

大強度陽子ビームに挑む 最先端加速器研究



佐藤洋一 (KEK加速器第二研究系 研究主幹・教授)
J-PARC MRビームコミッションンググループ
杉山泰之 (KEK加速器第一研究系 助教)
J-PARC MR RFグループ
武藤亮太郎 (KEK加速器第二研究系 教授)
J-PARC MR SXグループ

KEK加速器研究施設 加速器第一・二研究系 (J-PARC)

<https://ahfb10.kek.jp/ACCL-12/index.html>

京都大学 高エネルギー物理学研究室 セミナー
2026/4/14 (火)15:15 - 16:30

自己紹介

佐藤 洋一(さとう よういち)
東京生まれ

学位:

東京大学理物(学士・修士)
インディアナ大学(Ph.D.)

所属:

KEK 加速器研究施設 加速器第二研究系
J-PARC 加速器第6セクション
主リングシンクロトロン ビームコミッションニンググループ



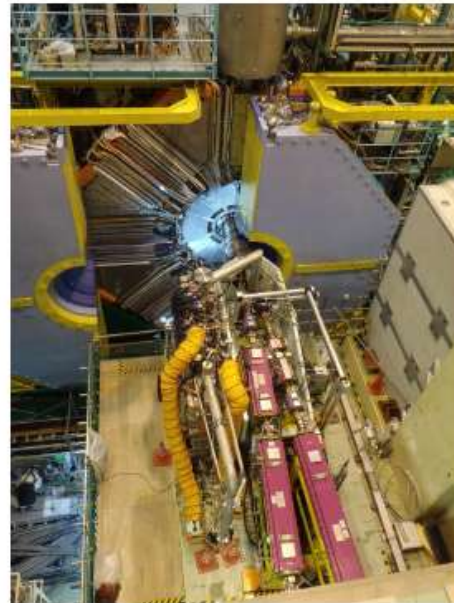
J-PARC加速器 (KEK) ホームページ
<https://ahfb10.kek.jp/ACCL-12/index.html>

趣味

大強度ビームの関連事象を眺めること
古典力学(運動量保存則、剛性)の体感
杖道2段、剣道初段、神道夢想流杖術(見習い)

Tsukuba campus

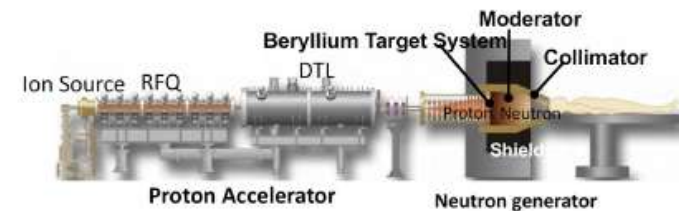
SuperKEKB, PF, PF-AR, R&Ds for ILC, SPF, cEERL, etc.

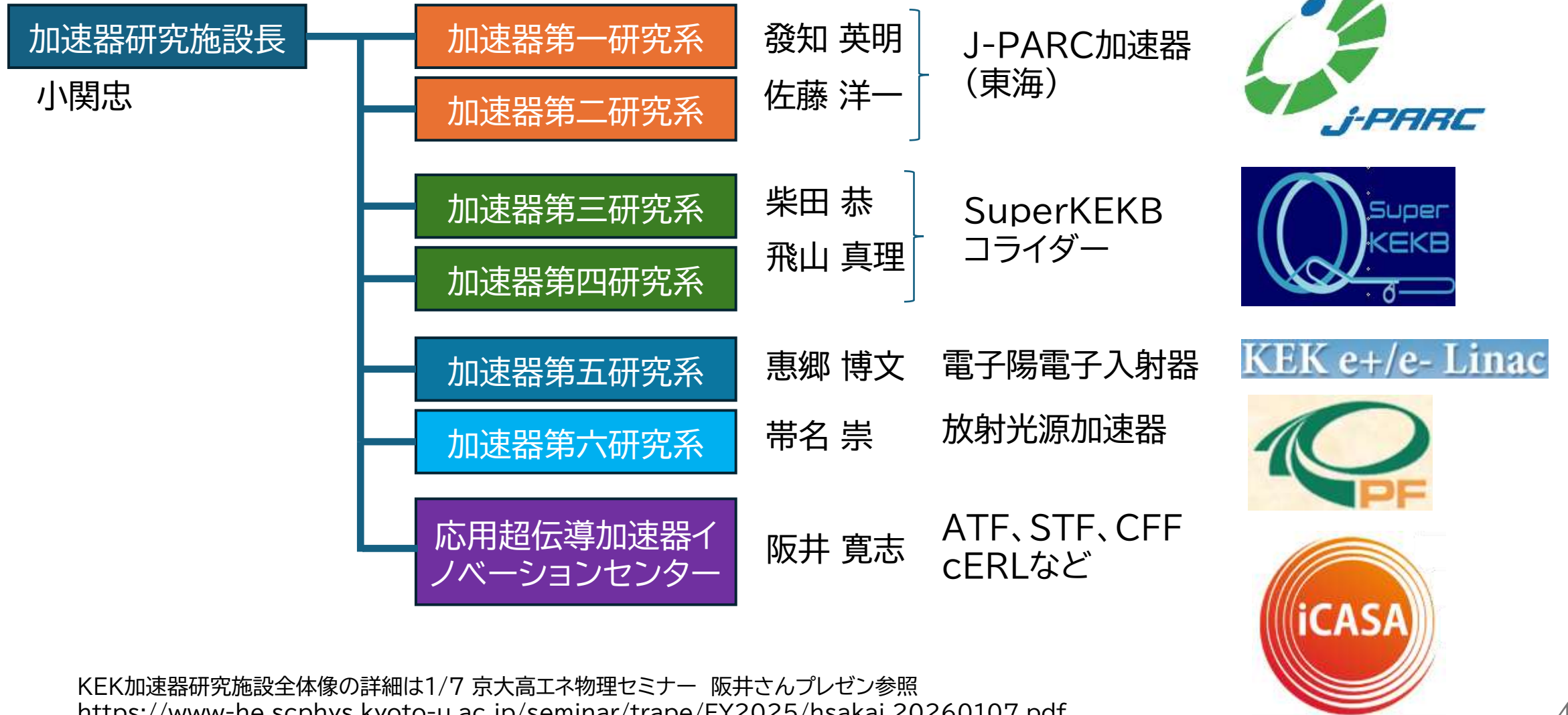


Accelerators in KEK

Tokai campus

J-PARC, IBNCT





大強度陽子ビームに挑む 最先端加速器研究 ①

FX 900 kW 利用運転達成 & FX 1 MW デモ試験成功

パルス当たり陽子数の世界記録更新が目前。これまで世界中の加速器が回避してきた「構造共鳴」に挑み、光学系の研究により打開。1.3-MWビーム実現を目指します。

佐藤洋一 for KEK/J-PARC加速器

京都大学 高エネルギー物理学研究室 セミナー
2026/4/14 (火)15:15 - 15:40

- ✓ J-PARC 主リング (Main Ring, MR) 概要
- ✓ MR FX 900 kW利用運転の達成までの歩み
 > 1 MWへの見通し
- ✓ まとめ
- ✓ コマーシャル

補足資料 紹介しきれなかったKEK加速器(東海キャンパス)の研究活動

Japan Proton Accelerator Research Complex

目的

大強度の陽子ビームを作り、それを標的に衝突させて作られる二次粒子ビームを用いて、様々な自然科学を探索。



特徴

大量の陽子を実験に供給できる加速器施設を持つ。
パルス(陽子のかたまり)に含まれる陽子数など、4世界記録を保持する大強度施設。

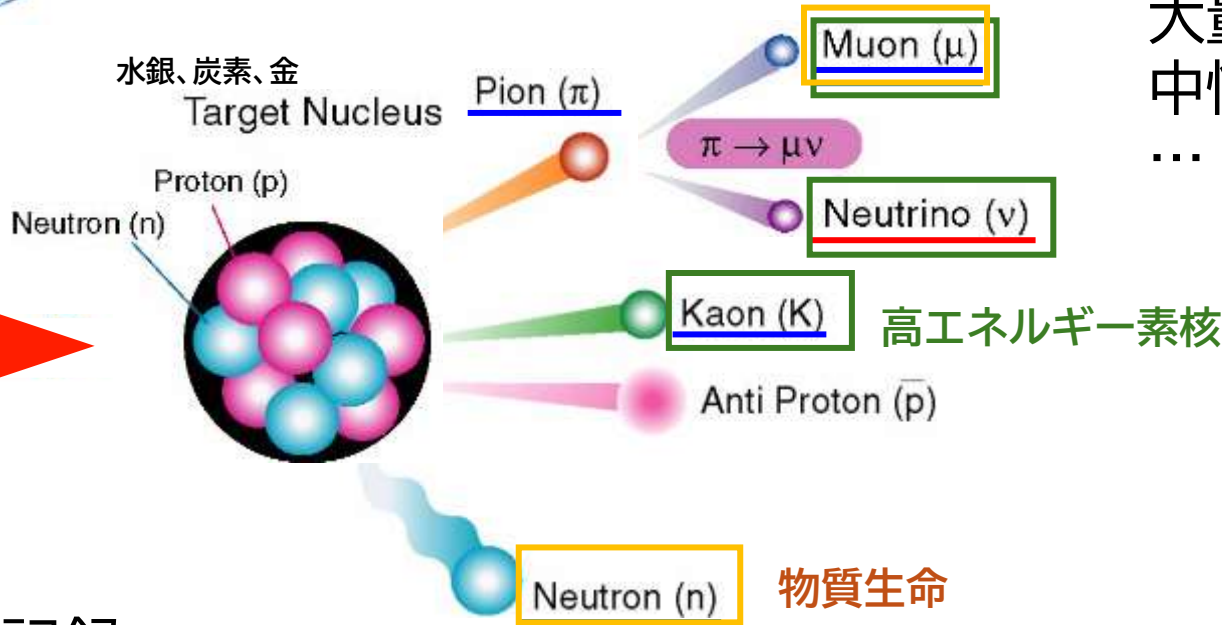
J-PARC運営機関：

- 高エネルギー加速器研究機構
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
- 日本原子力研究開発機構
Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

J-PARC: 科学技術における社会的インパクトの世界的拠点
物質・生命科学から素粒子原子核物理探求までの最先端研究が、
世界最高クラスの大強度陽子加速器の成す豊富な二次粒子を利用することで実現している。

Japan Proton Accelerator Research Complex

3 GeV or
30 GeV
protons



大量の陽子ビームがつくる
中性子、ミュオン、K中間子、ニュートリノ、
… 多彩な二次粒子ビームを利用

加速器大強度フロンティア
i.e.
熾烈な国際競争にあり、
統計量が鍵となる
素粒子原子核研究のフロンティア

4 世界記録

WR#1 From RCS MLF with 1 MW beam パルス当たり中性子源強度



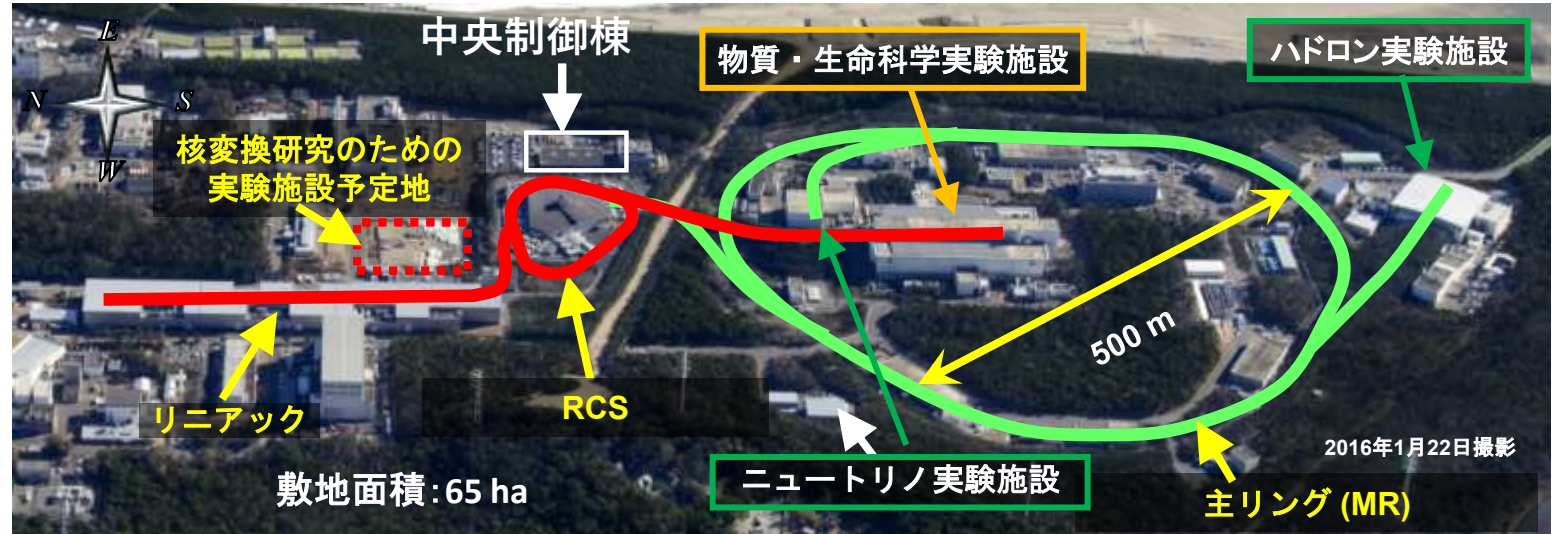
WR#2 From MR NU with $2.3-2.7E+14$ ppp beam パルス当たり陽子数

WR#3#4 From MR HD with slow extraction beam
with extraction efficiency 99.6% 取り出し効率
100 kW with $8.9E13$ ppp SXビーム強度 世界一



J-PARC加速器

世界最高クラスの大強度陽子ビームが成す現象・課題に立ち向かい、多目的全てに大強度フロンティアの実績を築いている、**加速器科学研究・技術開発の世界的拠点**



リニアック(線形加速器)

- 長さ: 249 m
- 加速エネルギー: 400 MeV

光速の71%

- 加速された陽子を

3 GeVシンクロトロンに入射



3 GeV シンクロトロン(RCS)

- 周長: 348 m
- 加速エネルギー: 3 GeV

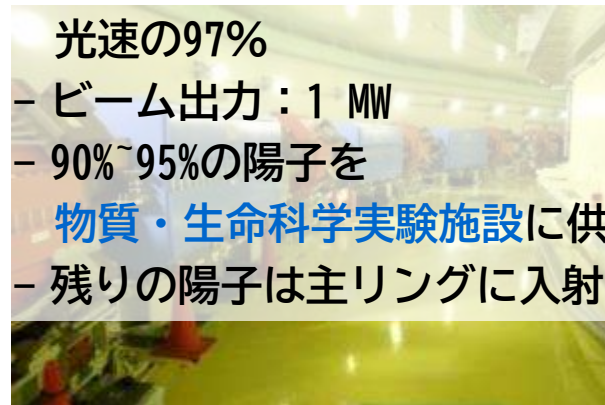
光速の97%

- ビーム出力: 1 MW

- 90%~95%の陽子を

物質・生命科学実験施設に供給

- 残りの陽子は主リングに入射



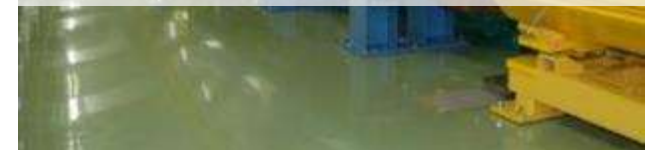
主リング(MR)

