

大強度陽子ビームに挑む J-PARC加速器とMR-FX運転

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。

大強度ビームにおける技術的・ビーム力学的課題をNUと連携して克服。

昨年からは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

2026/7/22

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

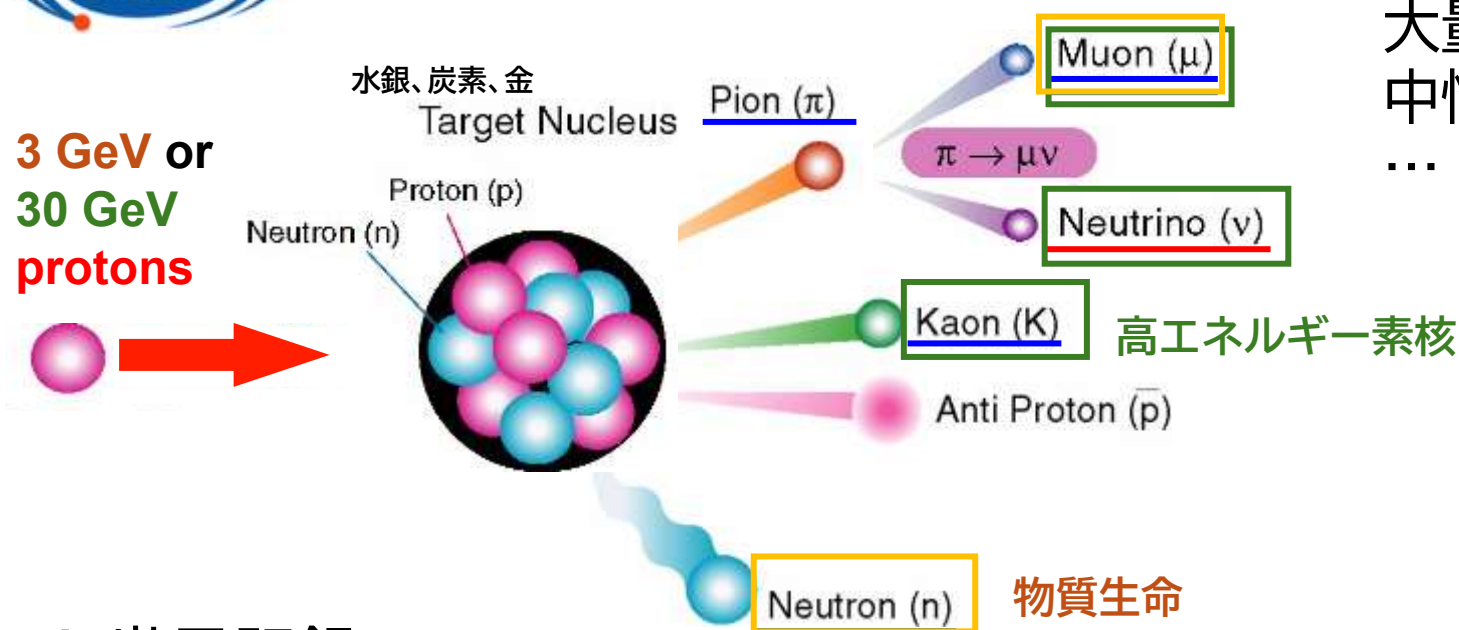
大量の陽子を実験に供給できる加速器施設を持つ。
パルス(陽子のかたまり)に含まれる陽子数など、4世界記録を保持する大強度施設。

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



大量の陽子ビームがつくる
中性子、ミューオン、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

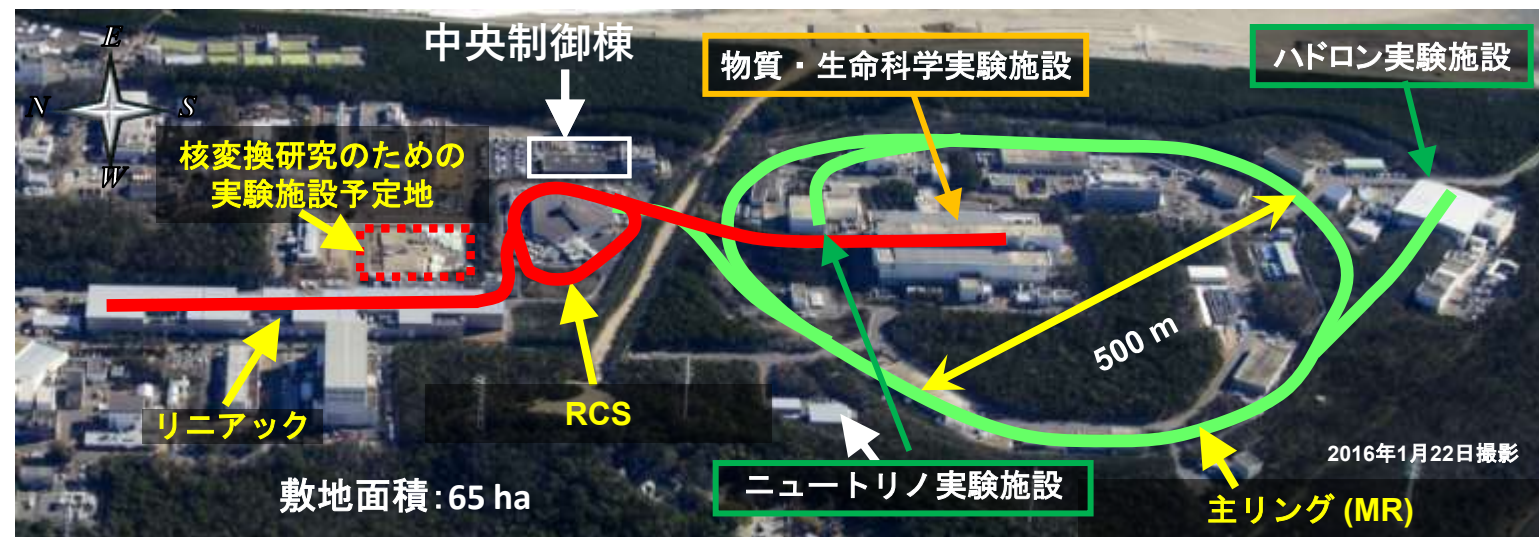
WR#2 From MR NU with $2.3-2.7E+14$ ppp beam パルス当たり陽子数

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



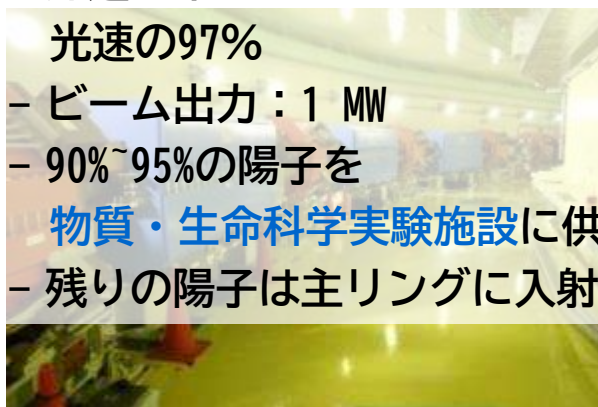
リニアック(線形加速器)

- 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

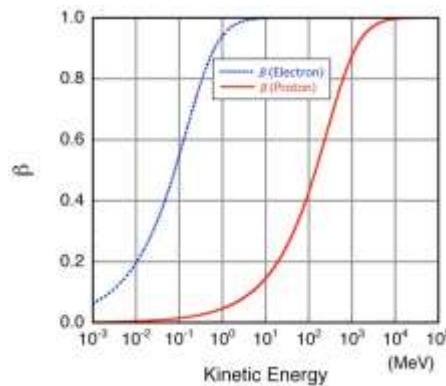


粒子: H^- RCSで荷電変換入射を行う

ビームエネルギー: 400 MeV

ピーク電流: 50 mA

繰り返し: 25 Hz



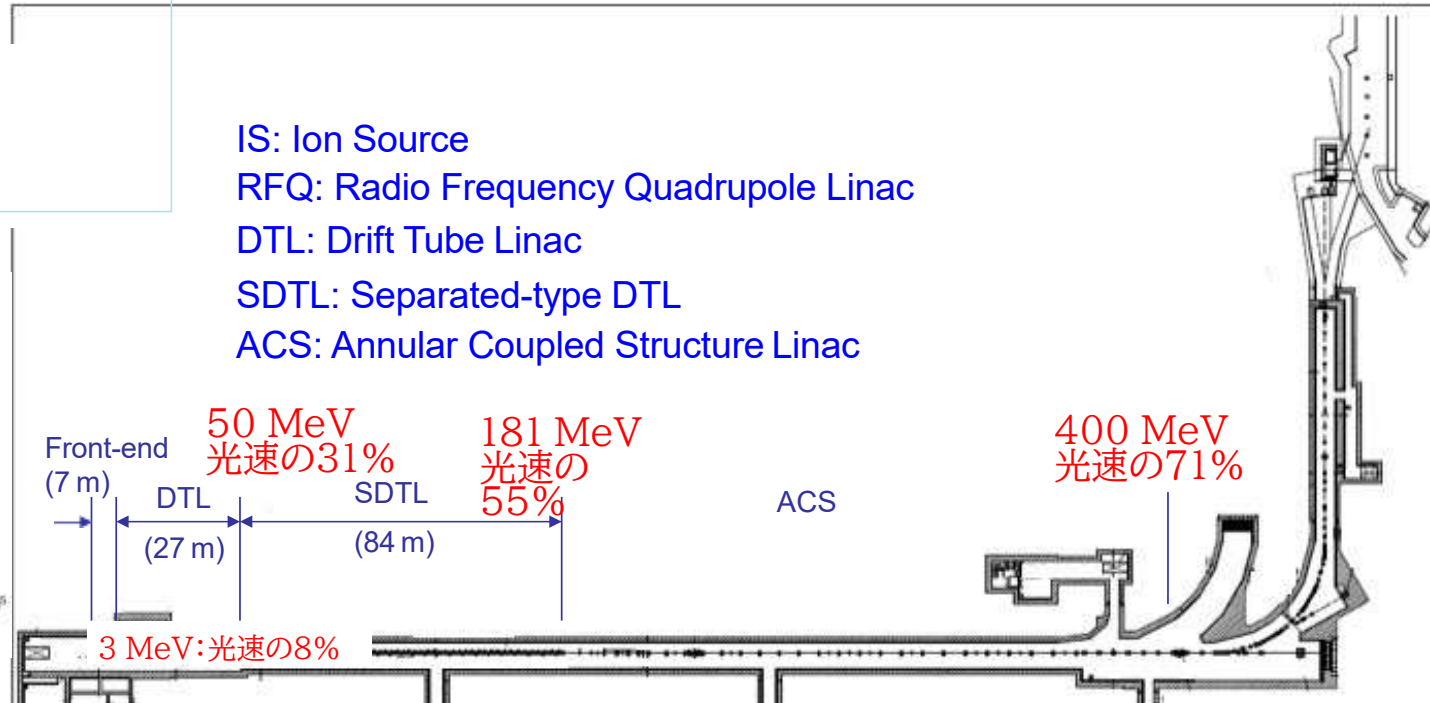
IS: Ion Source

RFQ: Radio Frequency Quadrupole Linac

DTL: Drift Tube Linac

SDTL: Separated-type DTL

ACS: Annular Coupled Structure Linac



速度の違いによって、
それぞれの段階で
最適な加速構造を選択

J-PARC 4世界記録
(1@MLF, 3@MR)

のビームの大元

更なる大強度化計画が進行中 (ピーク電流上げ、マクロパルス長の延伸、…)



Front-end = IS + LEBT + RFQ + MEBT



DTL

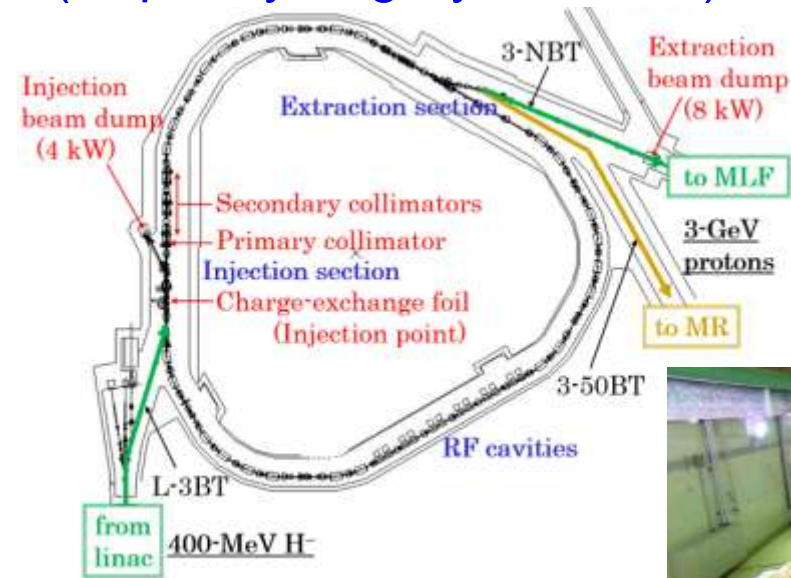


ACS

RCS 1MW $\rightarrow$ 1.5 MW化へ

J-PARC 円形加速器(シンクロトロン) : 3 GeVシンクロトロン(RCS) & 主リング(MR)

RCS (Rapid Cycling Synchrotron)

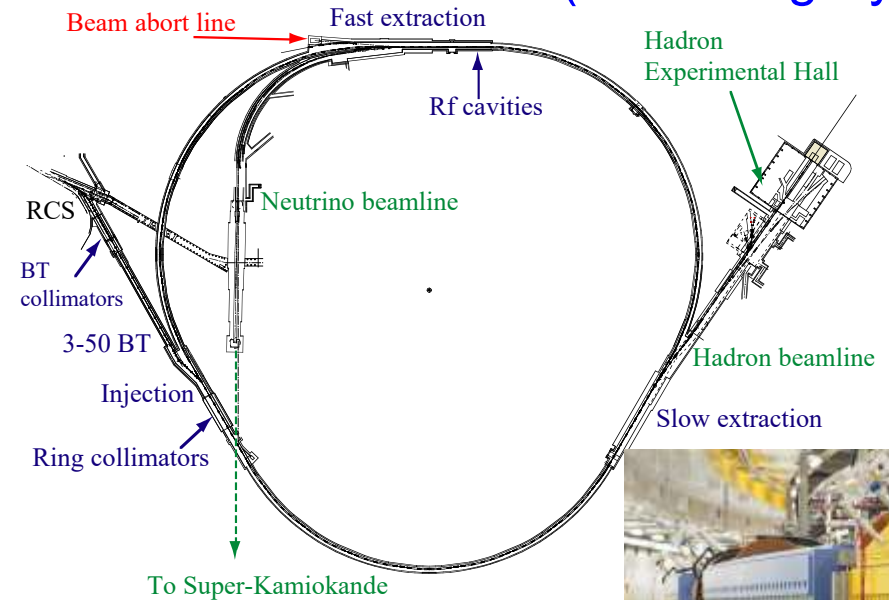


Circumference: 348.3 m
Injection energy: 400 MeV
Extraction energy: 3 GeV
Repetition period: 40 ms



粒子: H^+
RCSで荷電変換入射
 $H^- \rightarrow H^+$ (陽子)を行う

MR (Main Ring Synchrotron)



Circumference: 1567.5 m
Injection energy: 3 GeV
Extraction energy: 30 GeV
Repetition period: 1.36/4.24 s



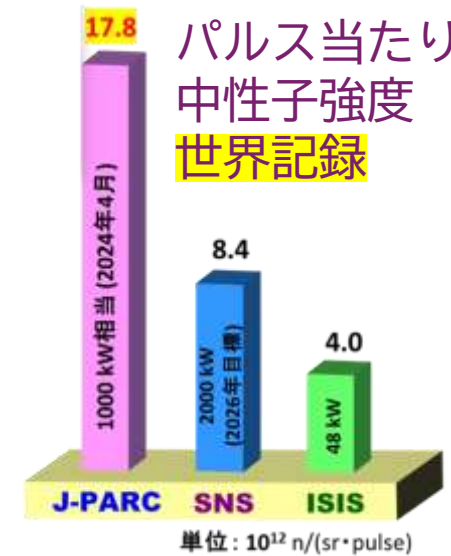
MR: 行先の違いに応じて運用期間を切り替え
NU向けとHD向けのそれぞれに特化したモードで運用
それぞれのモードで 世界記録(②パルス当たり陽子数 ToNU、
③遅い取り出しパルス当たり陽子数 & ④取り出し効率 To HD)
増強計画・記録更新が進行中

RCS: 行先の違いに応じたスーパーサイクル
(MLF向けとMR向けのハイブリッド)の運転モードを採用
それぞれに最適化したビームが J-PARC 4世界記録
(1@MLF, 3@MR) の前提条件となっている
世界でも稀有な低ビーム損失による大強度運転を実現

