

大強度陽子ビームに挑む最先端加速器研究



J-PARC

- ・佐藤洋一 KEK加速器第二研究系 研究主幹・教授 質疑込10分
「KEK・J-PARC加速器紹介」
- ・杉山泰之 KEK加速器第一研究系 助教 質疑込30分
「大強度加速のためのビーム縦方向不安定性対策」
- ・武藤亮太郎 KEK加速器第二研究系 教授 質疑込30分
「遅い取り出し運転におけるスピル構造・ビームロス対策と大強度化への展望」
- ・安居考晃 KEK加速器第二研究系 助教 質疑込30分
「速い取り出し運転の大強度化を可能にしたビームダイナミクス」
- ・石井恒次 KEK加速器第一研究系 教授 質疑込10分
「加速器って面白い？」

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>

大阪大学 豊中キャンパス 理学部H棟7F 701
2026/7/22 (水)15:30 -

KEK・J-PARC加速器紹介

自己紹介

佐藤 洋一 (さとう よういち)
東京生まれ・東京育ち (25歳まで)
yoichi.sato@j-parc.jp

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 (研究主幹・教授)
J-PARC 加速器第6セクション (セクションリーダー)
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 (グループリーダー)

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)

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する総合科学。

人類未踏のビームを生み出すために(高輝度・大強度フロンティア)
世界中で、あらゆる手段を講じた研究、多岐にわたる分野の研究が展開中:

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加速器性能向上、物理実験の成果に直結。

また、限界に挑戦して生まれた、フロンティア研究発の技術は、
加速器分野を超え、産業応用にも展開されています。

科学技術発展のゆりかご

最先端加速器研究の世界的拠点

KEK加速器研究施設は 高輝度フロンティア 大強度フロンティア に立ち続け、数々のマイルストーンを達成。
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。

高輝度フロンティア

World Records
in SuperKEKB:

- ピークルミノシティ
- 積分ルミノシティ

SuperKEKB発のナノ衝突技術は
FCC-ee (CERN), EIC (BNL)
といった計画の基準となっている。

PF, PF-AR:
放射光利用の世界的パイオニア。

iCASA:
日本唯一の超伝導加速器の
研究開発拠点。ILC用だけでなく
産業応用研究も展開。
KEK発の超伝導加速器技術は
理研仁科、IFMIF、JAEA、FRIB等
国内外に広く継承されている。

Tsukuba campus

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



Accelerators in KEK

Tokai campus

J-PARC, iBNCT



大強度フロンティア

World Records
in J-PARC:

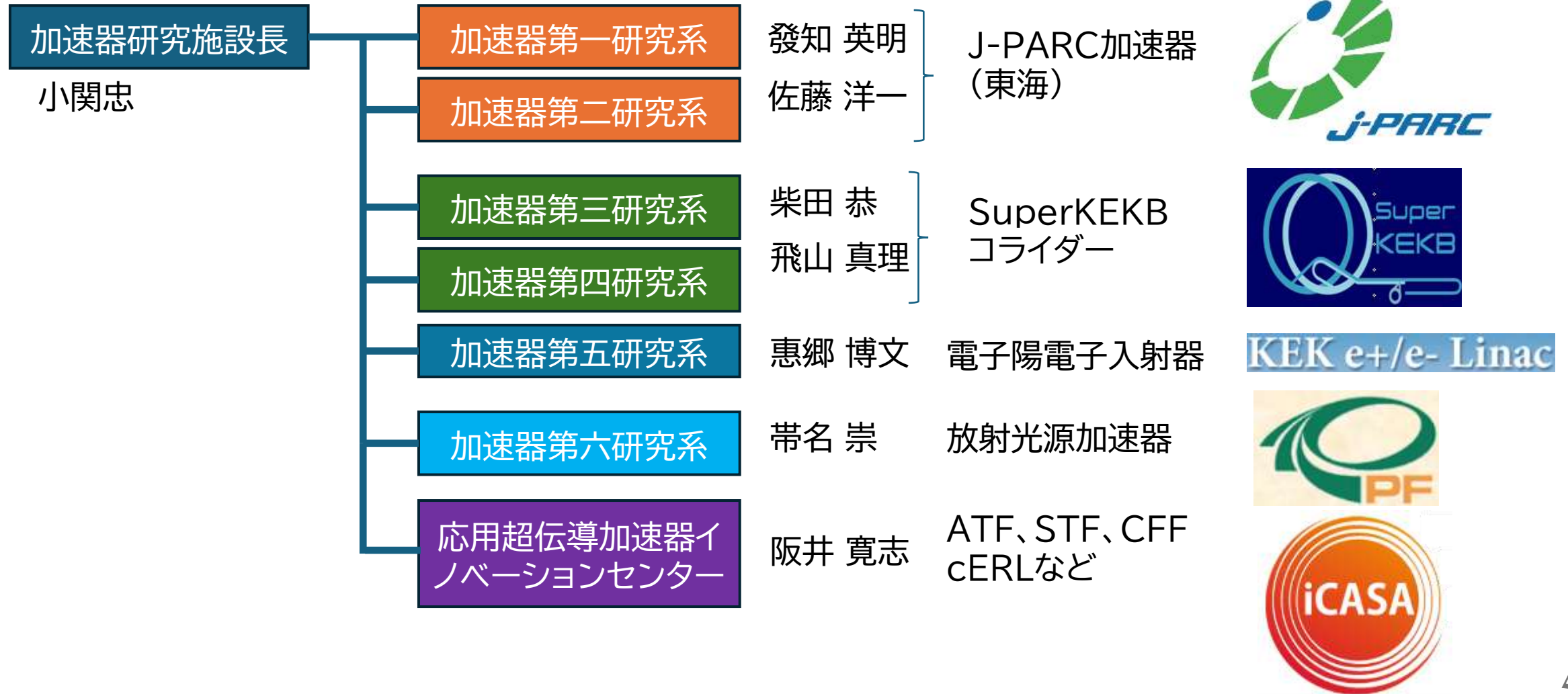
- パルス当たり中性子
- パルス当たり陽子数
- 遅い取り出しビーム強度
- 遅い取り出し取り出し効率

世界記録を持ち続ける
J-PARC加速器発の技術は
CERN, RAL, FNAL,
CSNS, ESS, ...
でも採用されている。
国際共同研究も多い。

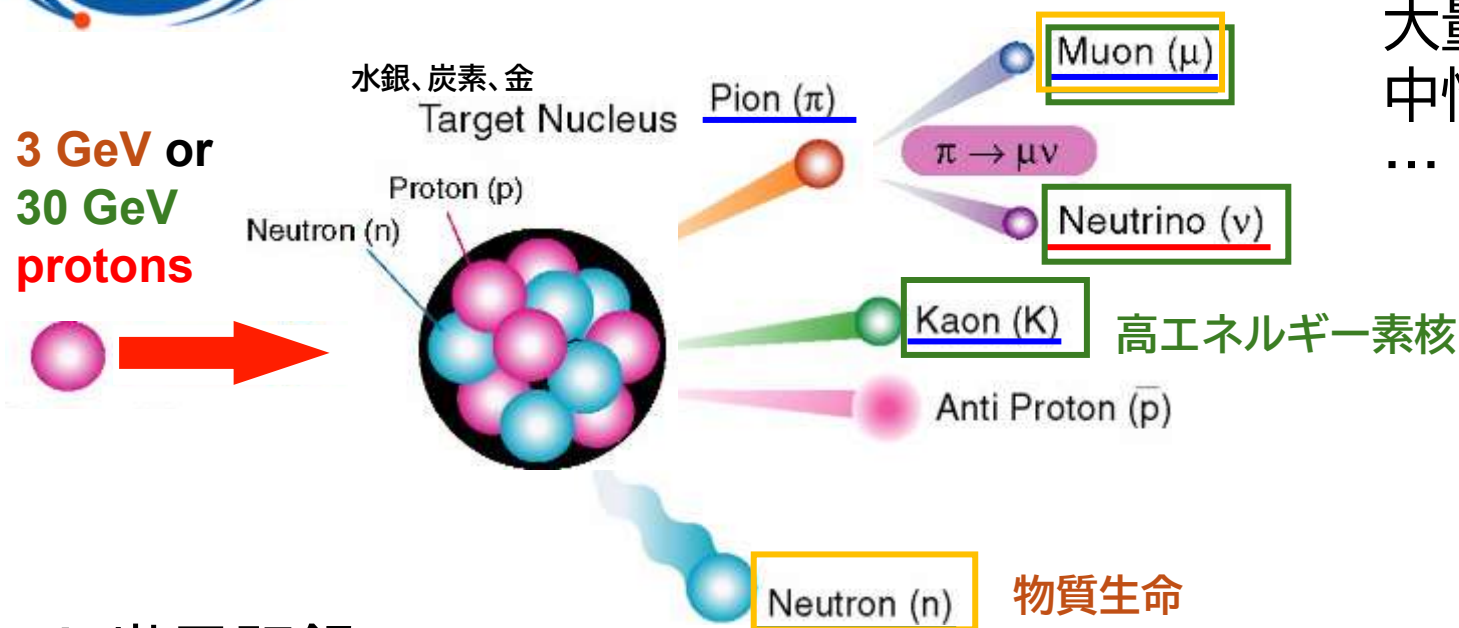
iBNCT:
コンパクト・低放射化の医療BNCT。
J-PARCリニアックが確立した
RFQ-DTL方式を採用。

