

核融合フロンティア 世界最高強度の加速器開発

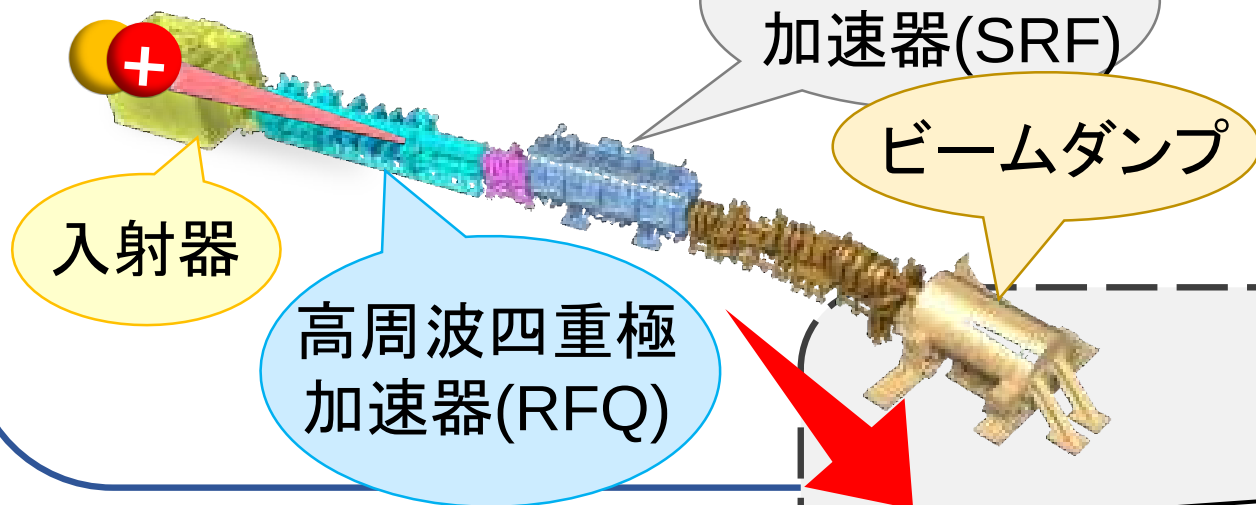
青森県
六ヶ所村

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 新屋 貴浩

1. IFMIF原型加速器

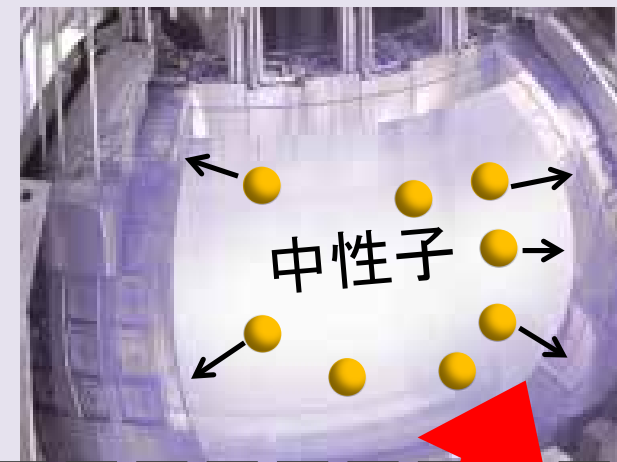
世界最高強度(=電流)の
重陽子ビーム加速器開発中