RCS 1MW → 1.5 MW化 計画進行中

MR-FX 1.3 MW化, MR-SX > 150 kW化 計画進行中

パルス当たり
中性子強度
世界記録

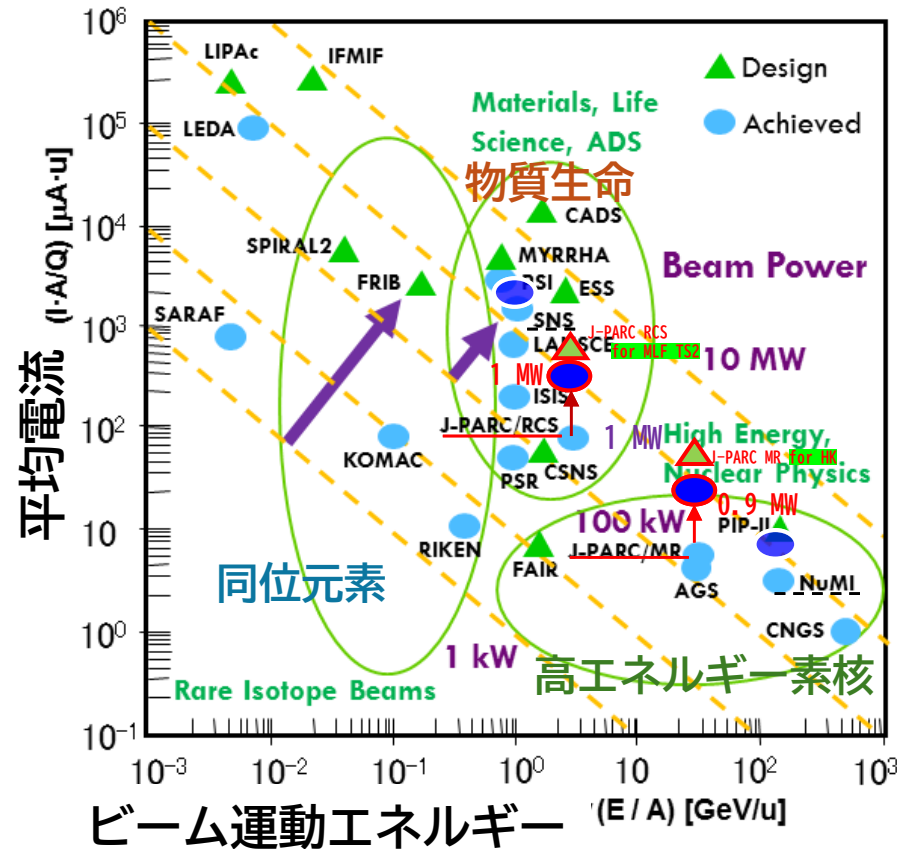


WR#2

WR#3#4

世界記録

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

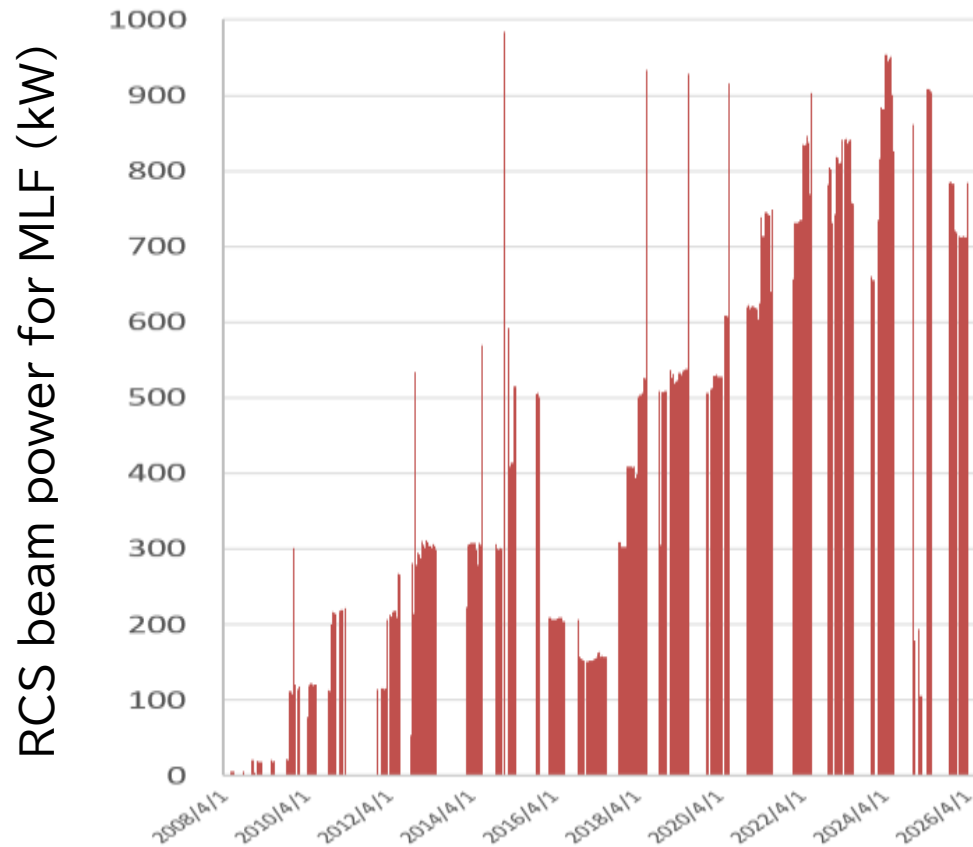
HD with slow extraction beam in ext.
efficiency 99.6% 取り出し効率 世界記録
100 kW with 8.9E13 ppp SXビーム強度 世界記録

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

Linac & RCS Power Trend and Plan



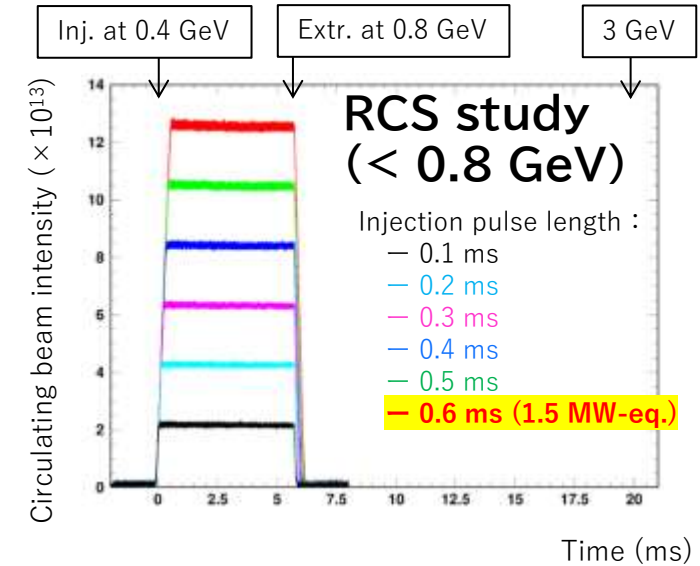
MLF 1 MW stable user operation (2024)
Recent operation:
~770 kW w/o significant trouble
(observing MLF beam target status)

To aim 1.5 MW for the near future 2nd TGT plan
Linac & RCS have performed beam studies for

- IS peak current: 50 mA → 60 mA
- Pulse length: 500 us → 600 us



Linac demonstrated to
accelerate 60 mA with
reasonable beam quality



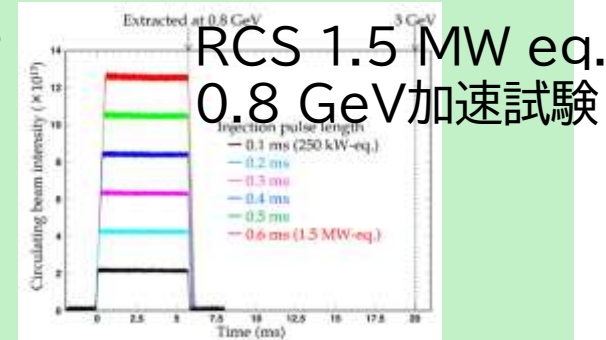
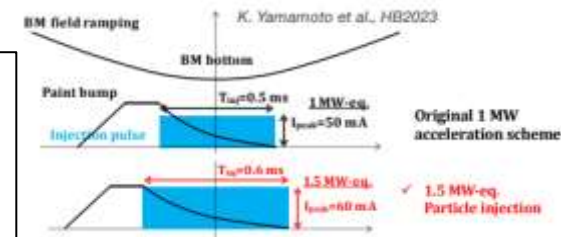
RCS New
RF cavities
(power save)
8/12 done
4/12 by 2028



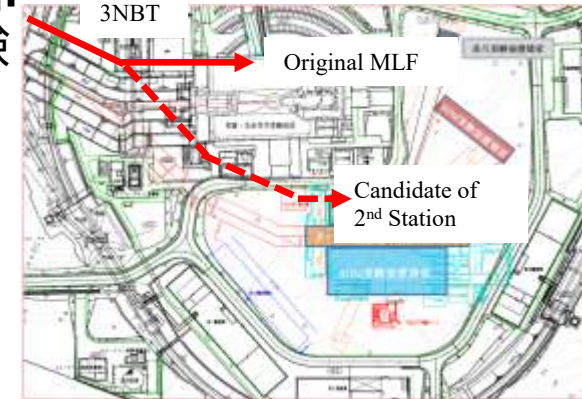
RCS現行性能1MW ->1.5 ~ 2 MW増強計画が進行中

- 1.5 MW: 6×10^{13} ppb *(2b/pulse)
整備中。加速器は2028でOK。将来計画としてTS2も検討中。
 - 1.5 MW eq. 低エネルギー加速試験(0.8 GeV)成功済
 - Kicker Impedance軽減対策済 (km-diode入れ対策半数完了 → RCS 1.5 ~ 2 MW 可)
 - RCS RF空洞増強 2028夏に完了予定
- 2.0 MW: 8×10^{13} ppb *(2b/pulse)
LINACの大増強が必要。予算化はTS2が付いた後。
 - LINAC: 60 mA → 70 mA **イオン源含む初段部(性能向上), 高周波源(出力増強 新造)**
 - RCS: シミュレーションでダイナミクスの見通しあり。ハードウェアR&Dは必要。

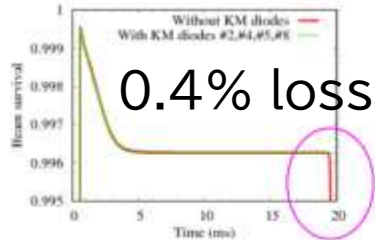
RCSパワー増強計画
IS電流×1.2~**1.4**
パルス幅×1.2~1.4



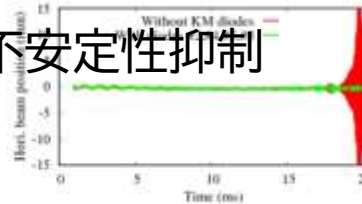
TS2計画



RCS 2 MW eq.
シミュレーション



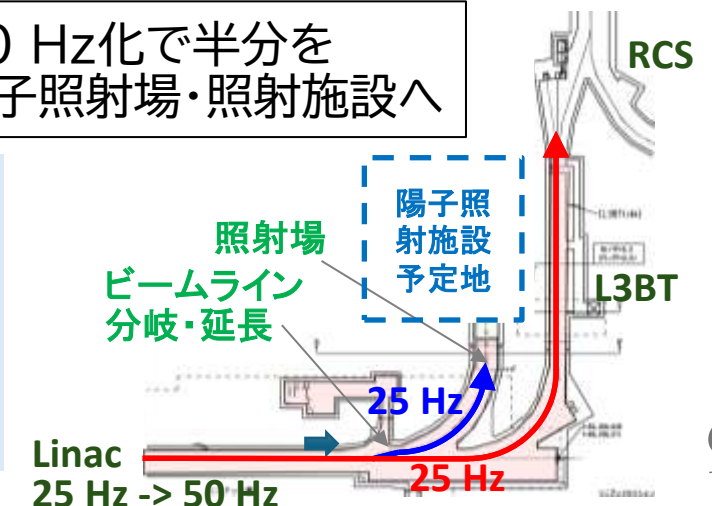
不安定性抑制

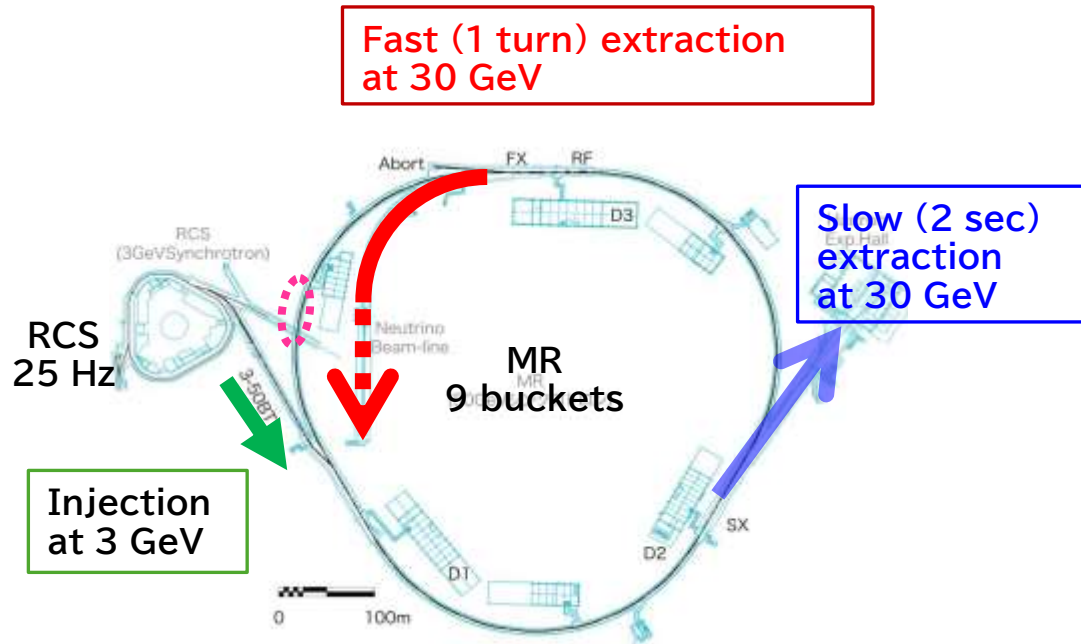


50 Hz化で半分を
陽子照射場・照射施設へ

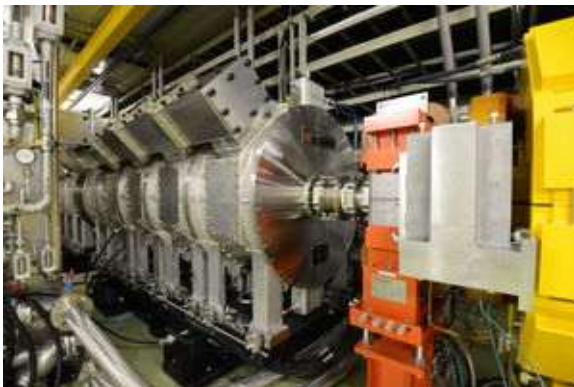
LINAC 照射場・照射施設増強 (宇宙戦略基金の段階ではRCS運転との切り替え運転を予定) → 50 Hz化による、照射運転とRCS運転の同時オペレーション化

- LINAC終端に**照射場** (将来的には照射施設新設) 20ms毎に行先を入れ替え
 - 低強度: 機器増強は不要
 - 大強度: Duty上げ改造 -> **冷却水系統増強、高周波源(高圧電源容量増)**





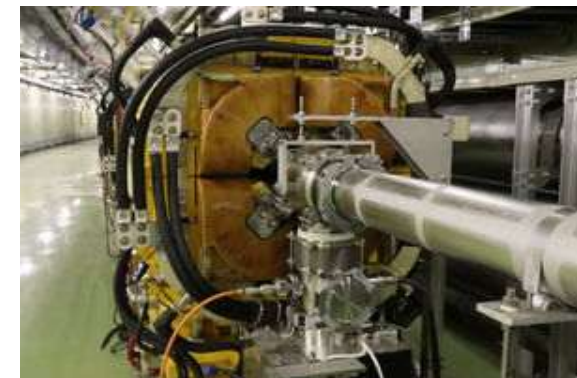
Circumference	1567.5 m
Injection energy	3 GeV
Extraction energy	30 GeV
Injection time	0.13 s
Acceleration time	0.65 s
Super-periodicity harmonic	3
Number of bunches	9
	8
Physical Aperture	81 π mm-mrad
Ring Collimator	54-70 π mmmrad



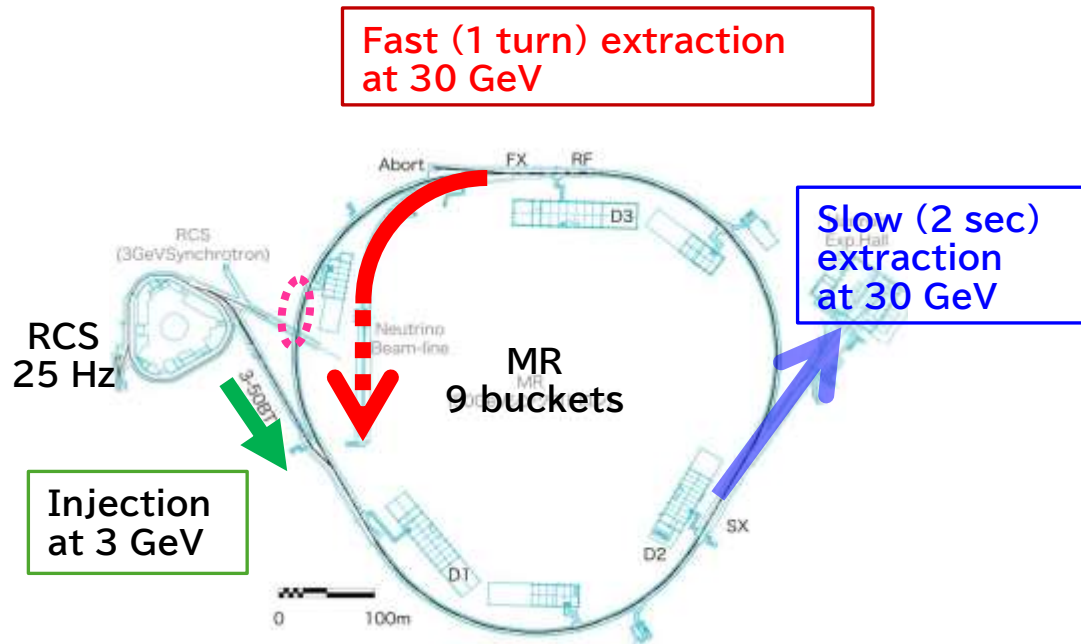
加速空洞 in MR
10 for Fundamental, 2 for 2nd harmonic



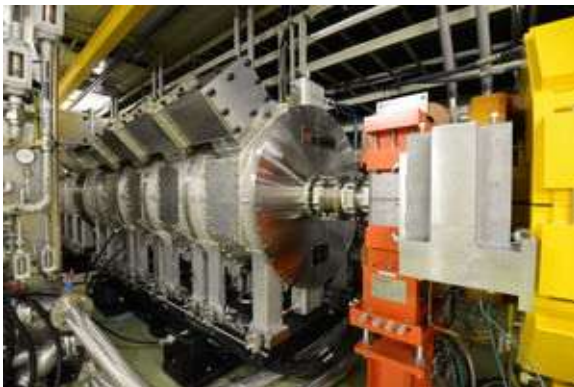
偏向電磁石 in MR
Total 96 magnets



四極電磁石 in MR
Total 216 magnets



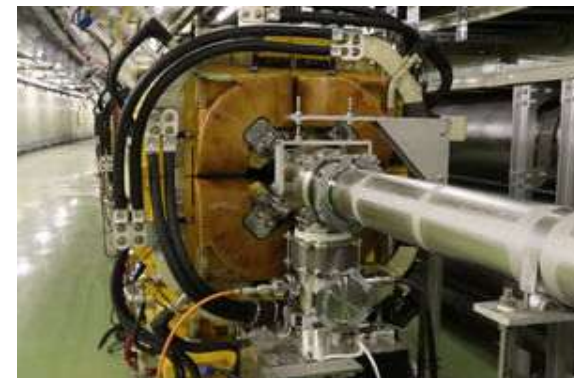
- シンクロトロンでは何度も粒子を**加速空洞**に通して経済的に加速。
1回通過 ~ 260 kV 加速 ~ 14 万周で 3 GeV $\rightarrow 30$ GeV
- 円形軌道にするため、**偏向磁石**を用いてビームを曲げる。
またビームが必要以上に広がらないようにビームの横方向に線形力を加え、レンズのような働きの**四極磁石**でビームを絞る。
 $\rightarrow$ ああ電磁気学。ビーム運動はハミルトニアンで記述できるね。
- しかし**270兆個の陽子パルス(~ 4 us long pulse)のビームは非線形力満載。でも、操作機能はほぼ線形力だけ。**
 $\rightarrow$ **大強度陽子シンクロトロンのビーム力学**
- **1 MW級となると、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。加速器構成機器への負荷・放射化によるメンテナンス性との闘いでもある。**