ミュオン加速器:
世界初のミュオン冷却&加速。

組織図



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

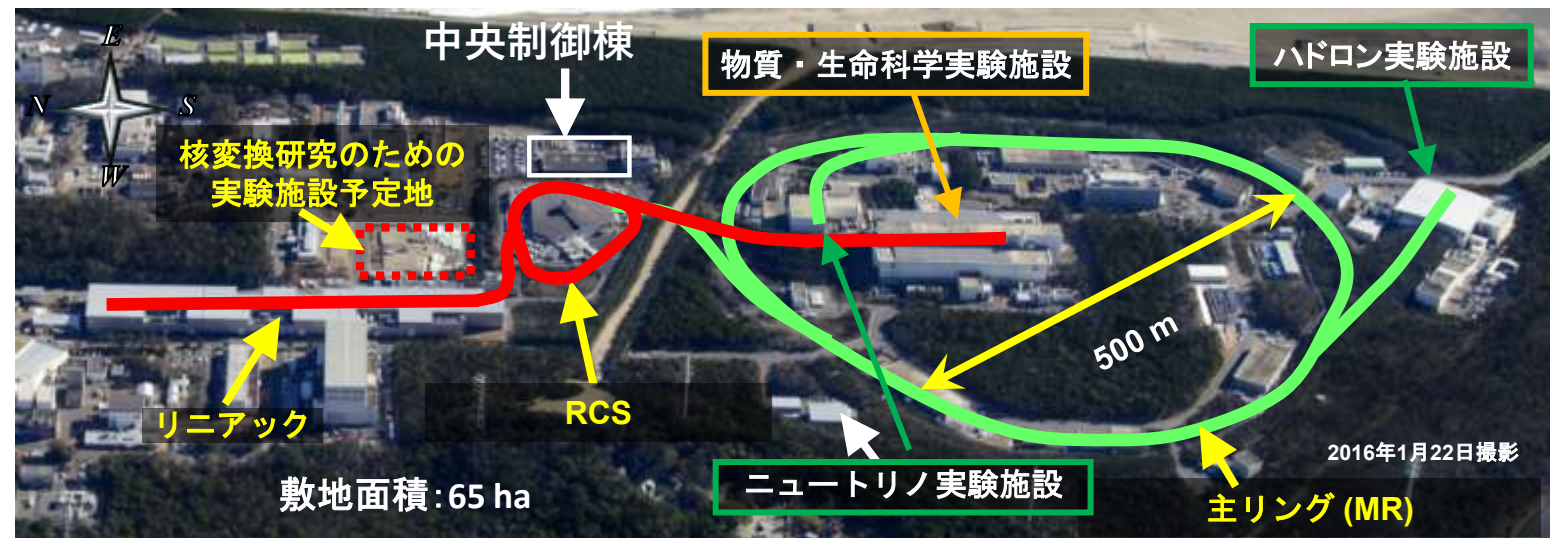
WR#2 From MR NU with $2.3-2.7E+14$ ppp beam パルス当たり陽子数

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



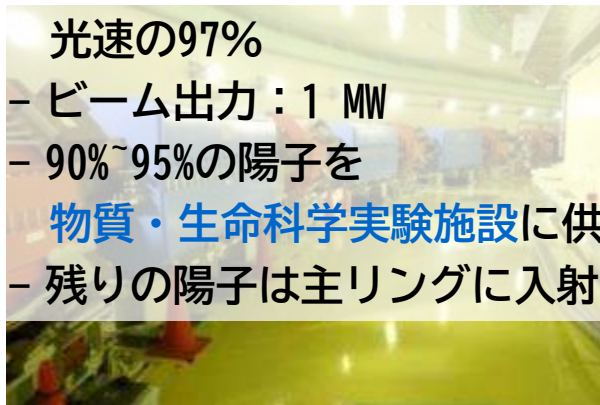
リニアック(線形加速器)

- 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)

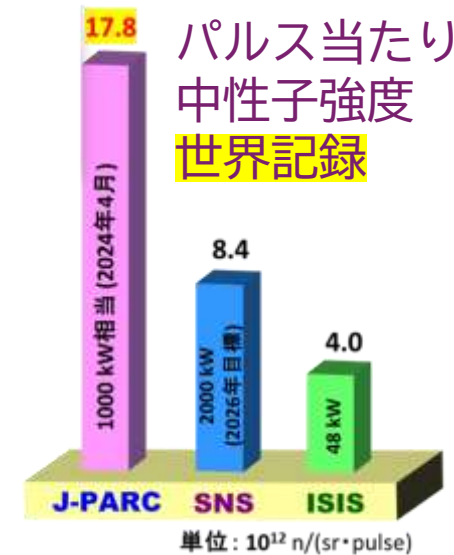
- 周長：1,568 m
- 加速エネルギー：30 GeV
光速の99.95%
- ビーム出力：0.8 MW
- 陽子をニュートリノ実験施設
またはハドロン実験施設に供給