- 周長: 1,568 m
- 加速エネルギー: 30 GeV

光速の99.95%

- ビーム出力: 0.8 MW

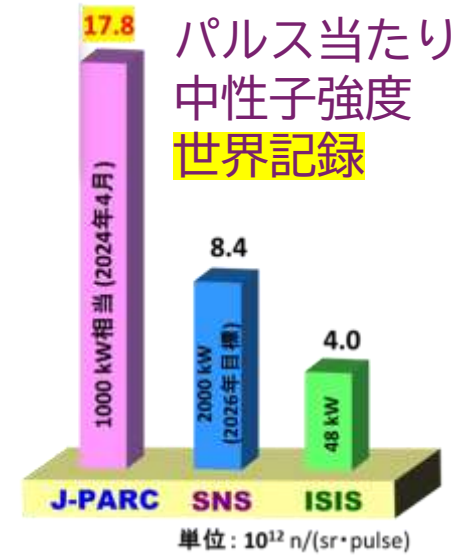
- 陽子を**ニュートリノ実験施設**または**ハドロン実験施設**に供給



世界のビーム強度フロンティア

WR#1

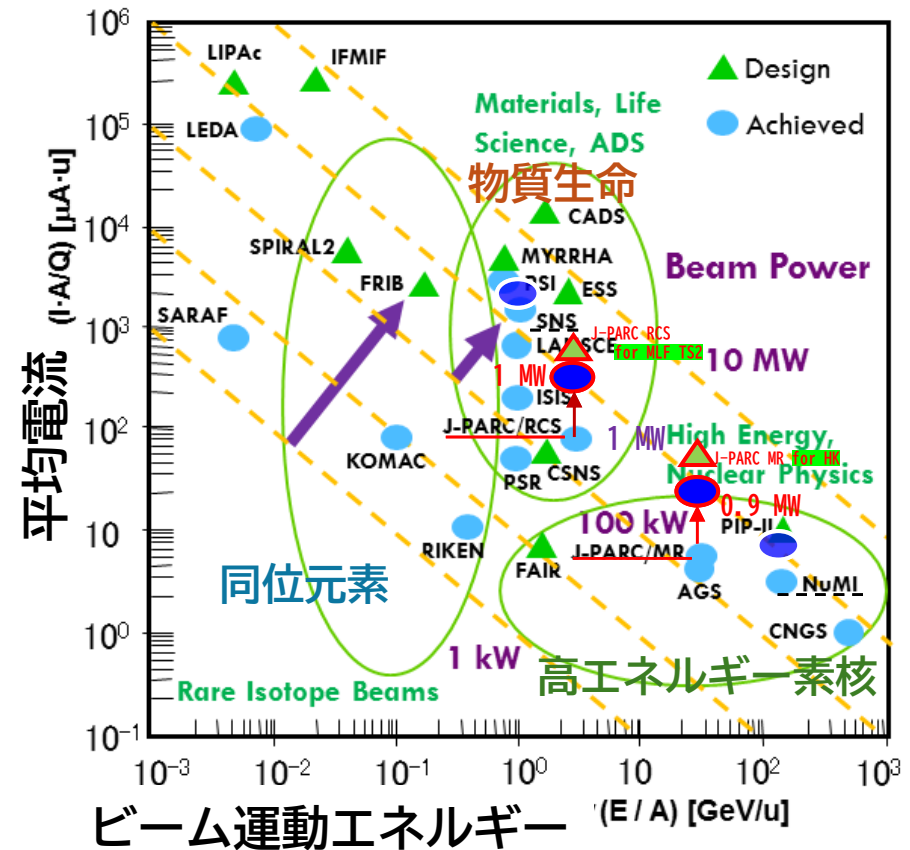
パルス当たり
中性子強度
世界記録



WR#2

WR#3#4

ビーム強度 = (平均電流) * (エネルギー)



大強度フロンティア:

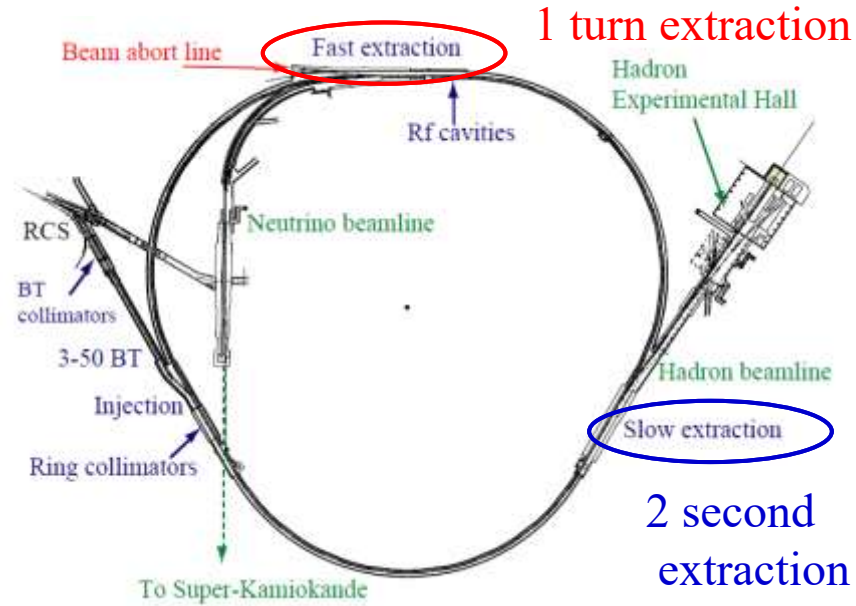
- ~ 1 GeV 陽子 --- 物質生命科学
 SNS (US) 1.9 MW at 1 GeV
 J-PARC RCS 1 MW at 3 GeV
 将来計画: 1.5 MW
 - > 10 GeV 陽子 --- 素粒子原子核
 NuMI (US) 1.05 MW at 120 GeV
 J-PARC MR-FX 0.9 MW at 30 GeV
 将来計画: 1.3 MW (2028)
- NU with 2.3-2.7E+14 ppp beam from MR
 パルス当たり陽子数 世界記録
- HD with slow extraction beam in ext.
 efficiency 99.6% 取り出し効率 世界記録
- 100 kW with 8.9E13 ppp SXビーム強度 世界記録

世界の大強度ハドロン加速器

●: Achieved by 2014, ●: by JFY2025

大強度フロンティア加速器として、
世界で唯一 J-PARC が複合施設

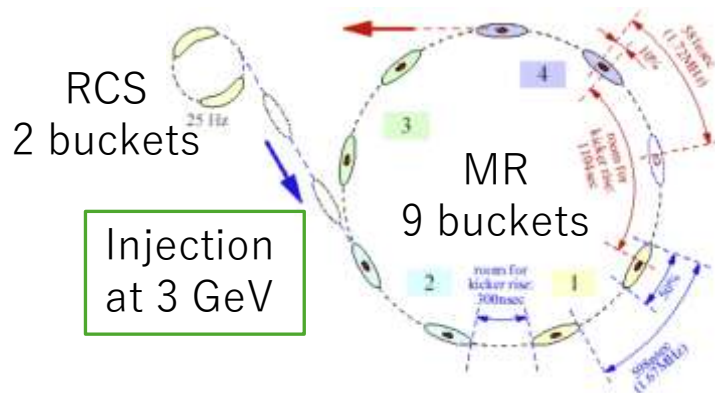
Circumference	1567.5 m
Injection energy	3 GeV
Extraction energy	30 GeV
Injection time	0.13 s
Acceleration time	0.65 s
Super-periodicity harmonic	3
Number of bunches	8



Beam Power (FX)
750 kW Design
→ 1.3 MW (Plan in 2028)

Beam Power (SX)
> 100 kW (in near future)

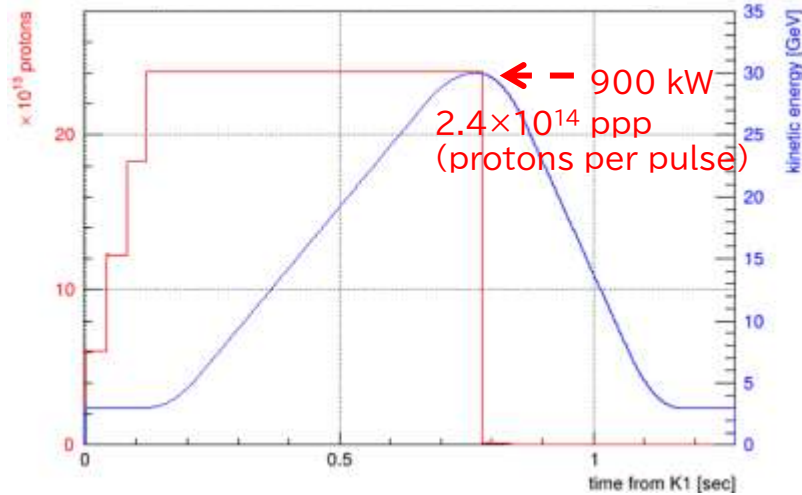
Fast extraction at 30 GeV



Physical Aperture	81π mm-mrad
Ring Collimator	$54-70\pi$ mmmrad
Transverse emittance	
At injection	54π mm-mrad
At extraction	10π mm-mrad (30 GeV)

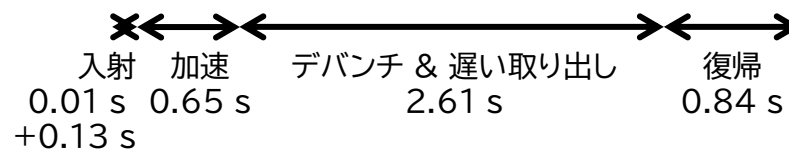
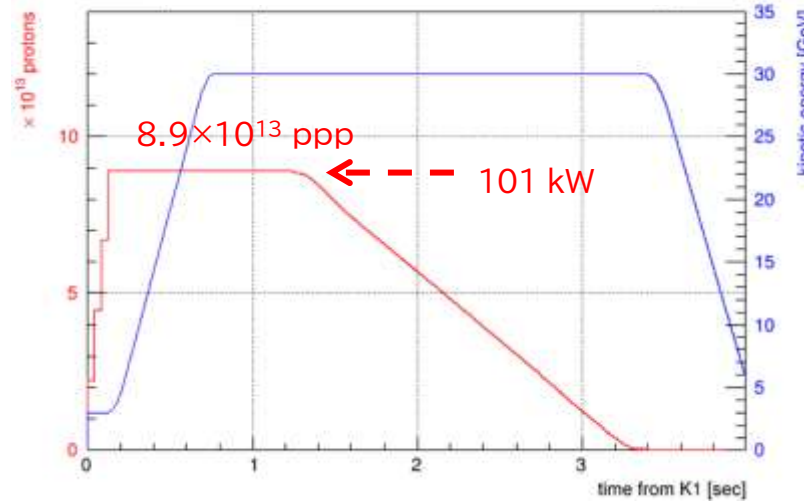
赤:DCCTで測定した陽子数 青:電磁石・RF加速空洞のランピングパターン

ニュートリノ運転



周期:1.28 s

ハドロン運転

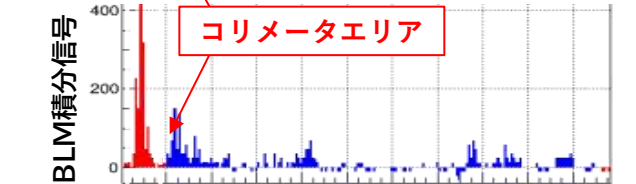
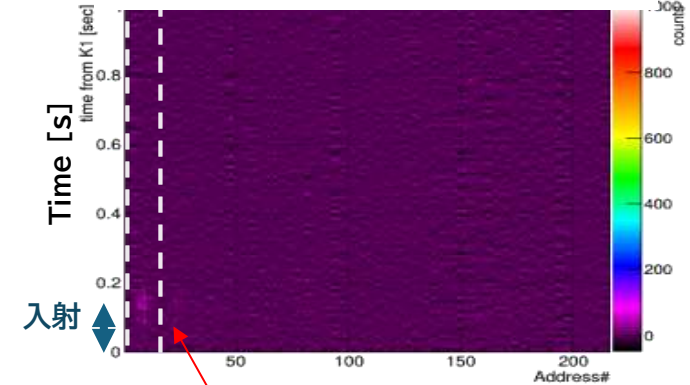


周期:4.24 s

RCS (25 Hz運転)から2バンチずつ4回入射してリングに貯めてから加速。加速するにあたり、電磁石とRF加速空洞はキッチリと同期させる。

ビームロス分布

ニュートリノ運転

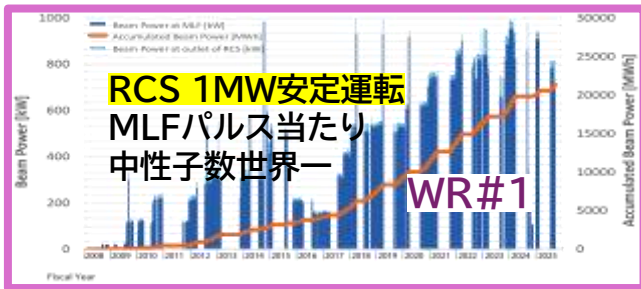
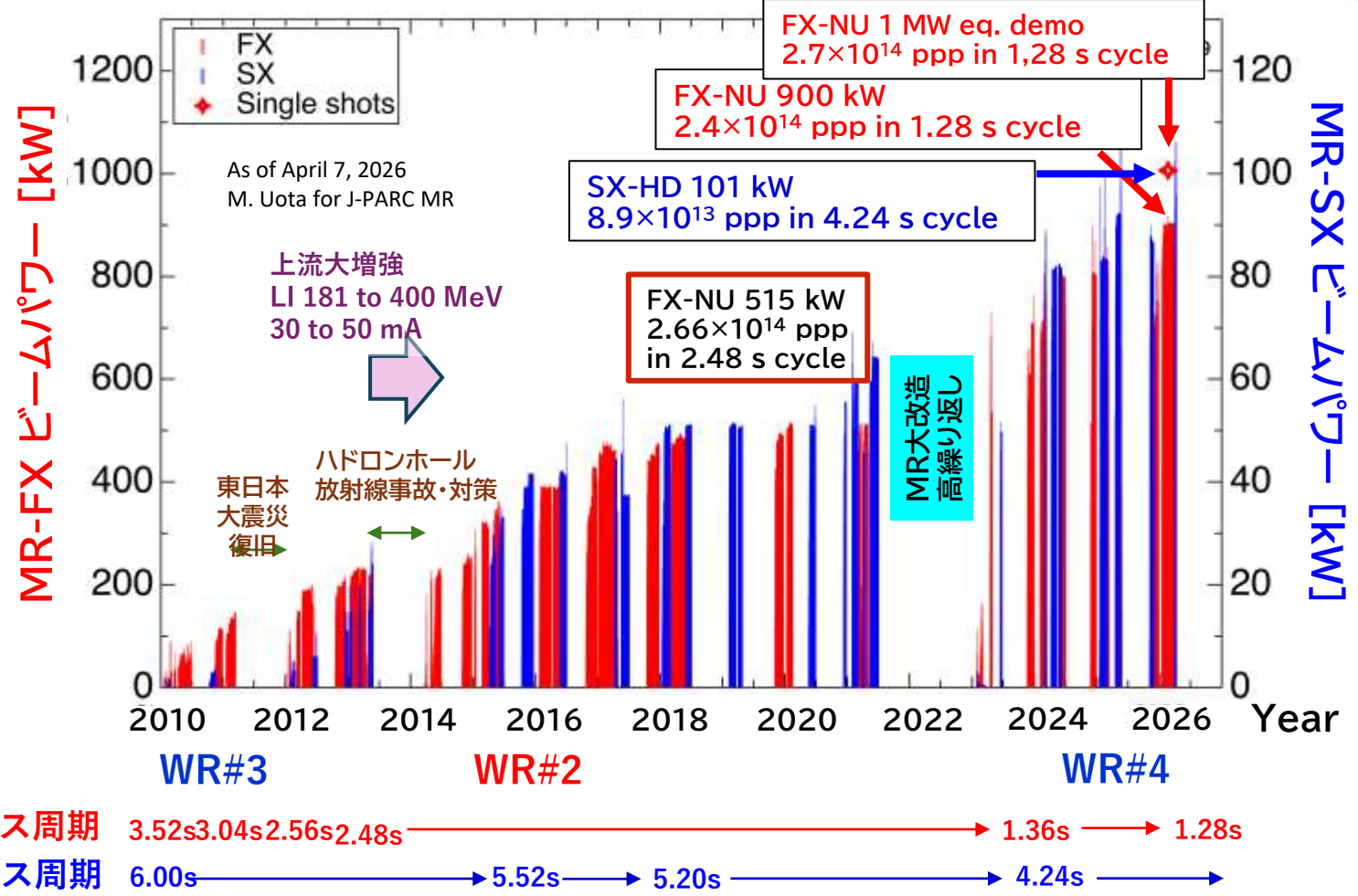
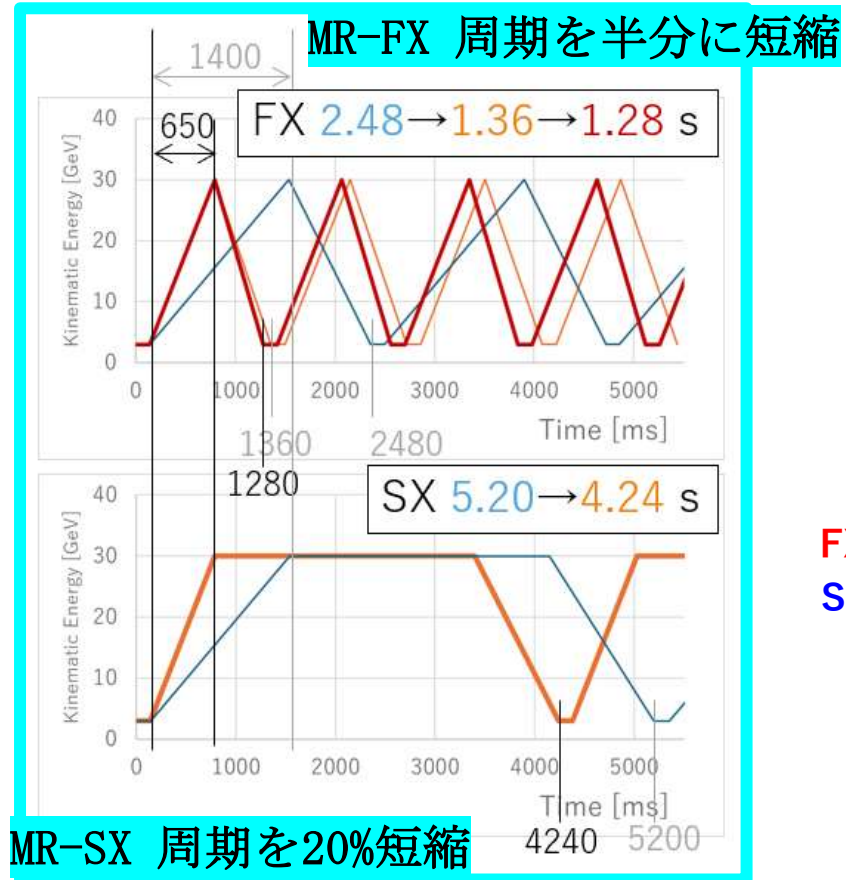