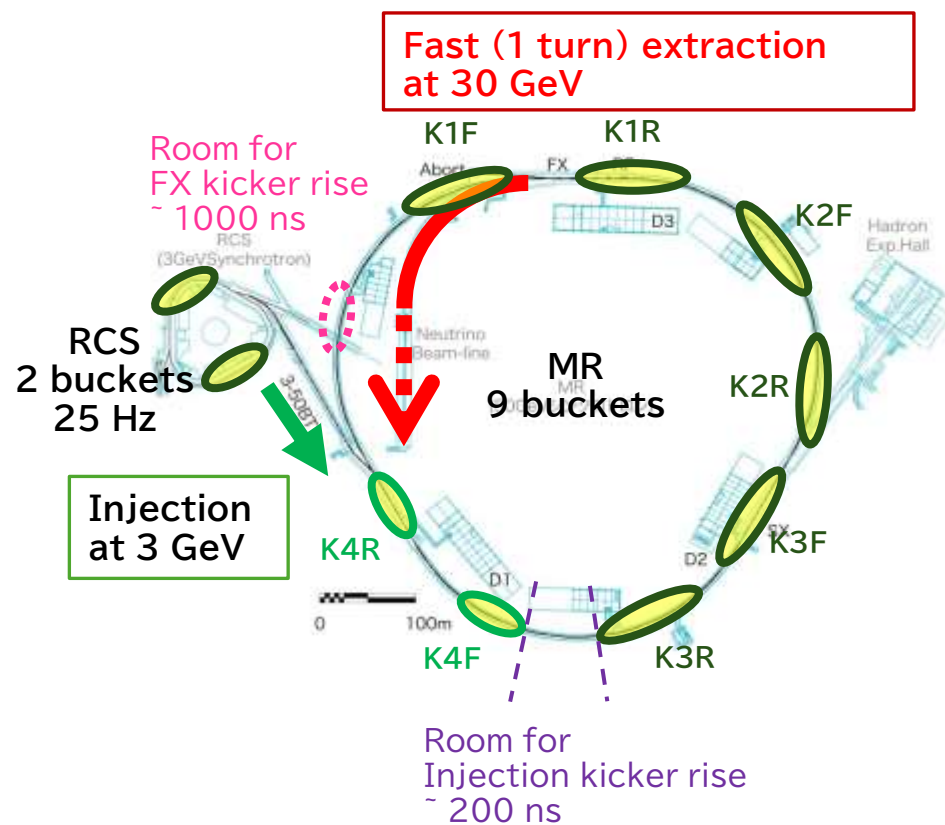
加速空洞 in MR
10 for Fundamental, 2 for 2nd harmonic



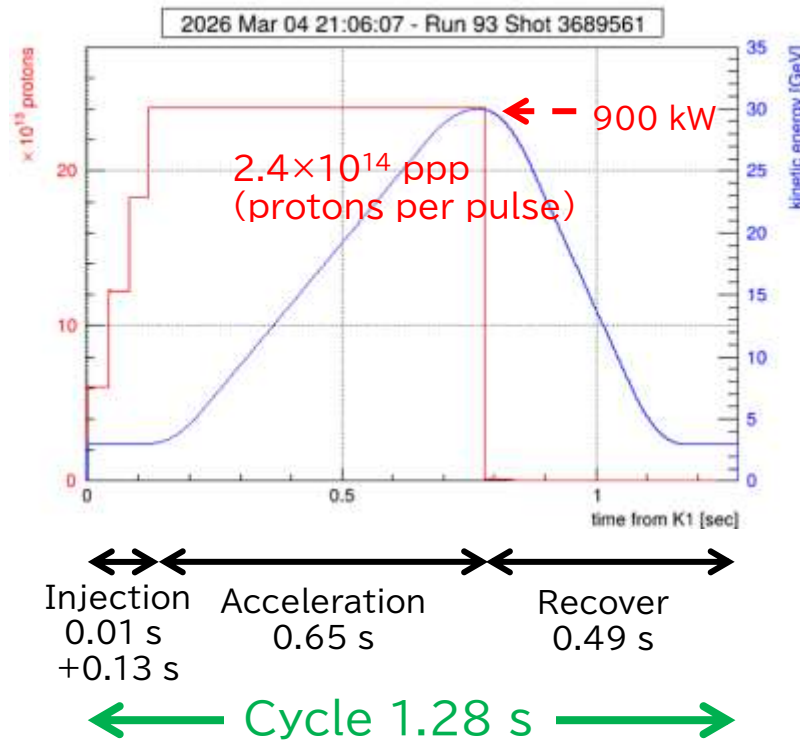
偏向電磁石 in MR
Total 96 magnets



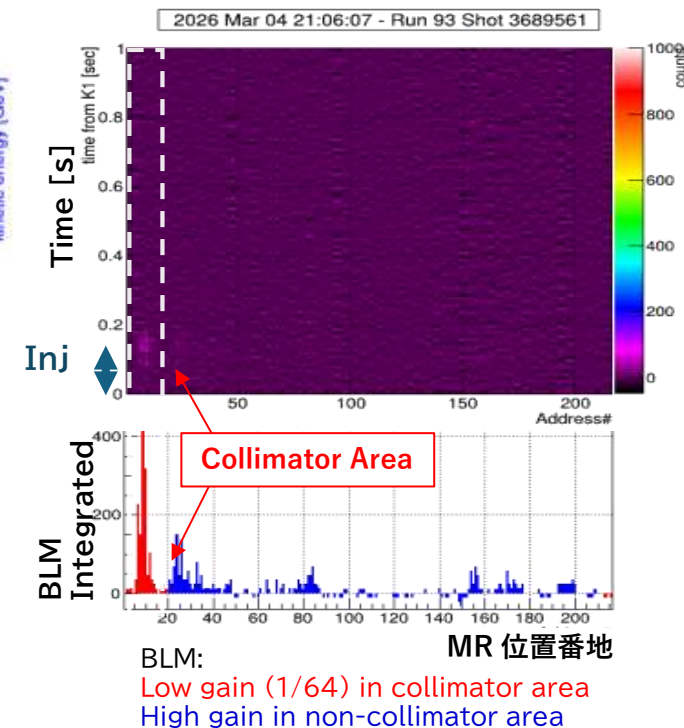
四極電磁石 in MR
Total 216 magnets



DCCTで測定した陽子数
電磁石・RF加速空胴のランピングパターン



ビームロス分布



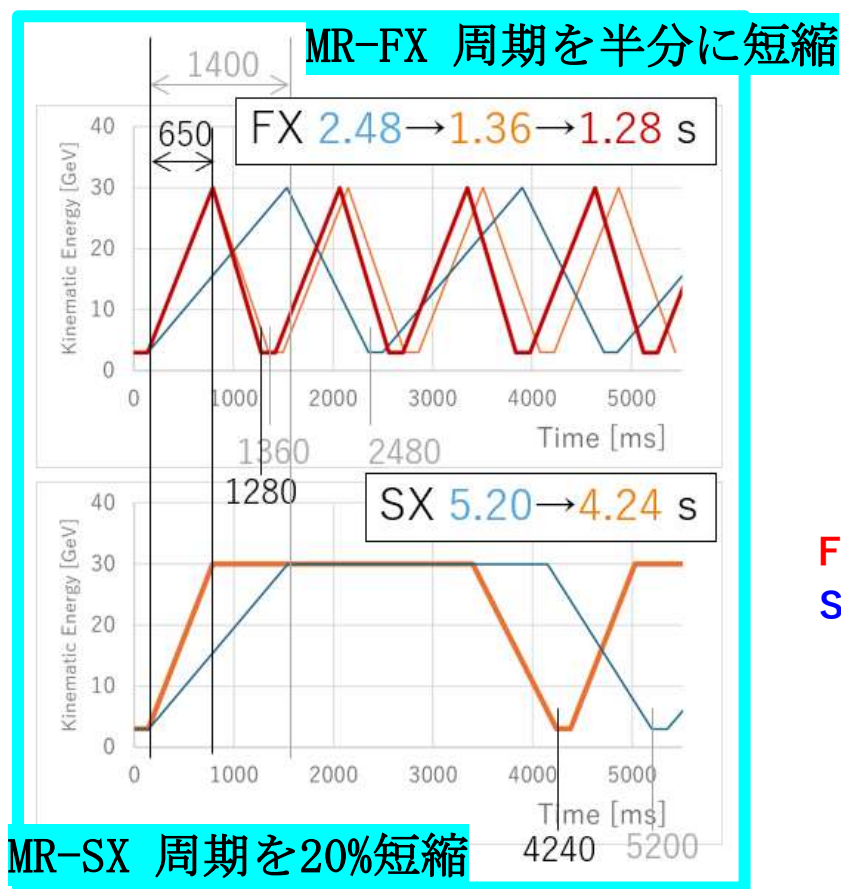
RCS (25 Hz運転)から2バンチずつ4回入射してリングに貯めてから加速。
加速するにあたり、電磁石とRF加速空胴はキッチリと同期させる。

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。

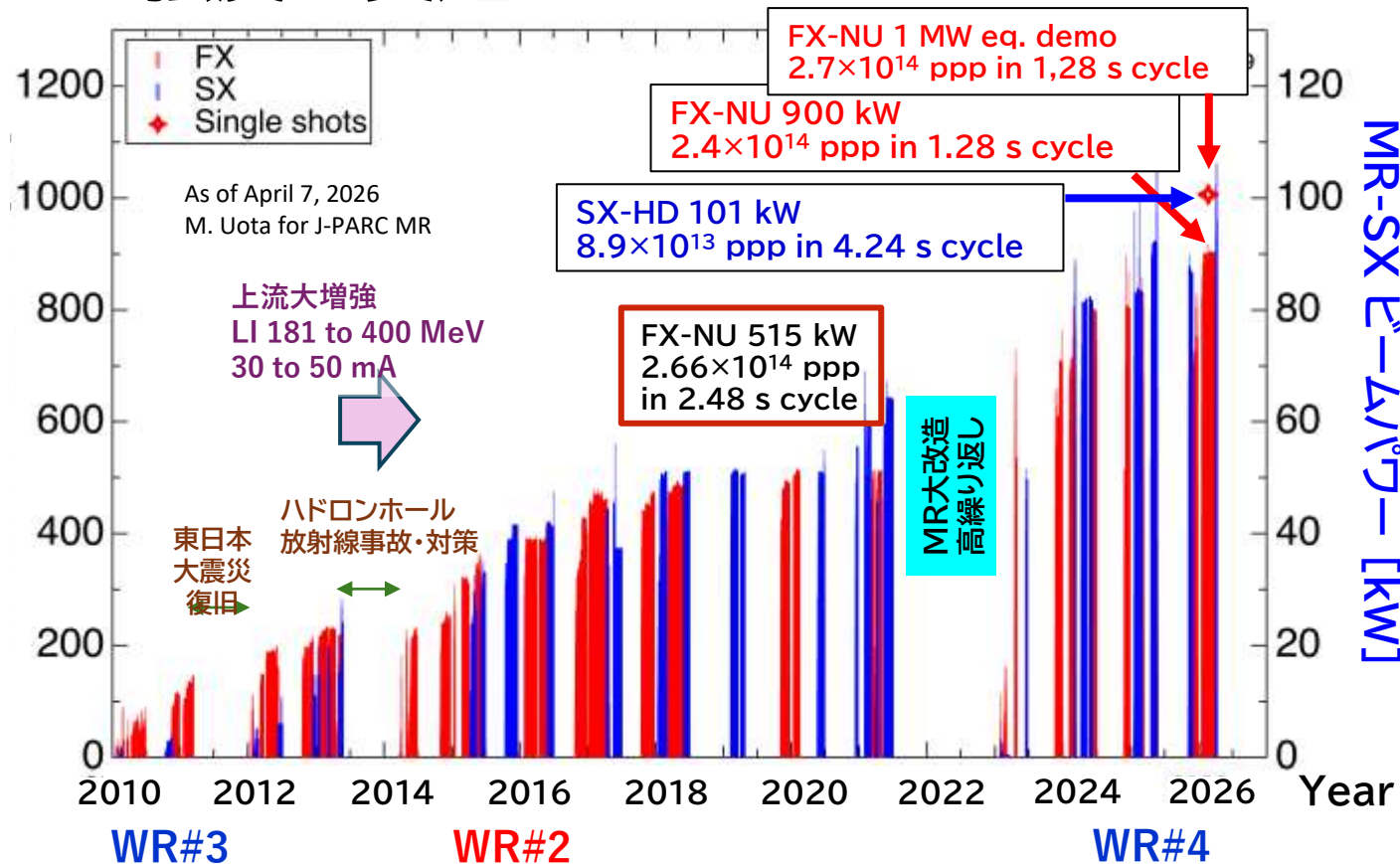
	3 GeV	→30 GeV
Bucket size:	598 ns	→581 ns
RF freq:	1.67 MHz	→1.72 MHz
Bunch/Bucket:	25~60%	→ 10%

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。
例: 主電磁石電源電流偏差 < 1e-4, dK1/K1 < 0.1%,
入射キッカー立上がり < 200 ns, etc.

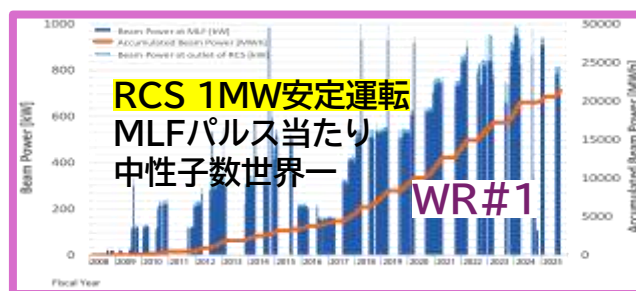
ビーム強度 $\propto$ パルス当たり陽子数
周期
 × ビームエネルギー



MR-FX ビームパワー [kW]



FXパルス周期 3.52s 3.04s 2.56s 2.48s → 1.36s → 1.28s
 SXパルス周期 6.00s → 5.52s → 5.20s → 4.24s



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

14

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

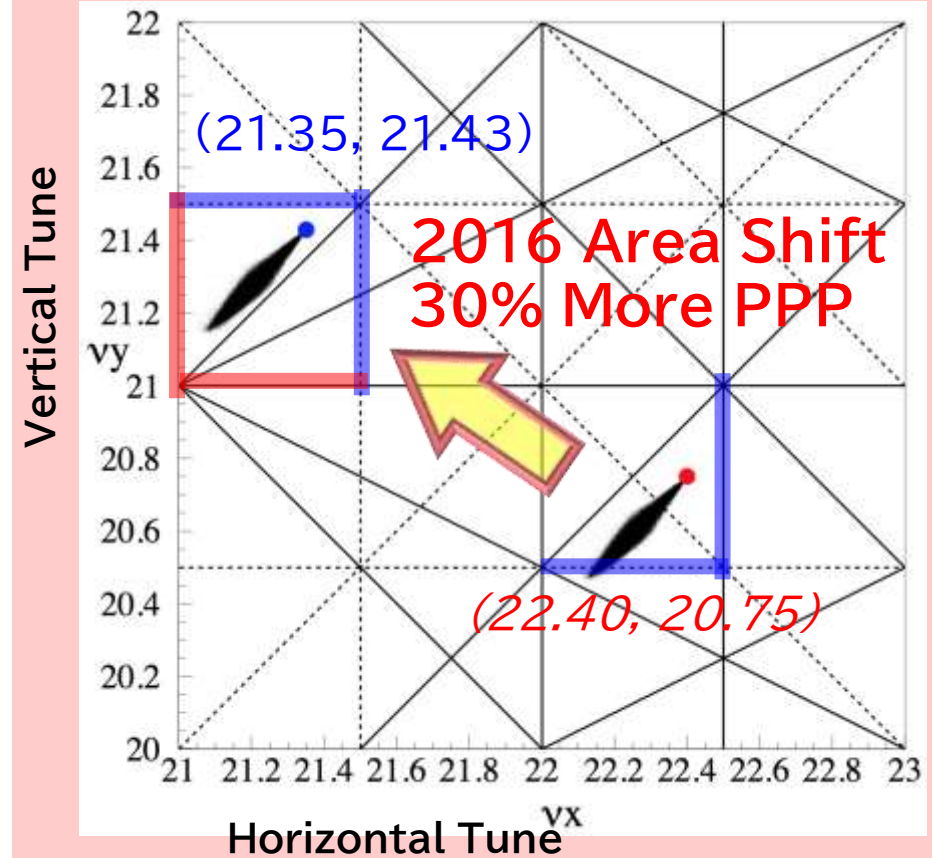
② Linac/RCSの増強・高度化はMRへの入射ビームハローを大幅に抑制した。(2013,2014)

③ 空間電荷効果を減らすMRバンチ長の延伸は、RFの増強・新運用法開発、入射キッカー改造、補正キッカー開発・導入により実現した (2014)

④ 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)

①

機器がともに動く
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)

⑤ 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)

⑥ 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 -)

⑤MR 高繰り返し化改造 2021-2022 & 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



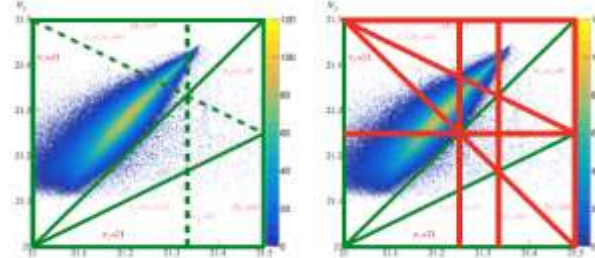
新コリメータ D

MR-FX 周期を半分に短縮

MR-SX 周期を20% 短縮

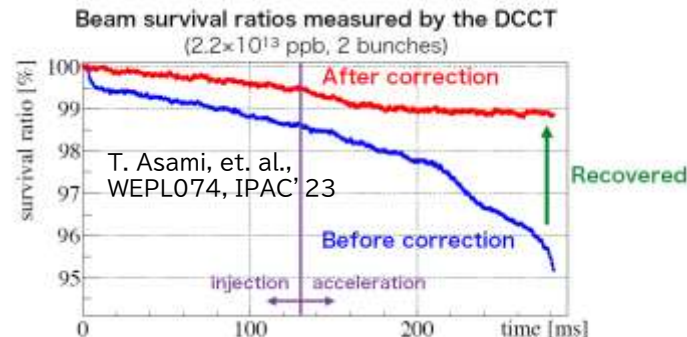
ビーム光学系は改造前をキープ

電磁石電源配線変更(非対称配線)



T. Yasui, TUXG1, IPAC' 23

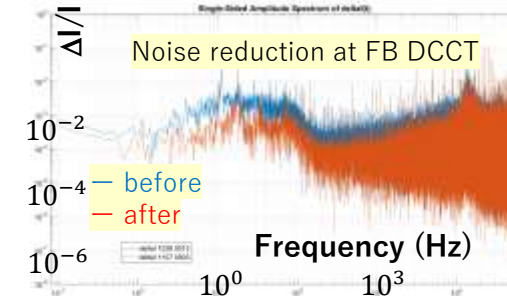
・大改造後の機器を駆使し
ビーム光学の対称性を追求
⇒ ビーム損失を抑制



T. Asami, et. al., WEPL074, IPAC' 23

- ・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



FFT spectrum of the output current of BM power supply (BM1)

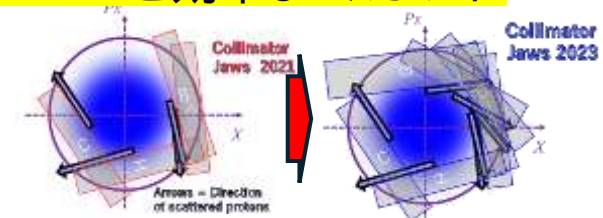
Y. Morita et al., IPAC2024, TUAD2.