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

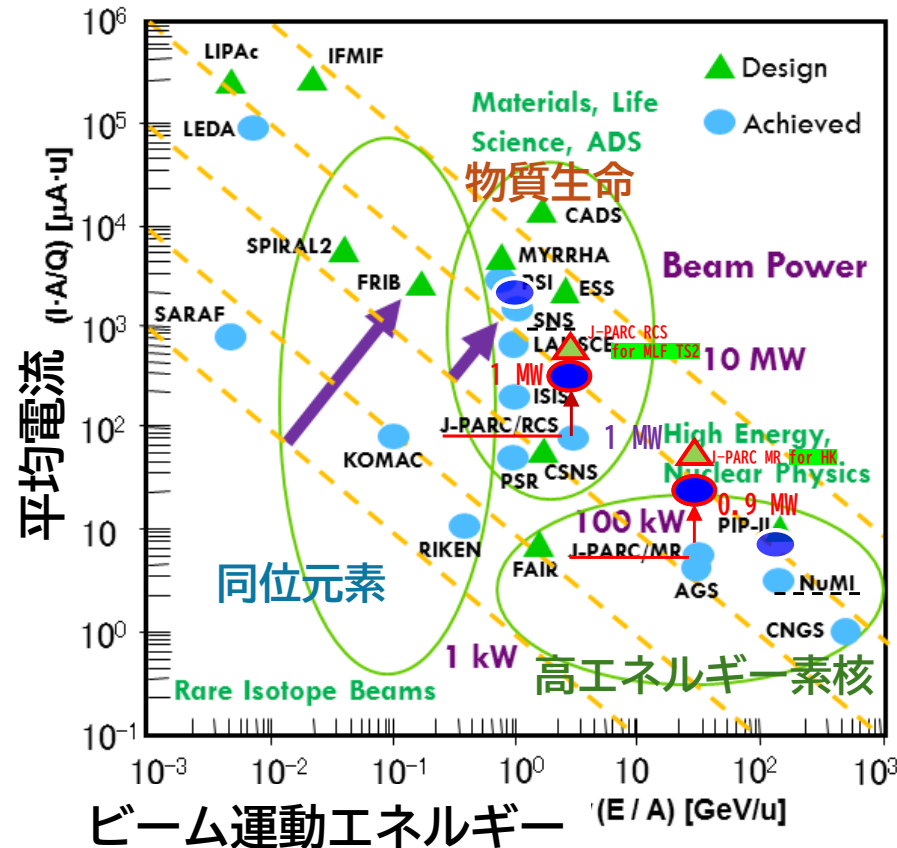


WR#2

WR#3#4

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

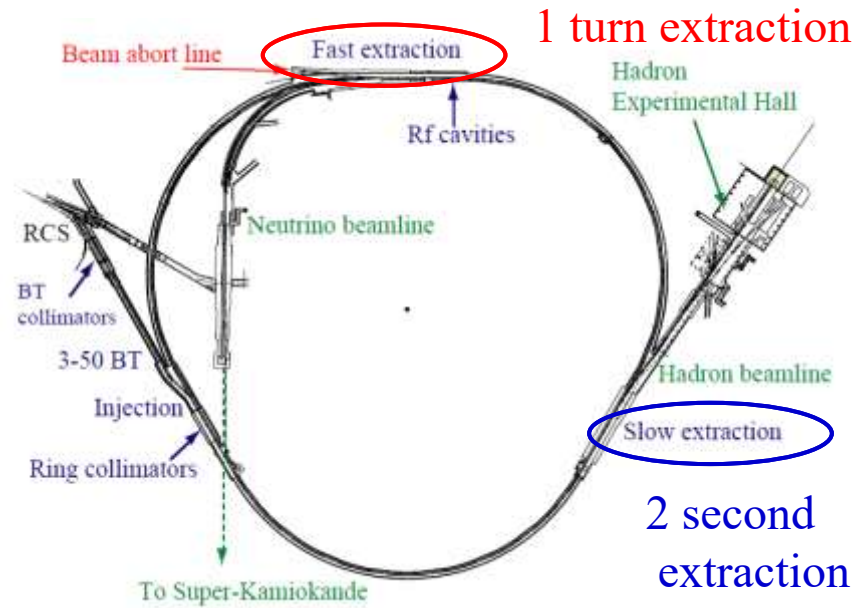
HD with slow extraction beam in ext.
efficiency 99.6% 取り出し効率 世界記録
100 kW with 8.9E13 ppp SXビーム強度 世界記録

世界の大強度ハドロン加速器

●: Achieved by 2014, ●: by JFY2025

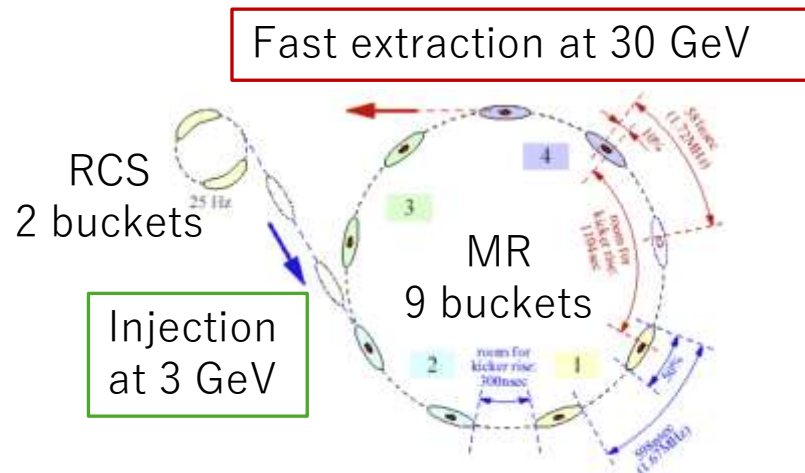
大強度フロンティア加速器として、
世界で唯一 J-PARC が複合施設

Circumference	1567.5 m
Injection energy	3 GeV
Extraction energy	30 GeV
Injection time	0.13 s
Acceleration time	0.65 s
Super-periodicity	3
harmonic	9
Number of bunches	8



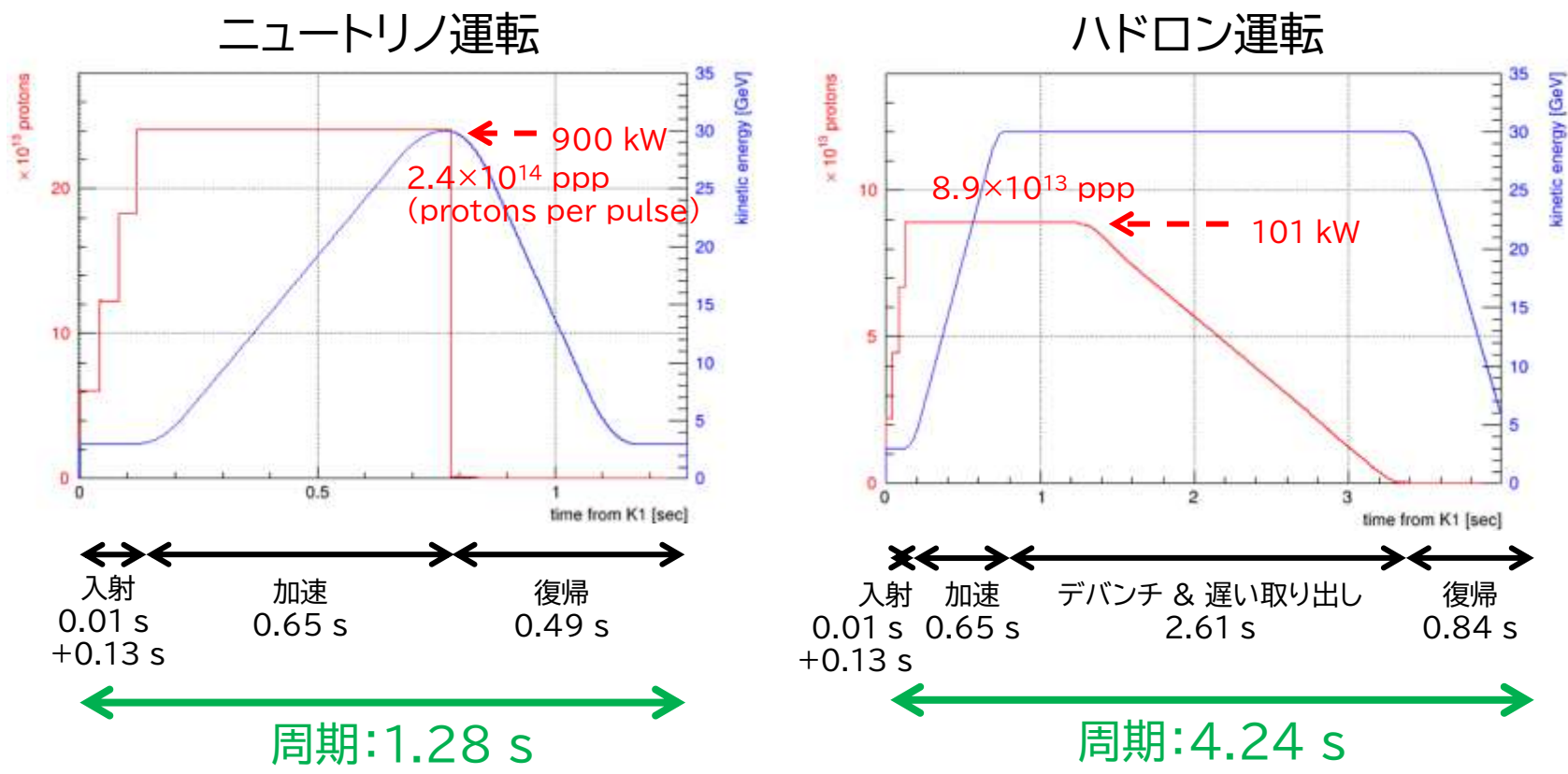
Beam Power (FX)
750 kW Design
→ 1.3 MW (Plan in 2028)