BLM:
Low gain (1/64) in collimator area
High gain in non-collimator area

ビームロスは入射・加速初段で主に起きる(共鳴線との抵触)。コリメータエリアで~98%ロスを回収し、他エリアの機器を保全。

大強度ビームでは、ビーム由来の厳しい機器負荷の中で、精密なビーム操作が必要。加速器構成機器はハードウェア限界に挑戦する必要がある。 例: 主電磁石電源電流偏差 < 1e-4

ビーム強度 \propto
 パルス当たり陽子数 \times ビームエネルギー
 周期



MR高繰り返し化大改造
 (2021.7-2022.6)

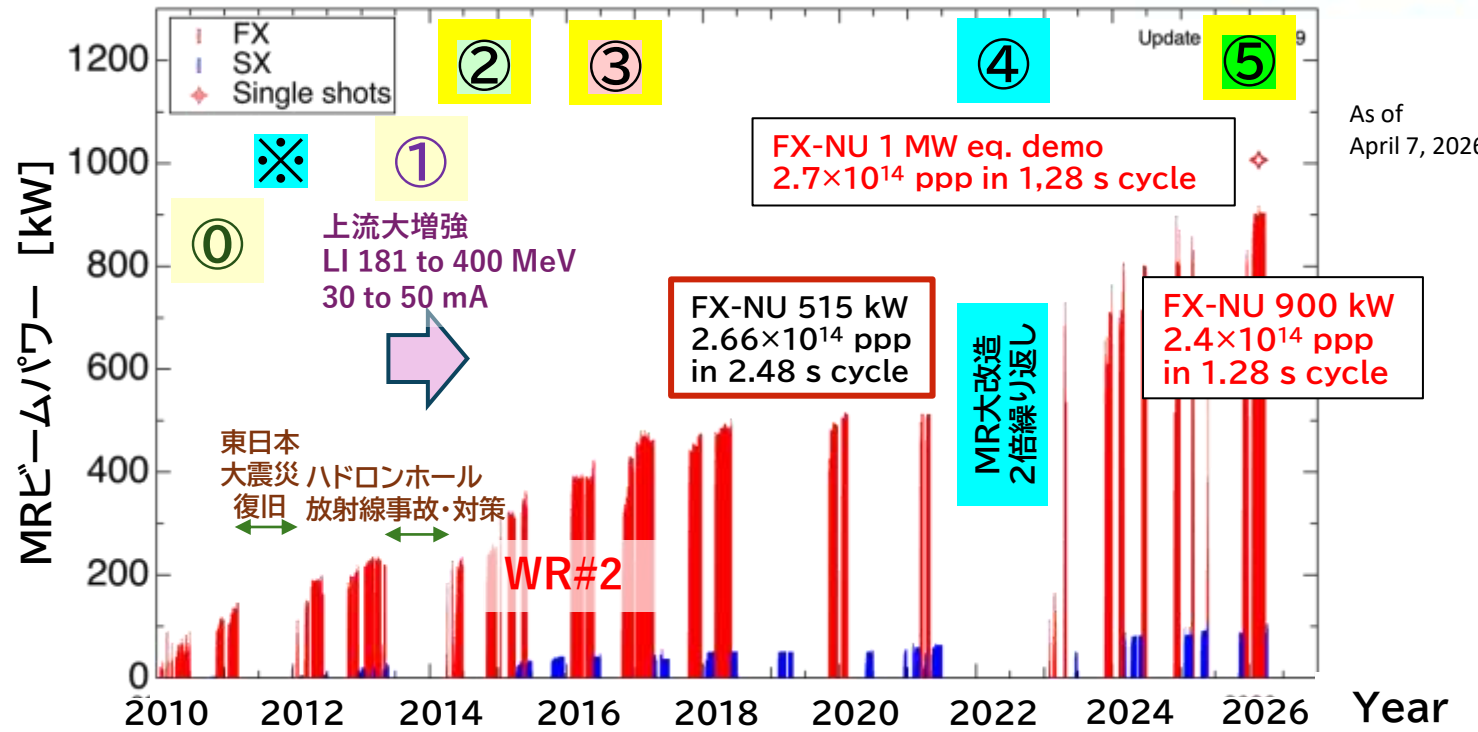
- 主電磁石電源
- 高周波加速装置
- 入出射システム
- ビームコリメータ

ビーム強度 ∞

$$\frac{\text{パルス当たり陽子数}}{\text{周期}} \times \text{ビームエネルギー}$$

大強度フロンティア での加速器研究

- PPP世界記録を更新
- ビーム強度を上げる
- 運転効率を上げる

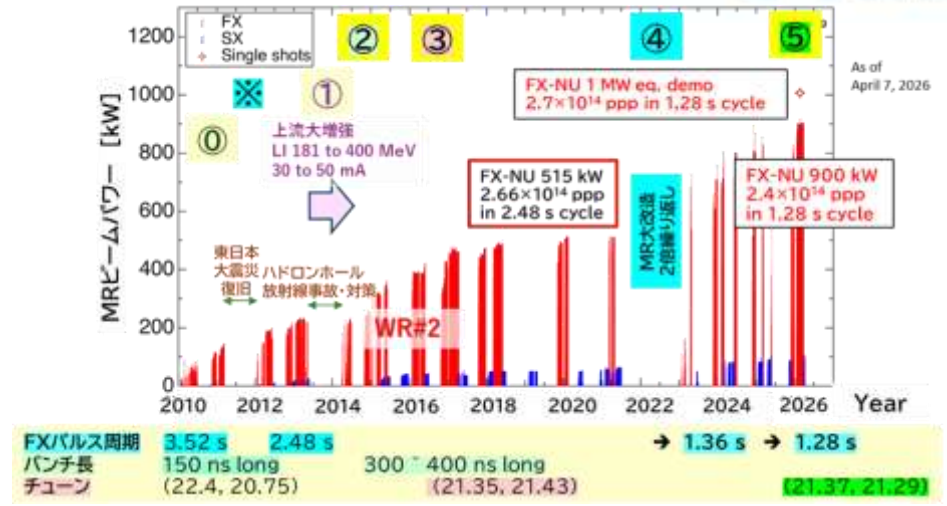


FXパルス周期	3.52 s	2.48 s	→ 1.36 s → 1.28 s
バンチ長	150 ns long	300 ~ 400 ns long	
チューン	(22.4, 20.75)	(21.35, 21.43)	(21.37, 21.29)

- **パルス当たり陽子数 (PPP) を増やす:** 共鳴現象、空間電荷効果、壁抵抗、機器への影響、…すべて前人未踏領域
- **周期を短くする:** ハードウェアの限界に挑戦・開発
- **機器の安定稼働条件を確立する:** 安定運用出来て初めてニーズを満たせる。15

ビーム強度 \propto $\frac{\text{パルス当たり陽子数}}{\text{周期}}$

- ① 全ての機器の安定稼働が大前提。再現性がなければ何も検証も出来ない。
- ① 上流からの高品質ビームはいつも大事。



②③⑤ 陽子数を増やすアイデアが出たら、原理実証までは比較的簡単(そこもアイデアがいるけれど)。しかしながら、利用運転に適用するには機器の性能拡張、安定性確保、安全システム構築、メンテナンス性の確保、…など克服課題が満載。年単位の準備を要する。

④ 大改造は、企画開始から開発に10年かかる機器もある。生まれた技術は加速器科学の分野で高い評価を受けている。
 ※ 2010 - 2013 の高繰り返し化はJ-PARC創生時の主電磁石電源の尤度を使い切った結果。過去の蓄積の上での成果。

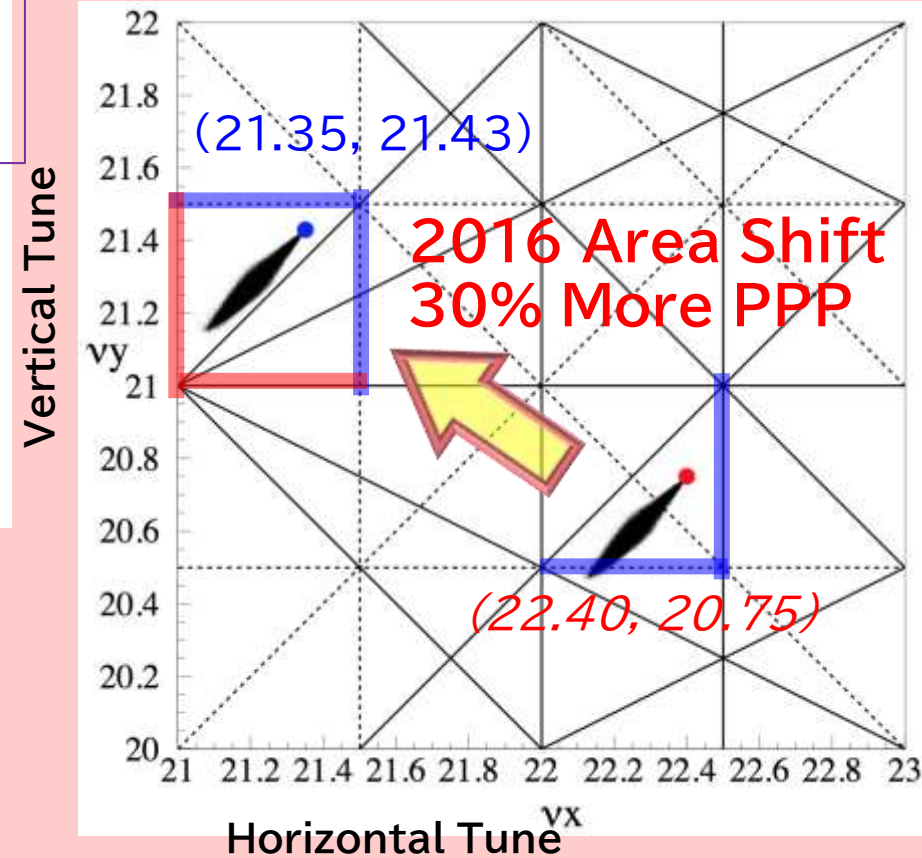
パルス当たり
陽子数
世界記録
(2020.1)
2.7E14 ppp
の原動力

① Linac/RCSの増強・高度化はMRへの入射ビームハローを大幅に抑制した。(2013,2014)

② MRバンチ長伸ばしは空間電荷効果を減らすためにRFの増強、入射キッカー改造、補正キッカーの導入により実現した (2014)

③ 2016年のMRチューンエリア変更の実現には、MR全周の口径限界、主電磁石電源の性能限界を追い込む必要があり、研究開発に2年を要した。(2014 - 2016)

④ 機器がまともに動く安定ビームを作る
→ 常時挑戦 (2009~)



栗本佳典、佐藤洋一「J-PARC Main Ring アップグレード」 「加速器」2021年18巻1号 p. 10-20 <https://doi.org/10.50868/pasi.18.1.10>

2倍高繰り返しで
> 2.7E14 ppp
(ロス比半減へ)

④ MRを電磁石電源と高周波加速空洞を中心に大改造。
→ パルス数を2倍(周期を半分に短縮) (2021.7-2022.6)

⑤ 新光学系の発見(2022)・適用(2025)
同じ陽子数でもビーム損失半減 (2026 -)

MR 高繰り返し化改造 2021-2022 と改造後のビーム調整方針

・H. Hotchi, J-PARC symposium 2024
・Y. Sato, HB2023

主電磁石電源、高周波加速空洞システム、入出射システム、コリメータシステム、など大改造



新 QDN 電磁石電源



新トランス設置



FX新高磁場セプタム: SM30-32



cav#12 新パワーアンプ



新コリメータ D

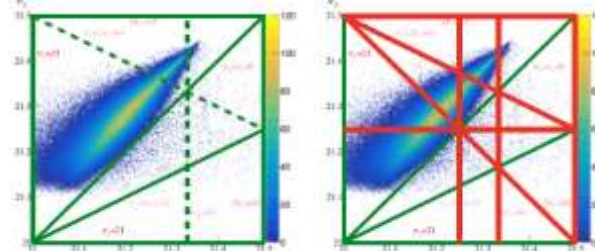
2025/8/8

MR-FX 周期を半分に短縮

MR-SX 周期を20% 短縮

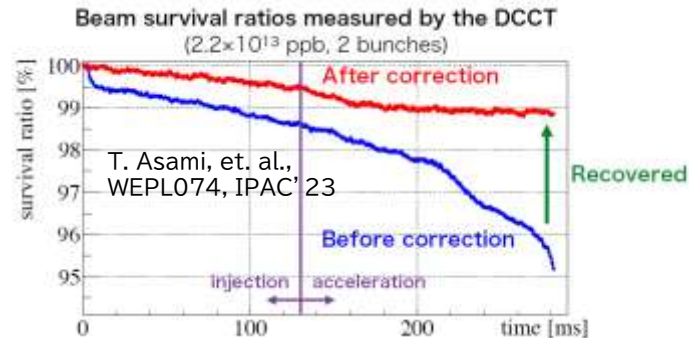
ビーム光学系は改造前をキープ

電磁石電源配線変更(非対称配線)

