 0.1 % デューティ)

2018年6月 - 2019年8月

入射器

RFQ

MEL

大電力ビームダンプ

連続

5 MeV, 125 mA
625 kW, パルス～連続

2021年7月 -

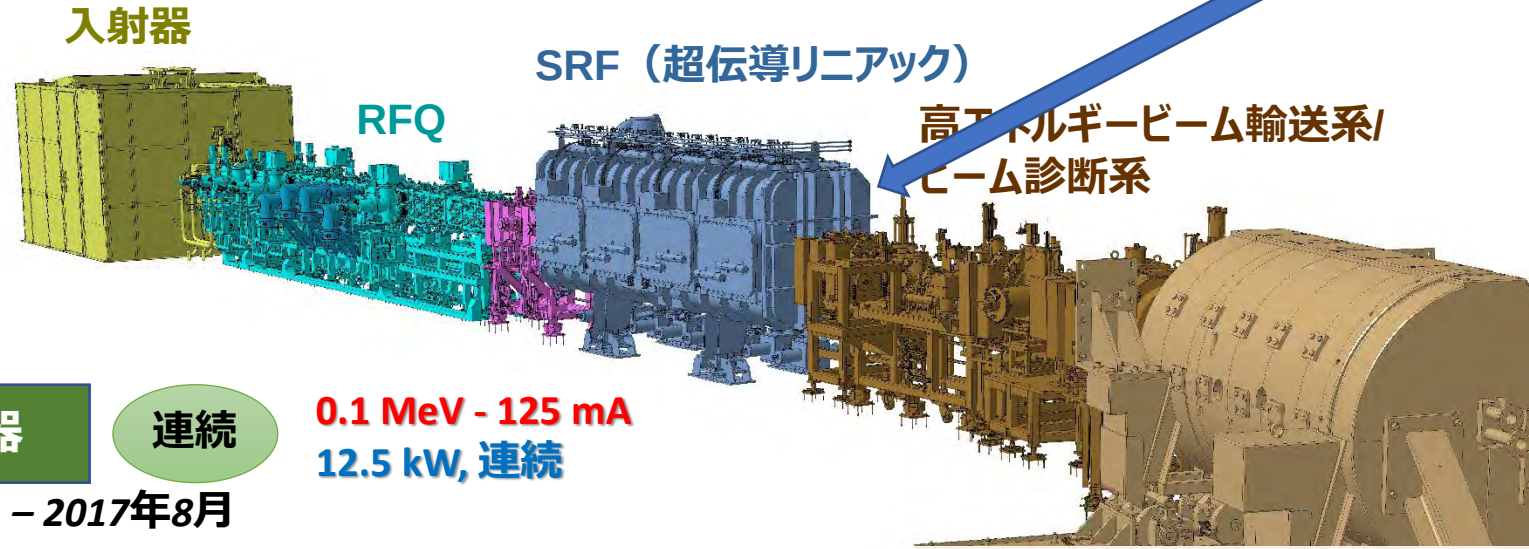
← 現在

LIPAcの段階的建設・ビーム試験（3）

LIPAc R
and be



超伝導リニアックの試験 次段階



入射器

連続

0.1 MeV - 125 mA
12.5 kW, 連続

2015年4月 - 2017年8月

入射器

RFQ

小電力
ダンプ

パルス

5 MeV - 125 mA
625 kW - パルス (< 0.1 % デューティ)