Resonance corr.

610 kW eq.
1.73e14 ppp

- ・コリメータ増設で

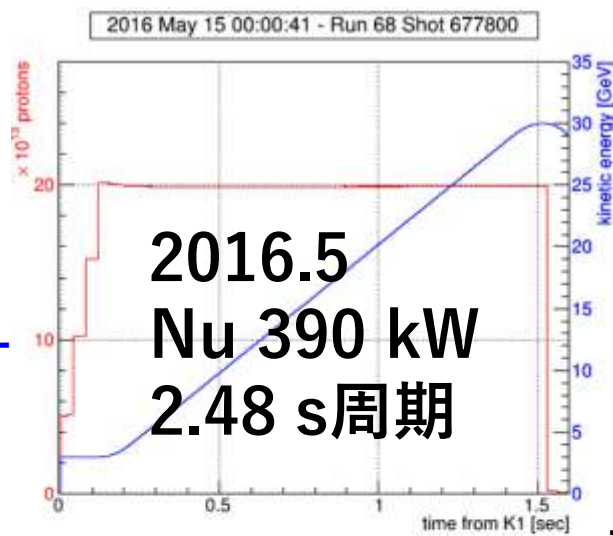
ハローを効率よくカット



MR-FX ビーム品質の変遷

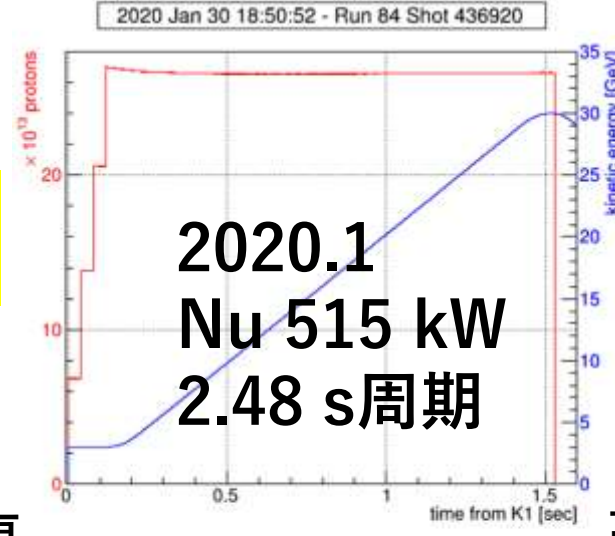
陽子数

エネルギー
パターン



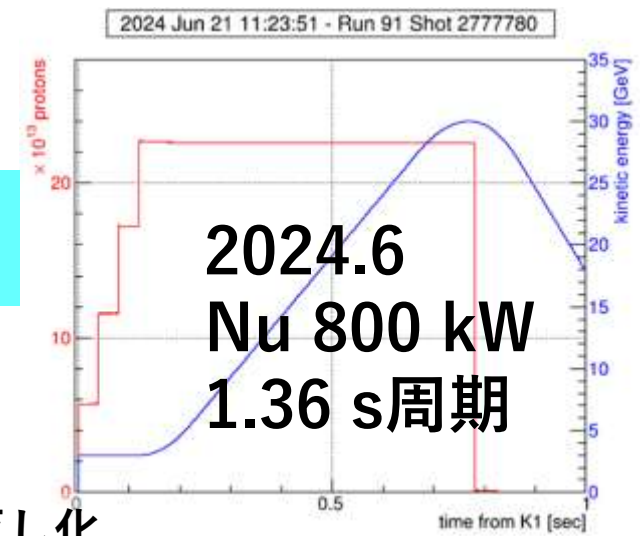
④

光学変更

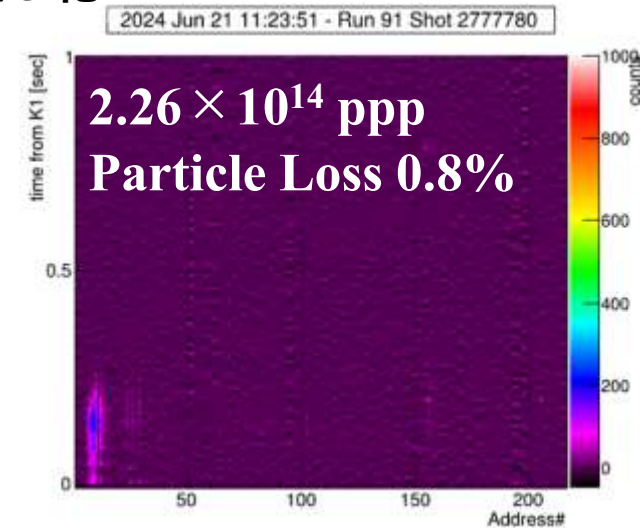
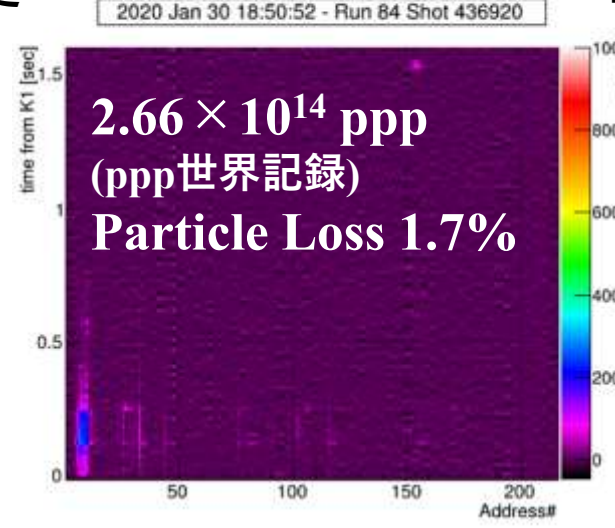
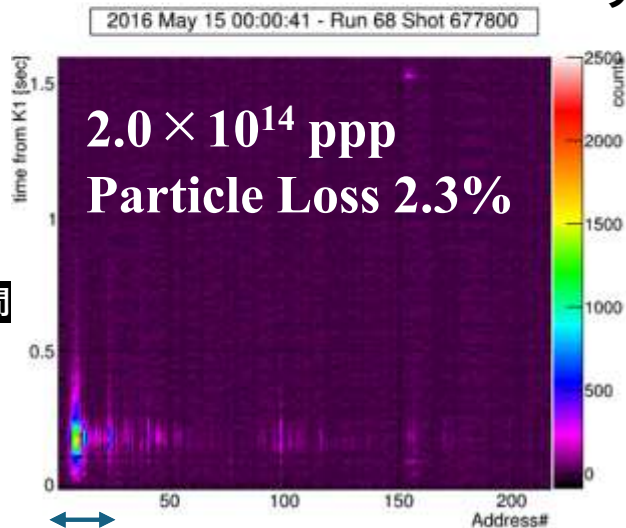


⑤

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)

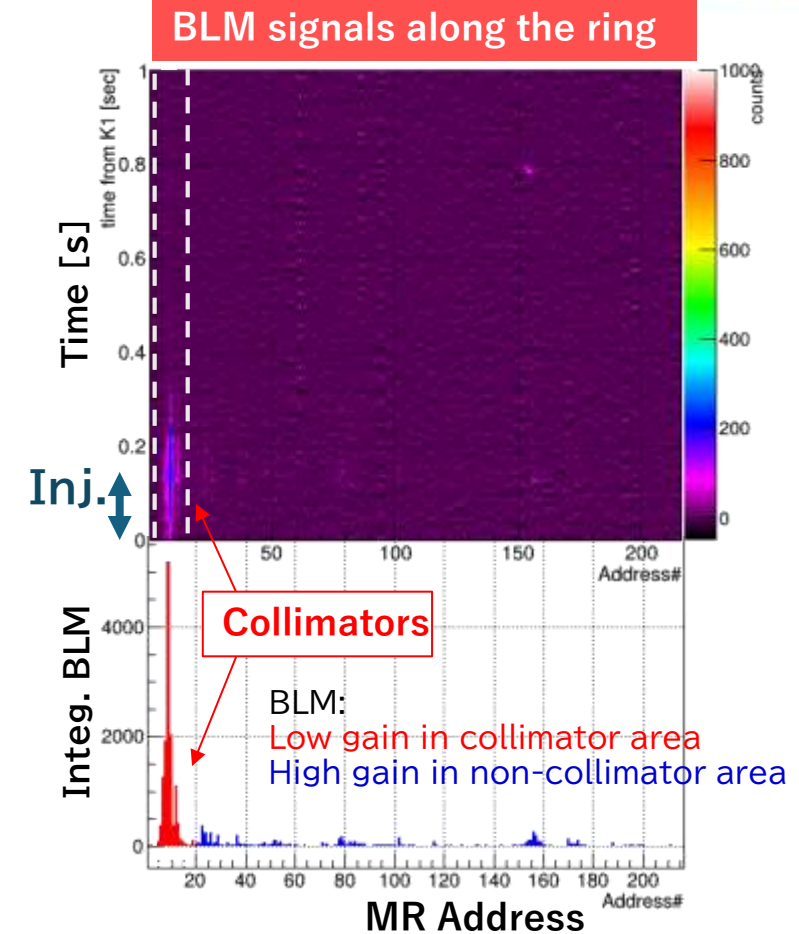
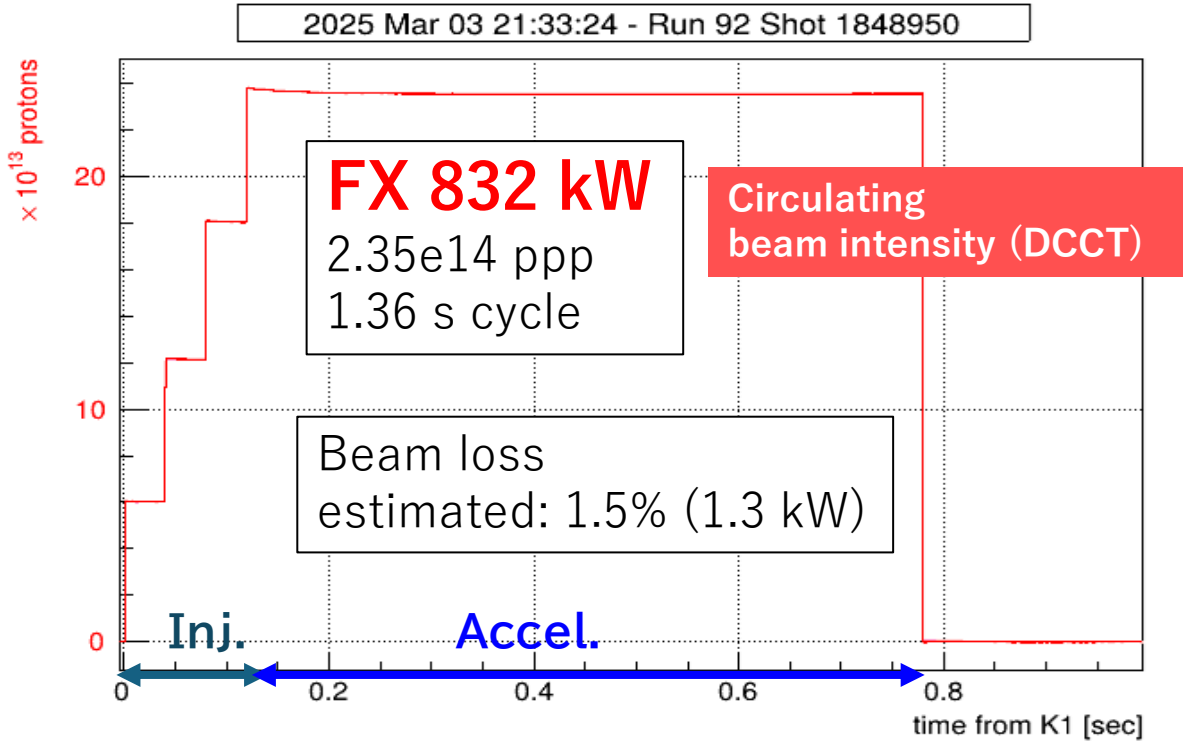
機能性追求 & ビーム光学開発

ビーム強度アップとビームロス抑制の両立に成功

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

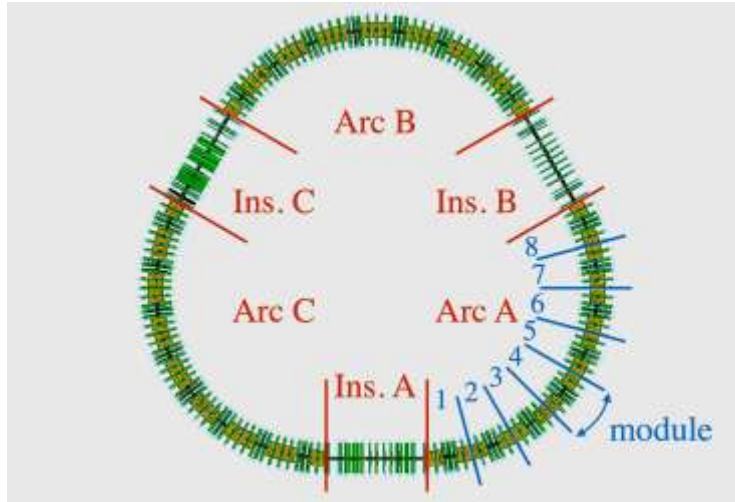
ω_0 と ω_n はなるべく離すべき。しかし、空間電荷効果・運動量拡がり・インピーダンス影響、…などで ω_0 は拡がりを持つため避け切れない。 → 影響の強いものから回避・補正をしていく。

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。

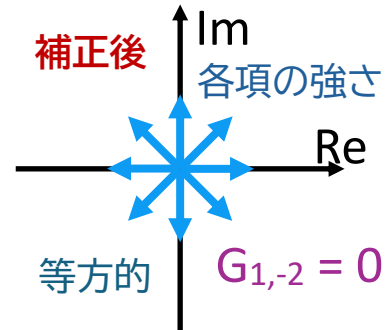
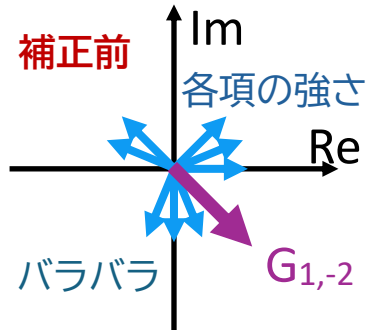
$$G_{1,-2} \equiv \oint \beta_x^{1/2} \beta_y K_2 e^{i(\psi_x - 2\psi_y)} ds \simeq \sum_j \beta_{xj}^{1/2} \beta_{yj} (K_2 \Delta L)_j e^{i(\psi_{xj} - 2\psi_{yj})}$$

六極磁場の強さ

同じものが複数ある

位相を調整

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



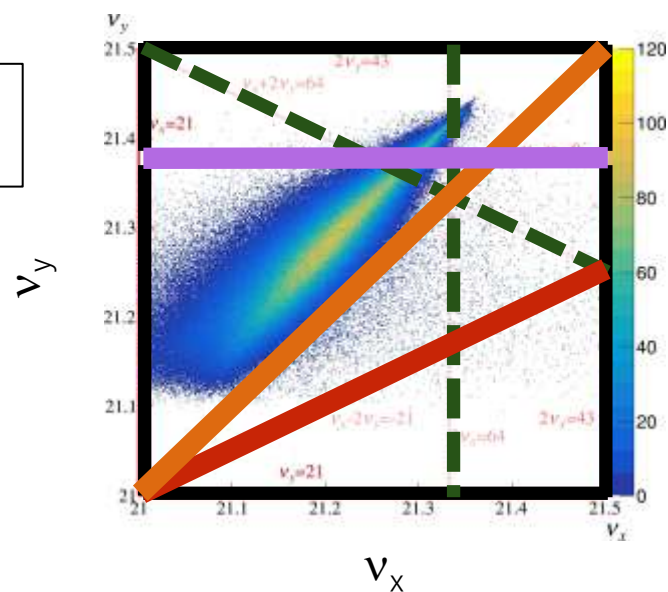
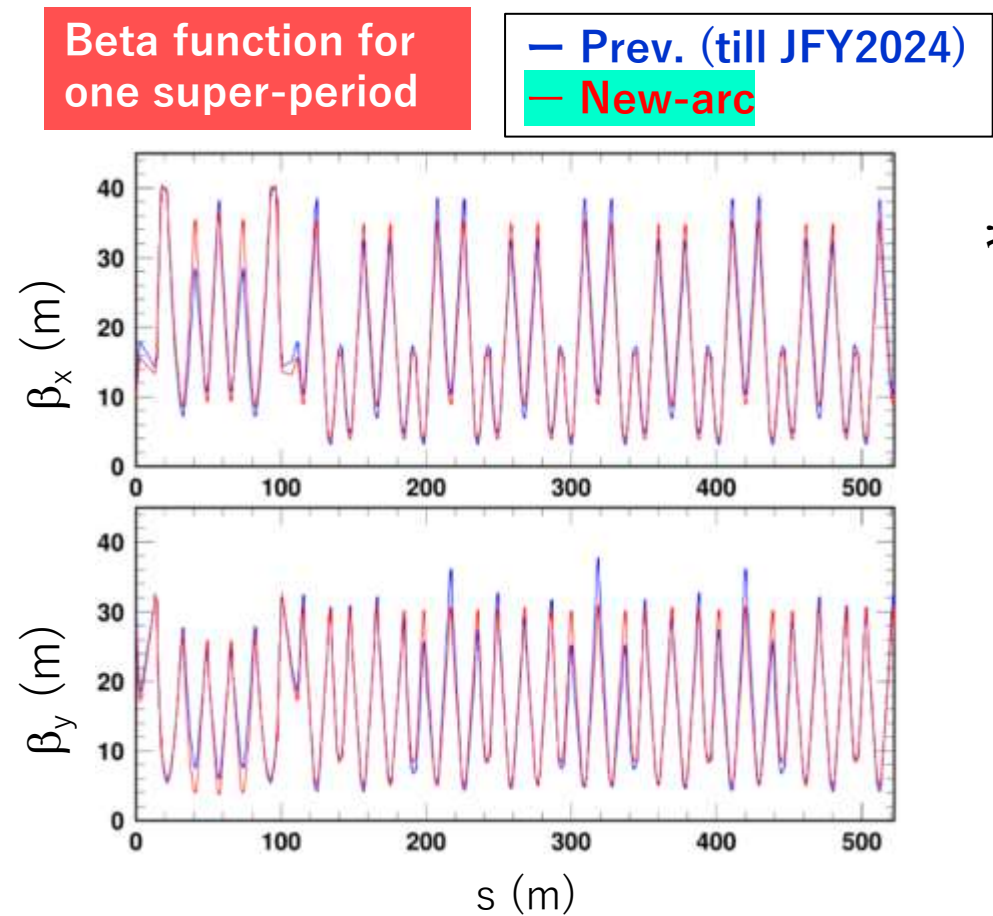
$$\sum_{k=0}^7 \cos(2\pi \frac{k}{8} + \phi) = 0$$