日欧合同チーム

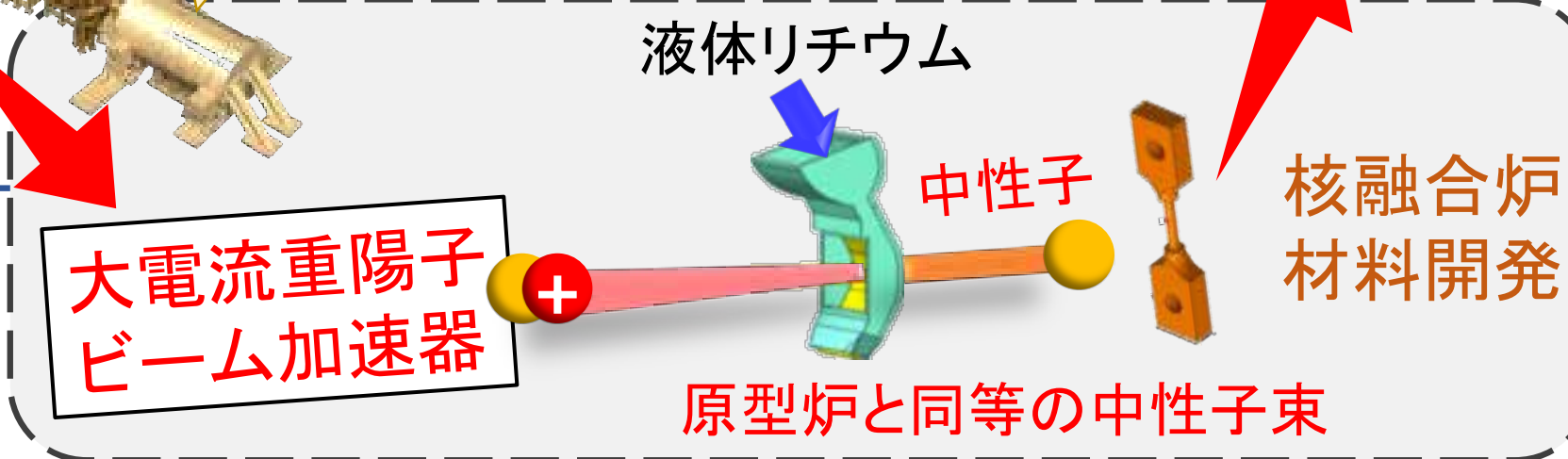


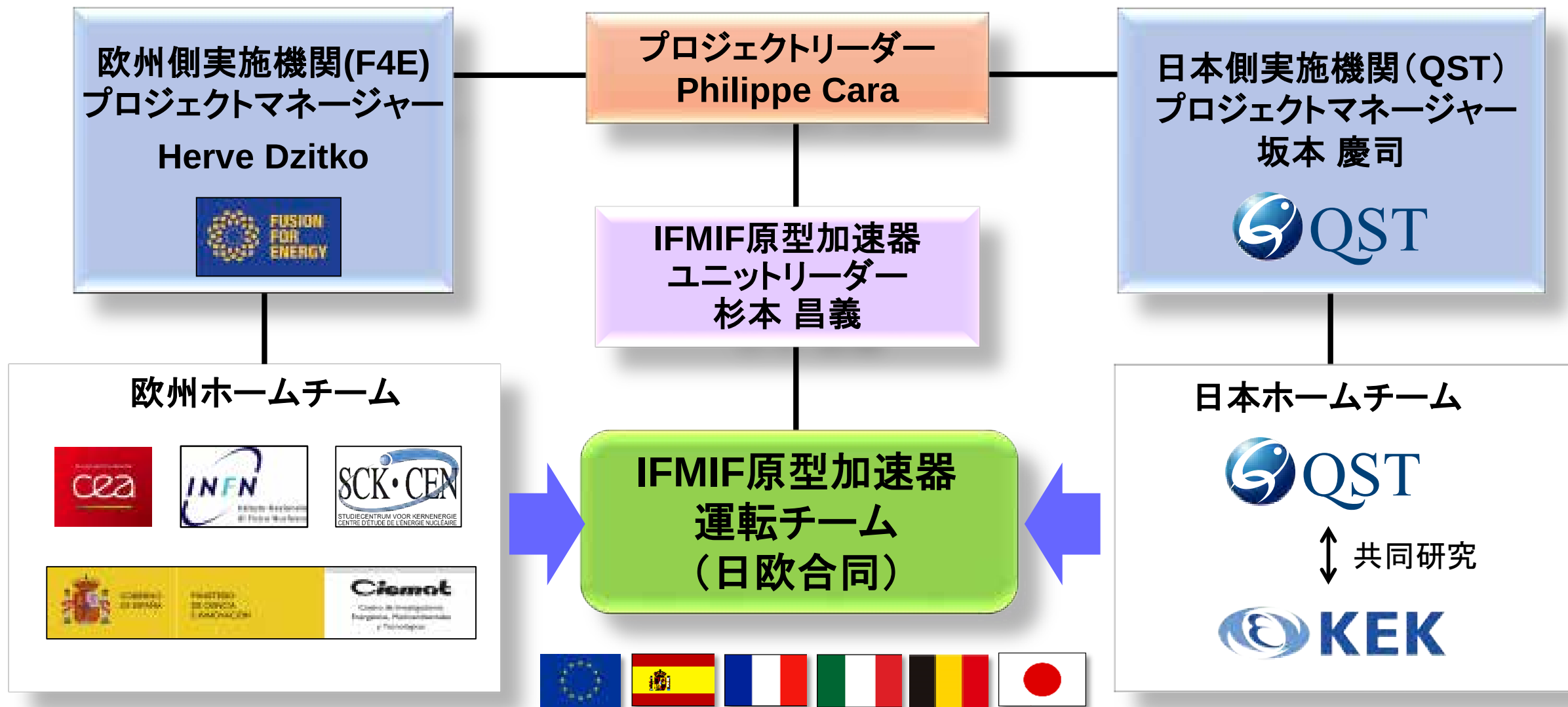
3. 核融合原型炉

健全性を実証した材料を
使う必要がある



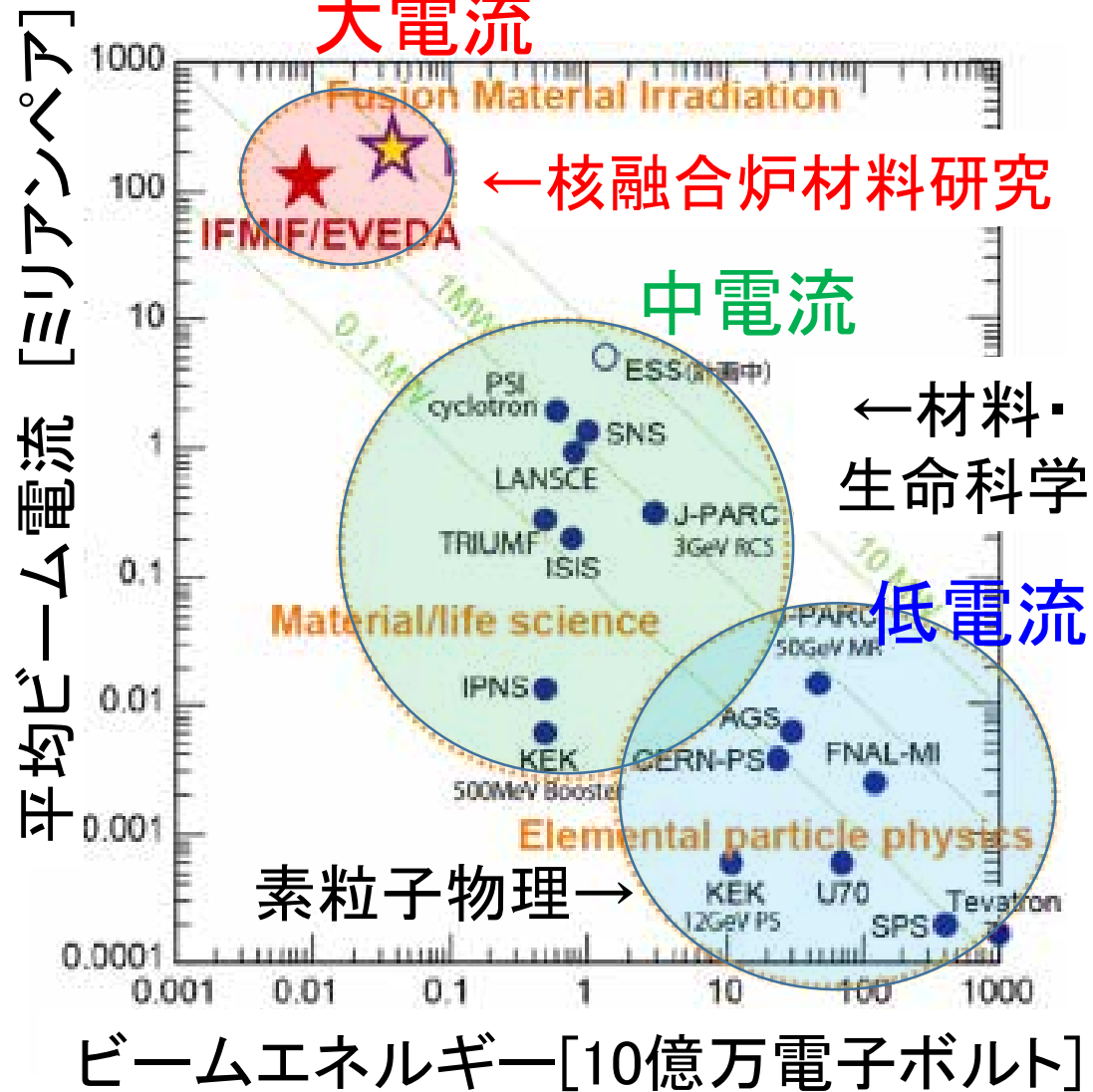
2. 加速器駆動型中性子源 (国際核融合材料 照射施設(IFMIF))