Beam Power (SX)
100 kW
> 150 kW (in near future)

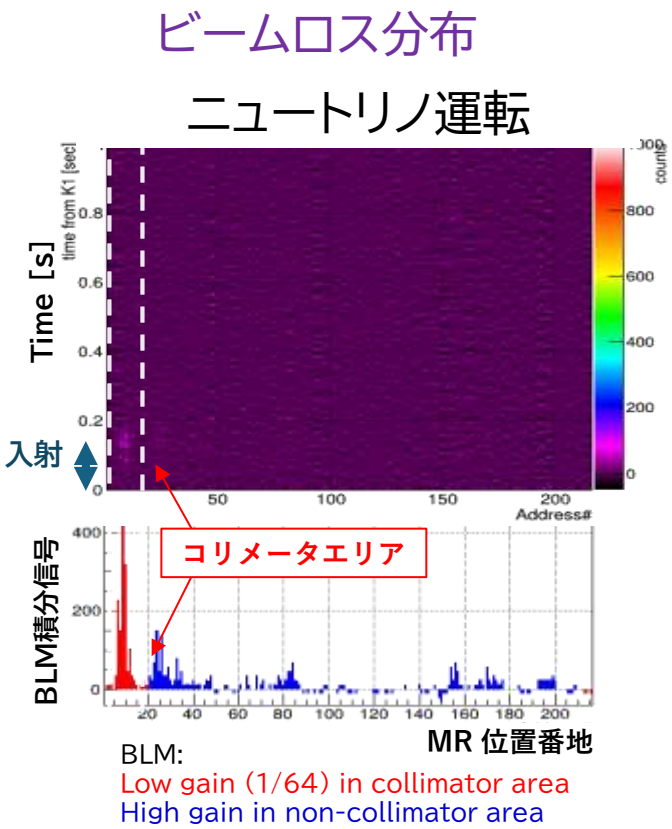


Physical Aperture	81π mm-mrad
Ring Collimator	$54\text{--}70\pi$ mmmrad
Transverse emittance	
At injection	54π mm-mrad
At extraction	10π mm-mrad (30 GeV)