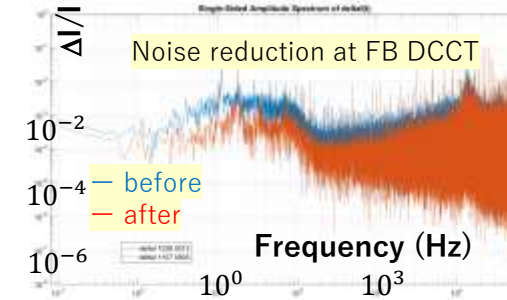


T. Yasui, TUXG1, IPAC' 23

・大改造後の機器を駆使し
ビーム光学の対称性を追求
=> ビーム損失を抑制



- ・主電磁石電源リップル改善
 - ・共鳴補正 (Trim-Sext) 最適化
 - ・Tune Tracking最適化
- 非構造3次共鳴の影響を更に抑制



Resonance corr. → 610 kW eq. $1.73e14$ ppp

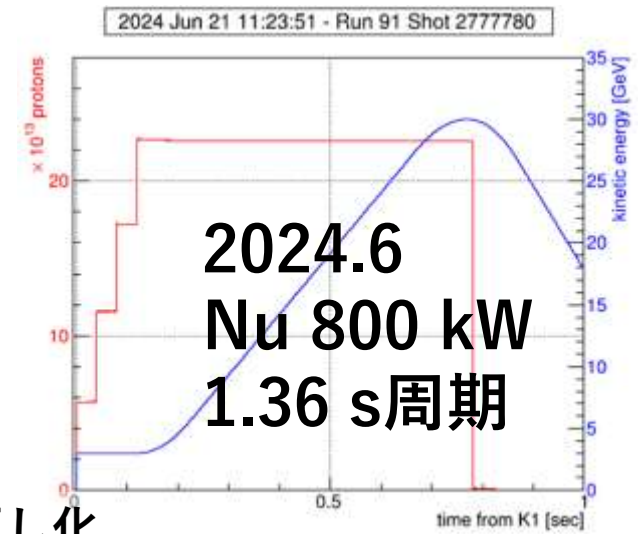
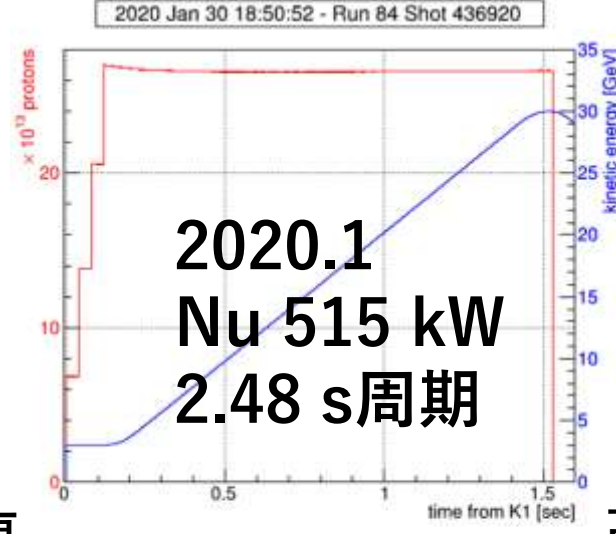
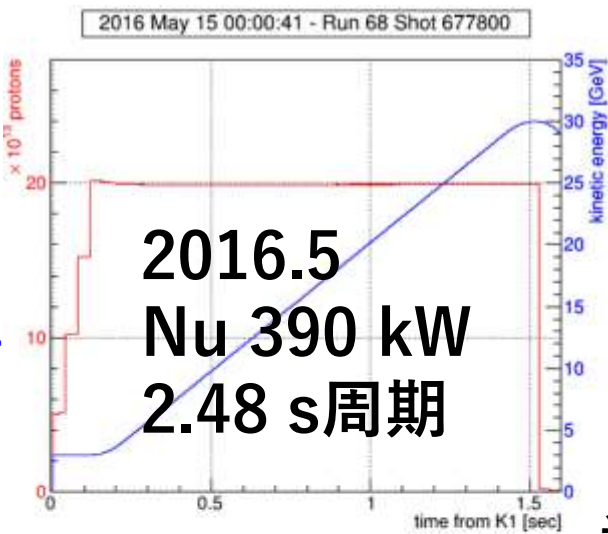
- ・コリメータ増設で
ハローを効率よくカット



MR-FX ビーム品質の変遷

陽子数

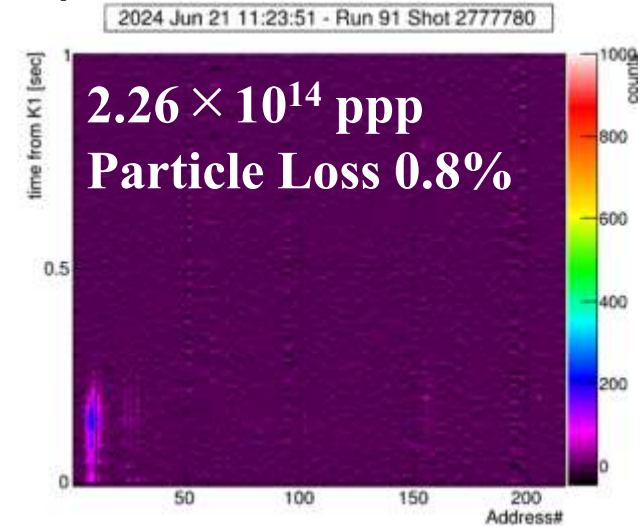
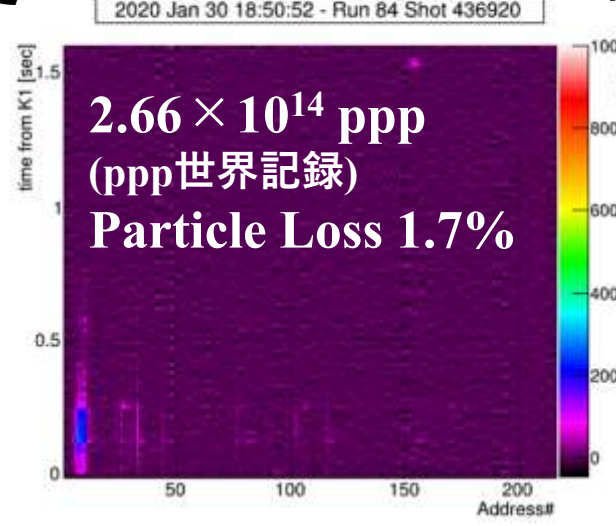
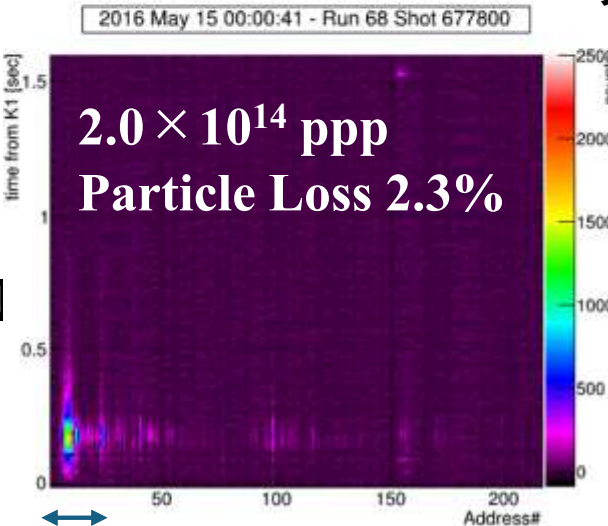
エネルギー
パターン



光学変更

高繰り返し化

ビーム
ロス分布
縦軸 周回時間
横軸 MR位置



コリメータエリア
ゲイン1/8
(ロス局所化)

機能性追求 & ビーム光学開発

ビーム強度アップとビームロス抑制の両立に成功

2023.4.16 21:51

MR-FX 753 kW eq. in 1.36s cycle; 2.13×10^{14} ppp@30GeV

MR-FX 753 kW 30GeV 加速・取り出しに成功。
J-PARC創設以来のMR-FXデザインパワーを達成！

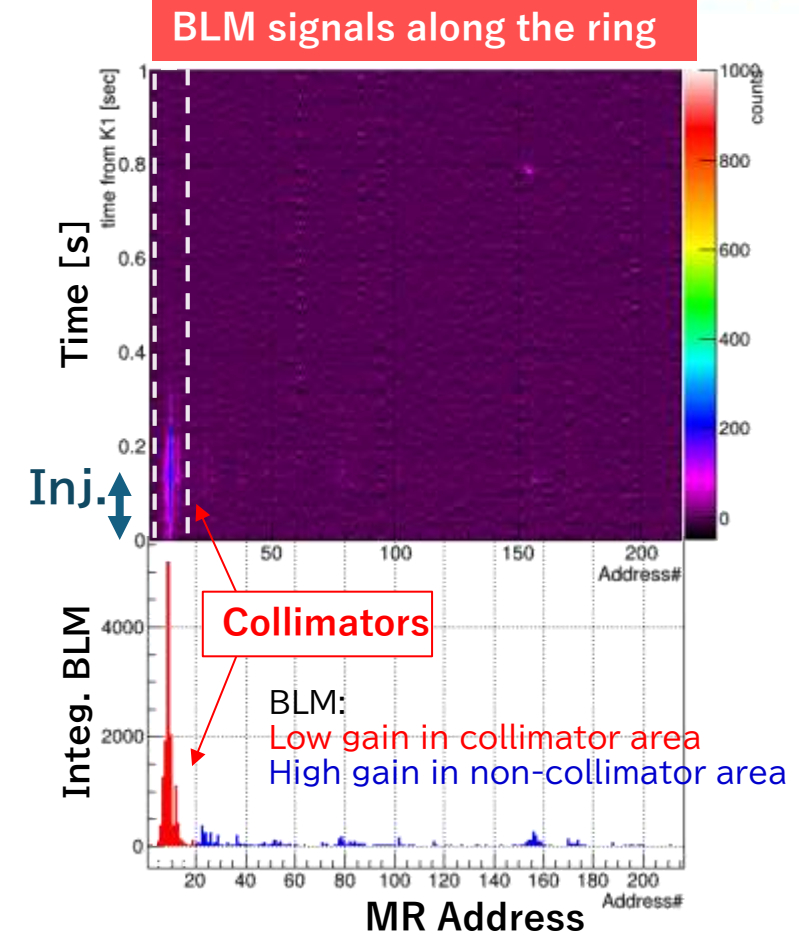
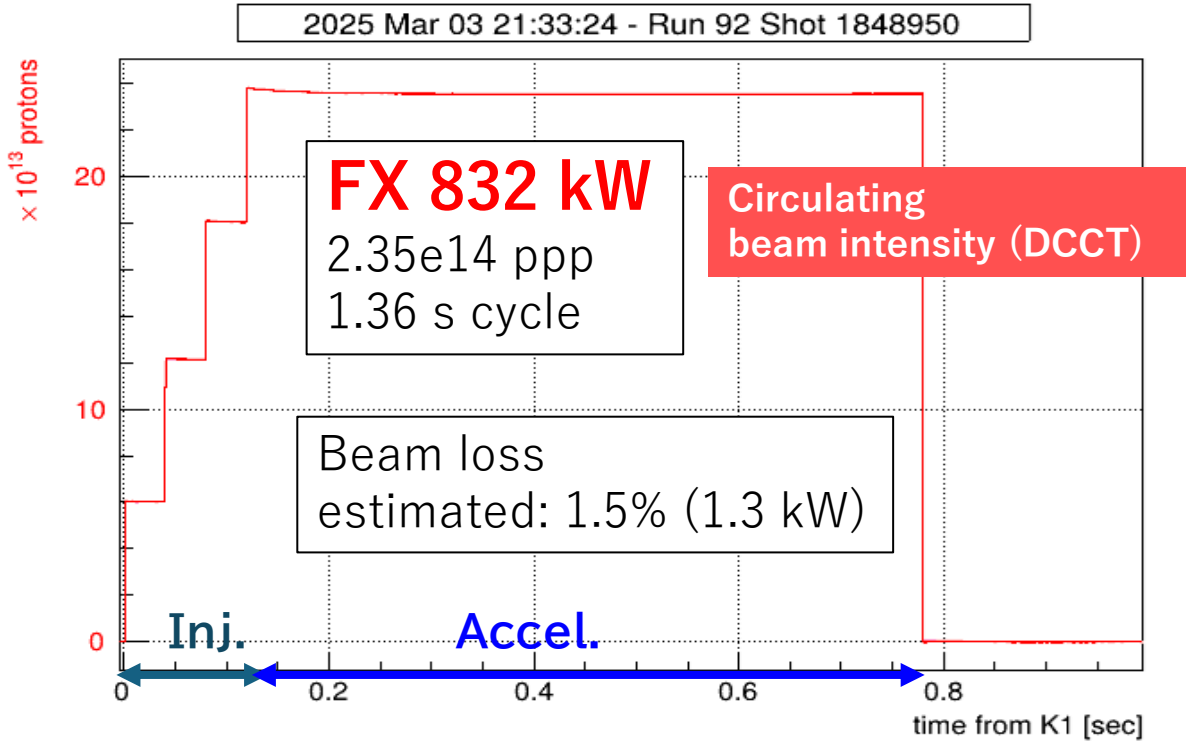
十分なドライランを経て、2024年6月には
MR-FX/NU 800 kW
MR-SX/HD 80 kW
安定利用運転を達成。



ビーム光学系は
改造前をキープ

改造後機器と
既存ノブの
精密調整で

830 kW
安定利用運転
を達成



JFY	Beam Power User Op.	Cycle Time	Beam Intensity	Particle Loss (DCCT estimation)
2019	515 kW	2.48 s	2.7×10 ¹⁴ ppp	1.7%
2023	710 kW	1.36 s	2.0×10 ¹⁴ ppp	1.3%
2023	760 kW	1.36 s	2.2×10 ¹⁴ ppp	1.6%
2024	809 kW	1.36 s	2.29×10 ¹⁴ ppp	0.9%
2024	830 kW	1.36 s	2.35×10 ¹⁴ ppp	1.5%

ビームロス抑制・ビームロス局所化

目的: メンテナンス性の確保
判断基準: 利用運転中の残留線量
メンテナンス計画・作業性

→ 半減させたい

- 270兆個の陽子パルス (~4 us long pulse) のビームは非線形力満載。
でも、操作機能はほぼ線形力だけ。 → 大強度陽子シンクロトロン のビーム力学

ビーム運動は 単粒子化してとらえると、
横方向運動(水平方向・鉛直方向)と縦方向運動(進行方向)
に大別。ここでは横方向運動に絞って考える。 大強度空間電荷効果のメイン

ベータトロン振動 ザックリイメージ	$\ddot{x} + \omega_{x0}^2 x = \sum_n F_{xn} \cos(\omega_{xn} t + \phi_{xn})$ $\ddot{y} + \omega_{y0}^2 y = \sum_n F_{yn} \cos(\omega_{yn} t + \phi_{yn})$	n は共鳴 F_n は x, y の関数
----------------------	---	-------------------------------

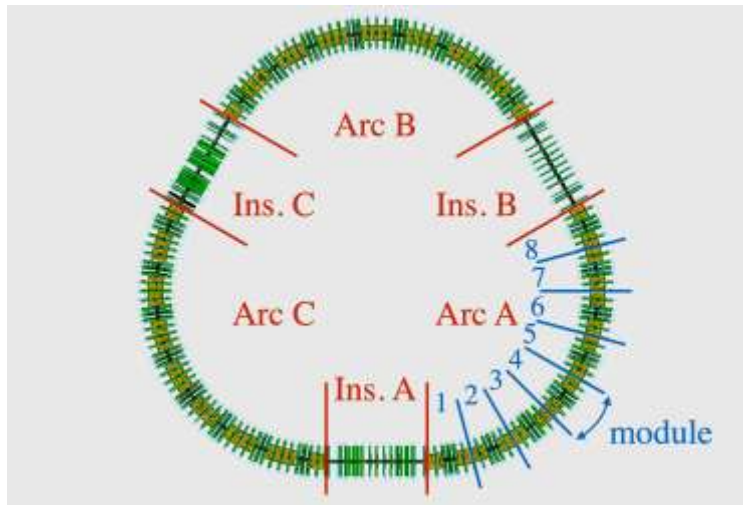
ω_0 と ω_n はなるべく離すべき。しかし、空間電荷効果・運動量拡がり・インピーダンス影響、…などで ω_0 は拡がりを持つため避け切れない。 → 影響の強いものから回避・補正をしていく。

一般的な共鳴補正: 位相の異なる複数の補正磁石で $F_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + c_\alpha \cos(\omega_1 t + \phi_\alpha) + c_\beta \cos(\omega_1 t + \phi_\beta) = 0$
しかしリング対称性に即した共鳴(構造共鳴)は回避するしかなかった。

リング格子特性を活用した補正: MRでは 3-Arc部、1-Arc部当たり位相進みが同じCellが8ある
共鳴源がArc部格子構成に由来するなら、Arc部の位相進みを調整すれば共鳴は相殺される

$$F_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^8 f_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_{p,q}) \rightarrow 0 \text{ (f1によらずに)}$$

リング格子特性: MRでは 3-Arc部、1-Arc部当たり位相進みが同じCellが8ある



$$F_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^8 f_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_{p,q}) \rightarrow 0 \text{ (f1によらずに)}$$