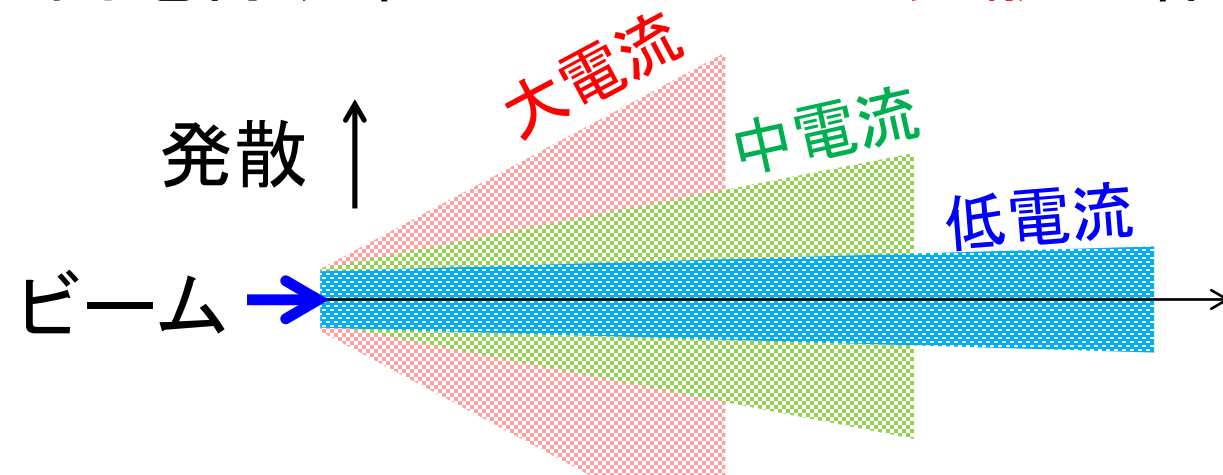
前人未踏の大電流領域に挑戦

大電流

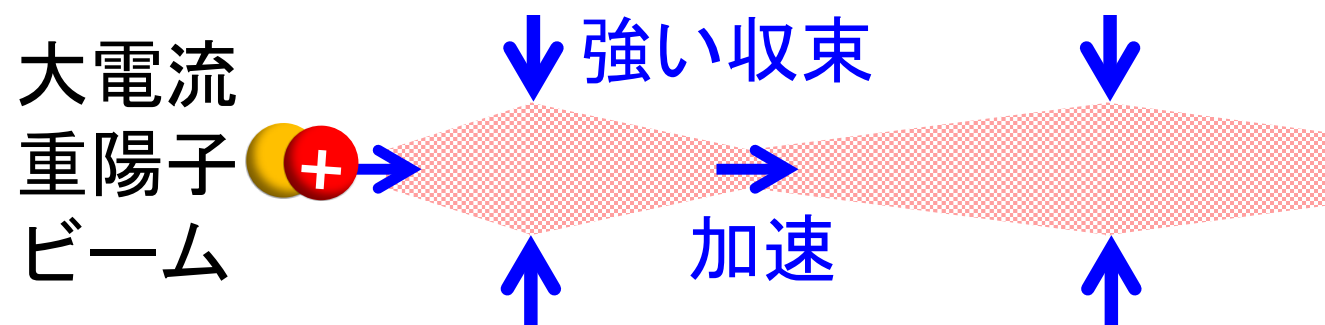


大電流化の課題

空間電荷効果によるビームの発散が増大



そのため、①強く収束しながら加速する
大電流加速器と②大電力が必要



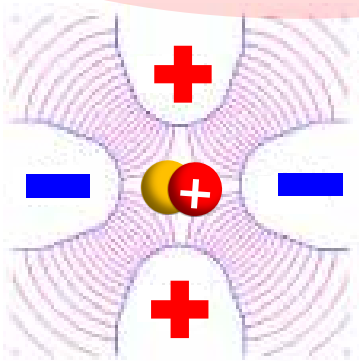
①世界最長、9.8mのRFQを開発

理論的な放電限界ギリギリ、全長9.8mの高周波四重極加速器(RFQ)で125ミリアンペアの大電流重陽子ビームを高周波電場で強く収束しながら加速する。

大電流

RFQ

世界最長 9.8m
高度な製作技術



四重極高周波電場

低電流

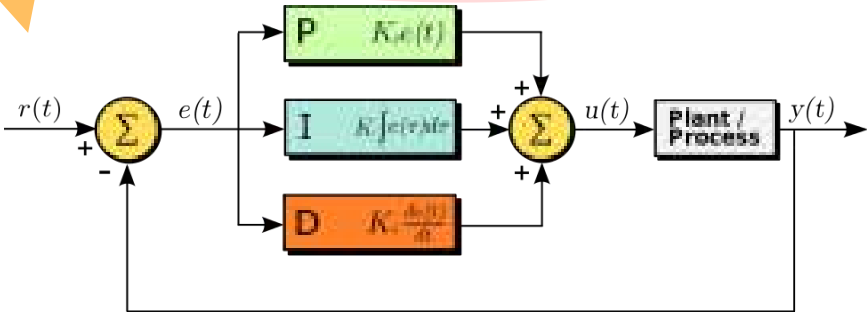
②世界最多、8系統の大電力高周波源を開発

8系統高周波源をシンクロ・フィードバック制御することで1600キロワットの大電力高周波パワーを供給する。

大電力

高周波源

世界最多 8系統
最先端のシンクロ・フィードバック制御

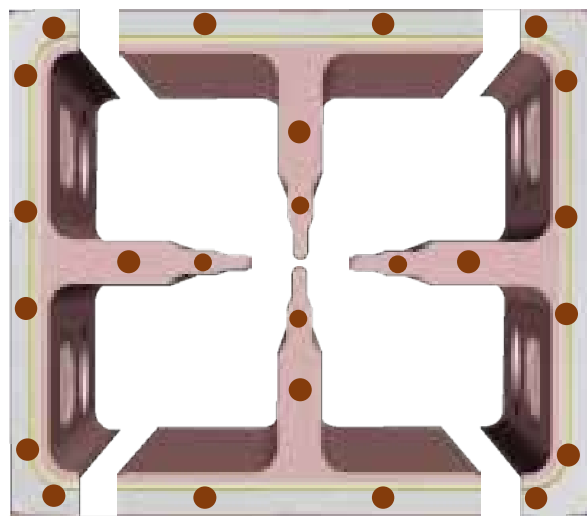


タイミングシステム + PID制御

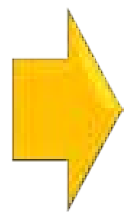
低電力

世界最長9.8mの大電流RFQは、放電限界ギリギリの高周波電場を高精度に励起するため、**世界最多の18分割したモジュール構造**の設計となった。

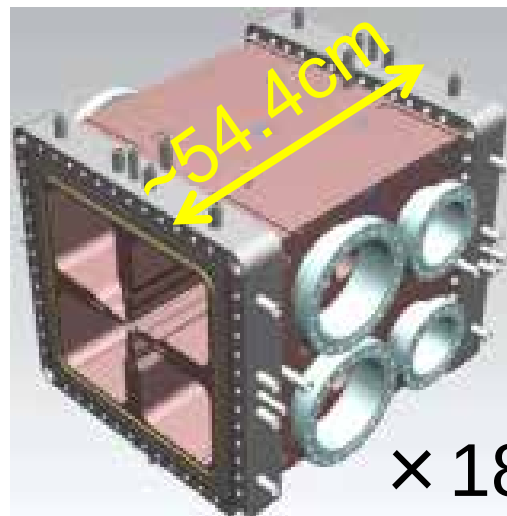
加工された4枚の
水冷式ベーン



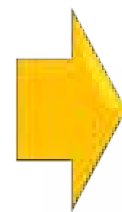
高精度加工
30ミクロン



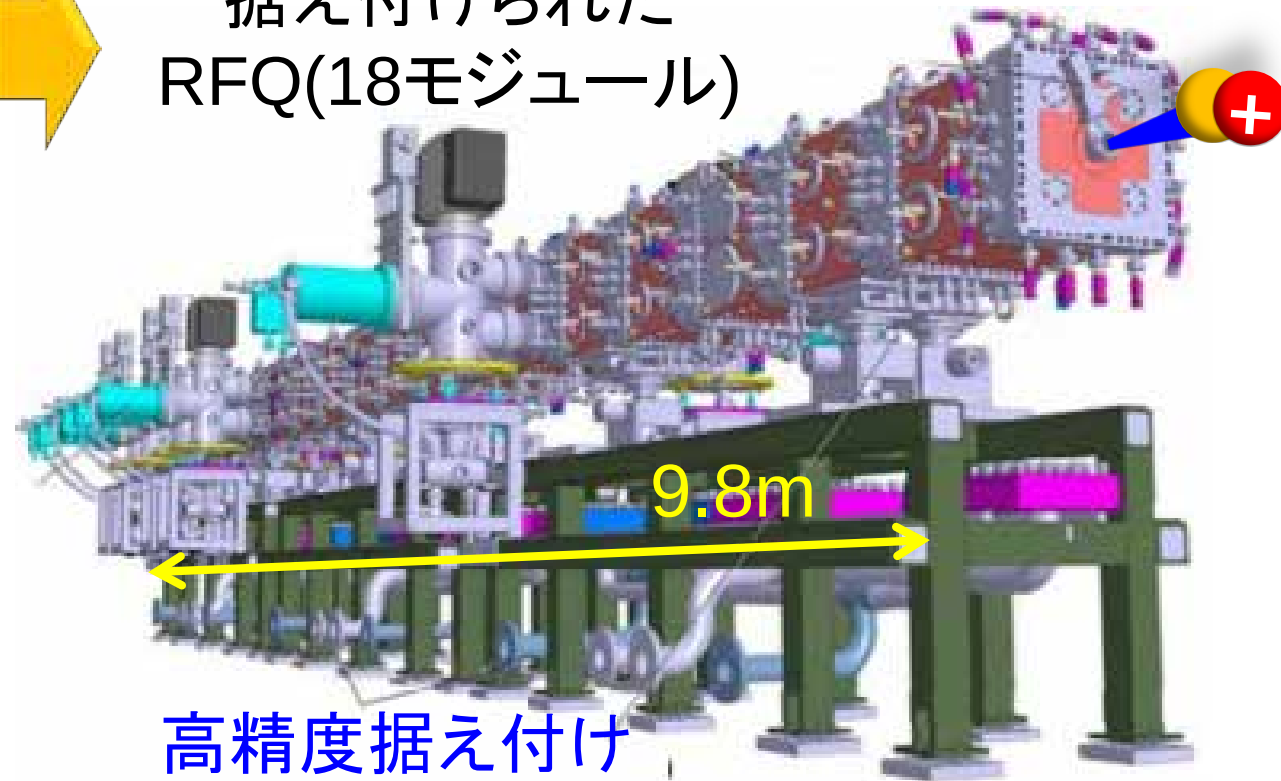
ロウ付けされた
モジュール



高精度ロウ付け
50-100ミクロン



据え付けられた
RFQ(18モジュール)