赤:DCCTで測定した陽子数 青:電磁石・RF加速空胴のランピングパターン

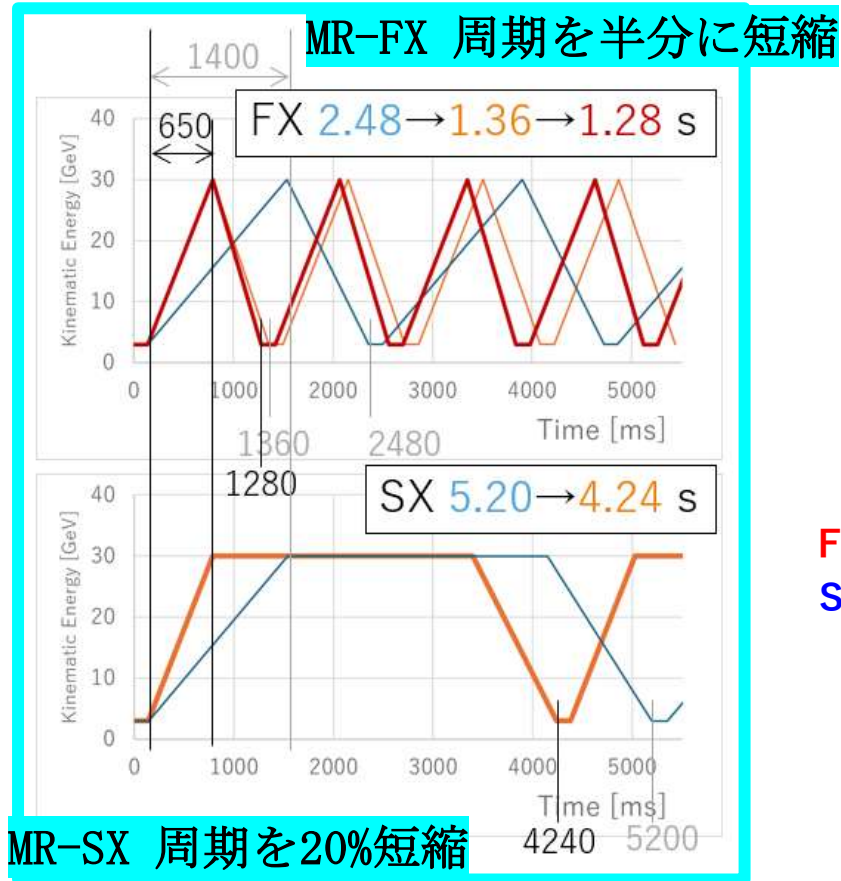


RCS (25 Hz運転)から2バンチずつ4回入射してリングに貯めてから加速。
加速するにあたり、電磁石とRF加速空胴はキッチリと同期させる。

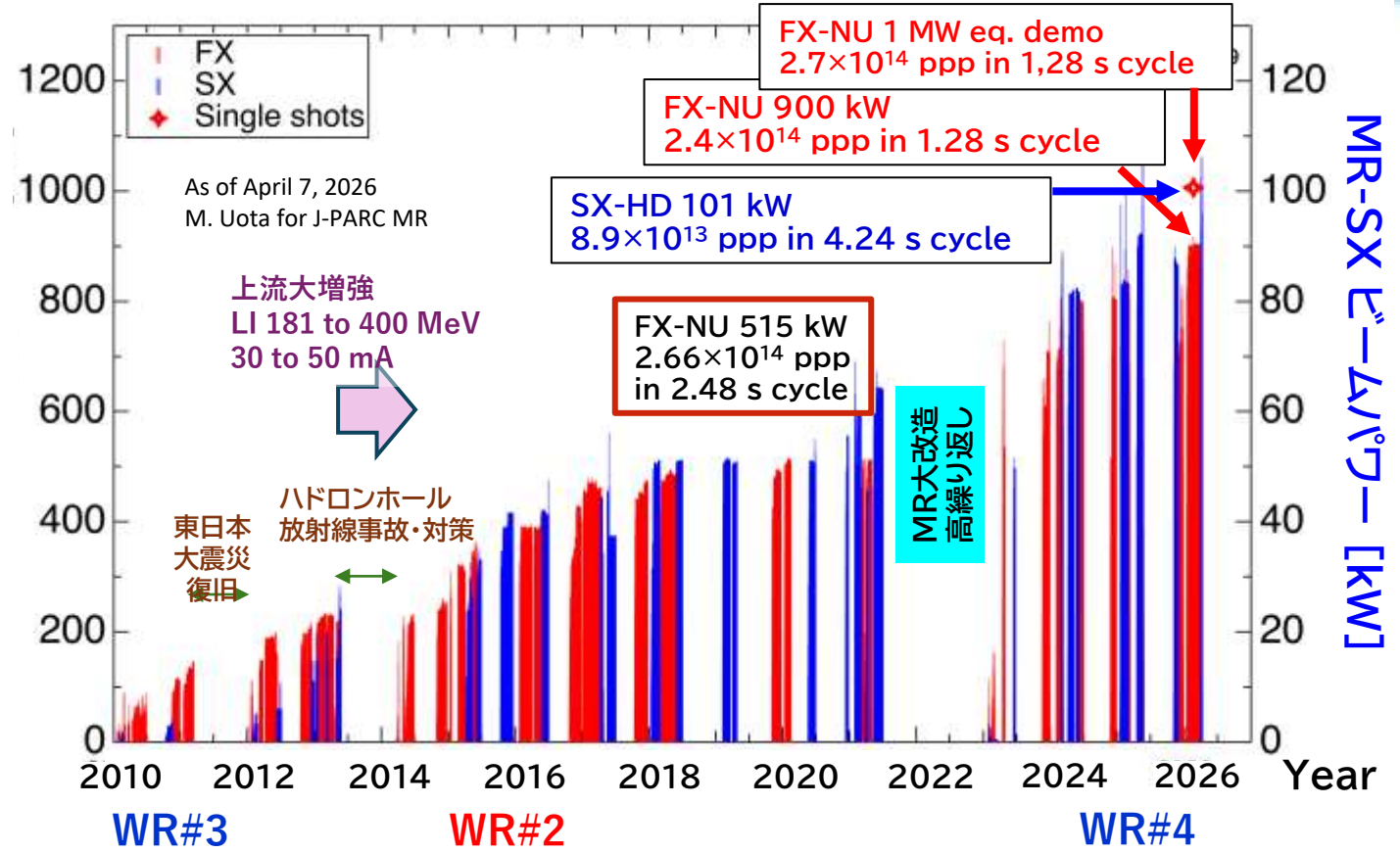


ビームロスは入射・加速初段で主に起きる(共鳴線との抵触)。
コリメータエリアで~98%ロスを回収し、他エリアの機器を保全。

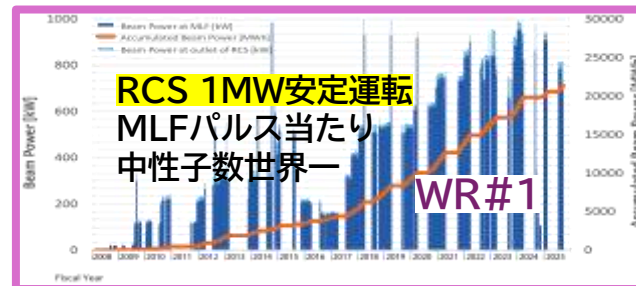
ビーム強度 $\propto$ パルス当たり陽子数
周期
 × ビームエネルギー



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

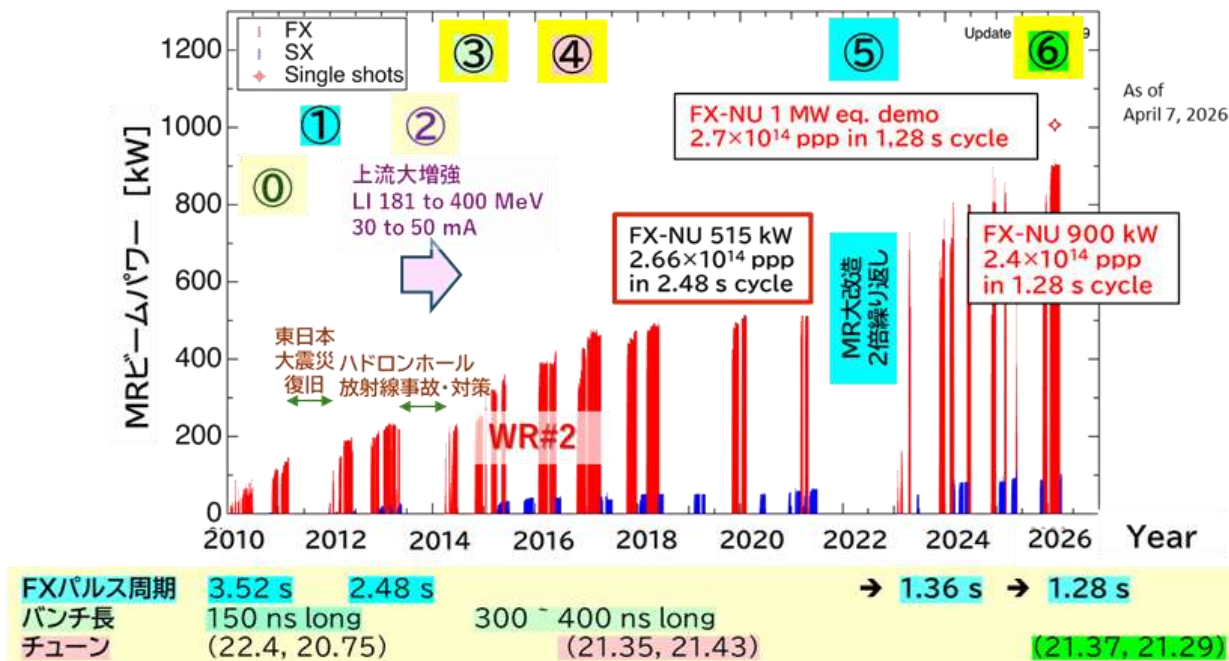
12

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

- 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。

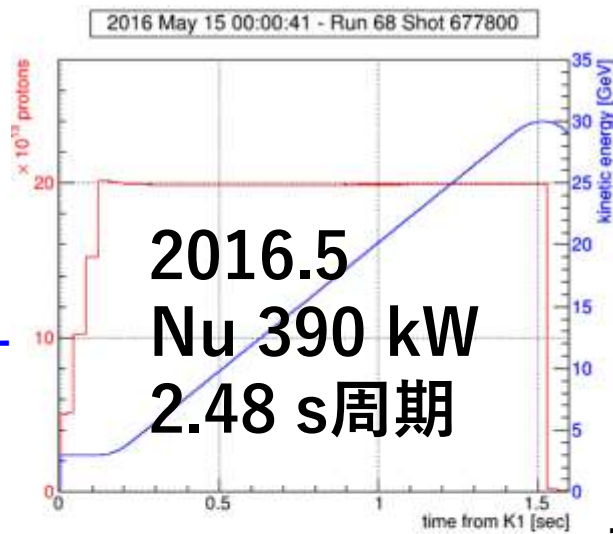


※ T2Kによる震災前のデータでの θ_{13} 論文、震災後のニュートリノ・反ニュートリノ振動比較実験企画は加速器メンバーのやる気を一挙に引き上げた。
③ スタディ時間の確保、NUも含めた光学変更はALL J-PARCで臨んだ。