2018年6月 - 2019年8月

入射器

RFQ

MEL

大電力ビームダンプ

連続

5 MeV - 125 mA
625 kW - パルス → 連続

2021年7月 -

入射器

RFQ

SRF

大電力ビームダンプ

パルス、
連続

9 MeV - 125 mA
1.125 MW - パルス → 連続

次段階

← 現在

最終レイアウト



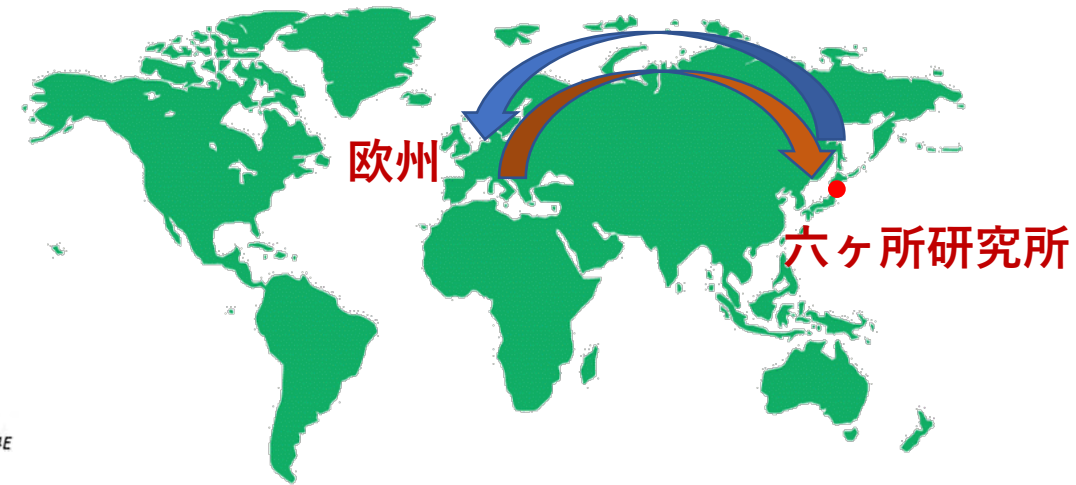
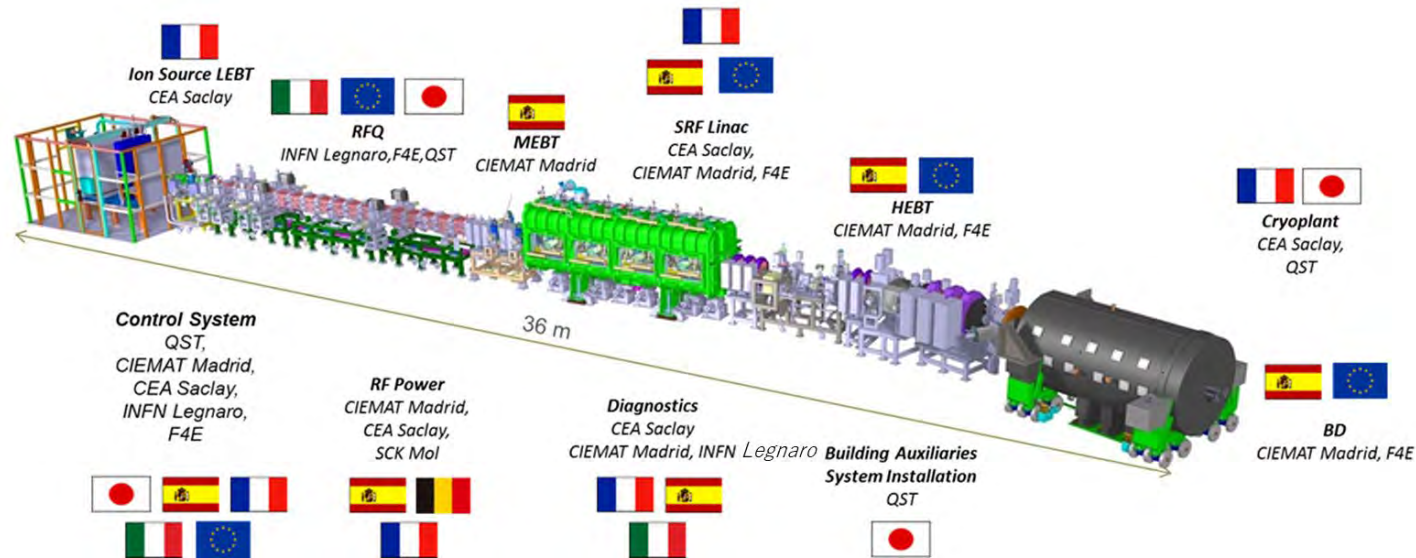
組立中の超伝導加速空洞



クライオモジュール外観
(超伝導リニアックの本体)