高精度据え付け
100ミクロン

実現のためには、**高い加工精度、ロウ付け技術、据え付け精度**を要する。

INFNは2011年からRFQモジュールの製作に取り掛かった。ベーンの切り出しでは、5軸加工機と3次元測定器を用いることで高い加工精度を満たすことに成功した。切り出された4枚のベーンは、炉内で1度にロウ付けすることで高い接合精度を満たすことに成功した。工程管理、性能検査も徹底して行なった結果、**18式のRFQモジュールが、2016年について完成した。**

高精度加工
(18式すべて形状が異なる)



高精度ロウ付け
(4枚のベーンを1度に接合)

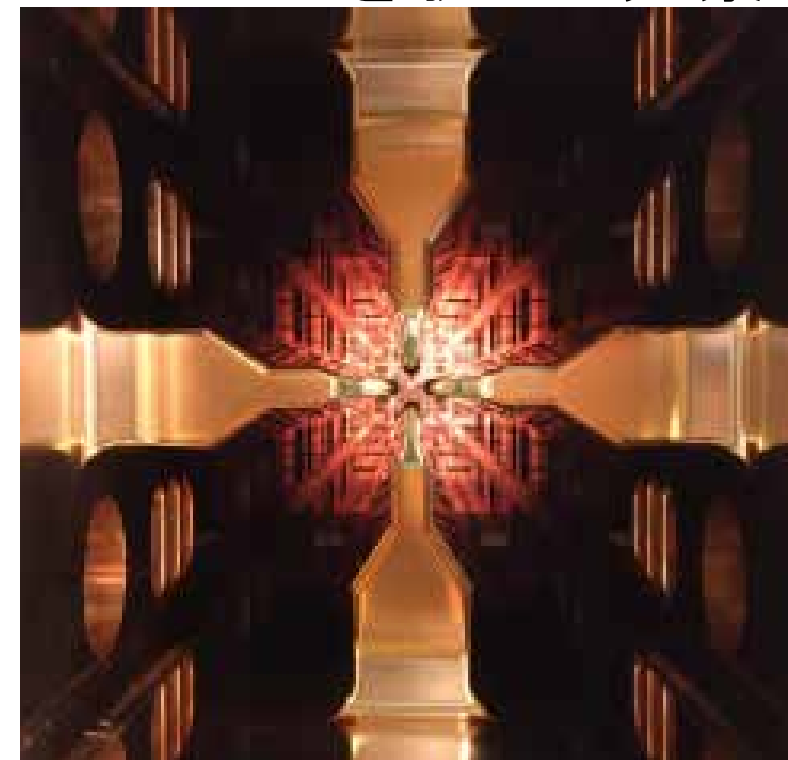


最先端の三次元測定機(レーザートラッカー)とアルゴリズム(SA[®] Ultimate)を用いた高精度な測定系を構築することで、RFQの高精度据え付け作業を可能にした。そして、**世界最長9.8mのRFQを100ミクロンの精度で据え付けることに成功した。**

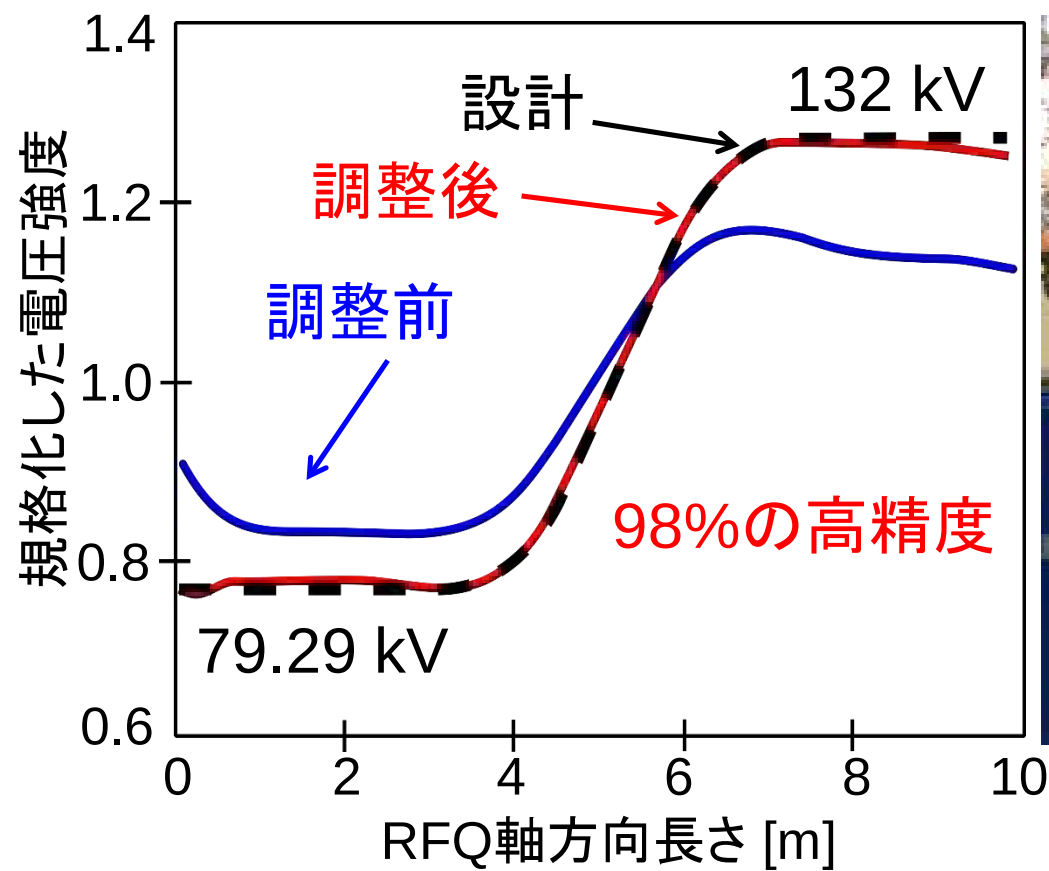
レーザートラッカーとアルゴリズムを使ったRFQの高精度据え付け作業



RFQ据え付け後に入口から出口を覗いた光景



共振周波数と電圧分布を測定しながら108個のチューナーで調整する1日ばかりの調整試験を約30回行い、目標の共振周波数(175メガヘルツ)と電圧分布(98%の高精度)を得ることに成功した。