R&D試行錯誤の一時的POT足踏みは、NUとの相互理解により合意された

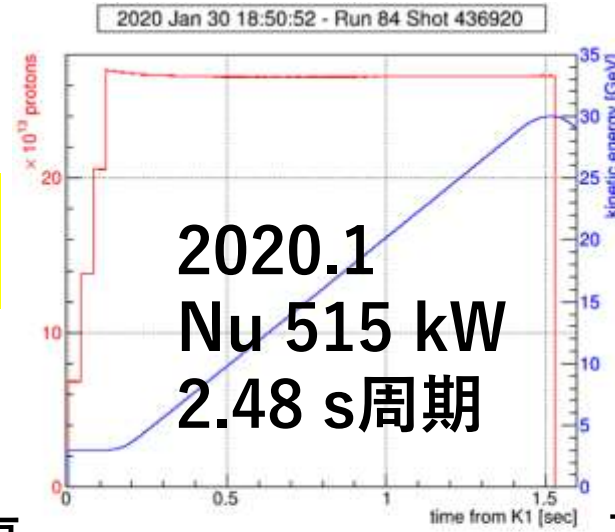
陽子数

エネルギー
パターン



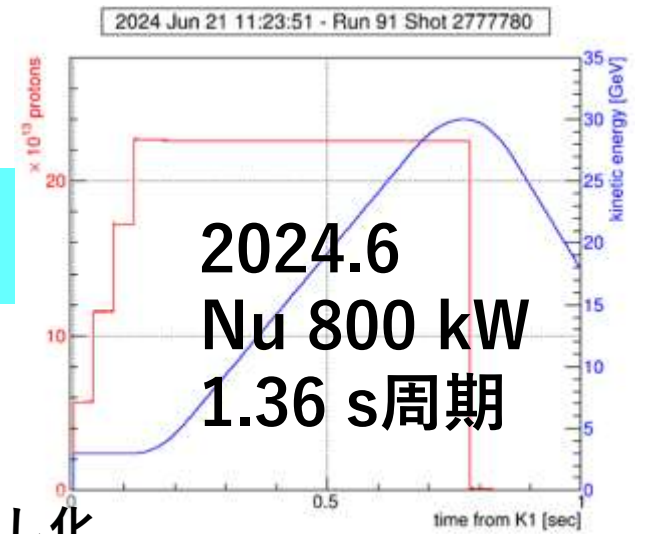
④

光学変更

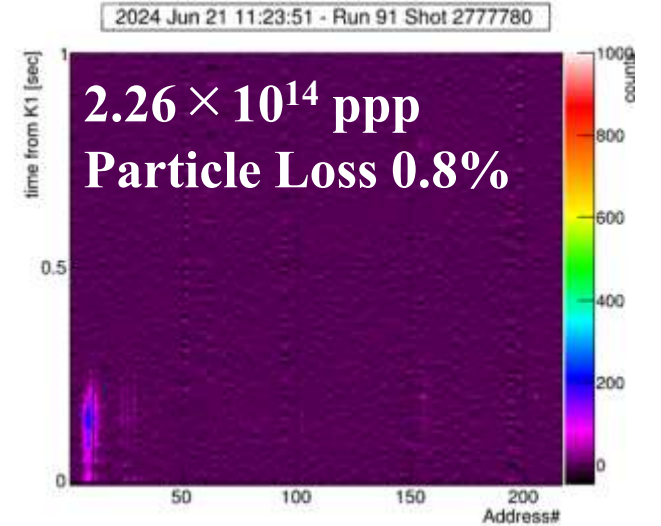
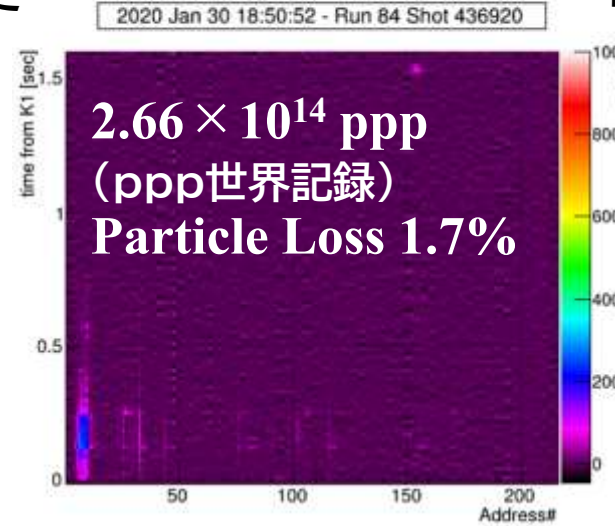
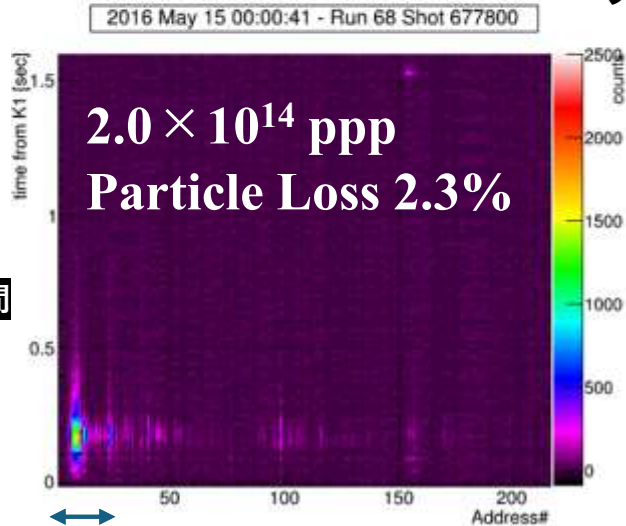


⑤

高繰り返し化



ビーム
ロス分布
縦軸 周回時間
横軸 MR位置



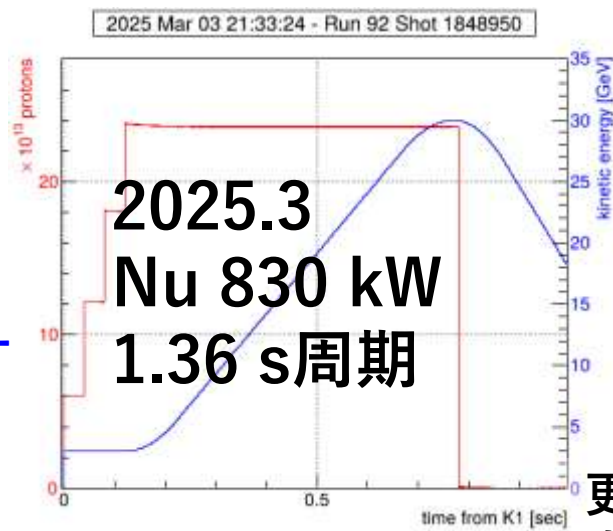
コリメータエリア
ゲイン1/8
(ロス局所化)

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

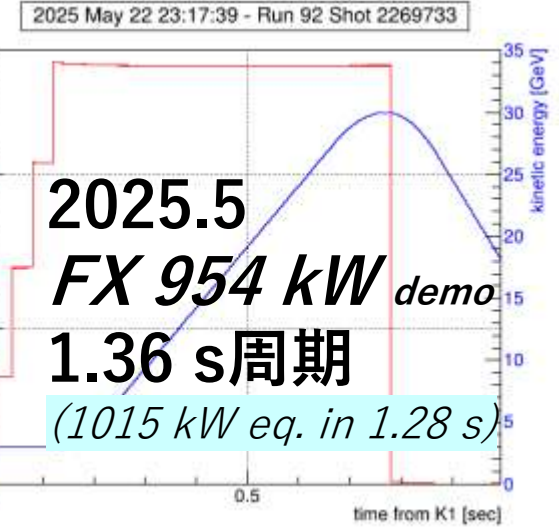
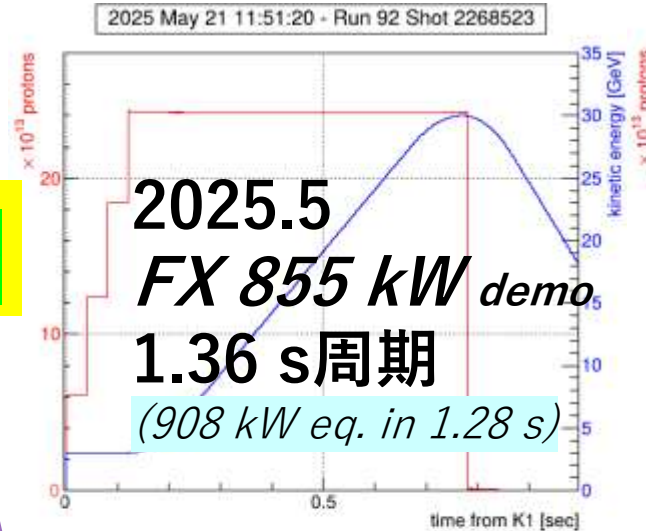
陽子数

エネルギー
パターン



⑥

更に
光学変更



⑤'