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



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

*1 for $n_x-2n_y=-21$

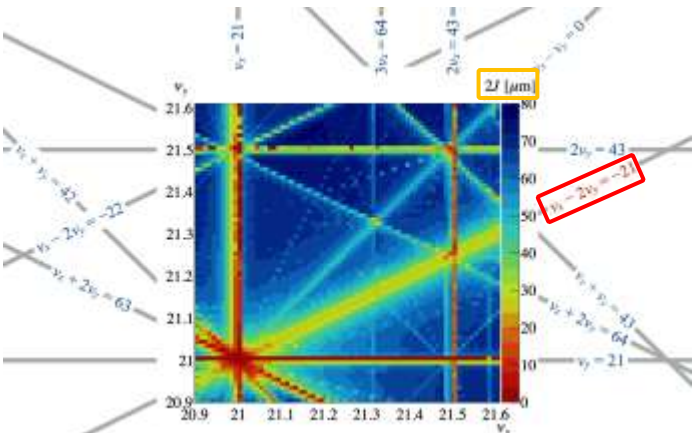
T. Yasui, S. Igarashi, Y. Sato, and T. Koseki,
“Beam optics for the compensation of third-order structure resonances”,
Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 013G01 (2022).
<https://doi.org/10.1093/ptep/ptab146>

*2 for $8n_y=171$

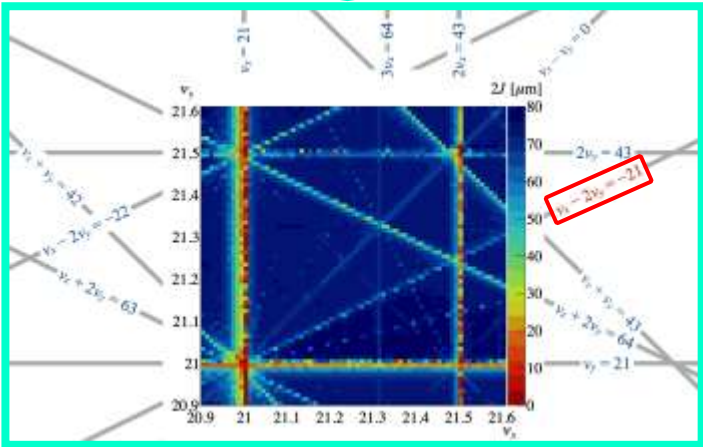
T. Yasui and Y. Kurimoto,
“Suppression of the eighth-order space-charge-induced resonance”,
Phys. Rev. Accel. Beams, **25**, 121001 (2022).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.25.121001>

生き残る粒子の最大のアクション(シミュレーション)

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



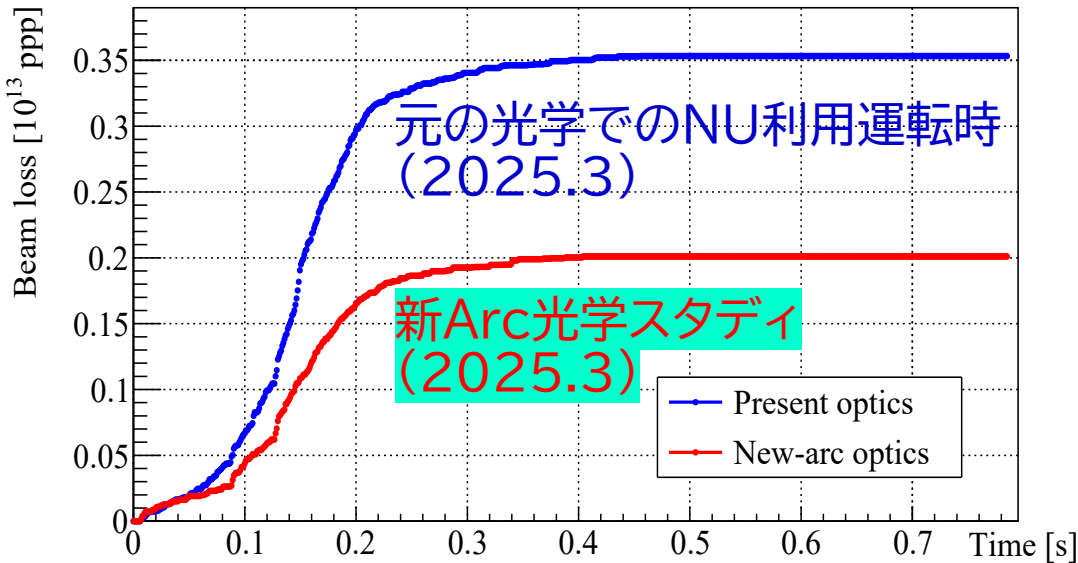
新Arc光学



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)



T. Yasui, et. al., IPAC2025

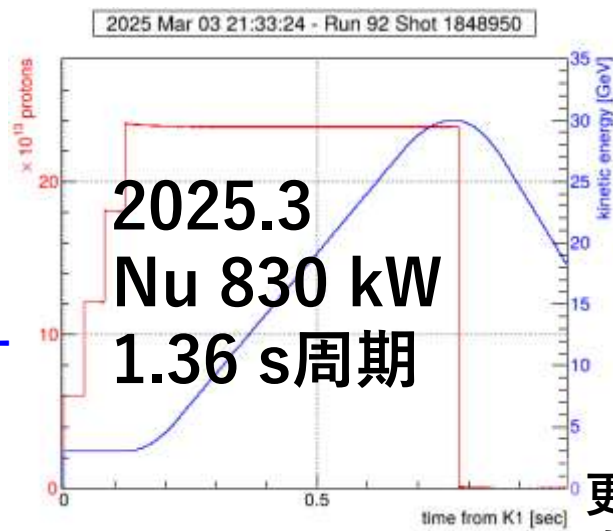
Y. Sato for J-PARC MR, “J-PARC MR status”, PASJ2025, FRO603.

ロス半減に成功

MR-FX ビーム品質の変遷

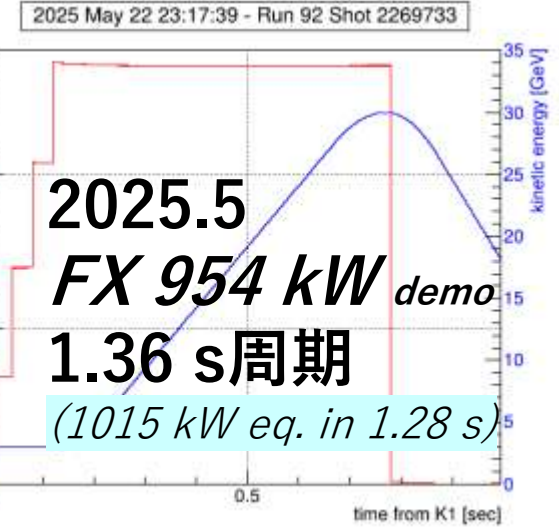
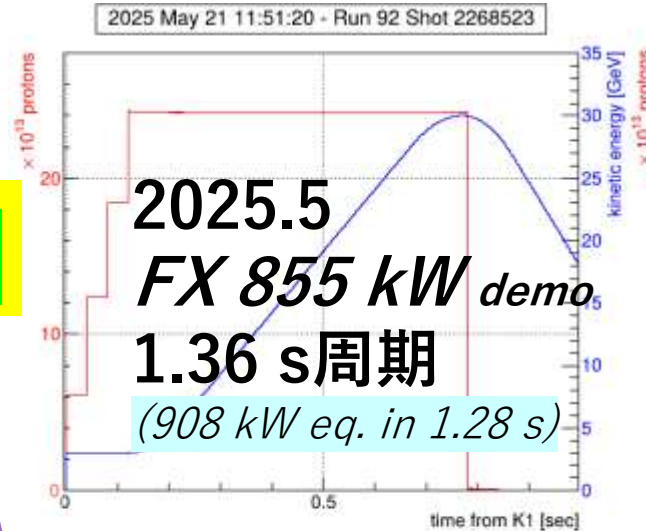
陽子数

エネルギー
パターン



⑥

更に
光学変更



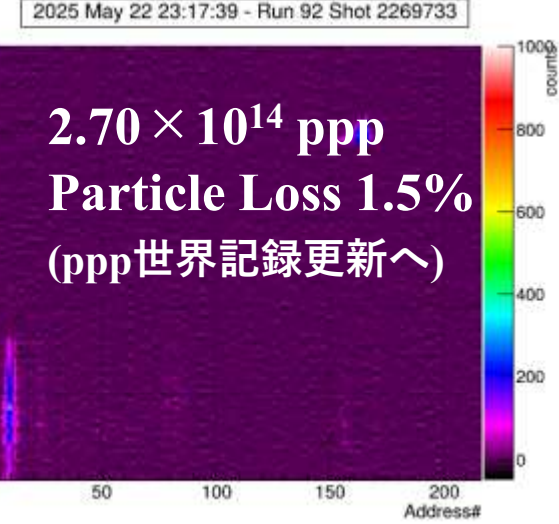
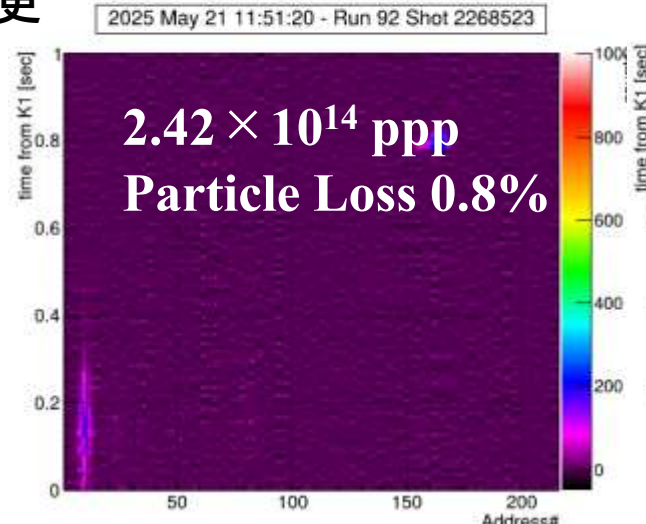
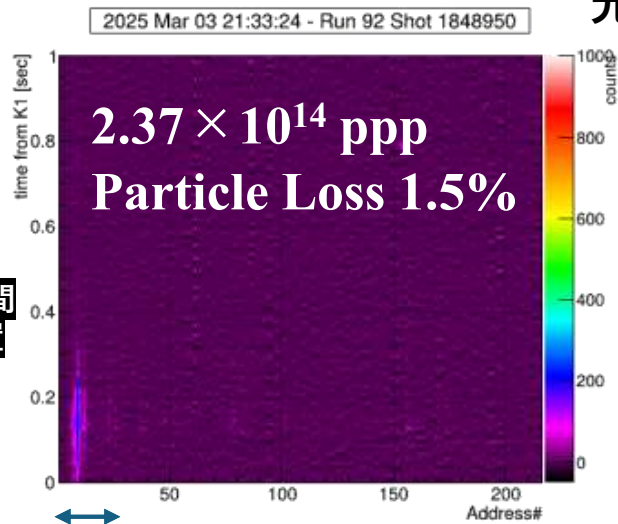
⑤'

⑥'

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

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 & ビーム光学開発を更に追求

MR Magnet PS Gr.

FX cycle 1.36 s $\rightarrow$ 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。

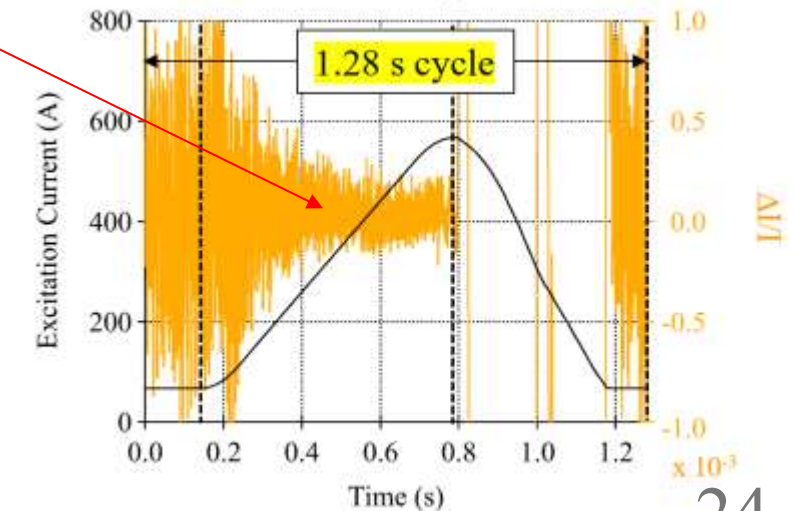
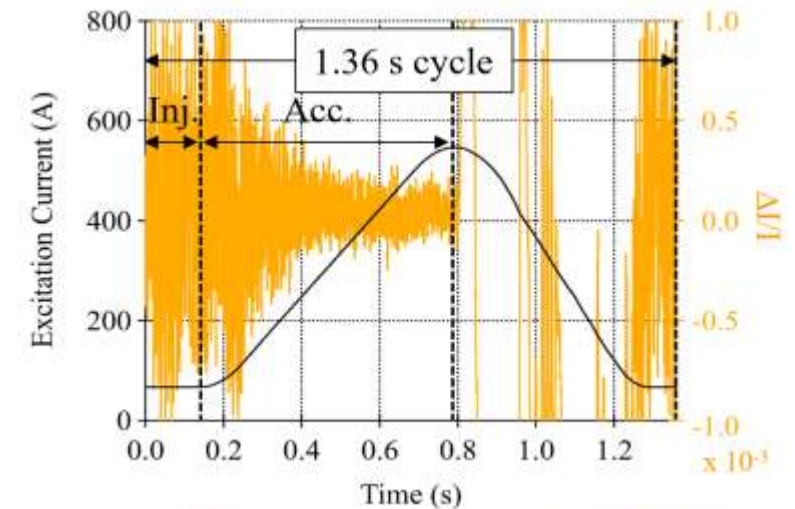
初日からFX1.36 s周期と同等の光学系を再現。

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 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

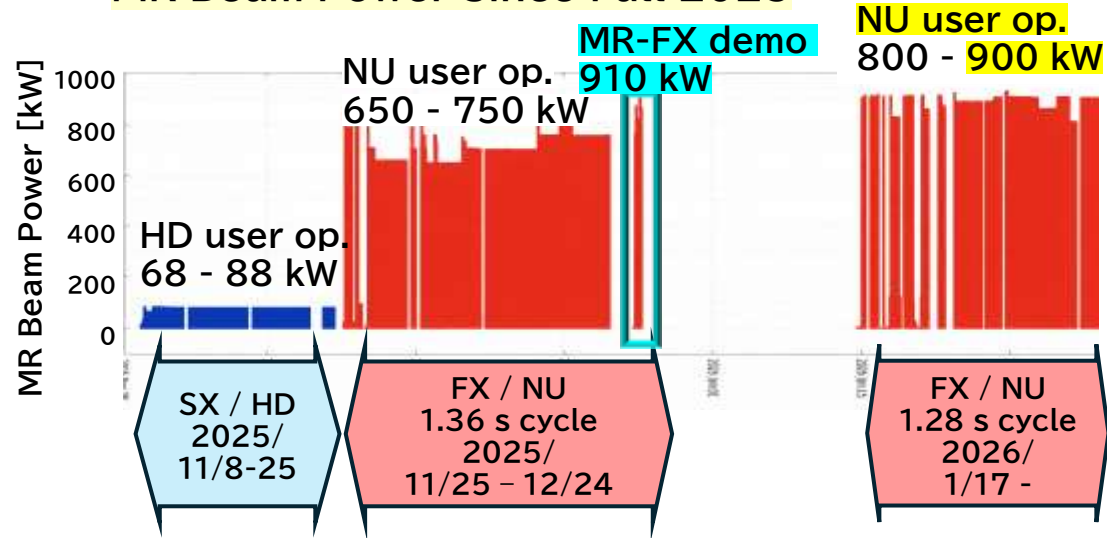


② RCSからのビームハロー

2025年秋運転では RCSからMRへの入射ビームハローが大きく、NU beam power は 650 – 750 kW に留まった。初期の段階からLI/RCSで1日程度の連続した調整時間をとれば、ハロー抑制が可能となることが予想されていたが、スケジュールされた半日メンテ日での短時間調整を毎週繰り返しても理想条件には届かなかった。

- 2025/March **NU** user op. 800 – 830 kW in 1.36 s cycle
 2025/4/21-5/19 **HD** user op. 92 kW,
 2025/5/22 **MR-FX** Demo 954 kW in 1.36 s cycle
 with small beam halo from RCS

MR Beam Power Since Fall 2025



LI/RCS/MR合同スタディ (2025/12/22-24),

LI/RCS:

A) LI study 含む

LI-精密matching (13 hours)

B) RCS study

MR-FX向け各種条件出し

C) RF systemの丸1日メンテナンス

NOTE: Many parts of A,B,C could be performed in a full day, but they could not be done in fragmented time of half-days.