LIPAc開発：日欧の共同チーム

Development of LIPAc:
EU and JA joint team



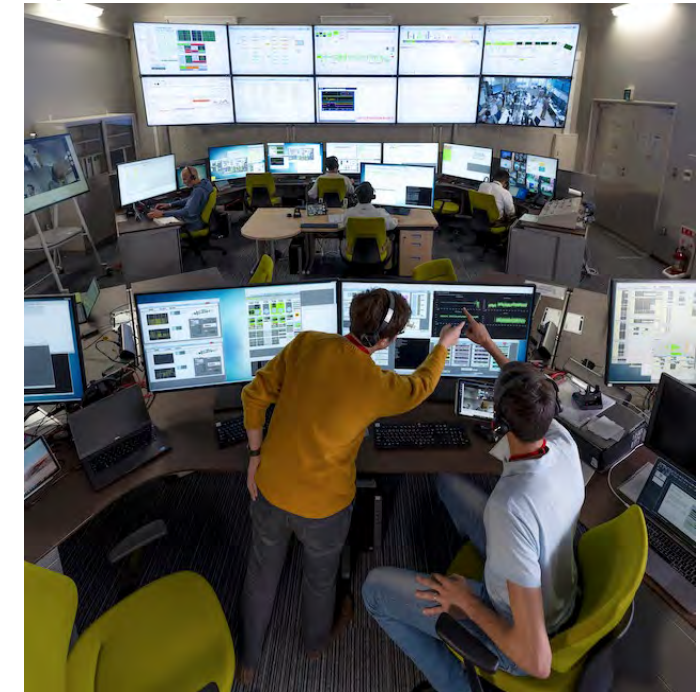
日欧のチームワークを結集



遠隔データ転送



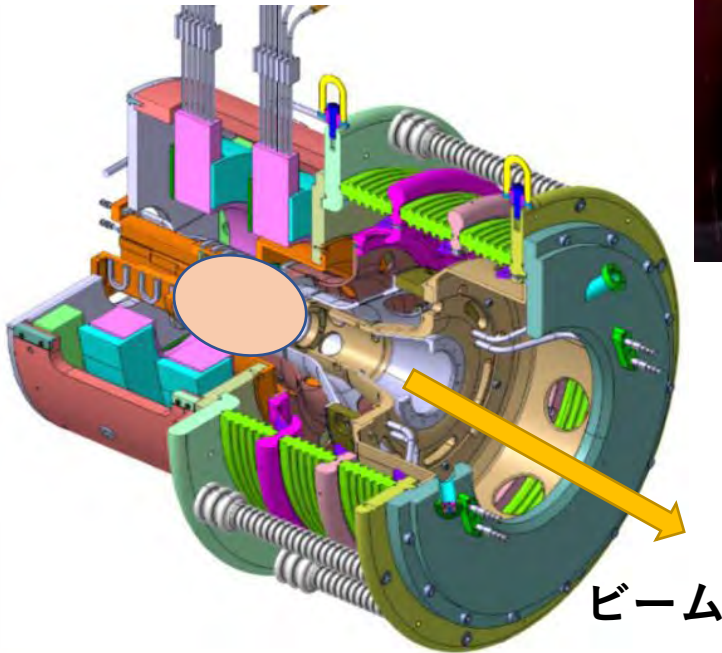
リモートでの実験参加



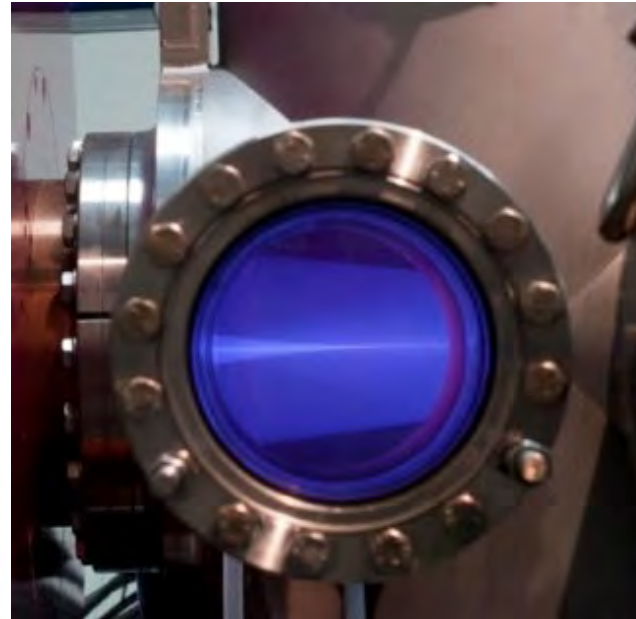
六ヶ所の遠隔実験室 (中央制御室)