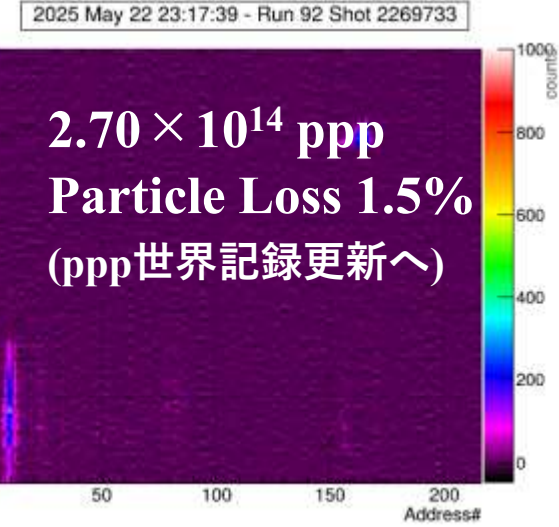
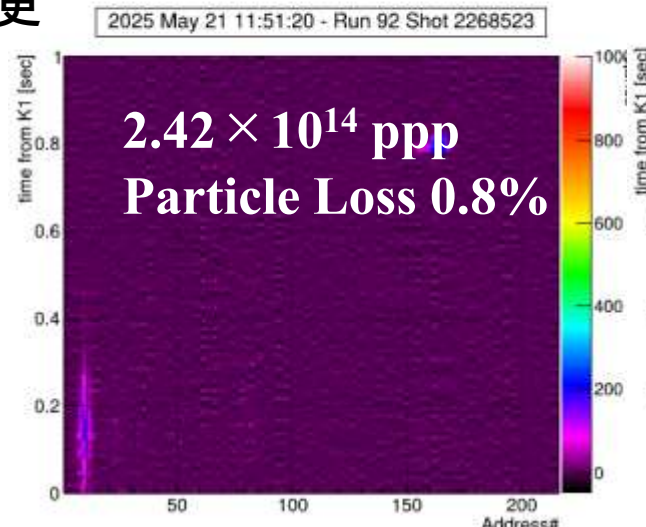
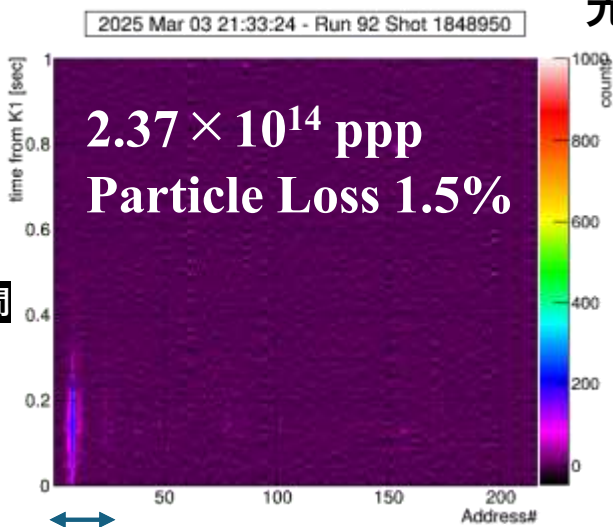
⑥'

高繰り返し化

現設備
1.36 sから
1.28 s周期へ
2025後期～
Tuneの変更

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)

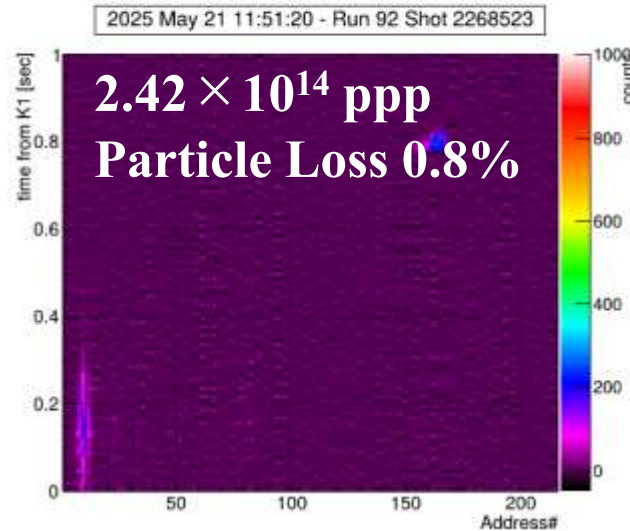
機能性追求 & ビーム光学開発を更に追求

MR-FX ビーム品質の変遷

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'

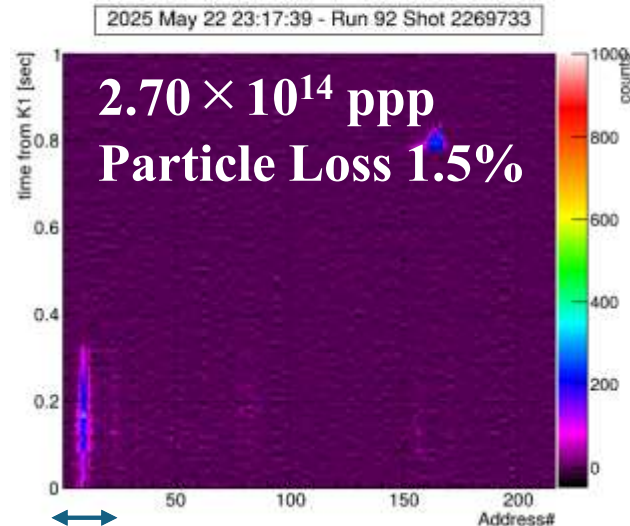
⑥'

高繰り返し化

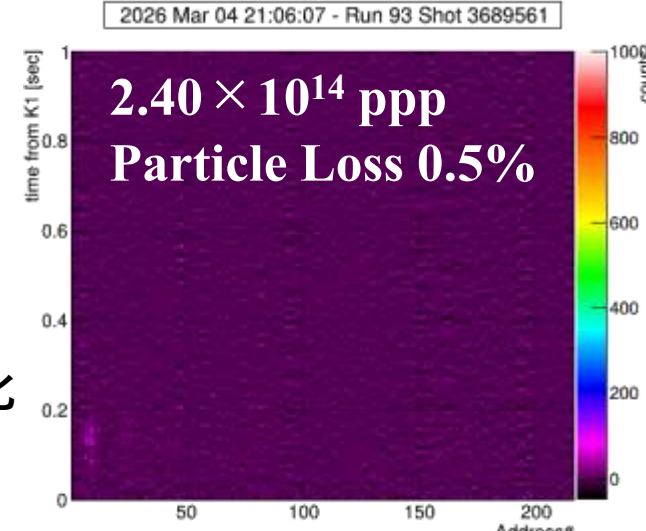
現設備
1.36 sから
1.28 s周期へ
2025後期～
Tuneの変更

更なる
設備増強で
1.16 s周期へ

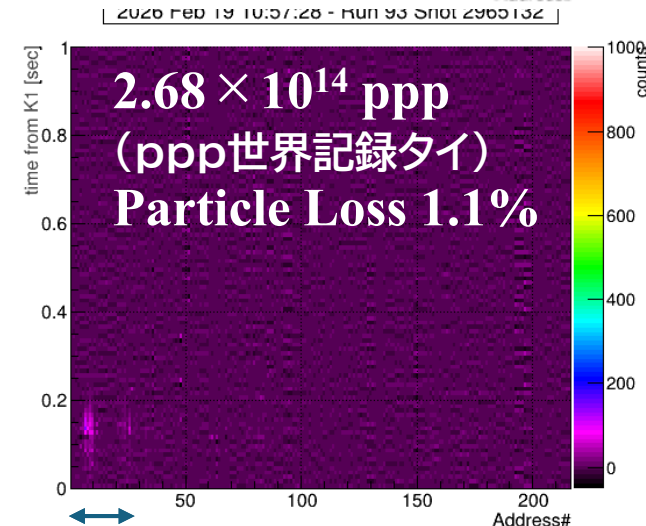
2025.5
FX 954 kW
demo
1.36 s cycle
(1015 kW eq. in 1.28 s)



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



2026.3
NU 900 kW
1.28 s cycle



2026.2
NU 1 MW
demo
1.28 s cycle

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

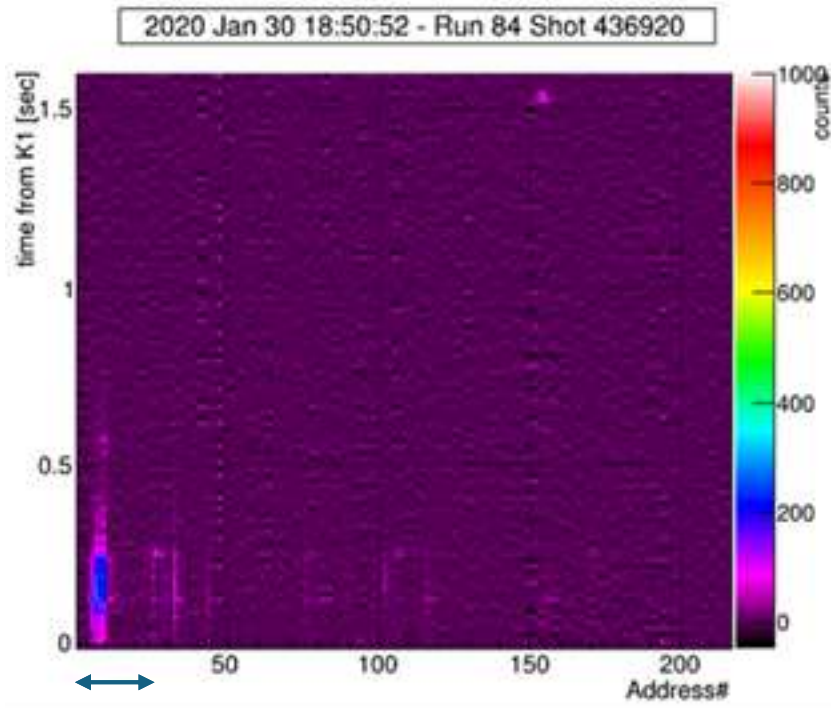
2020.1.30 NU 515 kW

2.66×10^{14} ppp

(ppp世界記録)