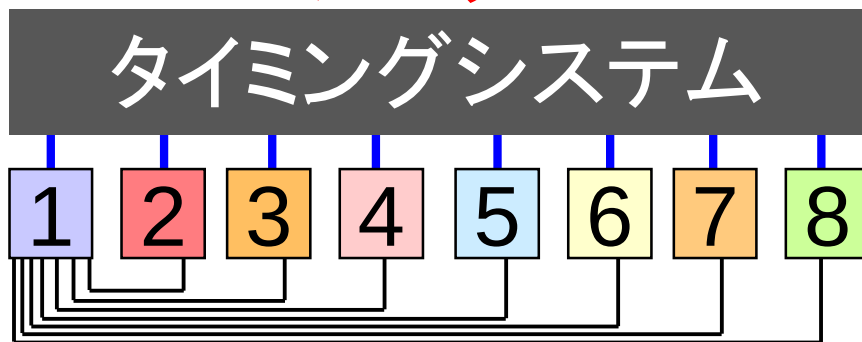


2017年6月、ついに世界最長9.8mのRFQが完成した

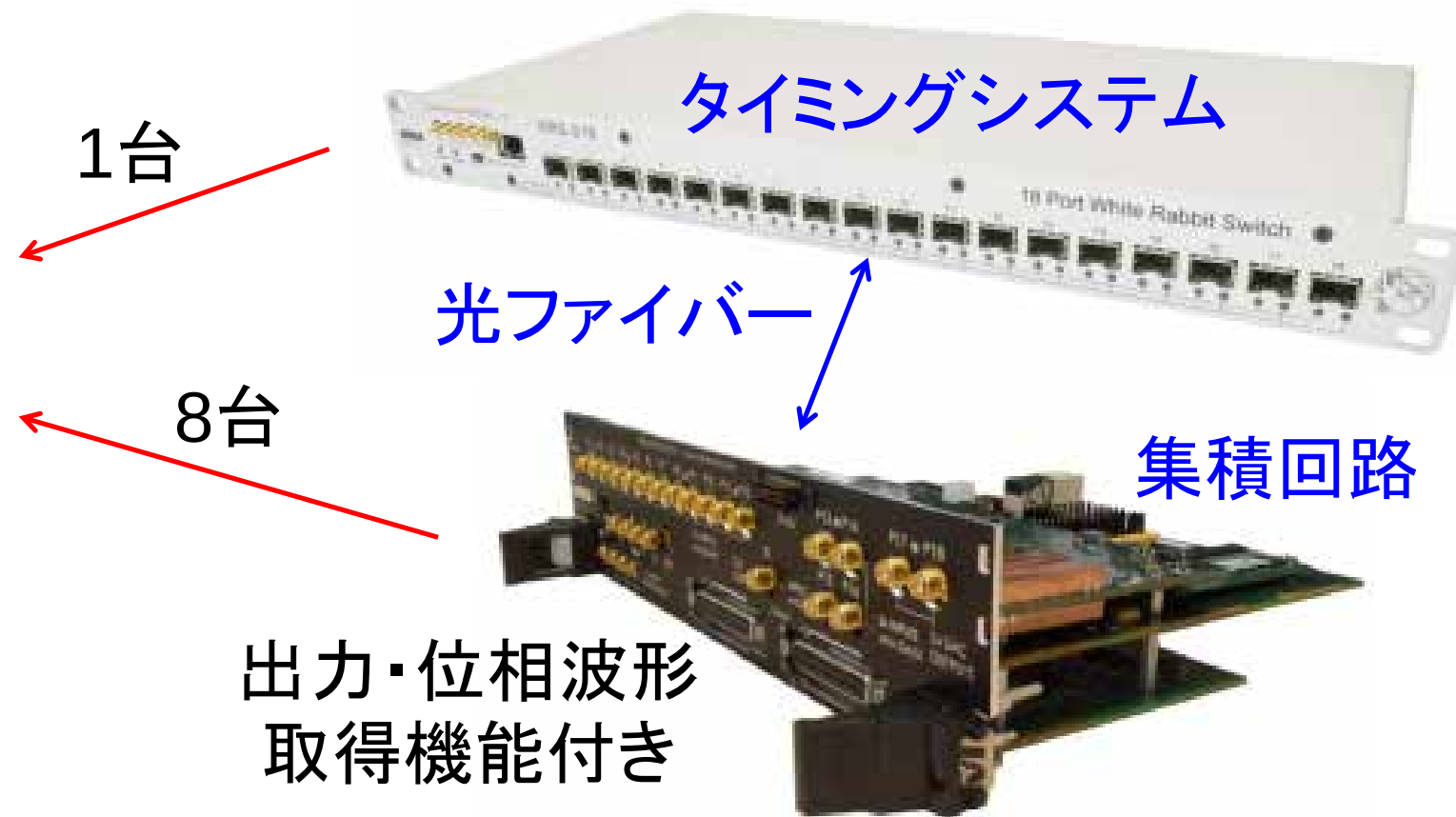
高周波源の大電力化：8系統高周波源の シンクロ・フィードバック制御装置が完成

CERNで開発された高精度時刻同期時技術(WHITE RABBIT)と集積回路(FPGA)を融合することで、**8系統の出力と位相のシンクロ・フィードバック制御を可能にしたシステムをスペインエネルギー・環境・科学技術研究センター(CIEMAT)が新たに開発した。**