Arc部の位相進みを調整

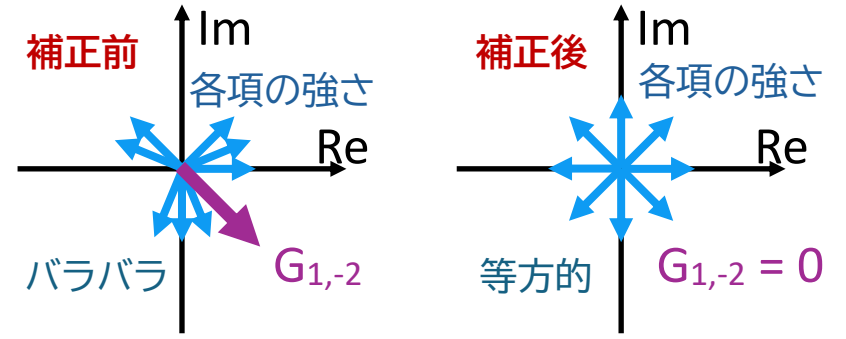
$$\sum_{q=1}^8 \cos(\omega_1 t + \varphi_{p,q}) = \cos(\omega_1 t + \varphi_{p,1}) + \cos(\omega_1 t + \varphi_{p,1} + \frac{2\pi k}{8}) + \dots + \cos(\omega_1 t + \varphi_{p,1} + 7\frac{2\pi k}{8}) = 0$$

- 六極磁場ポテンシャルの xy^2 の項が作る共鳴は**構造共鳴** $\nu_x - 2\nu_y = -21$
- 六極磁石を使っている限り、この共鳴は避ける他ないとされていた。

$$G_{1,-2} \equiv \oint \beta_x^{1/2} \beta_y K_2 e^{i(\psi_x - 2\psi_y)} ds \simeq \sum_j \beta_{xj}^{1/2} \beta_{yj} (K_2 \Delta L)_j e^{i(\psi_{xj} - 2\psi_{yj})}$$

六極磁場の強さ 同じものが複数ある 位相を調整

$$\begin{aligned} \psi_x - 2\psi_y &= \phi_x - 2\phi_y - (\nu_x - 2\nu_y + 3 * 7)\theta \\ \psi_x, \phi_x &: s \text{ の関数} \\ \phi_x &: \text{要素毎の位相} \\ \theta &= s/R \end{aligned}$$



$$\sum_{k=0}^7 \cos(2\pi \frac{k}{8} + \phi) = 0$$

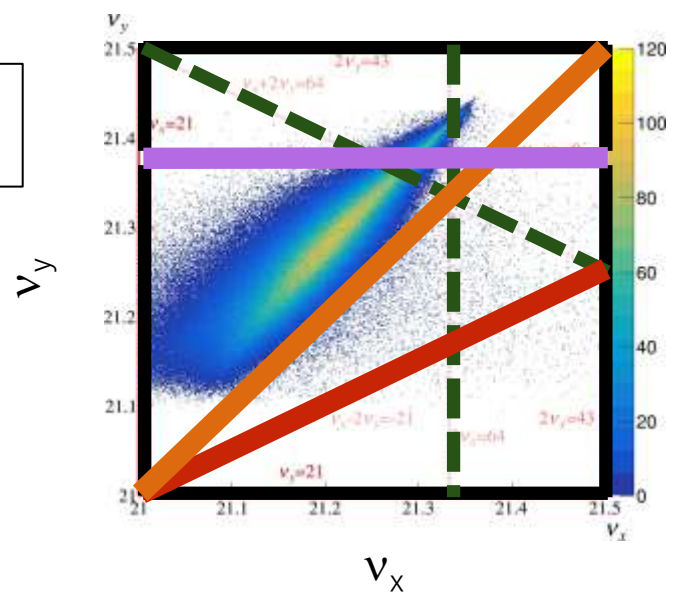
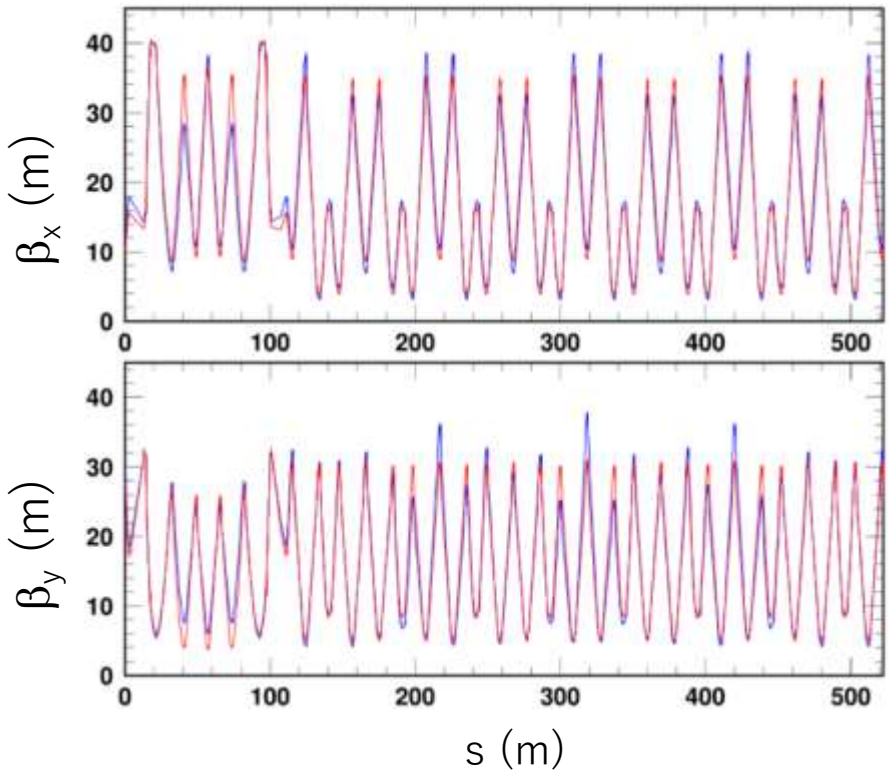
Arc部内の位相進み調整で共鳴が相殺。

同位相進み複数のCellを持つArc部で一般的に有効。

- 構造共鳴を抑制する新Arc光学(アーク部の鉛直方向位相差の自由度を活用)を採用する計画を進めた。2021~
- 光学変更に伴い、主電磁石電源に対する要求は大きく変わった。 *1,*2

Beta function for one super-period

— Prev. (till JFY2024)
— New-arc



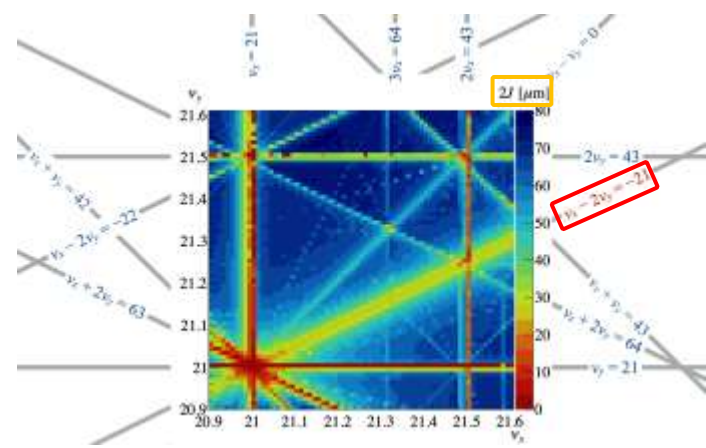
- $\nu_x - 2\nu_y = -21$ Walkinshaw
(3次構造共鳴：六極磁場由来)
- $2\nu_x - 2\nu_y = 0$ Montage
(4次構造共鳴：空間電荷効果由来)
- $8\nu_y = 171$
(8次構造共鳴：空間電荷効果由来)
- $3\nu_x = 64$, $\nu_x + 2\nu_y = 64$
(3次非構造共鳴：六極磁場誤差由来)

*1 for $n_x - 2n_y = -21$
T. Yasui, S. Igarashi, Y. Sato, and T. Koseki,
“Beam optics for the compensation of third-order structure resonances”,
Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 013G01 (2022).
<https://doi.org/10.1093/ptep/ptab146>

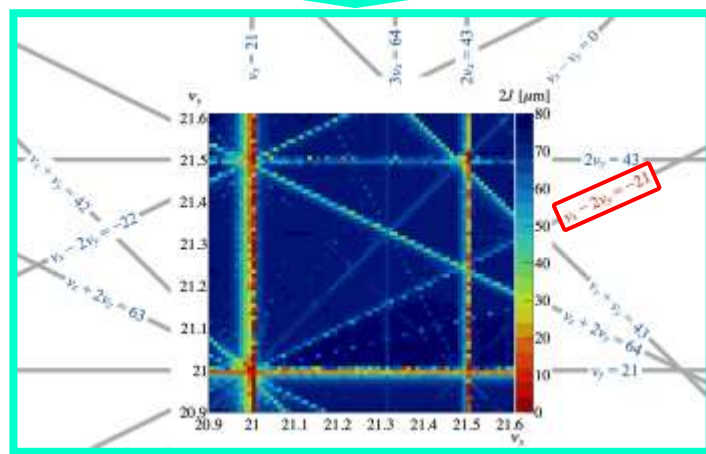
*2 for $8n_y = 171$
T. Yasui and Y. Kurimoto,
“Suppression of the eighth-order space-charge-induced resonance”,
Phys. Rev. Accel. Beams, **25**, 121001 (2022).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.25.121001>

生き残る粒子の最大のアクション(シミュレーション)

$$q = \sqrt{2J_q \beta_q} \cos \psi_q, \quad (q = x, y)$$



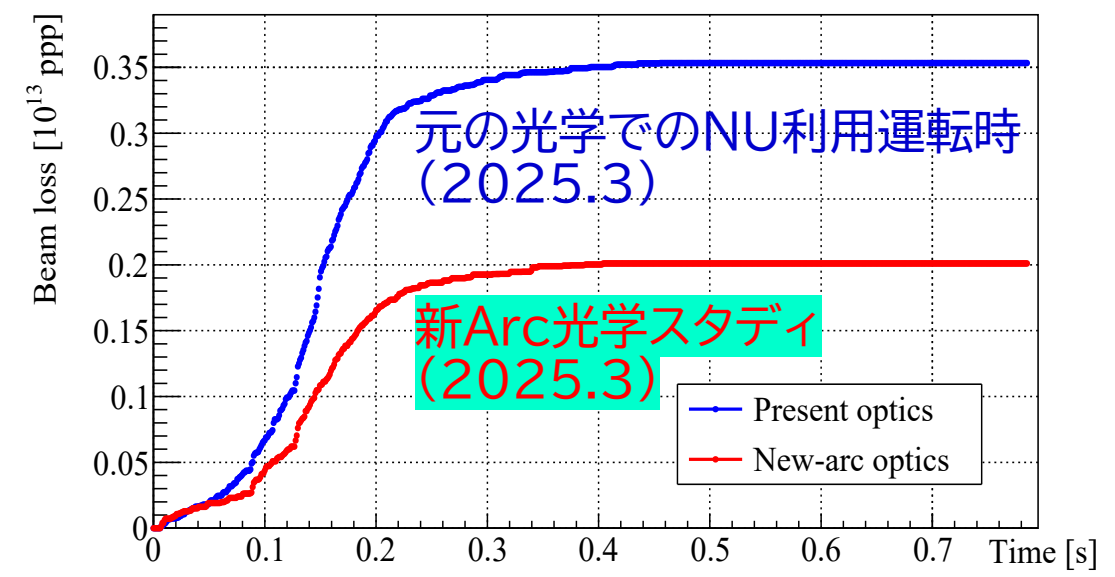
新Arc光学



構造共鳴 $\nu_x - 2\nu_y = -21$ の補正

- 構造共鳴を抑制する**新Arc光学**(アーク部の鉛直方向位相差の自由度を活用)を採用計画: 着手から利用運転適用まで4年。
- 主電磁石新電源への仕様出し: 2021年
- 主電磁石新電源機能への組込・調整: JFY2024で完了。
- → **新Arc光学**での大強度ビーム調整 **2025.3月、5月で実施**
- 利用運転適用: 2025.11月~

2.37e14 ppp (1.36s, 830 kW) in 2025/3.
ビームロス量時間発展 (DCCT-base推計)



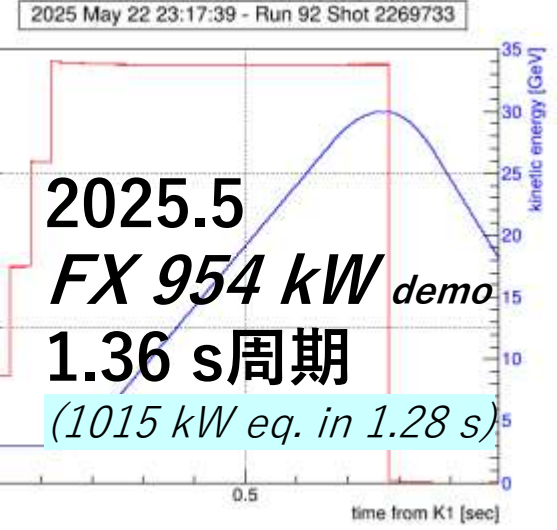
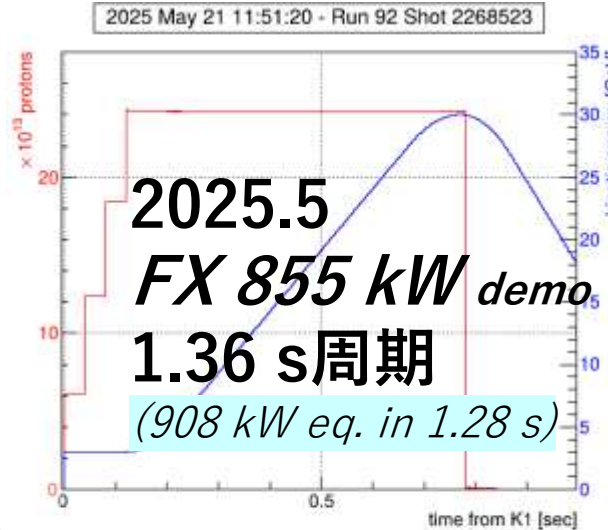
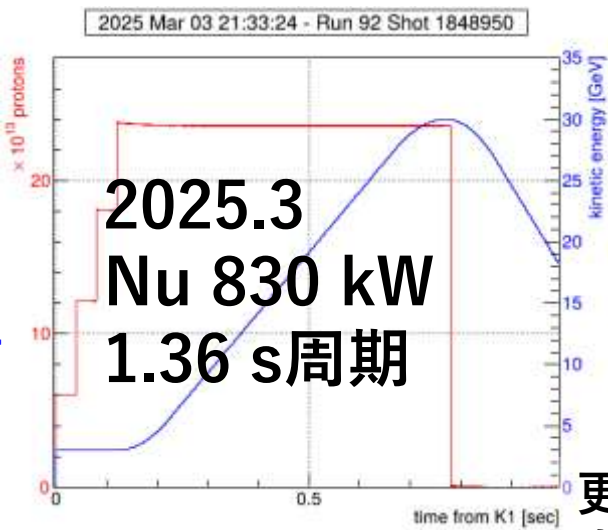
ロス半減に成功

T. Yasui, et. al., IPAC2025
Y. Sato for J-PARC MR, "J-PARC MR status", PASJ2025, FRO603.

MR-FX ビーム品質の変遷

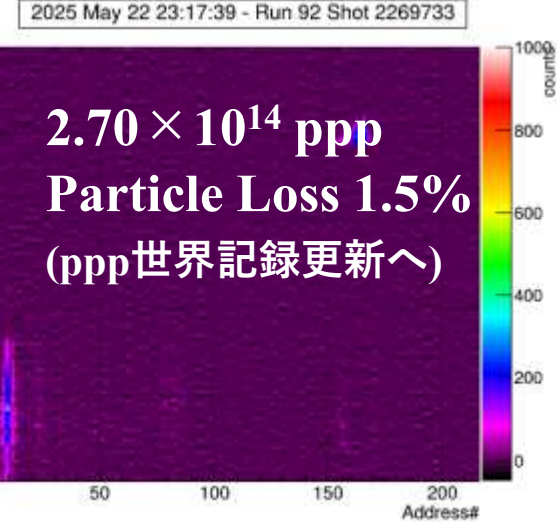
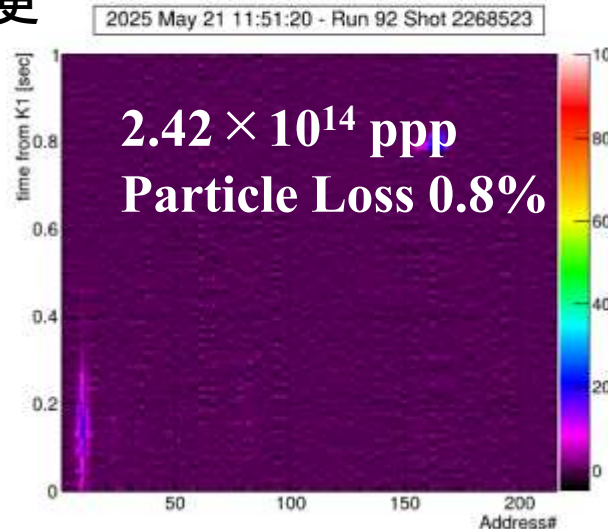
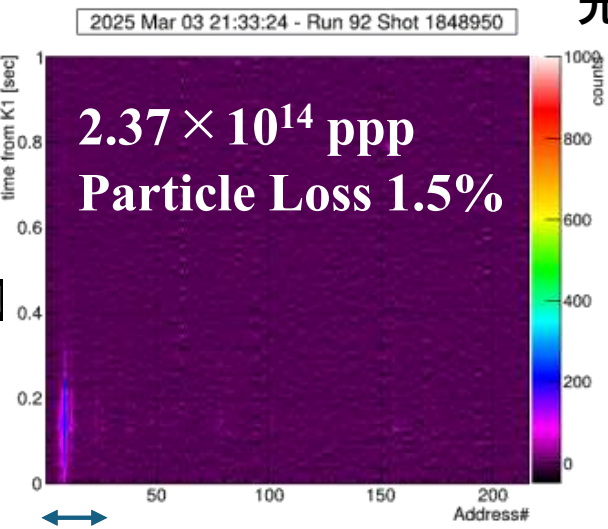
陽子数

エネルギー
パターン



更に
光学変更

ビーム
ロス分布
縦軸 周回時間
横軸 MR位置



高繰り返し化

現設備
1.28 s周期
2025後期～
更なる
設備増強で
1.16 s周期へ

コリメータエリア
ゲイン1/8
(ロス局所化)

機能性追求 & ビーム光学開発を更に追求

MR Magnet PS Gr.