入射器の要求性能

- ・ 電流
- ・ 収束性（エミッタンス）
- ・ 安定性
- ・ 長寿命

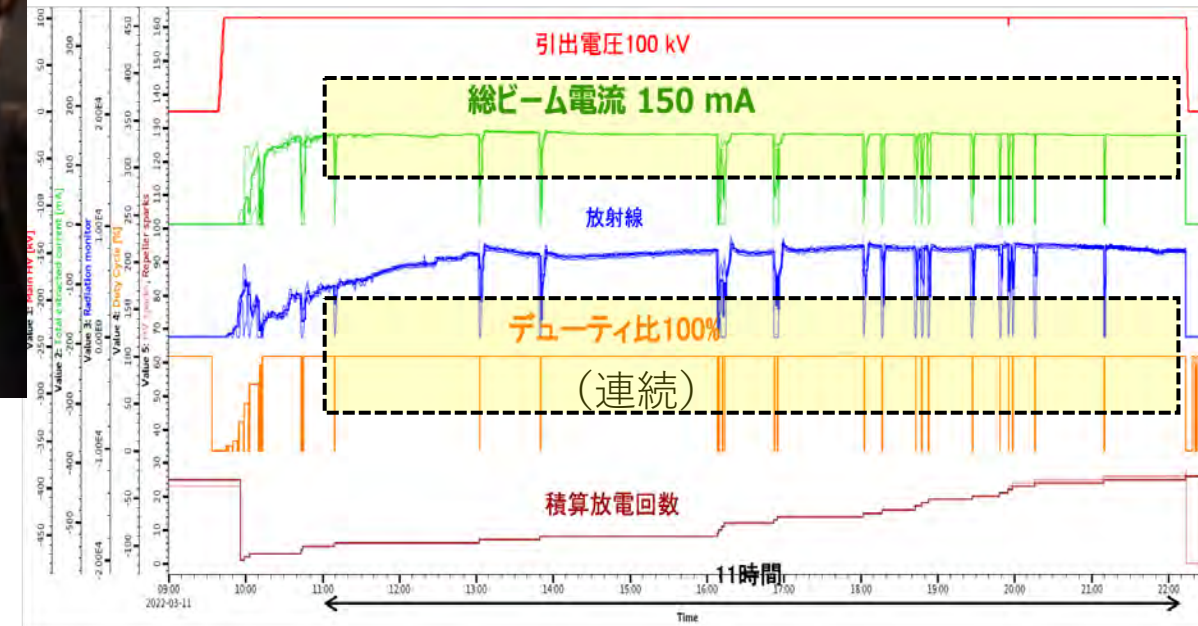


LIPAcの入射器



ビームによる発光

入射器の大電流定常実証



長時間の運転試験の結果

11時間の連続運転（デューティ比100%）に成功

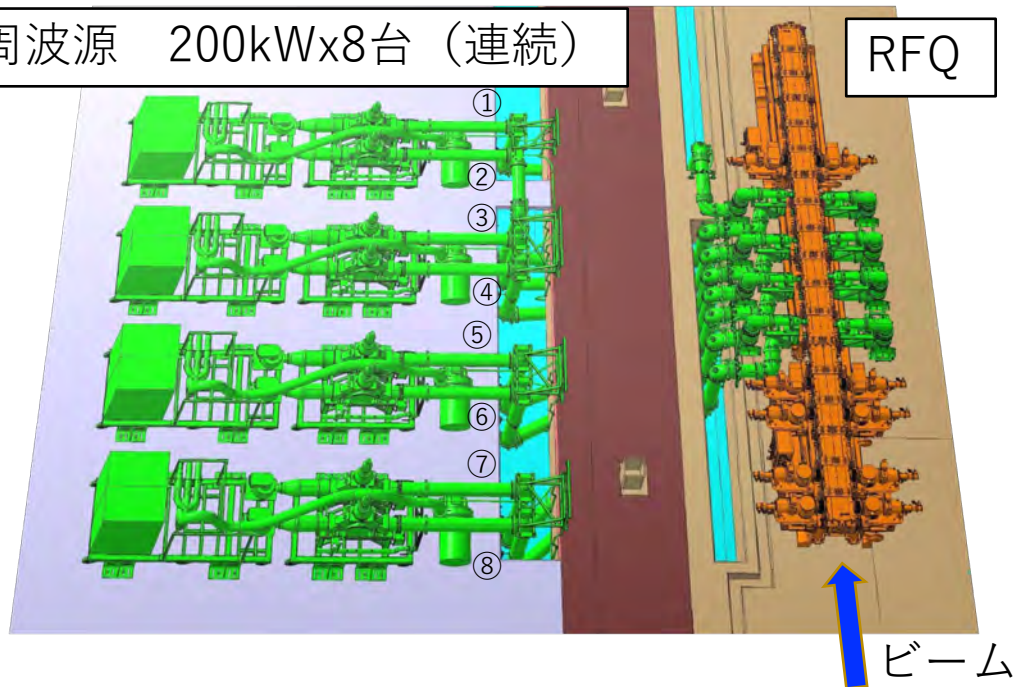
125 mAの連続重陽子ビーム加速試験に必要な**大電流・安定性・収束性**を同時に達成。**LIPAcの入射器システムに必要な性能を実証**