ナノ秒の高精度
シンクロ

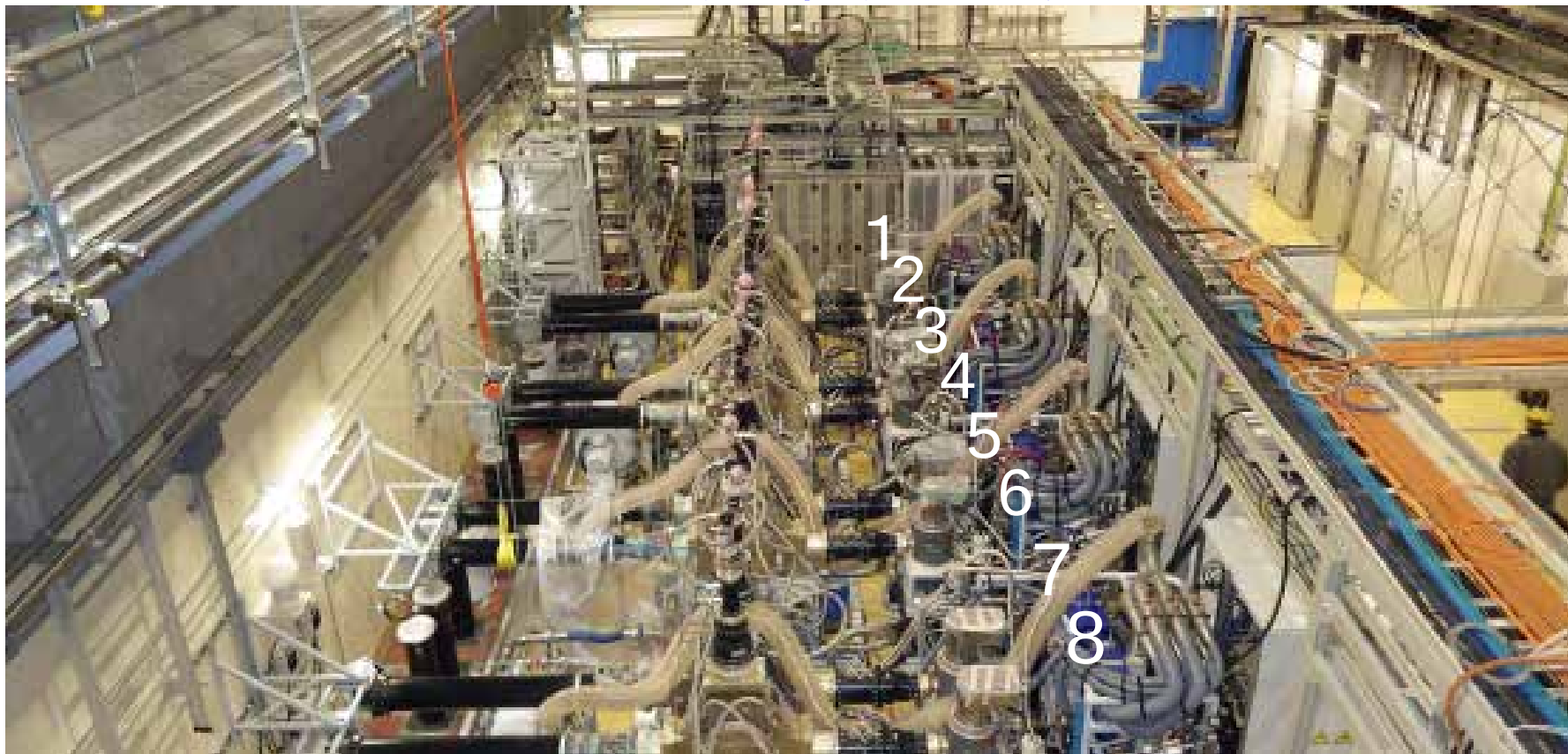


フィードバック制御
99.85%以上の
出力・位相安定精度



模擬負荷を用いた高周波源単体の出力試験で最大200キロワットを実証し、**合計1600キロワット出力可能であることを示した。**

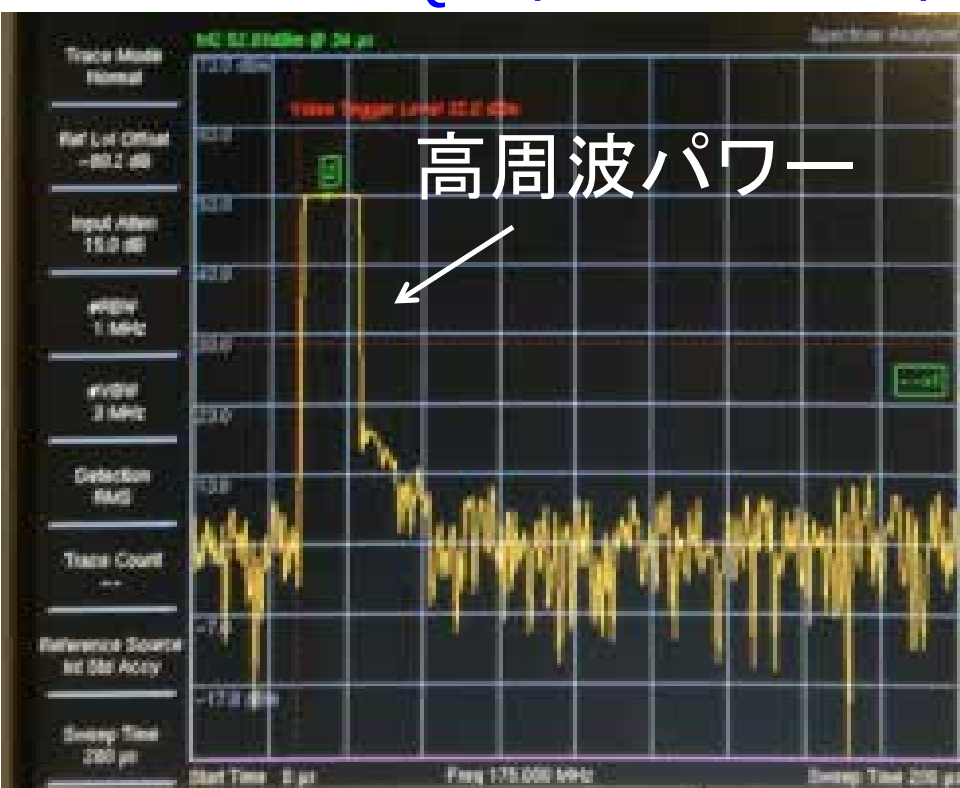
2017年6月 高周波源完成



7年かけついに、8系統大電力高周波源が完成した

8系統高周波源を用いたRFQへの高周波パワー入射に成功した。

RFQに初入射された高周波パワーを示す測定器と日欧合同チーム



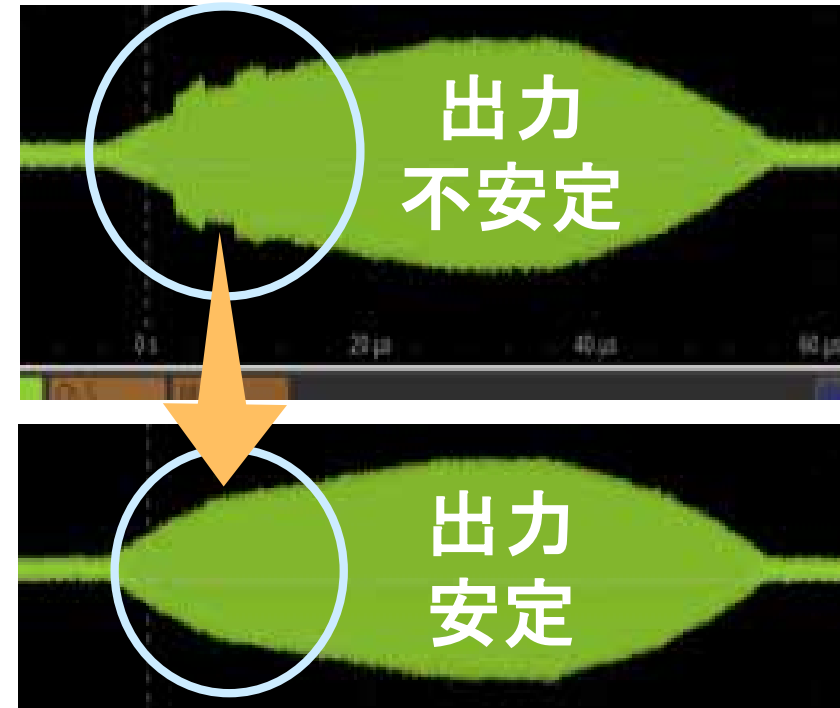
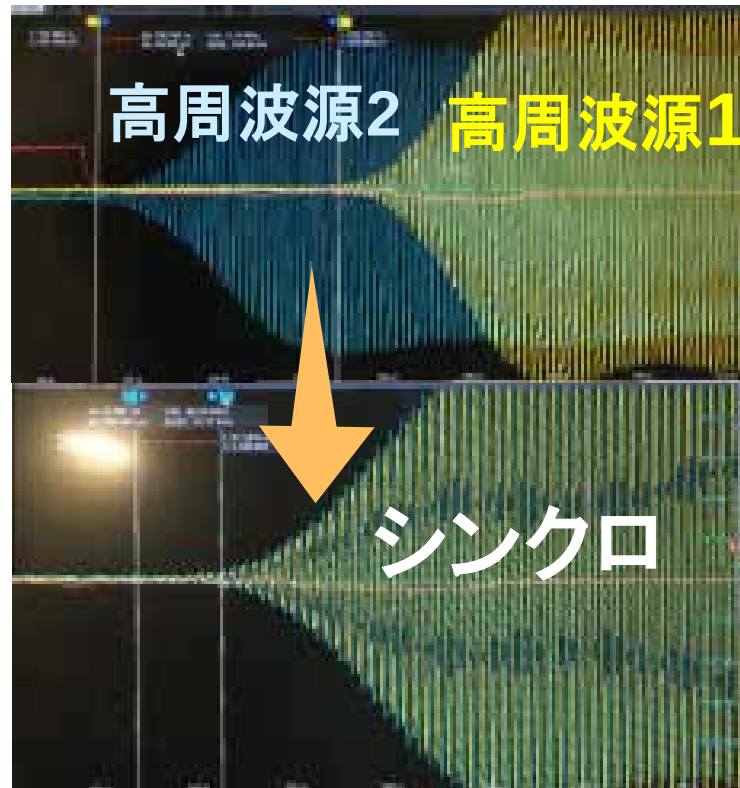
大電流重陽子ビーム加速試験に向けた
8系統高周波源とRFQの調整試験がはじまった