FX cycle 1.36 s → 1.28 s は既定路線。

入射・加速時間を変えずに、立下り時間だけを短縮すれば
ビームダイナミクスを変えずに 5%ビーム強度が増える。

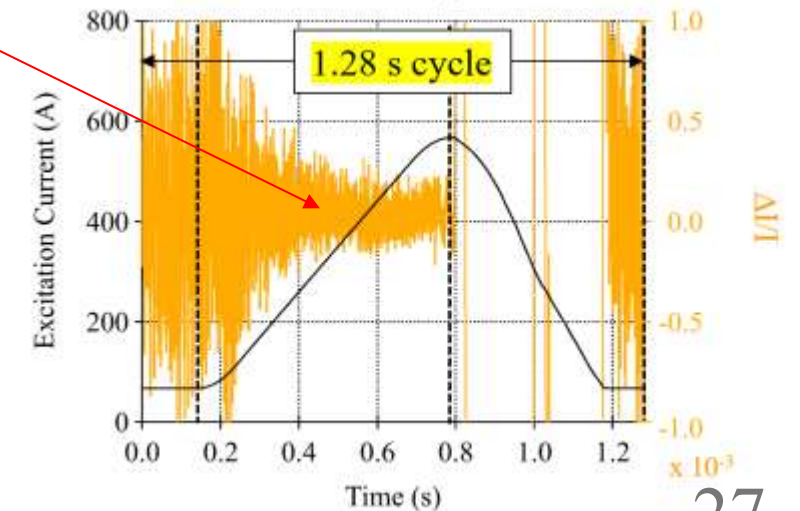
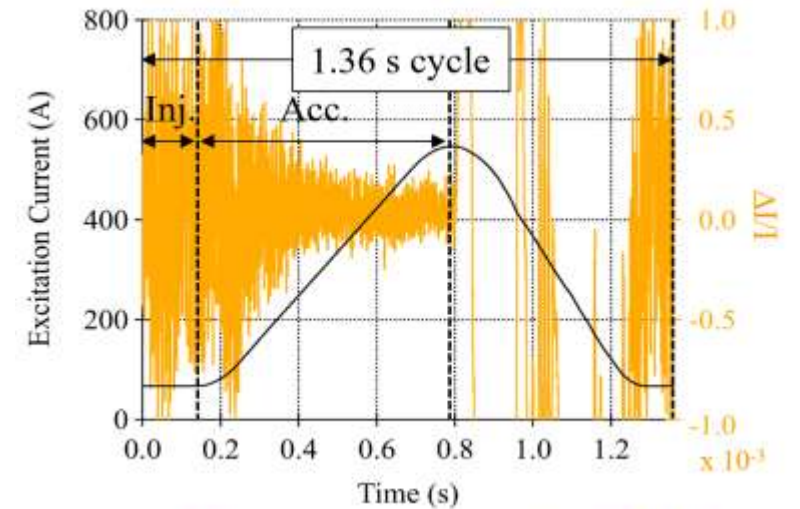
ただし、主電磁石電源・電流偏差の同レベル保持が必須。
1年に渡る、主電磁石電源通電試験で安定稼働条件を確立。

2026/1/14 - 21

FX1.28 s周期のビーム試験を実施。
初日からFX1.36 s周期と同等の光学系を再現。
安定的で再現性の高いビーム条件で
ビームダイナミクス試験を遂行できた。

→
差共鳴の下のTuneを狙うことに成功。更にロスを抑制し
2026.1月のNU 900 kW安定利用運転開始、
2026.2月のNU 1 MWデモ試験成功の道を開いた。

Current pattern of the QFP PS



FX利用運転に関連する共鳴

整数・半整数共鳴以外にも

3次構造共鳴(Walkinshaw)

$$v_x - 2v_y = -21$$

(由来：六極磁場)

4次構造共鳴(Montague)

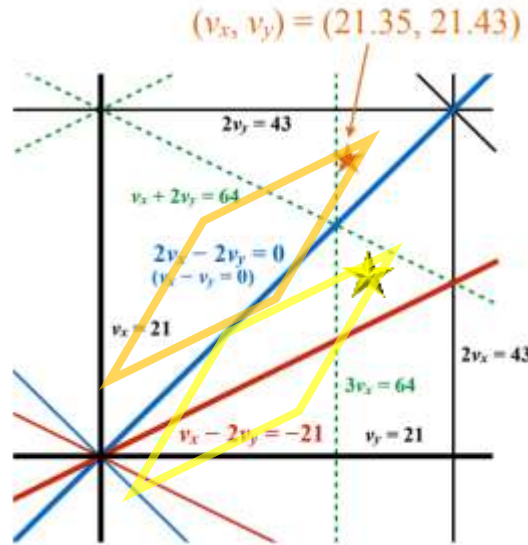
$$2v_x - 2v_y = 0$$

(由来：空間電荷効果)

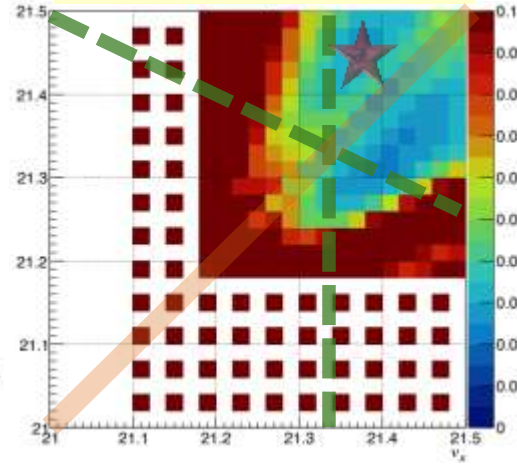
3次非構造共鳴

$$3v_x = 64 \text{ \& } v_x + 2v_y = 64$$

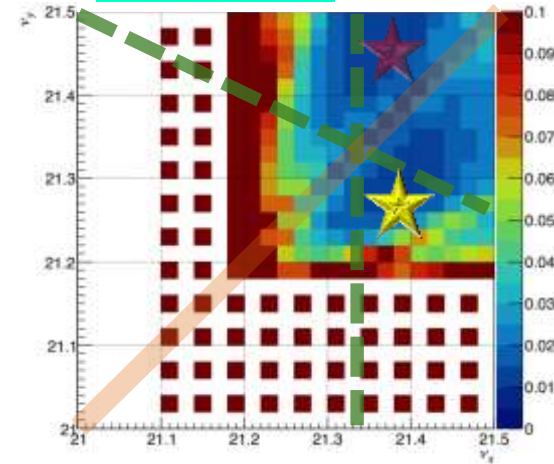
(由来：六極磁場誤差)



旧光学系 till JFY2024



新Arc光学系



PIC Space Charge Simulation w/o field errors for $4e13$ ppb (1.3 MW eq.) beam, T. Yasui, et. al., IPAC25

NOTE: The 3+0 and 1+1 lines are well corrected with Trim-S system, but only during injection period.

旧光学系から新Arc光学系に移行

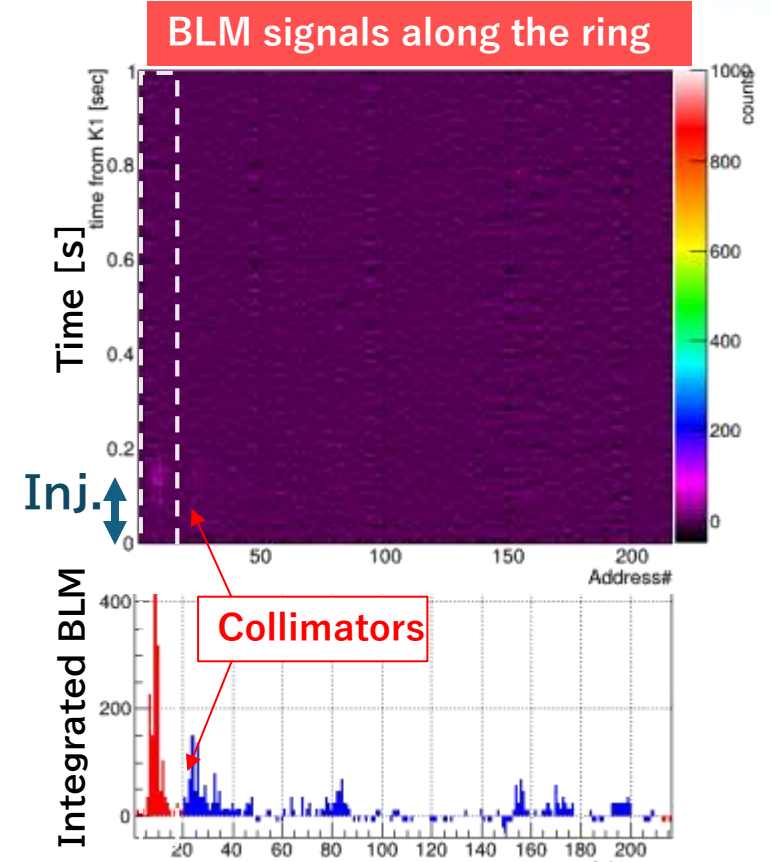
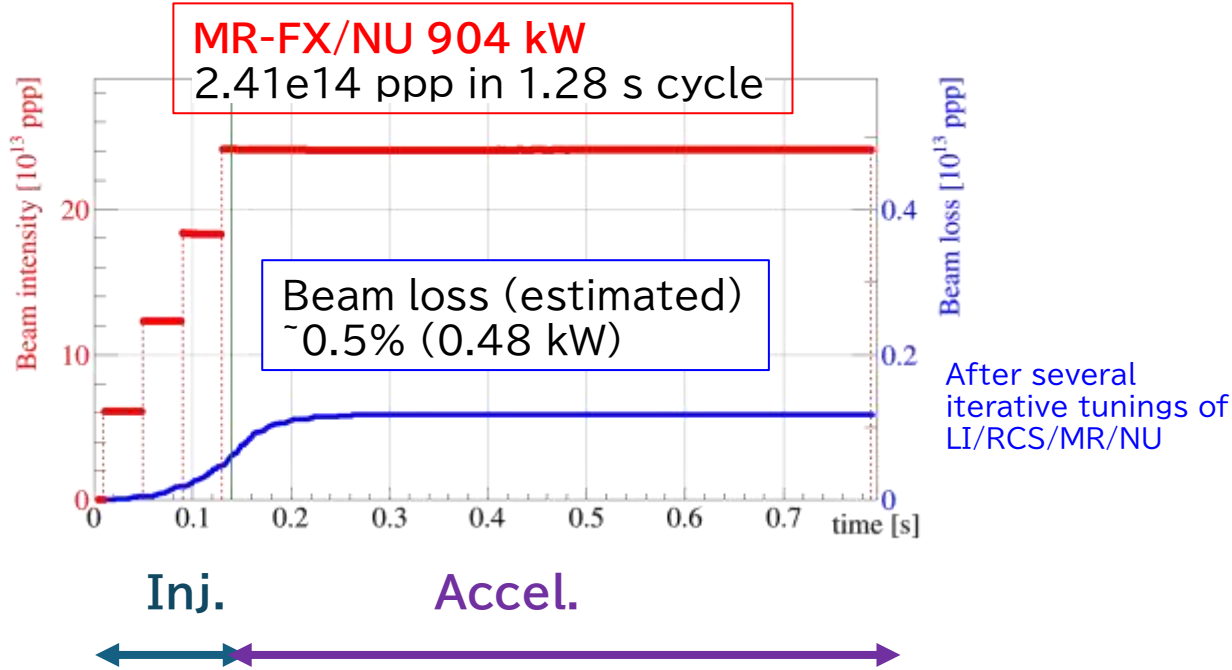
- 3次構造共鳴
- 4次構造共鳴

を抑制、更に3次構造共鳴の回避が不要となったことから、チューンを差共鳴の下エリアを探索する調整も完遂し、

抵触していた(加速中補正が不十分な) 3次非構造共鳴を2本から1本に減らすことに成功。

新Arc光学
利用運転適用
JFY2025

900 kW
安定利用運転
を実現
2026.1 -



We have optimized
LI/RCS/MR/NU
iteratively during
1.5-month user op.