LIPAc開発 : RFQ と 高周波源システム

Development of LIPAc:
RFQ and RF system



高周波源 200kWx8台 (連続)



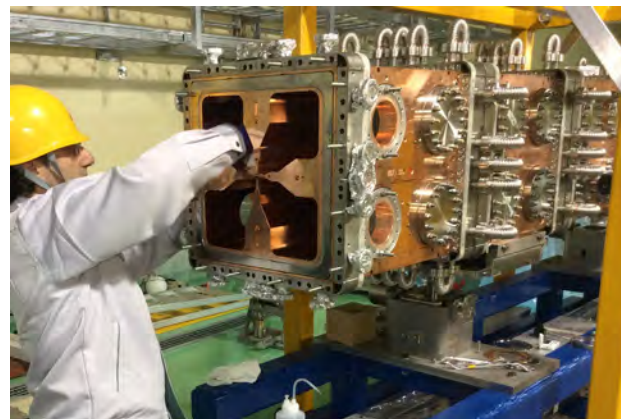
RFQ

LIPAcのRFQと高周波源 : チャレンジングな性能

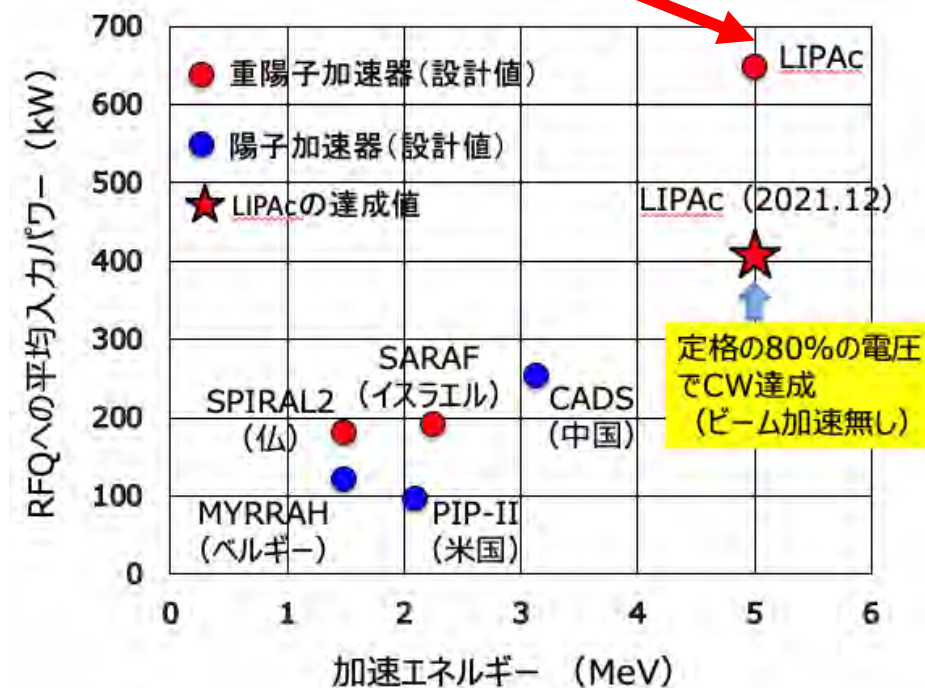
- RFQ : 高加速エネルギー (5MeV)、大電流 (125mA)、世界最長 (9.8m)
- 高周波源 : 大電力 (200kW/台)、8系統の同時入射
- RFQへの入力電力 : 650kW (ビーム加速時1400kW)



導波管と高周波源 (右側)



組立中のRFQ



RFQの平均入力電力 (パワー) の比較



日欧の研究者の意気込み

海外の施設からのメッセージ

Messages from EU and JA scientists and neutron accelerator facility

中性子照射施設のための
原型加速器 (LIPAc)