MR: ビーム条件を12/21 NU750 kWパラメータと同じにしても **MR-FX > 900 kW demo成功**

上流から下流までのLI/RCS/MR-FX/NU 逐次調整 in 2025/11/25 – 12/24

→ **LI/RCS条件を NU 900 kW 安定利用運転(2026/1/27~)に最適なものにした。**

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)

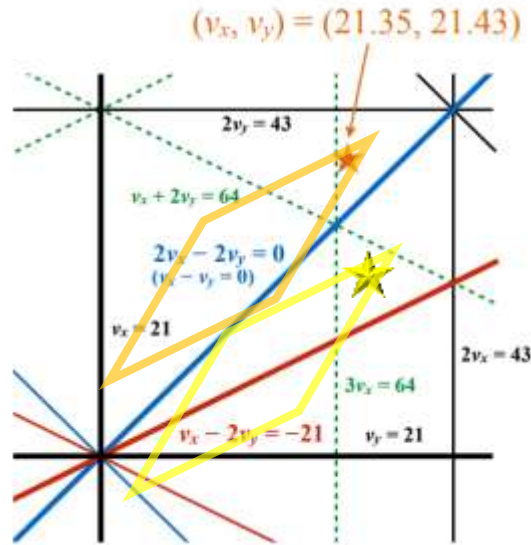
$$2v_x - 2v_y = 0$$

(由来：空間電荷効果)

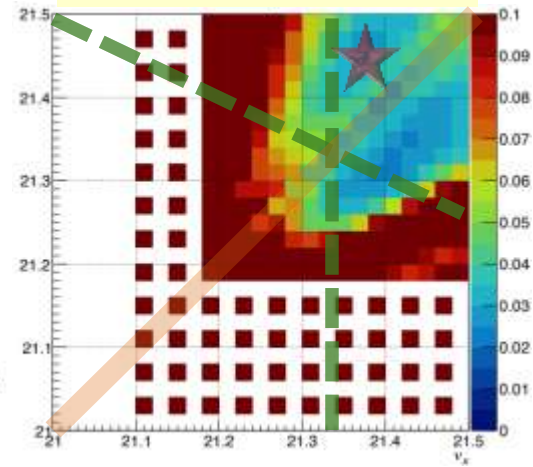
3次非構造共鳴

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

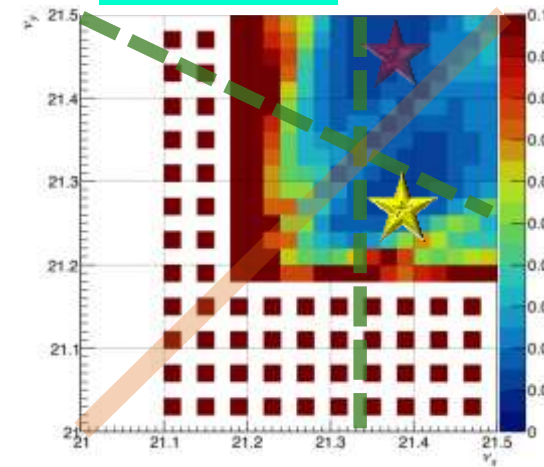
(由来：六極磁場誤差)



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、

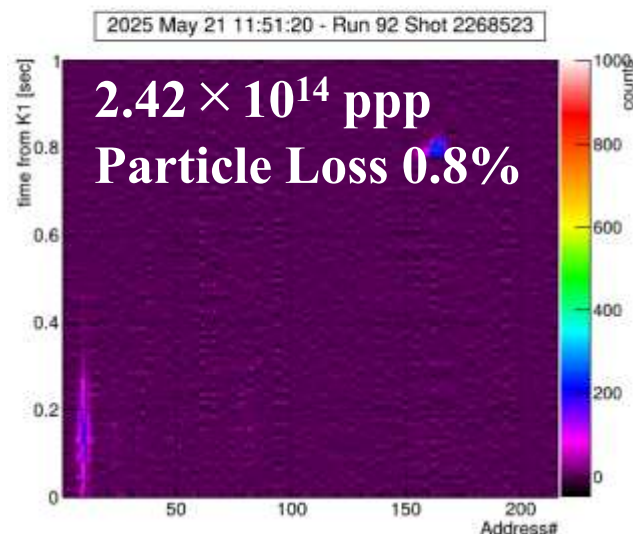
抵触していた(加速中補正が不十分な) 3次非構造共鳴を2本から1本に減らすことに成功。

MR-FX Beam Quality

2025.5 MR-FX demo

2026.2-3 MR/NU-FX

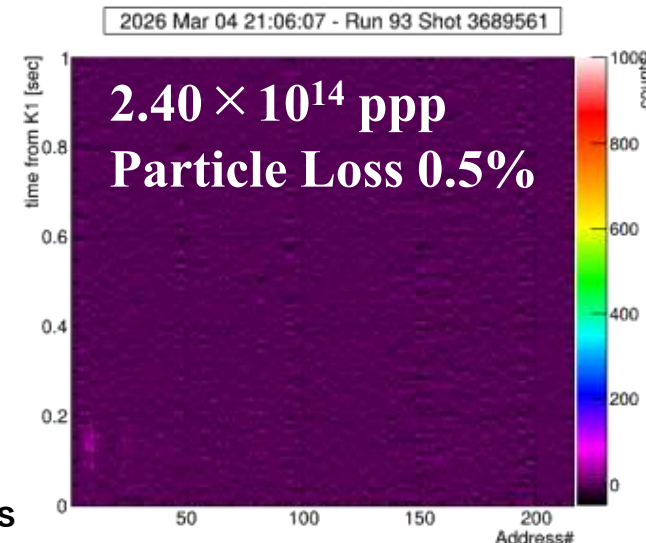
2025.5
FX 855 kW
demo
1.36 s cycle
(908 kW eq. in 1.28 s)



⑤'
⑥'

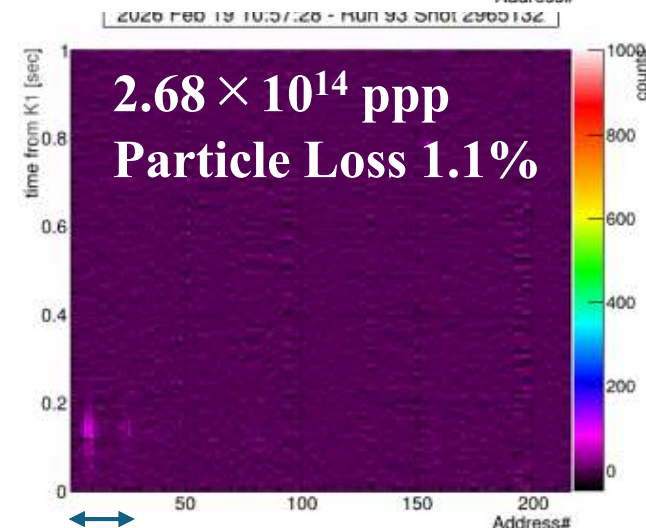
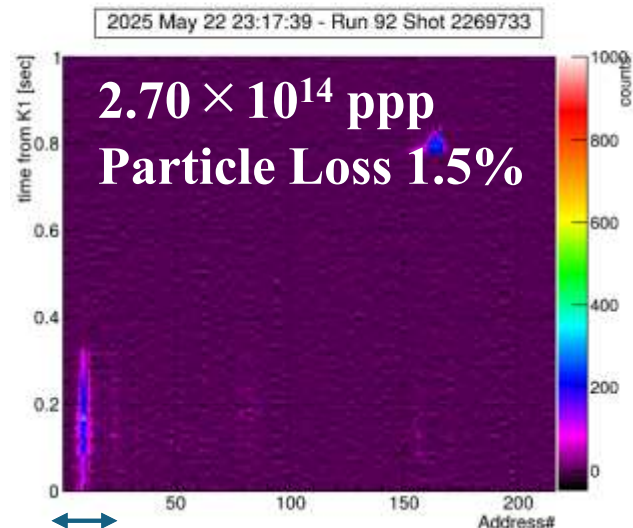
Higher
Repetition
1.36 s to 1.28 s

Further
B-Comm.



2026.3
NU 900 kW
1.28 s cycle

2025.5
FX 954 kW
demo
1.36 s cycle
(1015 kW eq. in 1.28 s)



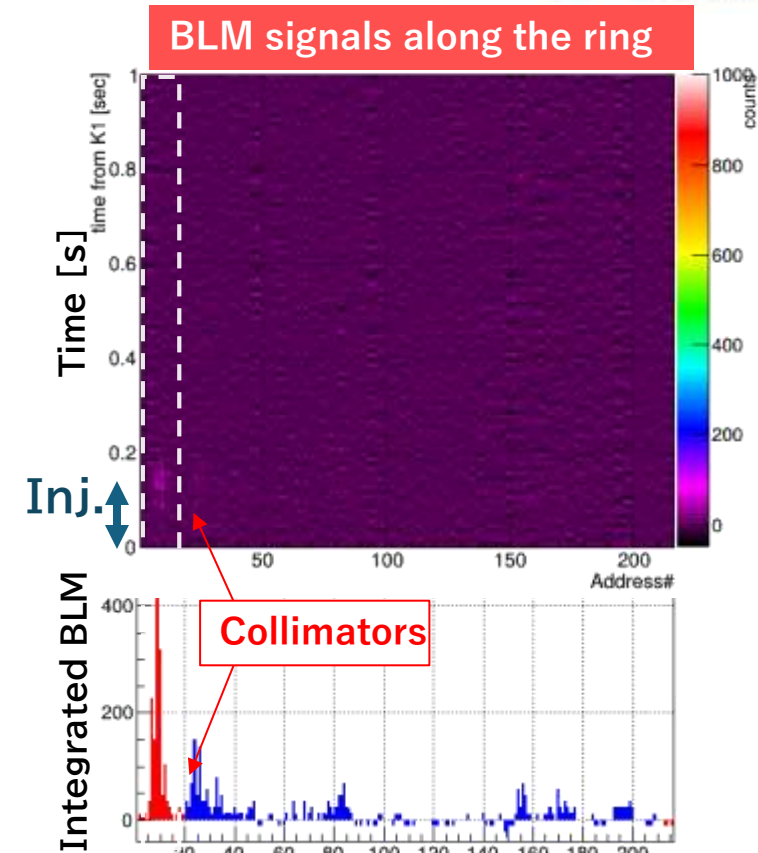
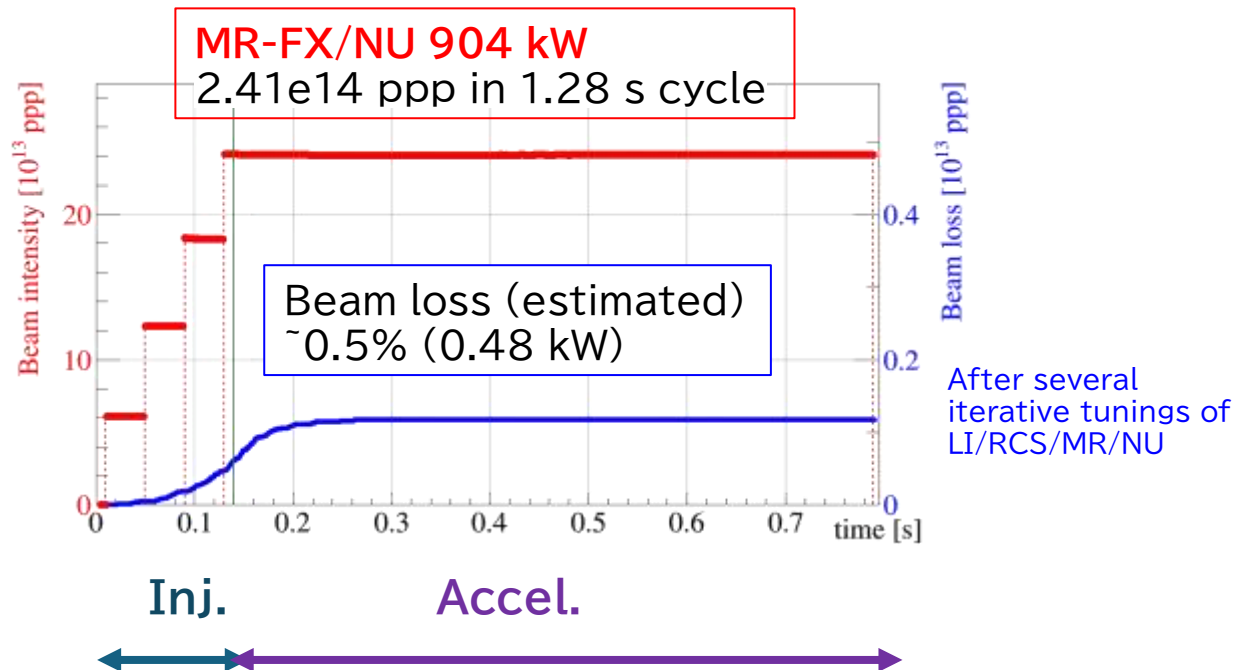
2026.2
NU 1 MW
demo
1.28 s cycle

Gain 1/8
In Collimator Area
(Beam Loss localized)

Gain 1/64
In Collimator Area
(Beam Loss localized)

新Arc光学
利用運転適用
JFY2025

900 kW
安定利用運転
を実現
2026.1 -



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

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%

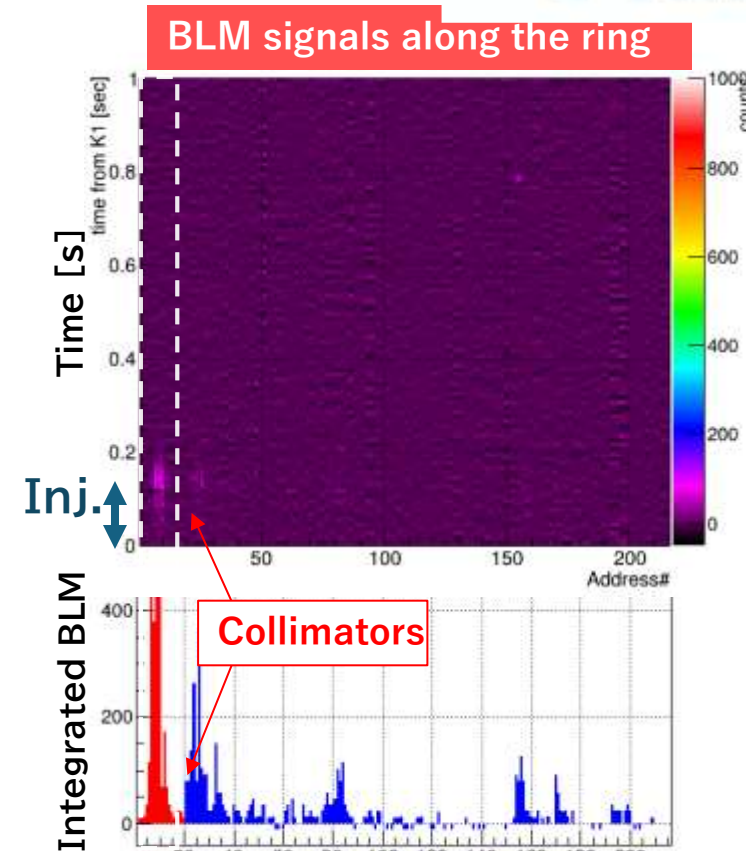
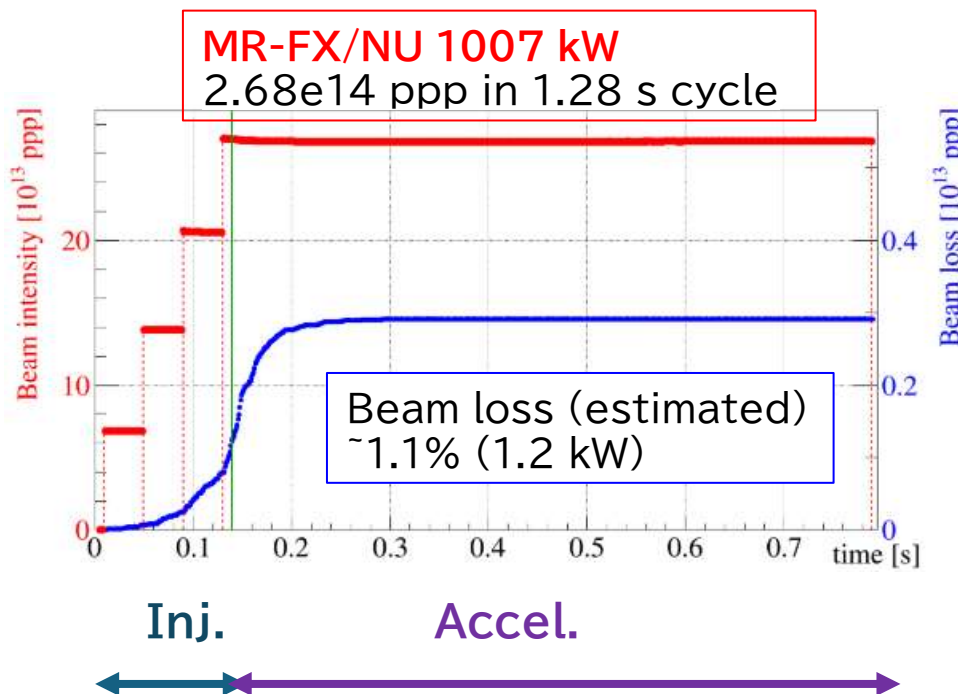
We have optimized
LI/RCS/MR/NU
iteratively during
1.5-month user op.