JFY	Beam Power User Op.	Cycle Time	Beam Intensity	Particle Loss (DCCT estimation)
2019	515 kW	2.48 s	2.66×10^{14} ppp	1.7%
2023	760 kW	1.36 s	2.20×10^{14} ppp	1.6%
2024	809 kW	1.36 s	2.29×10^{14} ppp	0.9%
2024	830 kW	1.36 s	2.35×10^{14} ppp	1.5%
2025	900 kW	1.28 s	2.40×10^{14} ppp	0.5%



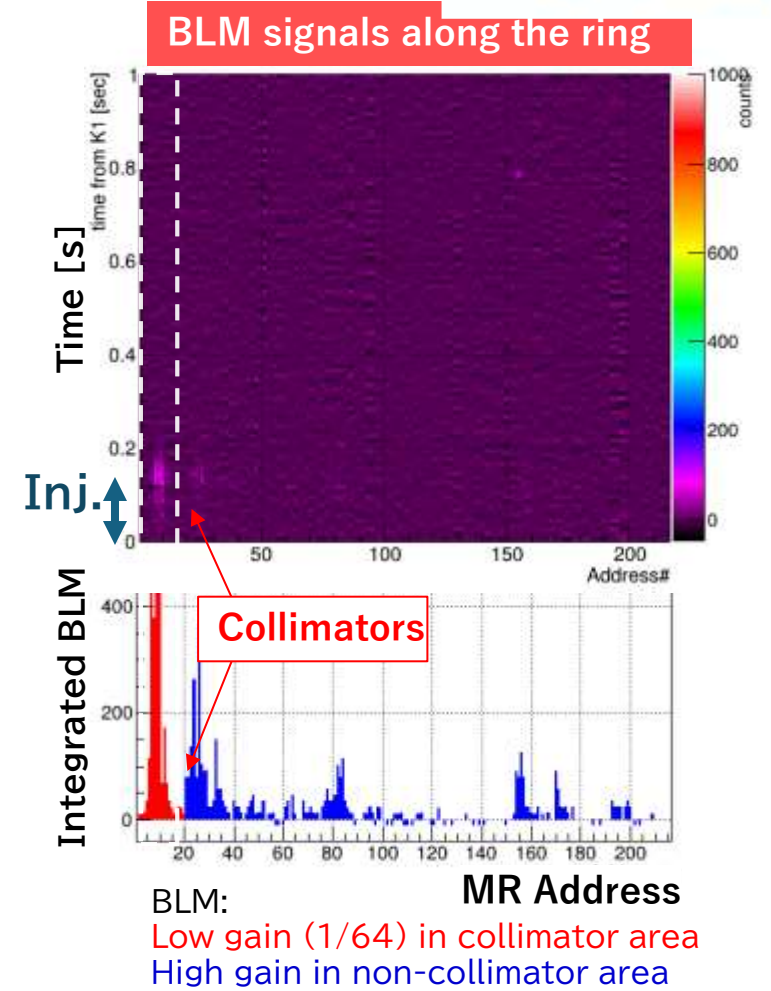
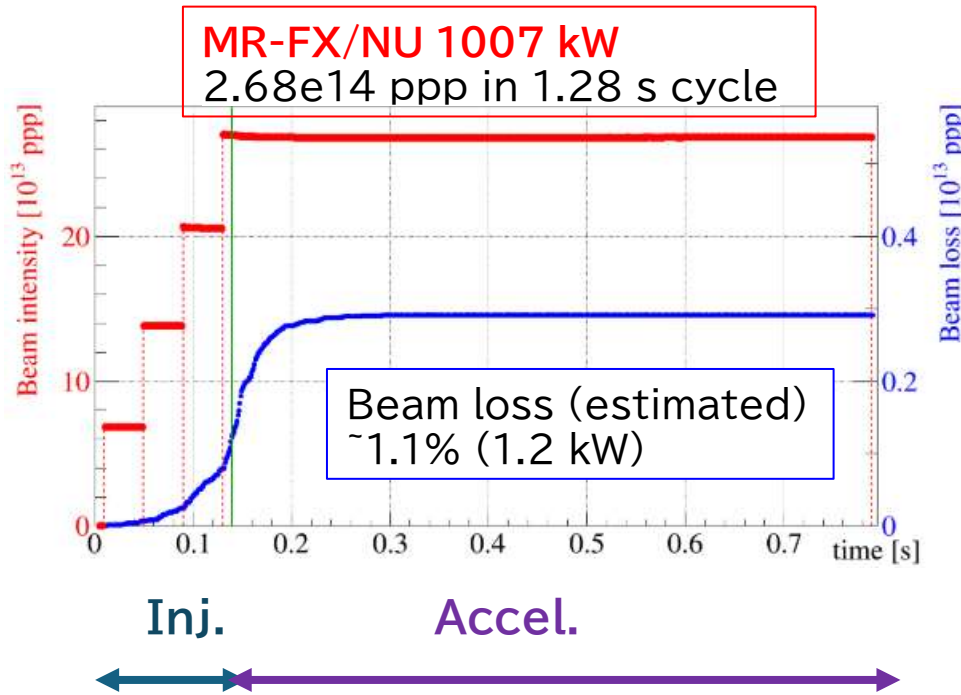
ロス半減以下に成功

BLM: MR Address
Low gain (1/64) in collimator area
High gain in non-collimator area

残留線量で評価しても
ビームロス量・局所化性能向上により、
十分なメンテナンス性確保が確認された。

新Arc光学
利用運転適用
JFY2025

1 MW
デモ試験成功
利用運転
可能レベル



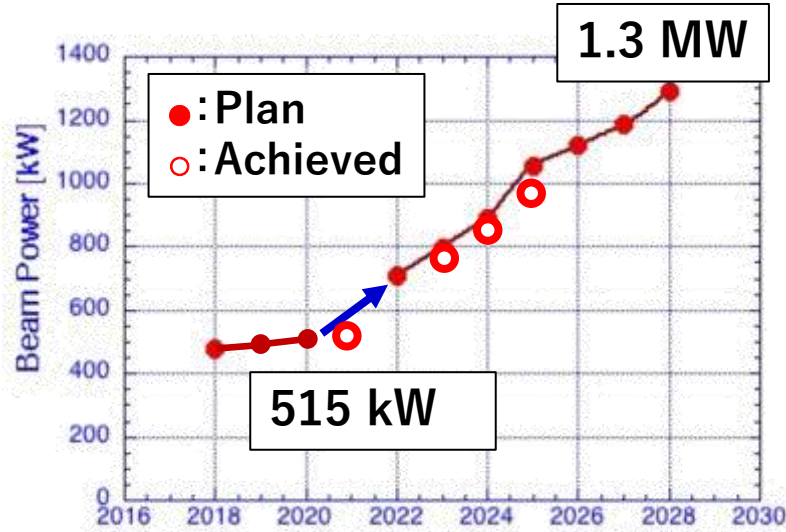
JFY	Beam Power User Op.	Cycle Time	Beam Intensity	Particle Loss (DCCT estimation)
2019	515 kW	2.48 s	2.66×10^{14} ppp	1.7%
2023	760 kW	1.36 s	2.20×10^{14} ppp	1.6%
2024	809 kW	1.36 s	2.29×10^{14} ppp	0.9%
2024	830 kW	1.36 s	2.35×10^{14} ppp	1.5%
2025	900 kW	1.28 s	2.40×10^{14} ppp	0.5%
2025	1 MW	1.28 s	2.68×10^{14} ppp	1.1%

ビームロスを大幅抑制・局所化増進した上で
パルス当たり陽子数270兆 (WR) 復活!

2026年度後半の利用運転目標

T2K and NOvA

- Discovery of CPV
- Precision measurements, mass hierarchy and exotic searches

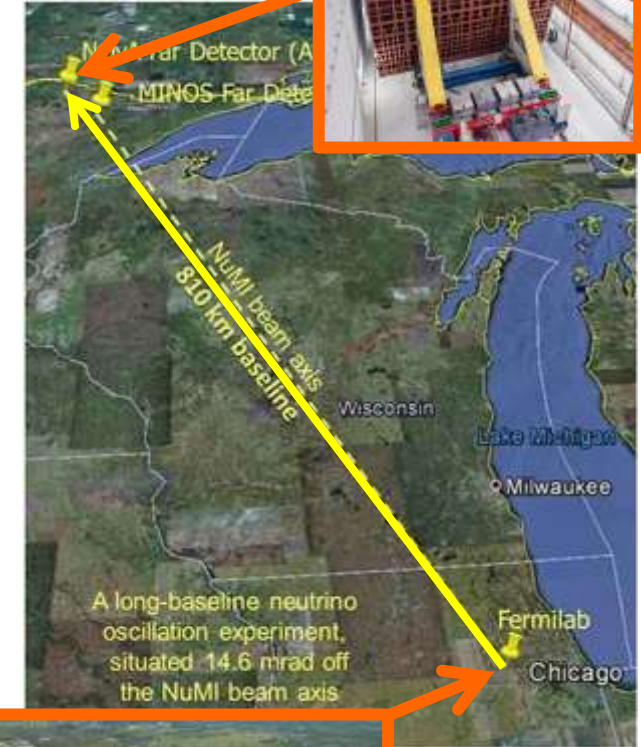


22.5 kton
Water cerenkov
detector



NOvA far detector

14 kton
Scintillator
detector



熾烈な国際競争

T2K and No v A (後継企画はそれぞれ HK and DUNE)

物理目的は共通。検出器性能はほぼ同等。

あとは統計量勝負。--- 加速器性能が勝負の鍵

MR大改造計画進行中 → 1300 kW in 2028 ^

2025～2027年度ハードウェア増強を継続:

- ・RF システム増強 (RF空洞増設、陽極電源増設) [～2027]
- ・主電磁石電源 (Capacity-Bank, …) [2026 & 2027]
- ・電磁石補正用電源 (Trim-Quad/Sext) [2026 & 2027]
- ・新アポートダンプ [2027]
- ・新ビーム位置モニターシステム [2025]

2028年度:

- ・増強後のハードウェアドライラン
 - ・1.16 sサイクル機器調整
 - ・秋以降、1.16 sサイクルビーム調整
- 2028年度内 FX 1.3 MW へ

・SX用増強 (Diffuser, Bent Si crystal, リップル補正, VHF空洞, …) [進行中]

JFY	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Event		Long Shutdown							
FX power [kW]	515	-	>700	800	900	>1000	>1100	>1200	1300
SX power [kW]	55	60-70	>80	>80	>80	>80	~100	~100	~100
Cycle time for Fast Extraction	2.48s		1.36s	1.36s	1.36s	1.28s	1.28s	<1.28s	1.16s
Cycle time for Slow Extraction	5.20s		4.24s	4.24s	4.24s	4.24s	4.24s	4.24s	4.24s
New Magnet PS	→								
Inj/FX system	→								
Collimator system		←							
RF upgrade	→								
Magnet PS upgrade (CB upgrade)						←			
Beam correction system upgrade						←			
Beam dump upgrade						←			
Diffuser/Ripple canceler/ Bent crystal/VHF/etc.	←								

JFY	FX Beam Power	Cycle Time	Beam Intensity	Particle Loss (DCCT estimation)
2019-2021	515 kW	2.48 s	2.7×10^{14} ppp	1.7%
2024	830 kW	1.36 s	2.35×10^{14} ppp	1.5%
2025	855 kW	1.36 s	2.42×10^{14} ppp	0.8%
	954 kW	1.36 s	2.70×10^{14} ppp	1.5%
		1.28 s		
2028	1.3 MW	1.16 s	3.3×10^{14} ppp	---

MRでは大強度化に向けて、更に新たな光学も検討中:

FX(新Arc光学でのTune搜索), SX(スリッページを増やす光学での不安定性抑制)

まとめ

J-PARC MRでは、2021-2022の高繰り返し改造後、改造機器の調整、および、それを踏まえた大強度化調整が順調に進んでいる。

✓ MR FX

JFY2024
2026.1~

830 kW利用運転の達成

900 kW安定利用運転の達成

2.42e14 ppp ビーム損失 ~0.5%

NU 830 kW利用運転時の半分

2026.2

1 MW eq. ビーム試験(NU標的打ち込み)成功

2.70e14 ppp ビーム損失 ~1.1%

✓ MR SX

JFY2025春

→ 武藤さんのトーク

92kW安定利用運転の達成

8.0e13 ppp for SX --- J-PARC4つ目のWR

2025.4

100 kW安定利用運転の達成

MRでは今後も更なる増強・大強度化計画が進行中。

あと何枚か広告です

KEK 加速器研究施設に所属する教員

KEK加速器研究施設では、以下の職種で公募を行っています。

博士研究員 若干名（任期:単年度契約で 3 年）

和文: <https://www.kek.jp/ja/career/accl25-13j>

英文: <https://www.kek.jp/en/career/accl25-13e>

着任時期:採用決定後、できるだけ早期

公募締切:2026年5月19日(火)正午必着

特別助教 若干名（任期4年、審査により定年制に移行することが可能）

和文: <https://www.kek.jp/ja/career/accl25-14j>

英文: <https://www.kek.jp/en/career/accl25-14e>

着任時期:採用決定後、できるだけ早期

公募締切:2026年5月19日(火)正午必着

加速器研究施設に所属する教員

- 教授、准教授、講師、助教、特別助教、特任助教、博士研究員など大学と大差ない職種です（教育公務員特例法が準用される教員です）。
- 加速器の設計・建設・運転・性能向上に関連する加速器の研究を行うとともに、次世代光源、リニアコライダーなどの将来計画に向けた加速器技術開発、産業・医療応用、加速器理論等の加速器に関する広範な研究を行っています。
- 教員として採用された後は、加速器研究施設が進めているいずれかのプロジェクトに属して、加速器の運転、維持、開発研究を行います（加速器理論は直接プロジェクトに所属せず幅広く研究をおこなうケースもあります）。
- **加速器を専門に研究してきた大学院生の方は圧倒的に少数派ですので、助教や博士研究員に応募される際には、これまでの研究分野は問いません。幅広い分野の方の応募を歓迎します。**
 - 研究教育用の能力があると人事委員会で認められた方を採用します。
 - **ご興味がある方には、直接相談、また施設などの見学にも応じます。**

加速器(KEK) お問い合わせ先: ホームページにのっている方ならどなたでも

「ホームページ」

KEK加速器研究施設 ホームページ <https://www2.kek.jp/accl/>

J-PARC加速器 (KEK) ホームページ <https://ahfb10.kek.jp/ACCL-12/index.html>

J-PARCパンフレット <https://j-parc.jp/c/public-relations/brochure.html>

KEK加速器研究施設は、総研大大学院・加速器科学コースの受け入れもしています。

加速器科学コース 一般入試（特別・通常）

https://www.soken.ac.jp/admission/application_info/acc/

【出願期間】 5年一貫制博士課程

【特別選抜】 2026年度4月入学：2025/05/29～2025/06/04

（受験票発送：2025/06/27予定）

【通常選抜】 2025年度10月入学及び2026年度4月入学：2025/06/26～2025/07/02

（受験票発送：2025/08/07予定）

【出願期間】 博士後期課程

（第1回） 2025年度10月入学及び2026年度4月入学：2025/06/26～2025/07/02

（受験票発送：2025/08/07予定）

（第2回） 2026年度4月入学：2025/12/04～2025/12/10

（受験票発送：2026/01/08予定）

～科学技術発展のゆりかご～

加速器科学

時代時代の技術限界を見極め、各界の最先端技術を貪欲に取り入れてその限界に挑戦、多体系・非線形物理を低次要素で操作しきる発見を練り上げて発展してきた総合科学。

大強度フロンティア・高輝度フロンティアに立ち続け、数々のマイルストーンを達成してきたKEK加速器研究施設は、国際的な加速器科学研究の一大拠点。

KEK加速器研究施設では、多岐にわたる研究分野が展開：

ビーム物理学(電磁気学 解析力学 多体系・非線形物理学)、計測学、
電子・電気工学、物性科学、高周波科学、低温技術、制御、計算機科学、プラズマ、...