日欧共同で開発、実証試験中

核融合中性子源施設 (A-FNS) の工学設計

加速器を使って発生する大強度の中性子を、核融合材料照射、
及び、様々な中性子応用利用できる施設

核融合中性子源



BA活動で加速器の性能を実証

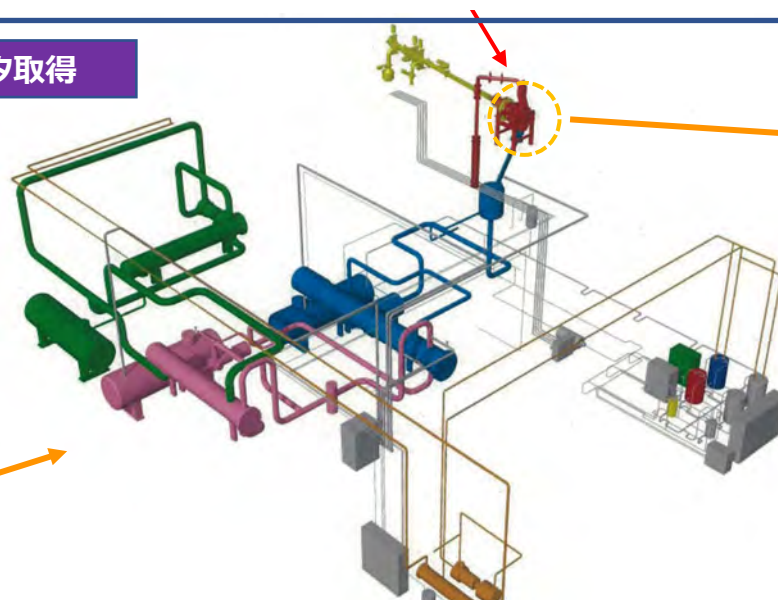
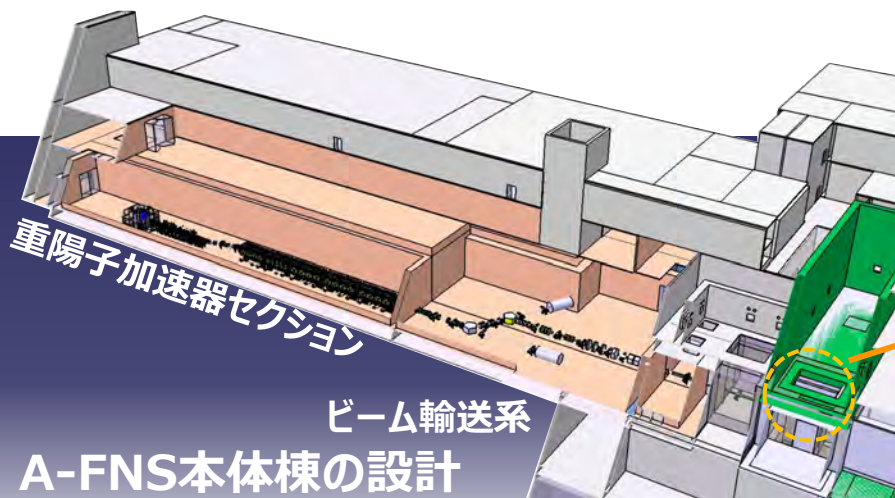
概念設計