出力波形を測定しながら100を超えるシンクロ・フィードバック制御の制御値(PID値等)を調整し、併せて、RFQの高周波コンディショニング、高周波源の機器の調整も行うため、調整試験は容易ではなかった。諦めることなく、日欧合同チームで協力し、約2年かけついに重陽子ビーム加速レベルに到達した。

100を超える制御値を調整

タイミングのオフセット調整

制御値調整



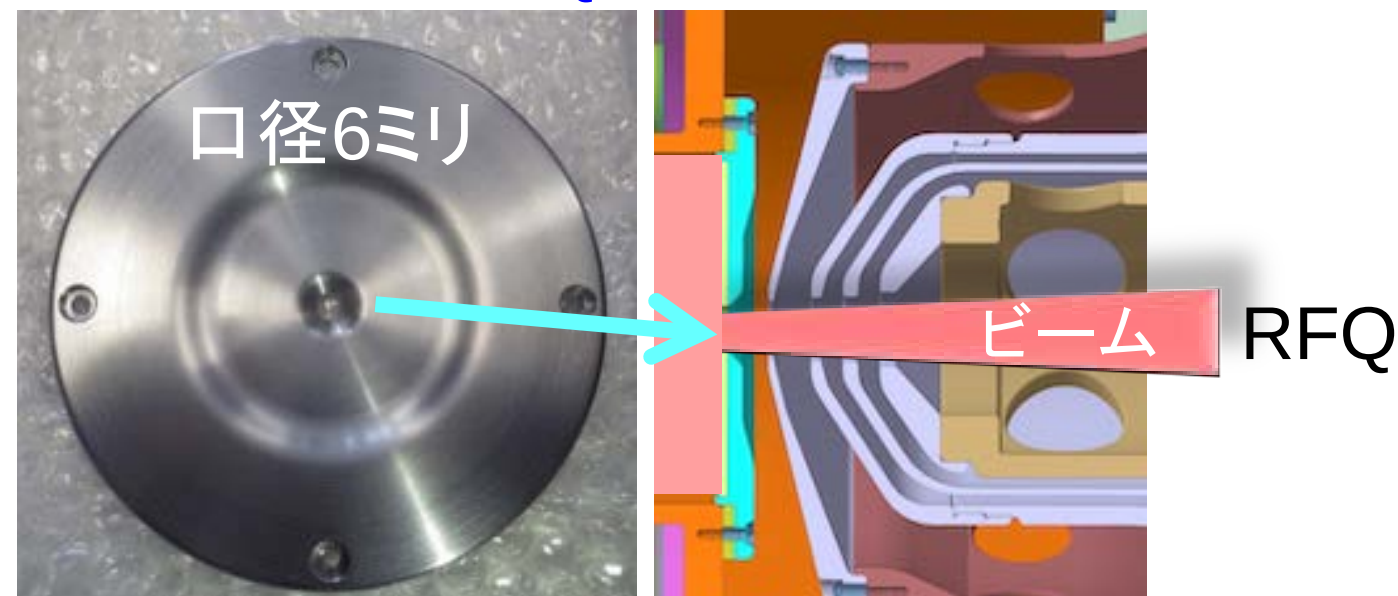
段階的にビーム電流を上げながら 高周波源を調整し、大電流重陽子ビーム加速に挑戦

いきなりの大電流重陽子ビーム加速試験では高周波源の調整が難しく、RFQを損傷するおそれがある。そこで、入射器の電極口径を6、9、12mmと広げていくことで**段階的にビーム電流を上げながら高周波源を調整する試験手順を考案した。**