それぞれの研究成果が直ちに加速器性能向上、物理実験の成果に直結しています。

技術限界に挑戦し続けて発展したKEK発の技術は、世界中の最先端加速器で採用されています。加速器分野を超えた産業応用もまた広がっています。

J-PARC加速器(KEK) 問い合わせ先：

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

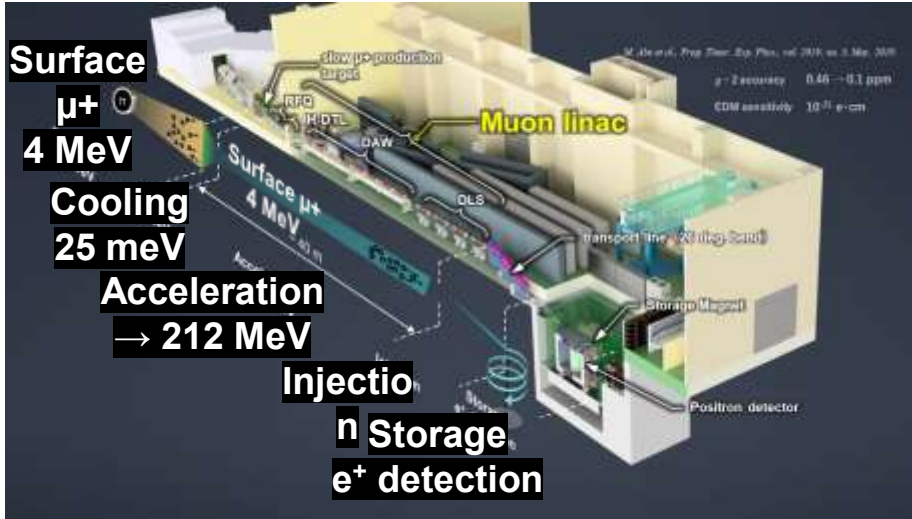
加速器第一研究系 研究主幹・教授 發知 英明 hideaki.hotchi@j-parc.jp

加速器第二研究系 研究主幹・教授 佐藤 洋一 yoichi.sato@j-parc.jp

補足資料

紹介しきれなかったKEK加速器(東海キャンパス)の研究活動

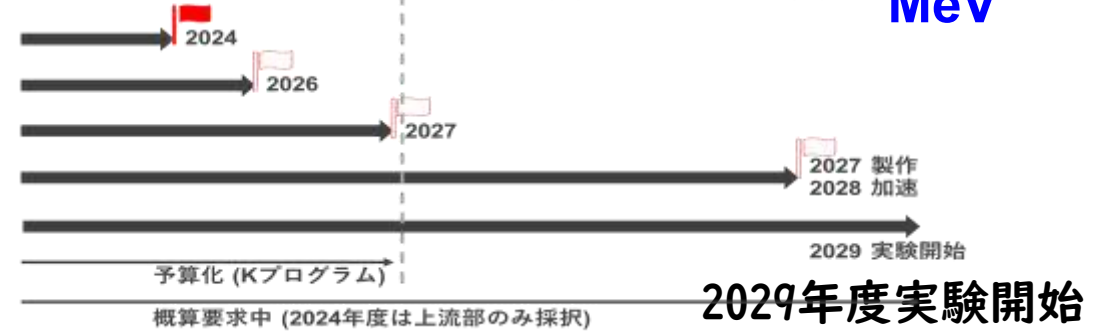
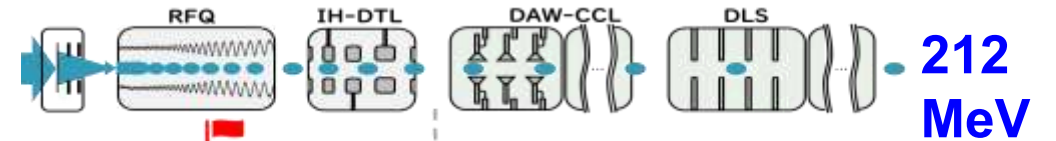
J-PARC ミュオン加速器 (μ g-2/EDM実験)



実験目標：
 μ 異常磁気モーメント(g-2) 精度: 0.46 -> 0.1 ppm
 μ 電気双極子モーメント(EDM) 感度: 10e-21 e cm

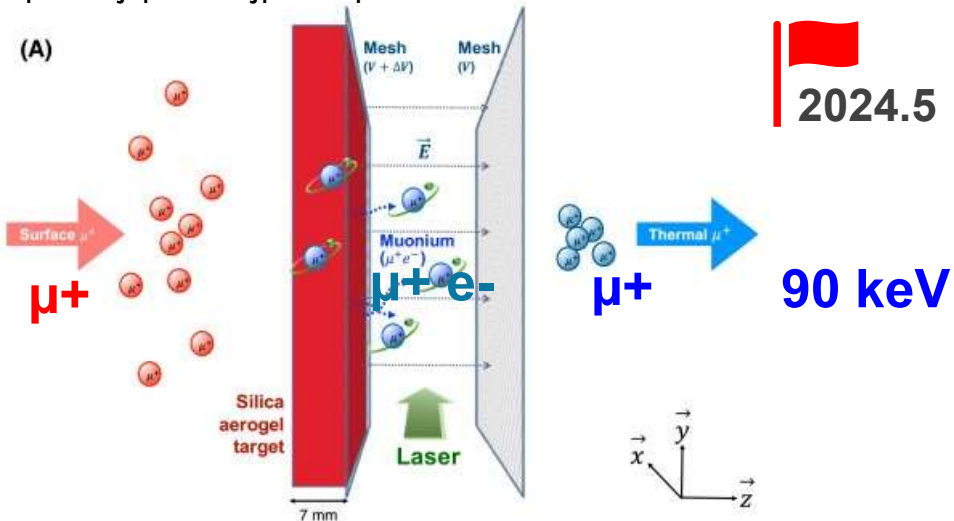
課題

- 低ビームエミッタンス (1/1000)
- 弱く収束 (1/1000) & 高い入射効率 (x10)
- コンパクトな蓄積リング (1/20)
- 大口径検出器
- 新規システム (BNL/FNALと異なる)



世界初のミュオン冷却&加速達成

<https://j-parc.jp/c/press-release/2024/05/17001336.html>



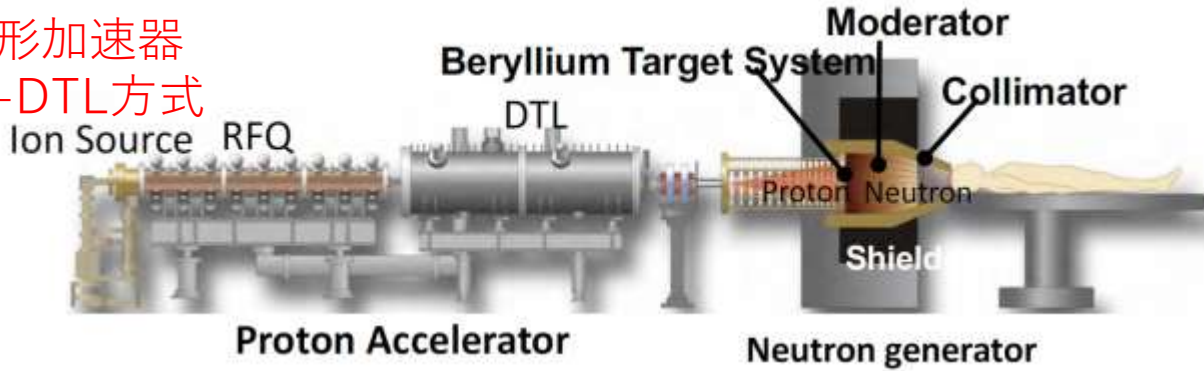
ミュオン線型加速器、3T蓄積磁石、3次元らせん入射系の開発研究を進めている。

世界初の成果を出し続けている
 J-PARCミュオン加速器計画を
 完成させる人材が要る

医療応用：iBNCTの推進

筑波大学病院との共同研究。KEKは大強度陽子リニアックを担当。
J-PARCのリニアックをベースに設計、建設した。

RF線形加速器
 RFQ+DTL方式



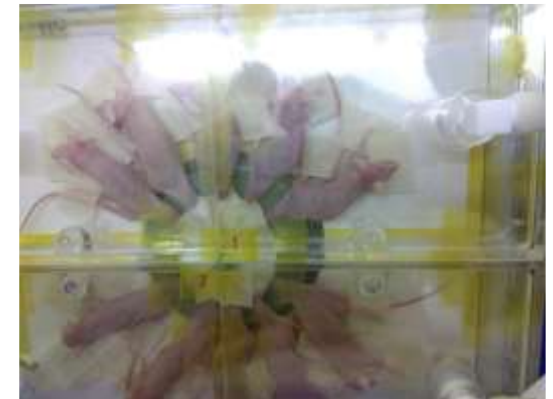
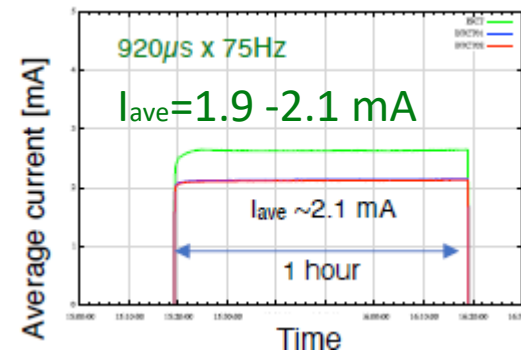
非臨床試験を2021年11月から
 2022年12月まで実施。
 2024年3月から臨床試験を開始

中性子反応断面積が大きいボロンをがん細胞に蓄積させ、
 Be TGTにあてて中性子発生、Boron-neutronで細胞1個
 サイズ10 μm に広がる α 線で、がん細胞のみを治療。

8 MeV陽子線形加速器を用いることで

- 高めたエネルギー&大電流(数mA)
- 高いDuty factor&安定性

を確保。コンパクトかつ低放射化な加速器BNCTを開発。



熱外中性子数

1.4E9 n/cm²/s @2.1mA > 1.0E9 (IAEA 推奨値) 40

実は陽子線治療を最初に日本でやったのは 筑波大とKEK

大型低温重力は望遠鏡KAGRAへの協力

KEKは超高真空、極低温、制御、測量等で主導的な役割をはたしている。特に真空機器の遠隔監視システムの開発・整備にはJ-PARC MR制御グループが開発初期から参画している。

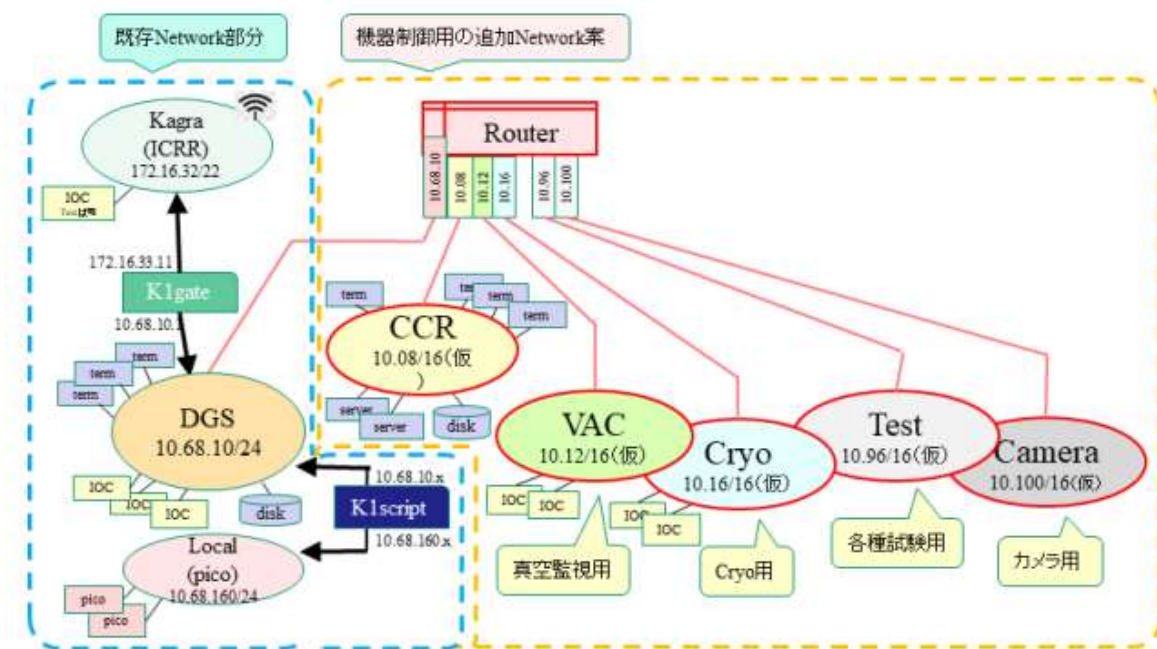
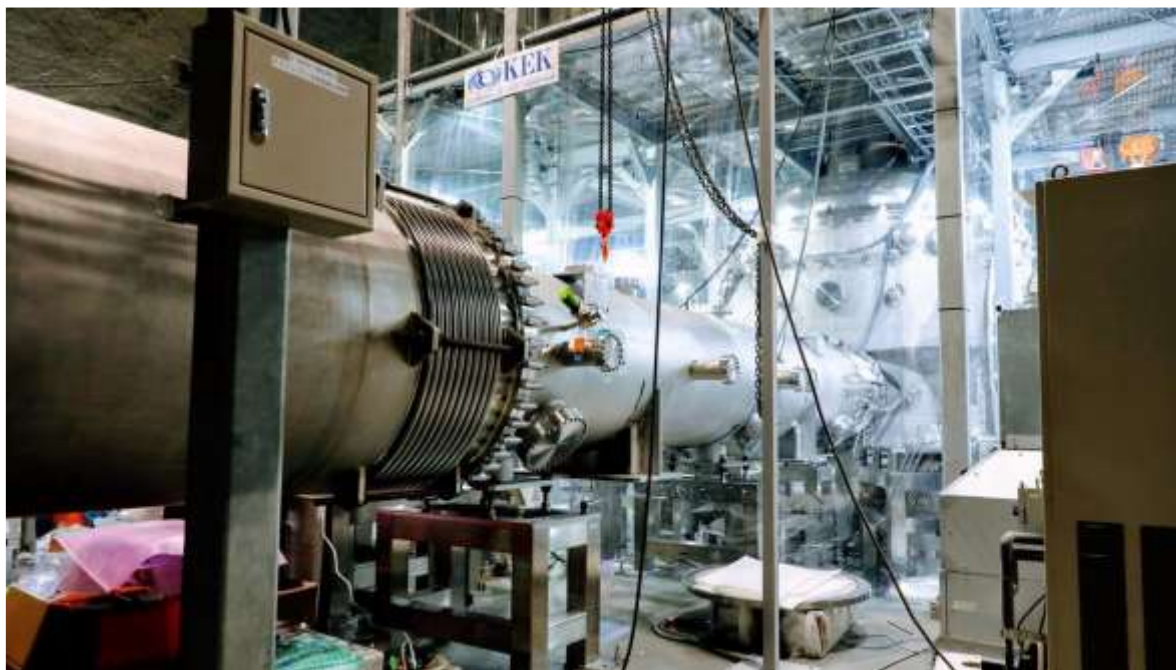


Figure 7: Network extension plan for device controls.

広帯域・高勾配空洞 (J-PARC RCS/MRで開発)



Finemet® Core: Proterial Co. 空洞内部の磁性材料に工夫。
 Coating: Toshiba Co. 小型化と低パワー損失を実現。
 Shroud: MHI, Toshiba
 Ceramic gap: Kyocera

Proton Beam

Anode-PS: TMEIC
 Vacuum tube: Thales

Cut-surface polish: Harukawa
 Coating: Shimomura-Shikki
 Vacuum Capacitor: Meiden

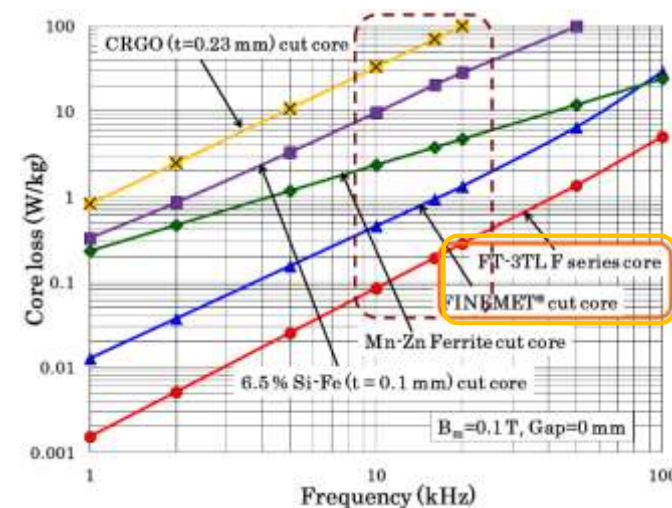
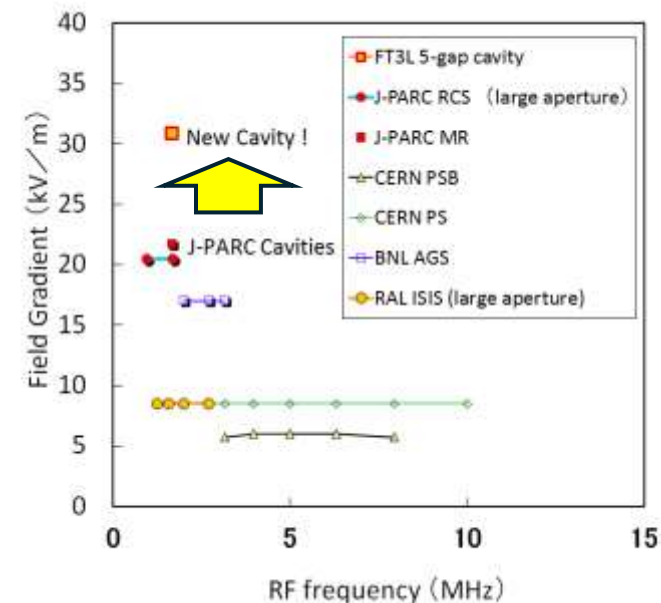
Final-stage AMP: DKK Co.
 Driver AMP: Ohta-Electronics
 LLRF: Mitsubishi Electric Co.



CERN, EUの加速器でも高インピーダンスコアを採用
 Instability damper in CERN PS
 Anti-proton deceleration in ELENA and AD
 Cavity for Cancer therapy machine (Med-Austron)

Magnetic Annealed (FT3L) コアは高周波トランスとしても有望。2018年からKEKとProterial Co. (元Hitachi Metal Ltd.)で提携中。

世界最高の加速勾配



Characteristics of materials for transformer