工学設計

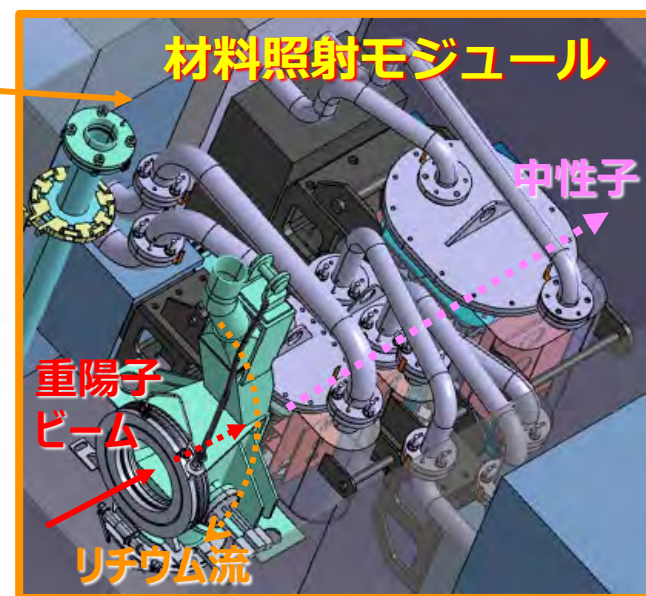
製作・建設

データ取得

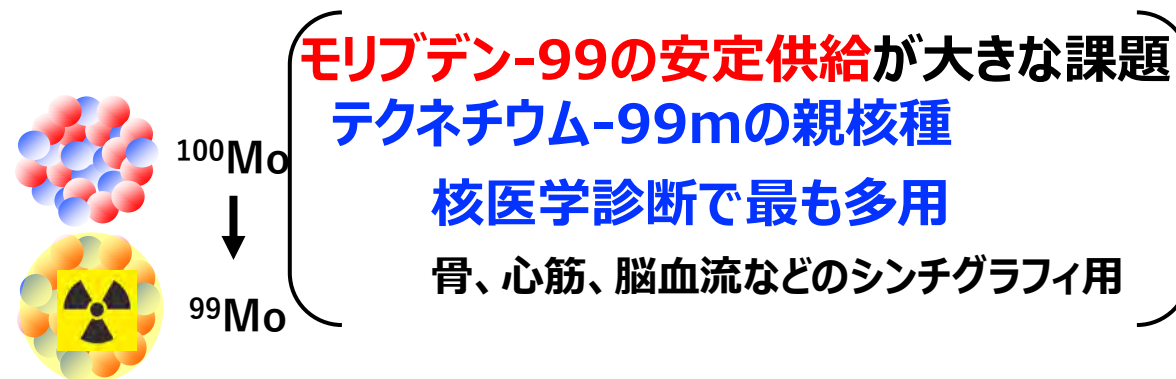
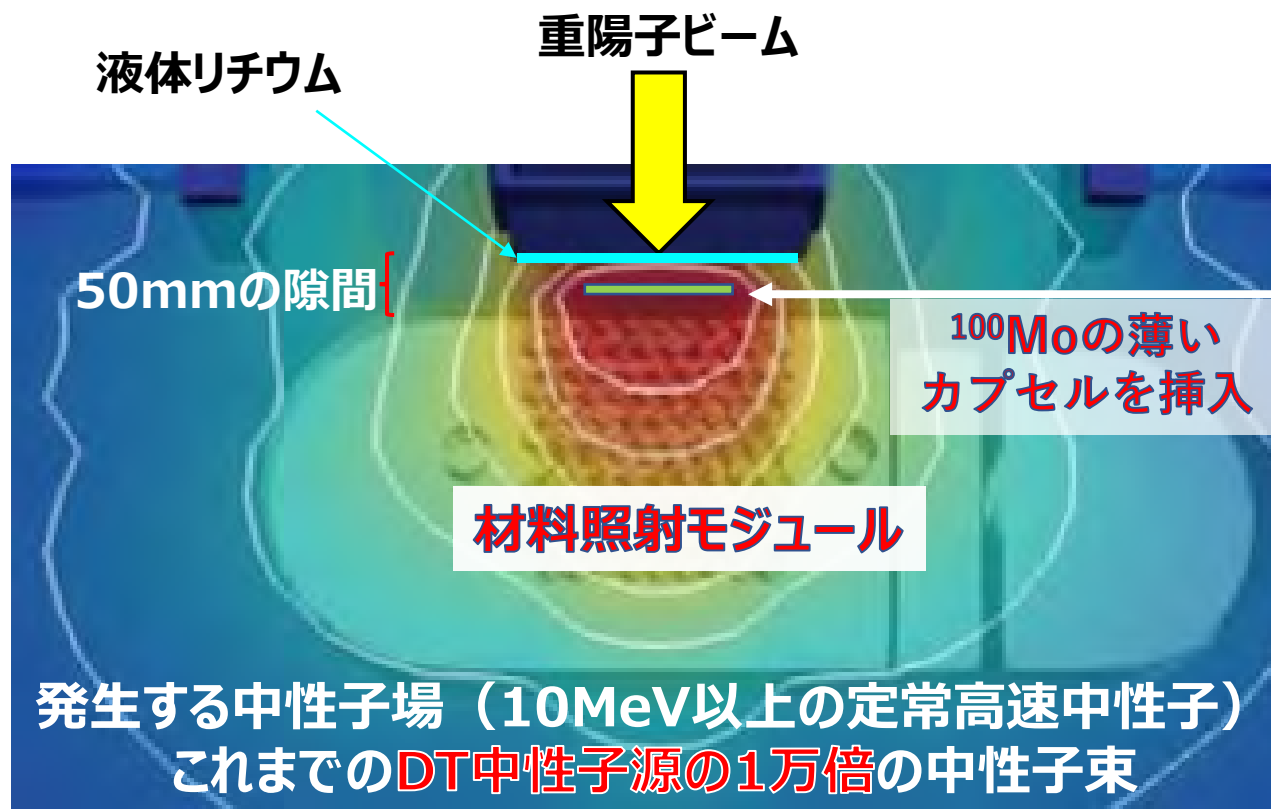
現在の進捗