ロス半減以下に成功

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



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

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

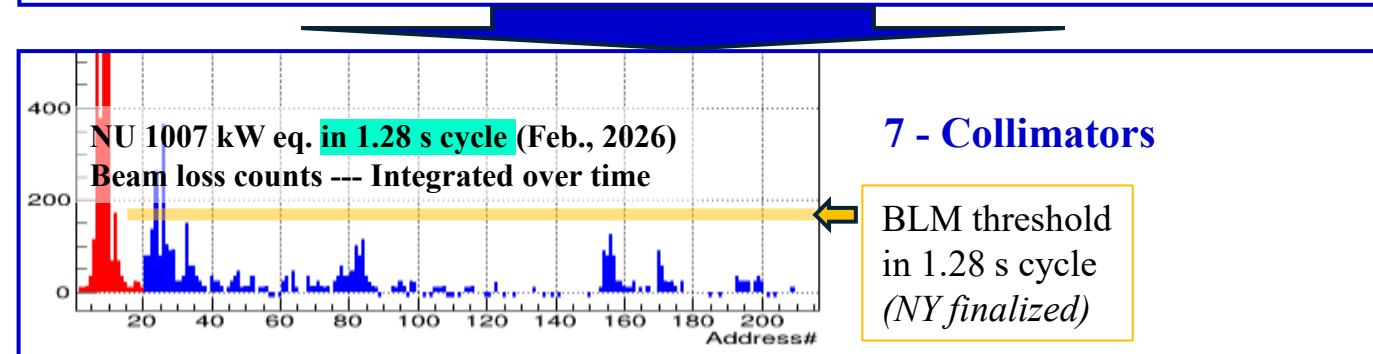
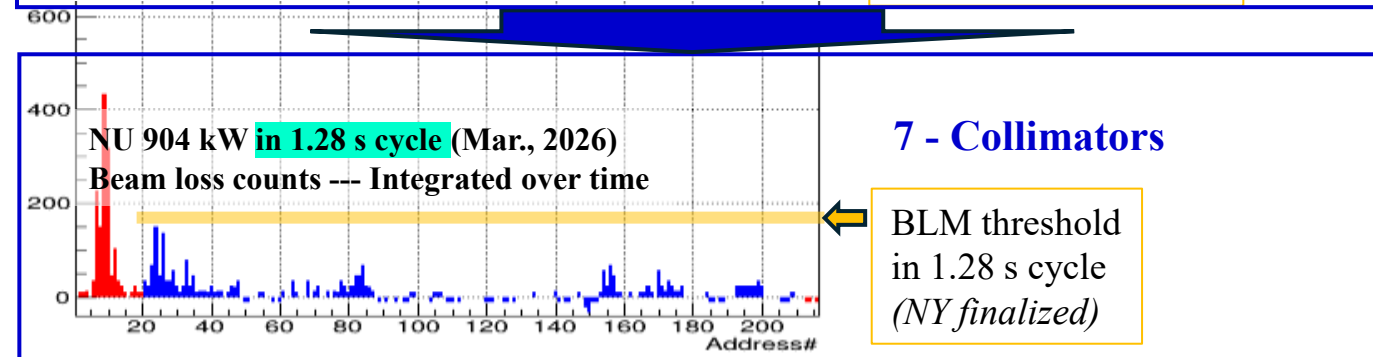
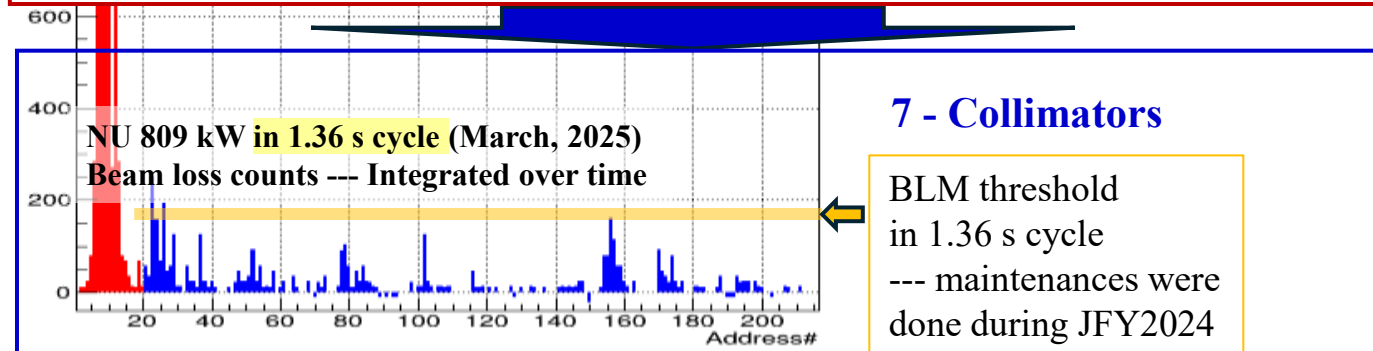
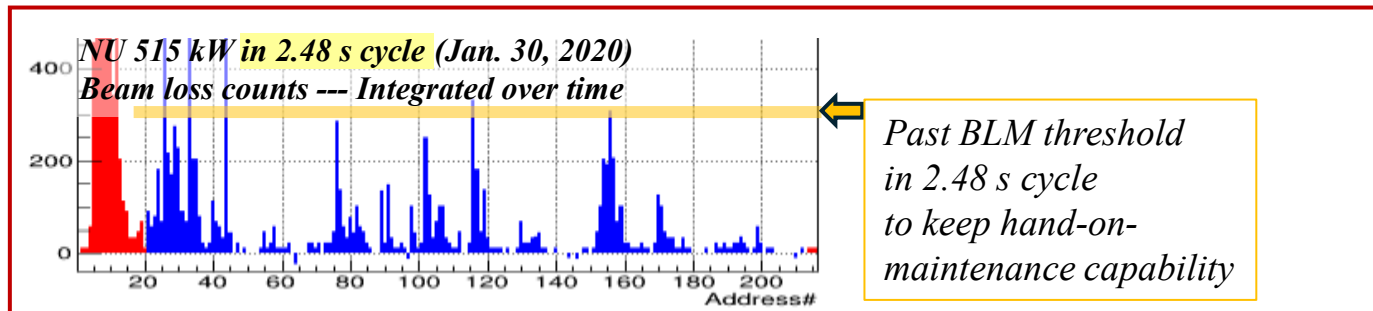
Beam loss localization

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%

Present scenario of collimator balancing

- Consider single path collimation first, then optimize the balance empirically
- Upstream collimators are set in smaller aperture. Downstream collimators are basically set to catch scatt. particles.
- Scattered particles at collimators are minimized by angled col-jaws.

2026/4/23



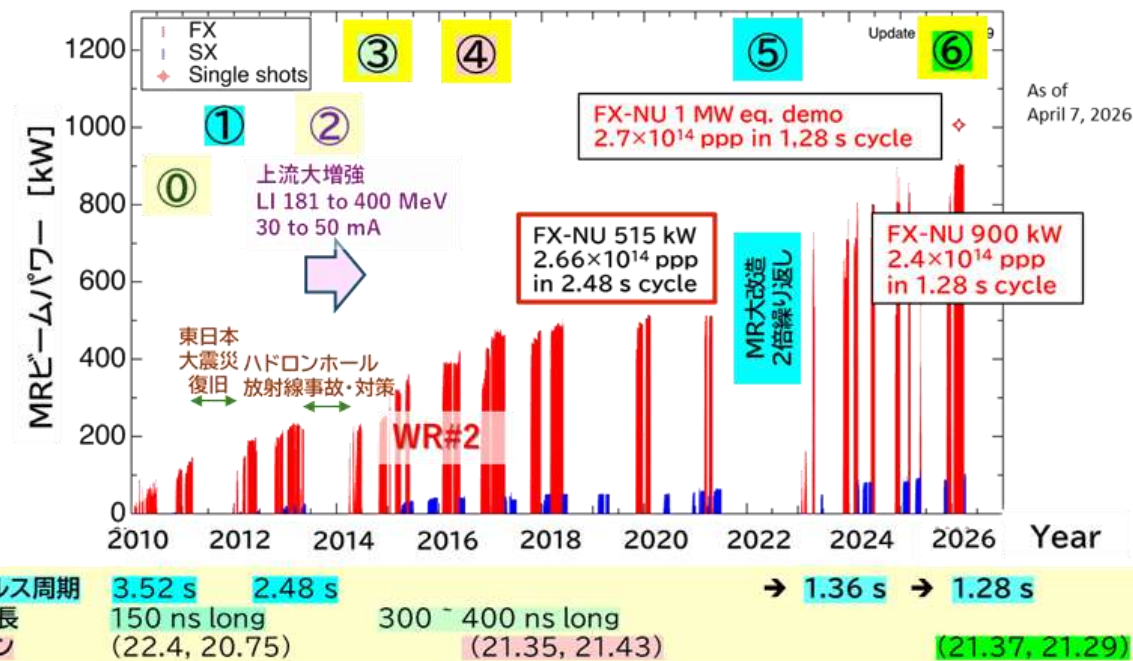
Collimators are mostly optimized.

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

- 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。
- ②上流からの高品質ビームはいつも大事。

③④⑥ 陽子数を増やすアイデアに基づく。アイデアの原理実証には試行錯誤の機会は必須だが、比較的簡単。しかし、利用運転適用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。
特に安定性確保にはビームでの検証が必要。

①⑤ 大改造は、企画開始から開発に10年かかる機器もある。機器の性能評価は大強度ビームによる厳しい負荷を通して成される。
そうして生まれたJ-PARC発の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。通電試験を繰り返した。



※ T2Kによる震災前のデータでのθ13論文、震災後のニュートリノ・反ニュートリノ振動比較実験企画は加速器メンバーのやる気を一挙に引き上げた。
③ スタディ時間の確保、NUも含めた光学変更はALL J-PARCで臨んだ。

R&D試行錯誤の一時的POT足踏みは、NU Userとの相互理解により合意された31

今までのMR-FX運転まとめ

J-PARC MR-FXでは、NUとの密接な連携協力の元、ビーム強度を積み上げてきた。
2021-2022の高繰り返し改造後も、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

2026.1~

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%

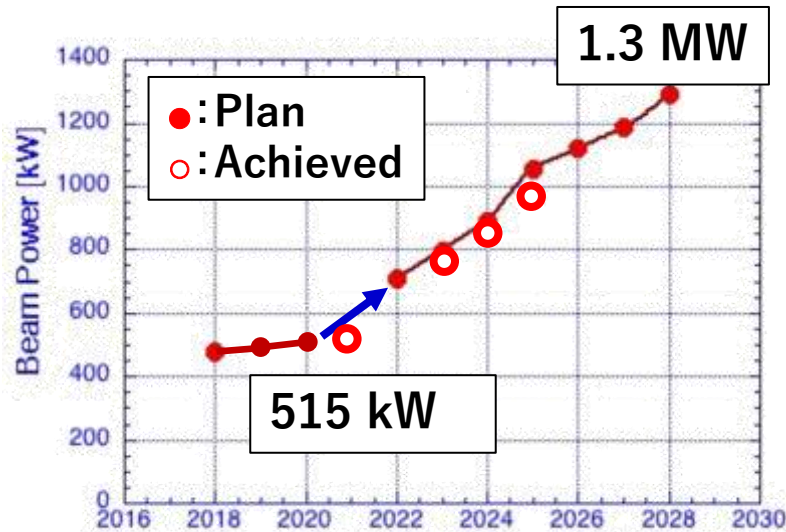
MR/NUの相互理解(NU-BLがT2Kコラボレータに提示する資料の共同作成も含む)、
MR/NU共同研究、ALL J-PARC (LI/RCS/MLF/MR/NU/HD)でのスタディ時間確保、
ビーム条件作成協力が、弛まない大強度化の原動力といえる。

ではこれからは？

大強度陽子ビームに挑む
J-PARC加速器 MR将来計画

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 NOvA (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 へ

T2K計画の後継： HK計画

ニュートリノ実験施設

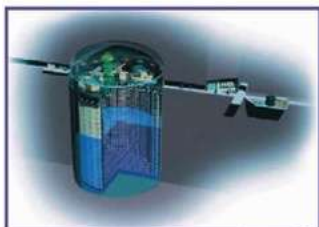
Discovery of CPV;
Precision measurements;
Mass hierarchy and exotic searches

NU with 2.3-2.7E+14 ppp beam
from MR パルス当たり陽子数 世界一

→ NU > 3.3 E+14 ppp beam

NU experimental facility (2009 -)

- Long baseline neutrino oscillation experiment (T2K)



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



- Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam
Phys. Rev. Lett. 112, 061802 (2014)
- Restrict Possible Values of Neutrino CP Phase
<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2177-0>

- Hyper-Kamiokande experiment (HK) (2027 -)

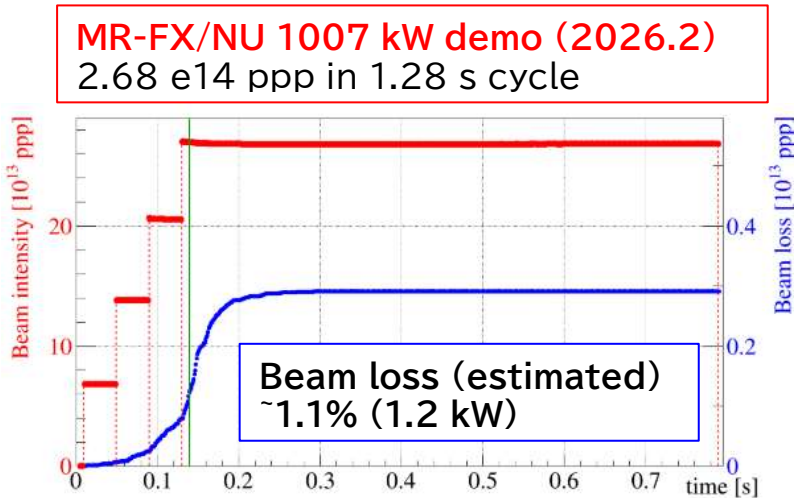
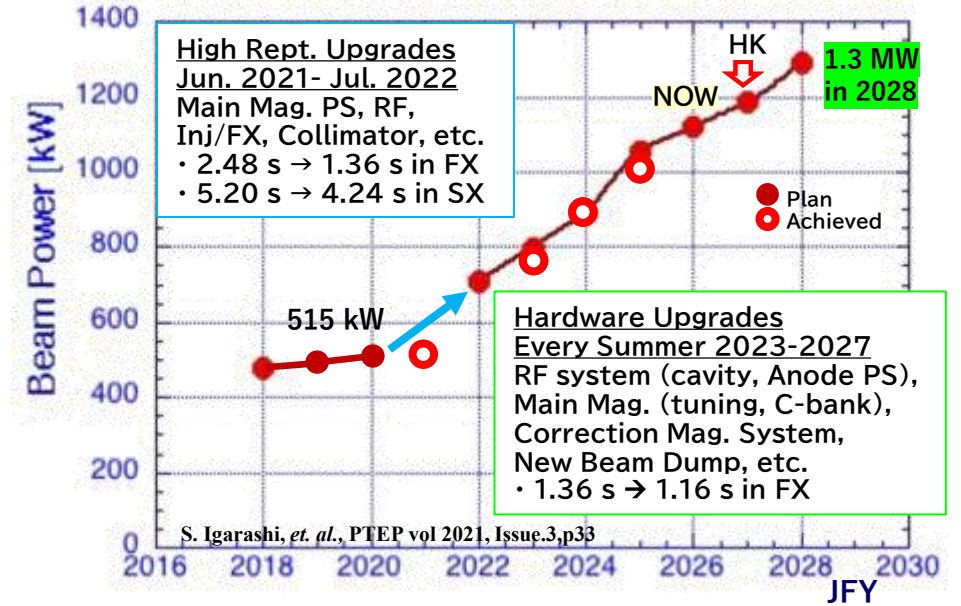
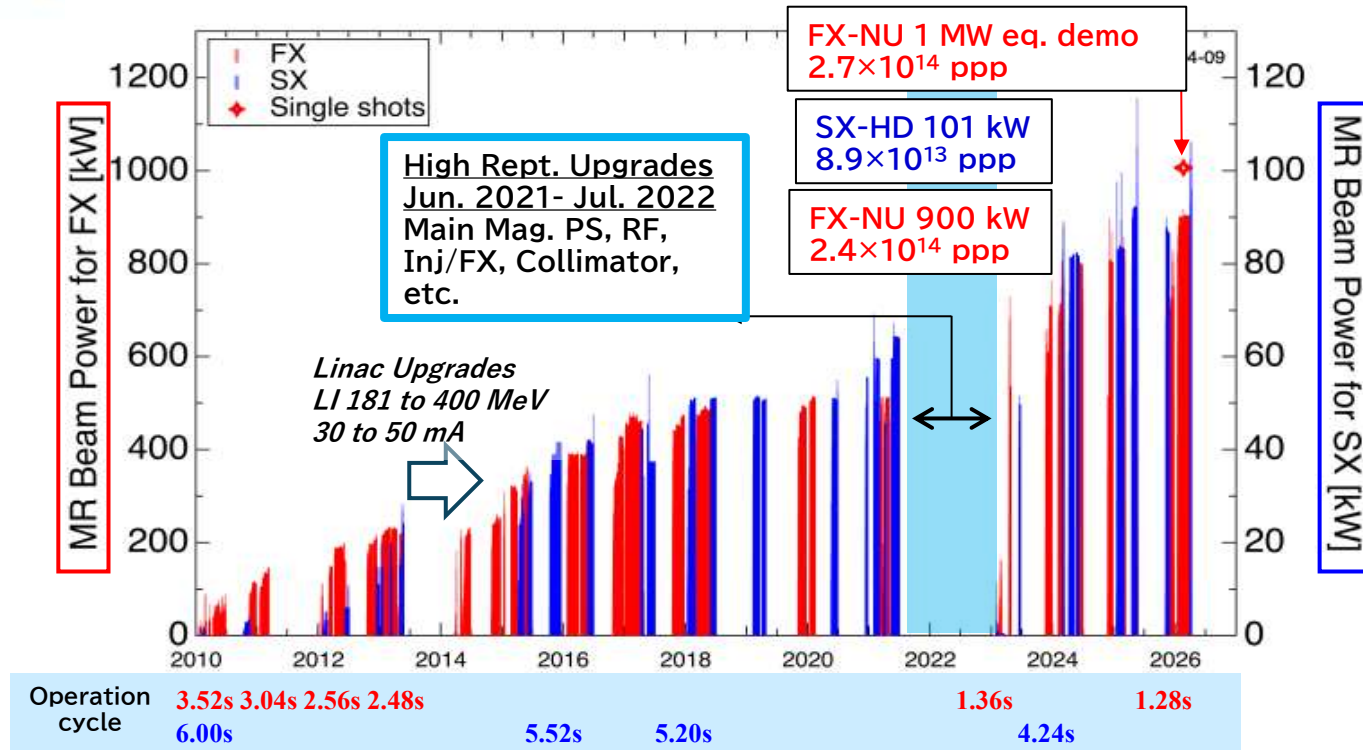
- **Far Detector**
Water Cerenkov
Detector
10 times of SK
fiducial volume



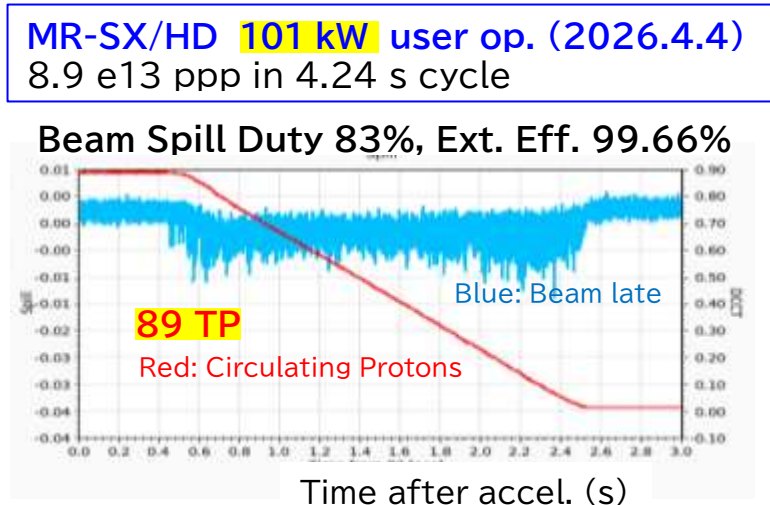
- **MR Beam Power Upgrade**
750 kW → 1.3 MW
Hardware Upgrades (MR, NU)
+ R&D new Beam Dynamics

- (anti-)muon neutrino beam produced by 1.3MW proton beam
- New near detector

MR Power Trend and Near Future Plan



FX is aiming
1.3 MW
by JFY2028



SX is aiming
>150 kW
(TGT upgrade 2031~)
and
Higher Spill Duty

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]
- ・新アボートダンプ [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	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%
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)

引き続き、機器の増強、ビーム調整を進めて、
2028年度にビームパワー1.3 MWを目指す。
必要な機器増強は2027年度に完了予定。
2028年度にその増強を駆使して大強度化を追求する。

- 更なる高繰り返し化 $1.28\text{ s} \rightarrow 1.16\text{ s}$
RF空洞の増設
主電磁石電源(新電源6台)コンデンサーバンク増強
主電磁石電源(再利用電源1台)の更新
- ビーム粒子数増 & ビーム損失軽減
RF陽極電源の増設
光学補正用電磁石電源の増設
ビーム位置モニタの高度化
ビーム調整効率化
ビームダンプの増強(容量4倍化)
- ビームダイナミクスの検討
新動作点の開発
光学補正・共鳴補正の高度化