$$\text{ビーム加速パワー} = \text{ビーム電流} \times \text{加速エネルギー}$$

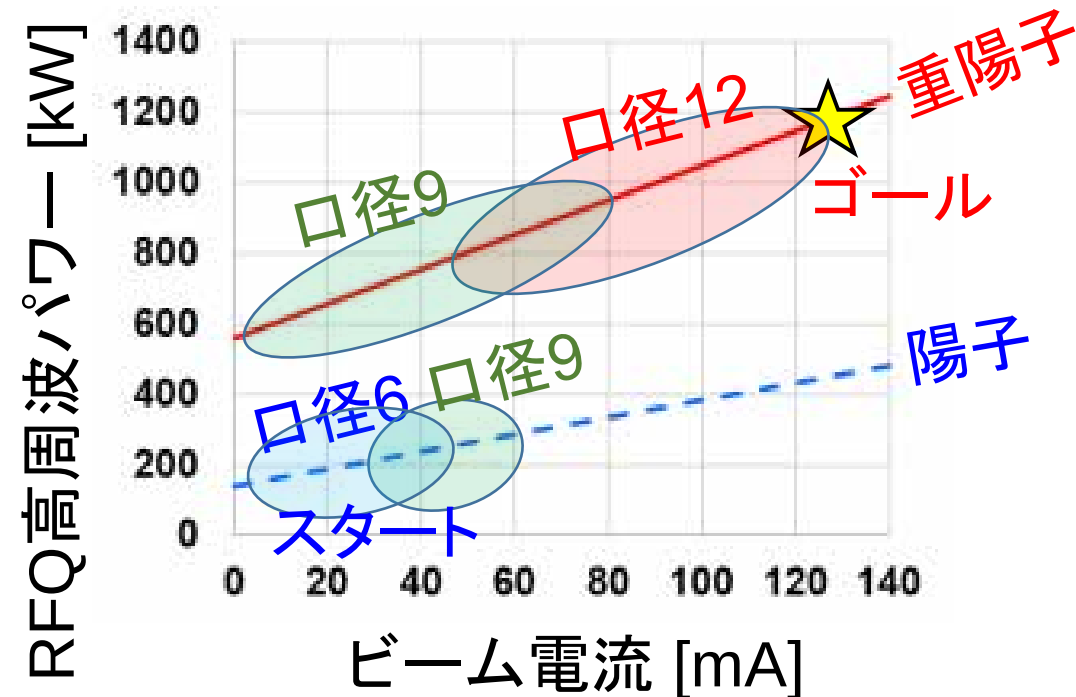
電極口径でRFQへのビーム電流を調整

ビーム試験手順: $\Phi 6 \rightarrow 9 \rightarrow 12\text{mm}$



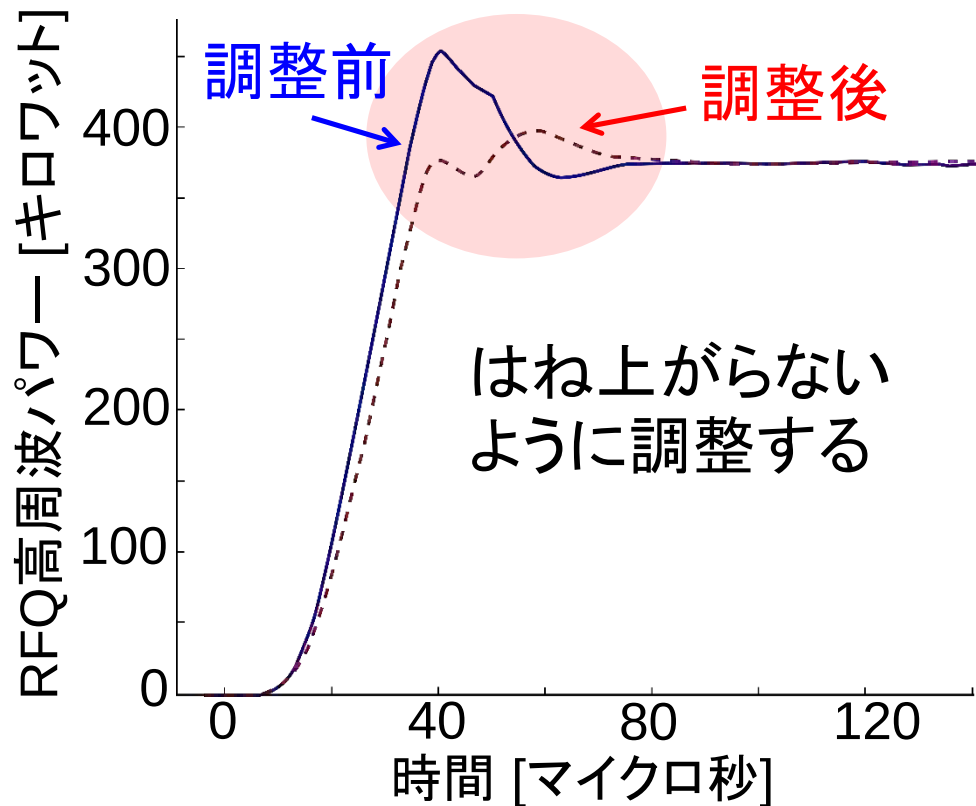
正面

断面



RFQが損傷するおそれのない低電流陽子ビームで出力・位相波形を測定しながら高周波源を調整し、**ビーム入射時の高周波出力の過渡応答を最適化することに成功した。そして2018年6月、世界初の8系統高周波源によるビーム加速に成功した。**

出力の過渡応答調整



世界初の8系統高周波源によるビーム加速成功

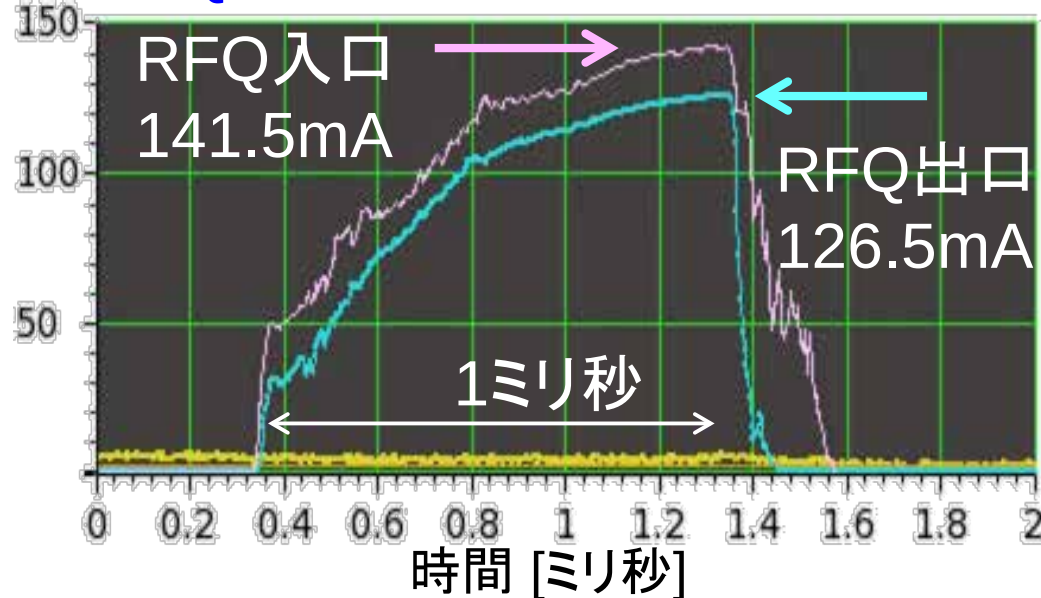


2019年7月24日ついに、パルス運転(1ミリ秒/1秒間隔)で**目標である125ミリアンペアの世界最大電流の重陽子ビーム加速に成功した。**

RFQ入口と出口のビーム電流波形

ワンチームで達成した世界最大電流の重陽子ビーム加速！

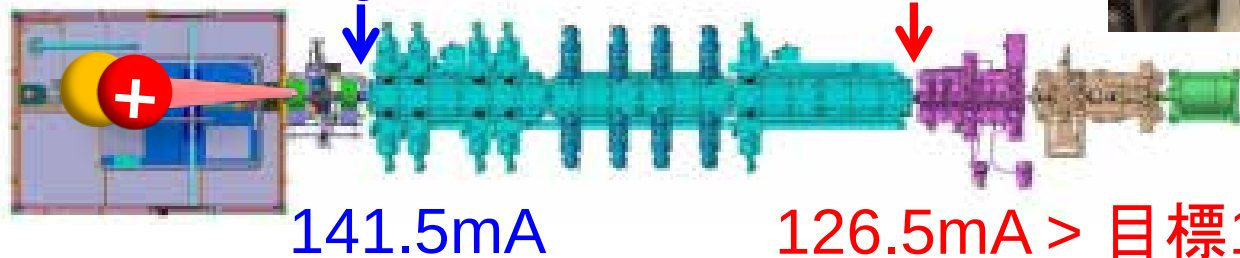
ビーム電流 [mA ミリアンペア]



入射器

RFQ入口

RFQ出口



ついに前人未踏の大電流領域を切り開いた

IFMIF原型加速器の要である世界最長RFQと世界最多系統高周源の開発に成功し、その性能をパルス運転で実証したことで、IFMIF原型加速器の完成に大きく近づいた。

今回の成果

RFQ・高周波源
パルス運転実証



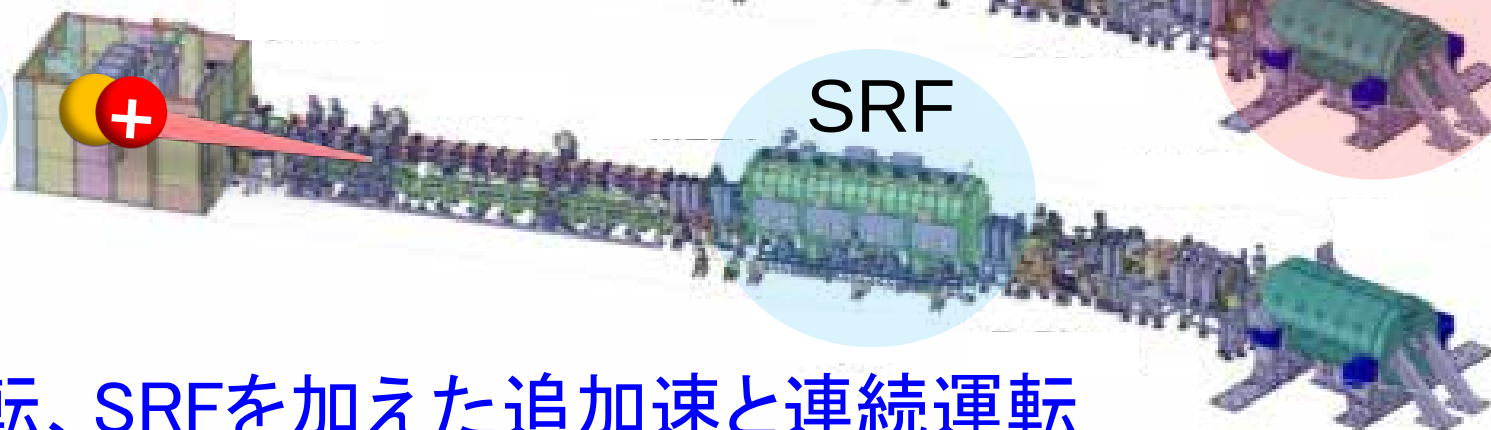
次の課題

RFQ・高周波源
長パルス運転



最終課題

超伝導高周波加速器
(SRF)で追加速
＋連続運転



残すは、RFQの長パルス運転、SRFを加えた追加速と連続運転



融和



情熱



忍耐

大切なことは、
情熱・融和・忍耐