液体リチウムターゲットループの設計



大強度中性子源を用いたクリーンなRI製造と供給の国産化技術の開発



A-FNSでの評価

→日本の1週間の需要量の2倍以上の
 ^{99}Mo を製造

これまで100%海外輸入に依存しているMo-99の国内製造と安定供給への道を拓く

- 核融合炉材料用照射
- 医療用放射性同位元素製造

→同時利用できる施設

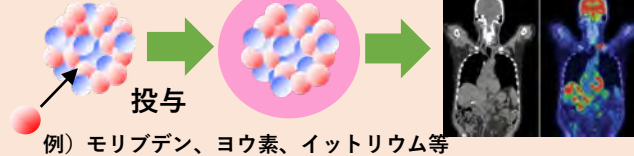
核融合炉の材料・機器試験だけでなく、基礎研究・産業医療・エネルギー応用までを網羅する、**汎用性の高い照射場の提供→新たな中性子研究・産業への展開**

「くすり」をつくる

生命・健康を維持する

放射性医薬品製造

高純度元素 放射性医薬品



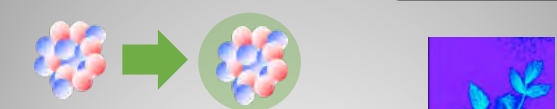
日本の放射性医薬品供給の現状
海外からの全て輸入するため安定供給できない
年間100億円単位の国内市場

参考) 放射線利用の経済規模調査
(平成27年度) 内閣府

「病害虫に強い農作物」をつくる

食料をまもる

陽電子イメージング



酸素・窒素・炭素同位体製造
品種改良用トレーサー製造の市場規模1000億円

「物質」をつくる

生活を豊かにする

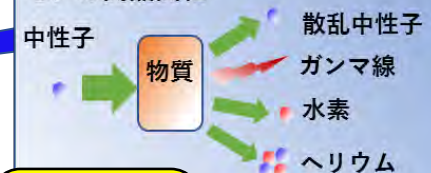
半導体製造



国内原子炉照射による製造で年間5トン程度製造していたが、2011年以降原子炉未稼働のため停止

「特殊な目で」を内部を見る

ラジオグラフィー・放射化分析等
モノの高品質化

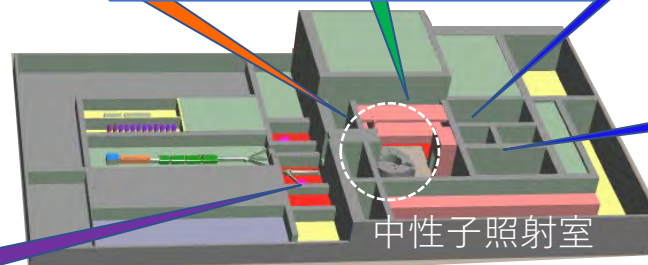


科学の目

散乱中性子 → エンジンの開発
超伝導物質の開発
ガンマ線 → 高純度物質の開発
水素 → 水素エネルギー物質の開発
ヘリウム → リチウム電池の開発

産業応用例

A-FNS中性子源施設



中性子照射室

**A-FNS施設を中核とした
中性子応用研究施設群の構築へ
(ニュートロンフォレスト構想)**

「先進医療」をつくる

病気を治す

ホウ素-中性子捕獲がん治療
(BNCT)悪性脳腫瘍、肝臓がん、
中皮腫等の治療



ニュートンフォレスト構想

—A-FNS関連施設から中性子産業の創出へ—

Neutron forest concept:
From A-FNS related facilities
to neutron application industries