RF Cavity



RF Anode PS

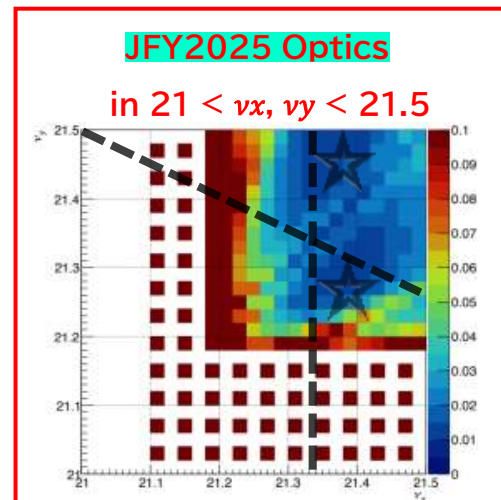


Mag PS for BM

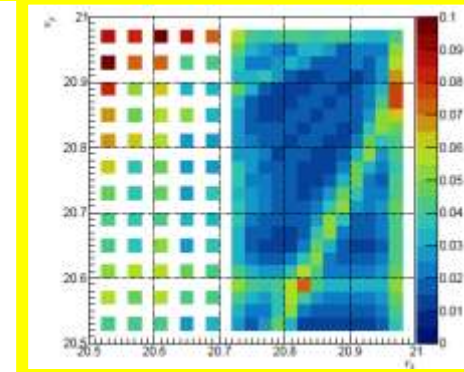


Capacitor bank
(in container)

Beam Position Monitor
signal circuit



Possible op. point (2028~)
in $20.5 < vx, vy < 21$

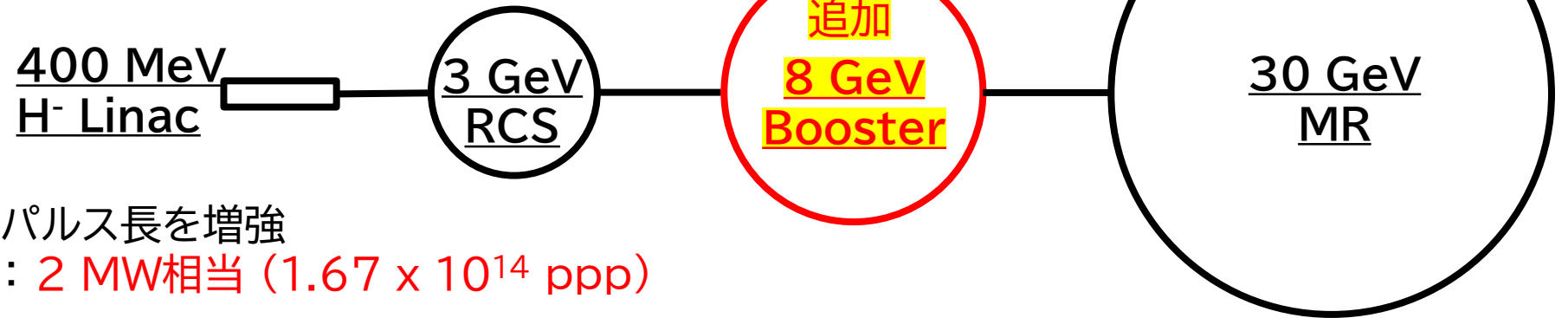


FX > 1.3 MWも検討中

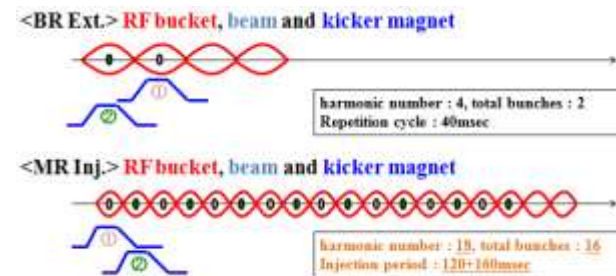
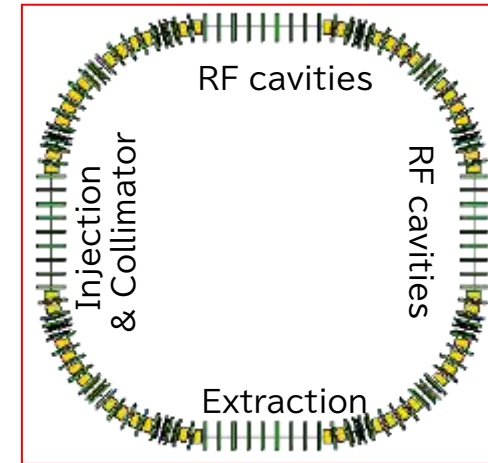
NOTE: NU Userサイド(TGT 1300 kWで申請済)との連携が必要。

RCS 1 $\rightarrow$ 1.5~2 MW化計画を活用し、陽子数 $> 3.3e14$ ppp ($= 4.1e13$ ppb $\times 8b$) を検討中
MRへの入射ビームバンチ長のばし、不安定性対策強化、RCS/3-50BT増強、ダイナミクス追求、...

新加速器配置案: 8 GeVブースターの追加



- ✓ Linacビームのピーク電流、パルス長を増強
→ RCSのビーム強度を倍増: **2 MW相当** (1.67×10^{14} ppp)
- ビーム強度が倍になることで...
→ ビームのエミッタンスは増大
→ ロスの原因となる空間電荷効果も増強
- ビーム力学的観点から倍の強度になった3 GeVビームをそのままMRに入射することはできない
- ✓ **RCSの下流に8 GeVブースターを追加**
→ 断熱減衰によるビームの低エミッタンス化: **bg比 0.43**
→ MR入射時の空間電荷効果の低減: **bg²比 0.19**
- ✓ MR出力
→ **3.2 MW** ($h=9$, 8バンチ, 1秒サイクル)
→ **5.5 MW** ($h=18$, 16バンチ, 1.16秒サイクル)



	3 GeV RCS	8 GeV Booster
Circumference	348.333 m	696.666 m
Super-periodicity	3	4
Injection energy	400 MeV	3 GeV
Extraction energy	3 GeV	8 GeV
Repetition	25 Hz	25 Hz
Ramping pattern	Sinusoidal	Sinusoidal
Transition energy	9 GeV	15 GeV
Harmonic number	2	4
Number of bunches	2	2
Momentum acceptance	± 1%	± 1%
Ring acceptance	486pi mm mrad	189 pi mm mrad
Collimator aperture	324pi mm mrad	126 pi mm mrad

SX@30GeV >150 kWの追求

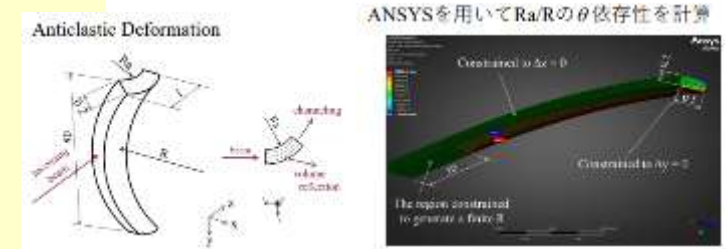
HD 100 kW 安定利用運転達成(2026. 4.4)

HD回転TGT 150 kW (JFY2031)計画と対応したSX 150 kW化は、
SXロス、Spill構造改善、ビーム不安定性が課題。

SX 150 kW実現は、現行の開発リストで目指せる:

- | | | |
|-------------------|-------------|-------|
| ① 湾曲結晶 | [SXロス軽減] | 開発中 |
| ② Spill FB強化 | [Spill構造改善] | 開発中 |
| ③ Slippage増の光学系開発 | [ビーム不安定性抑制] | 準備中 |
| ④ VHF空洞導入 | [ビーム不安定性抑制] | 基本設計済 |

湾曲結晶導入で SXロス半減へ(①)



Keil-Schnell criterion

$$\frac{|Z_L(n\omega_0)|}{n} < F \cdot \frac{|\eta|\beta^2 E_0/e}{I_p} \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2_{FWHM}$$

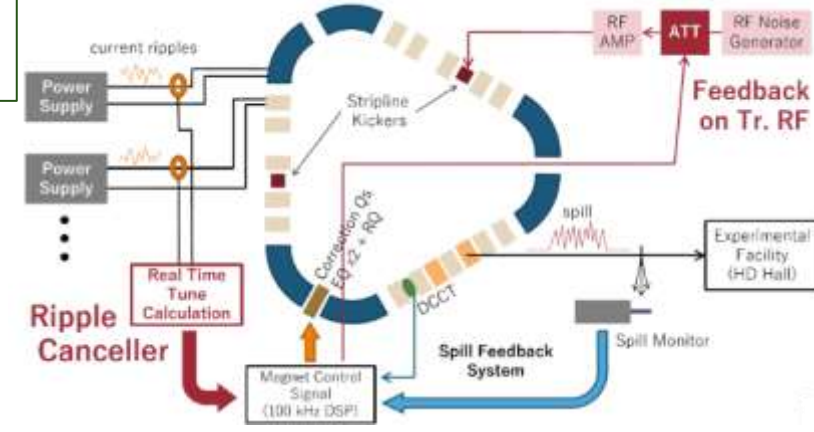
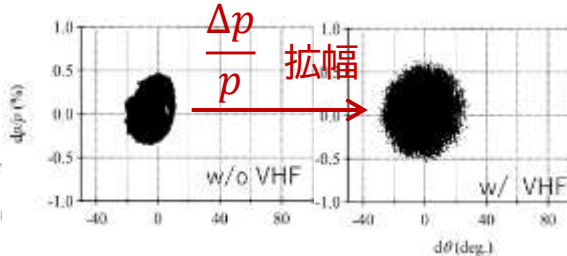
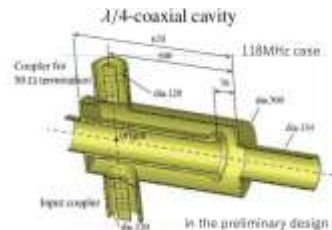
Impedance Slippage Longitudinal Emittance

光学系開発で η 増(③)
ビーム不安定性抑制

$$\eta \quad -0.002 \rightarrow -0.003$$

リップル
キャンセラー(②)

VHF空洞で dp/p 増(④)
ビーム不安定性抑制



SX@8GeV 50 kW

Phase I はそのままOK. Phase IIにはハードウェア増強が必要

- SX septum(本体&電源)
- 大口径QDT

Phase	Power [kW]	Cycle [s]	#Proton [TP/pulse]	#Proton [TP/bunch]	Acc. Status
α	0.22	9.2	1.6	0.4	Done
I	3.2	2.48	6.2	1.6	Ready
II	56	1.2	52.5	13.1	

J-PARC遅い取り出しStretcher Ring (SR)

J-PARC 遅い取り出し Stretcher Ring(SR)
MRの上に、超電導磁石ベースのリングを天井に設置。
MRで加速し、速い取り出しでSRに入射し、SRで遅い取り出し。
ラティス、磁石、応力・躯体強度… 概ね検討

NOTE: Stretcher RingはHD Userサイド(新增設で500 kWで申請済)との連携が必要。

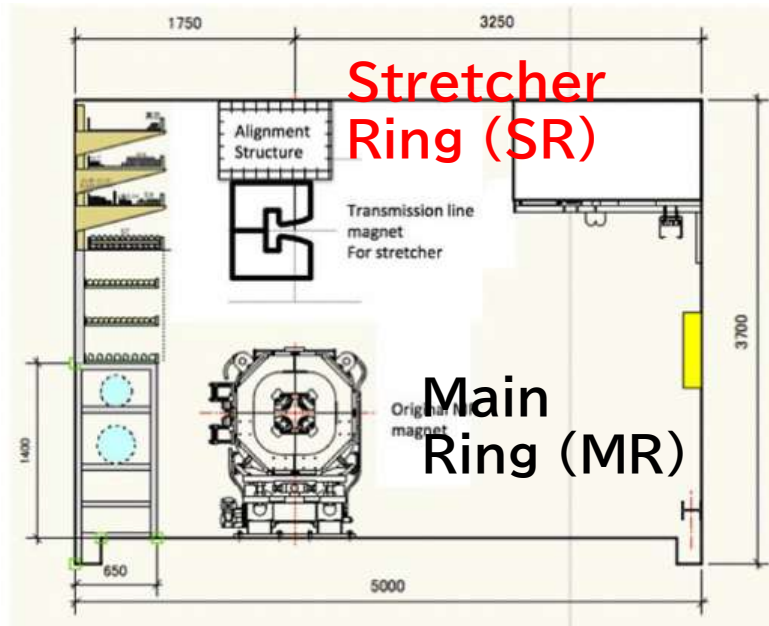
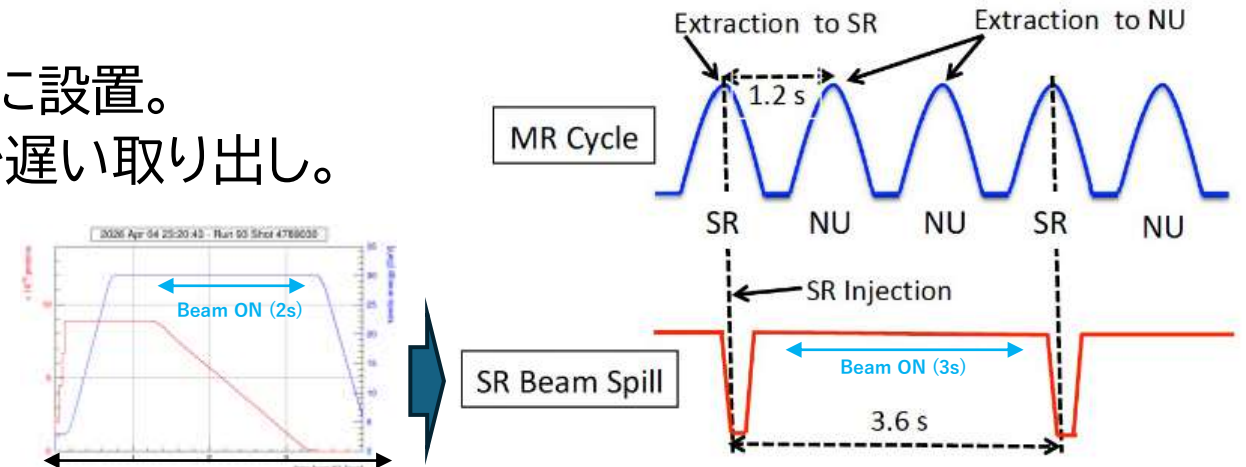


Figure 4: Layout of the MR (black), SR (red), BTL (blue), and abort magnets (QFAB and QDAB).



MR only: 150days: NU 100days(1.2s cycle)、HD 50days (4.2s cycle, 2s spill)

MR+SR: 150days:

NU 150days*2/3 (x1.0 POT/year)

HD 150days*4.2/3.6 (x3.5 POT/year)

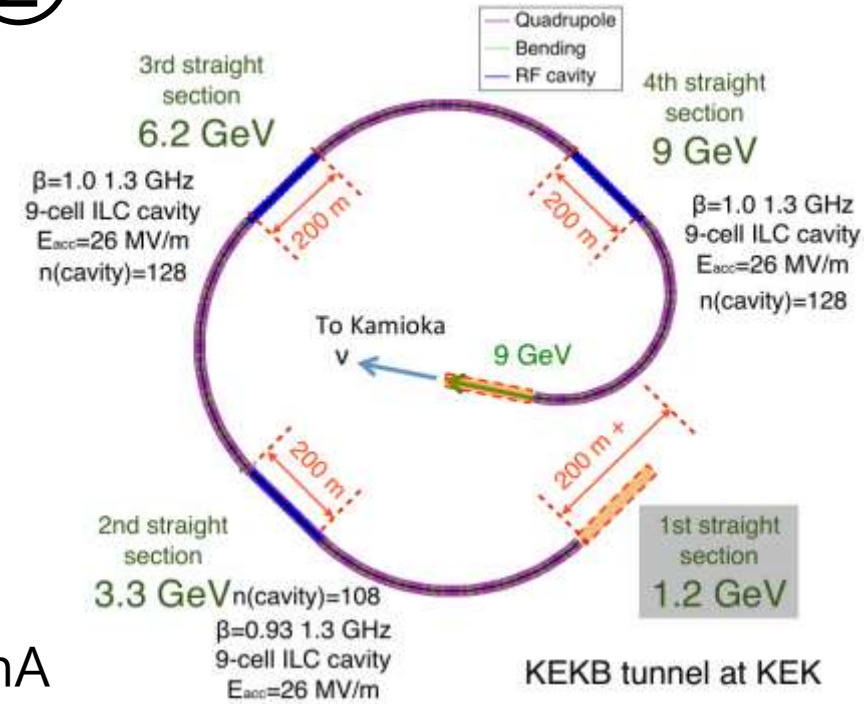
- **NUとHDの同時オペレーション**
- スpill長の延伸 (e.g. 2s → 3s or more)
- 高繰り返し 4.2 s → 3.6 s
- パワー当たり低ピーク電流 4.24s/2s → 3.6s/3s
- DC電磁石@SR -> 低リップル

9 GeV陽子リニアック @ Super-KEKBトンネル

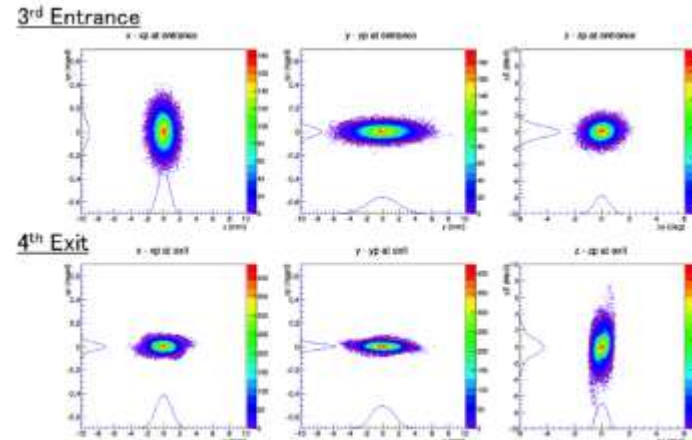
出力エネルギー9 GeV×ピーク電流100 mA×Duty factor 1%
→ビームパワー9 MW

ピーク電流100 mA→ECRイオン源等で既に実績あり
加速→ILCの技術、ILCタイプの超伝導加速空洞を活用

- ✓ KEKBトンネル:
周長3 km (直線部0.2 km + アーク部0.55 km)×4
- ✓ 4つの直線部をdispersion-freeにして、
そこにRF空洞を配置して9 GeVまで加速
 - 加速勾配: 9 GeV/0.8 km = 11.3 MV/m
 - E0値: ~30 MV/mが必要になる
- ✓ European XFELでは、ILCタイプの空洞を活用、
そこでの実績から上記のパラメータは十分に実現可能
- 第1直線部では、SNSやESSで行っているように、
常伝導空洞と超伝導空洞を組み合わせ
1.2 GeV領域まで加速
- 第2直線部以降で9 cell、1.3 GHzのILCタイプの
超伝導空洞を活用して1.2 GeVから9 GeVまで加速



$I_{peak}=100$ mA



ロスなく
安定に加速
(Simulation)

More Duty factorでの更なる大強度化もあり得る。

Multi MW標的開発は国際的な課題。別途追求が要る