Particle Loss 1.7%

2.48 s周期



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

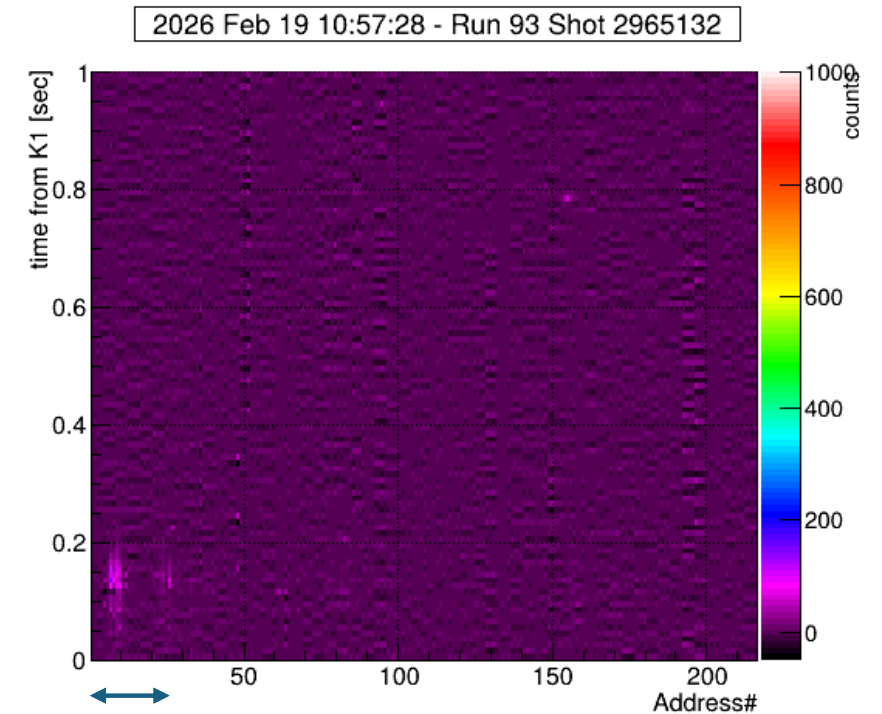
2026.2.19 NU 1 MW demo

2.68×10^{14} ppp

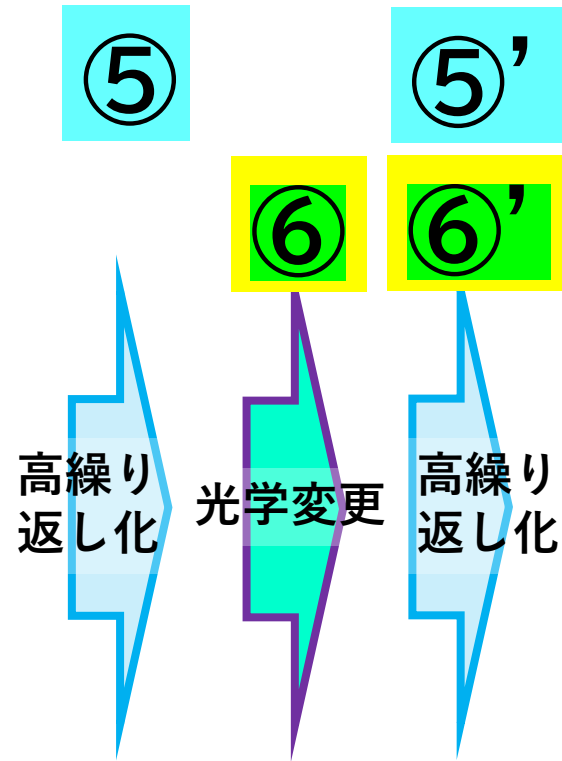
(ppp世界記録タイ)

Particle Loss 1.1%

1.28 s周期

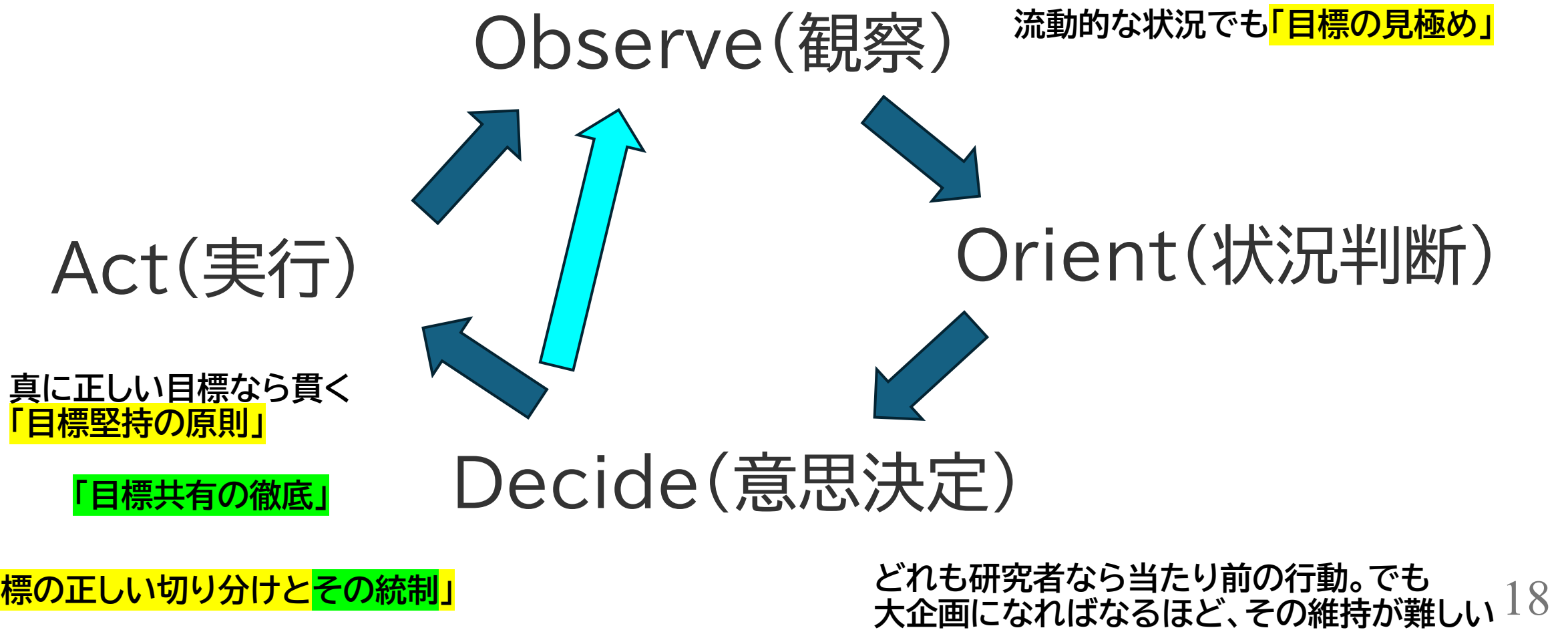


Gain 1/64
In Collimator Area
(Beam Loss localized)



「J-PARC加速器とT2Kの運転」

J-PARC加速器とT2Kの運転について、
加速器と実験側の関わり方や、運転の方針をどのように決めているか、
どうやってロスを減らしながら強度を上げてきたか



J-PARC中央制御室 (CCR)

Work space (Beam Tuning)

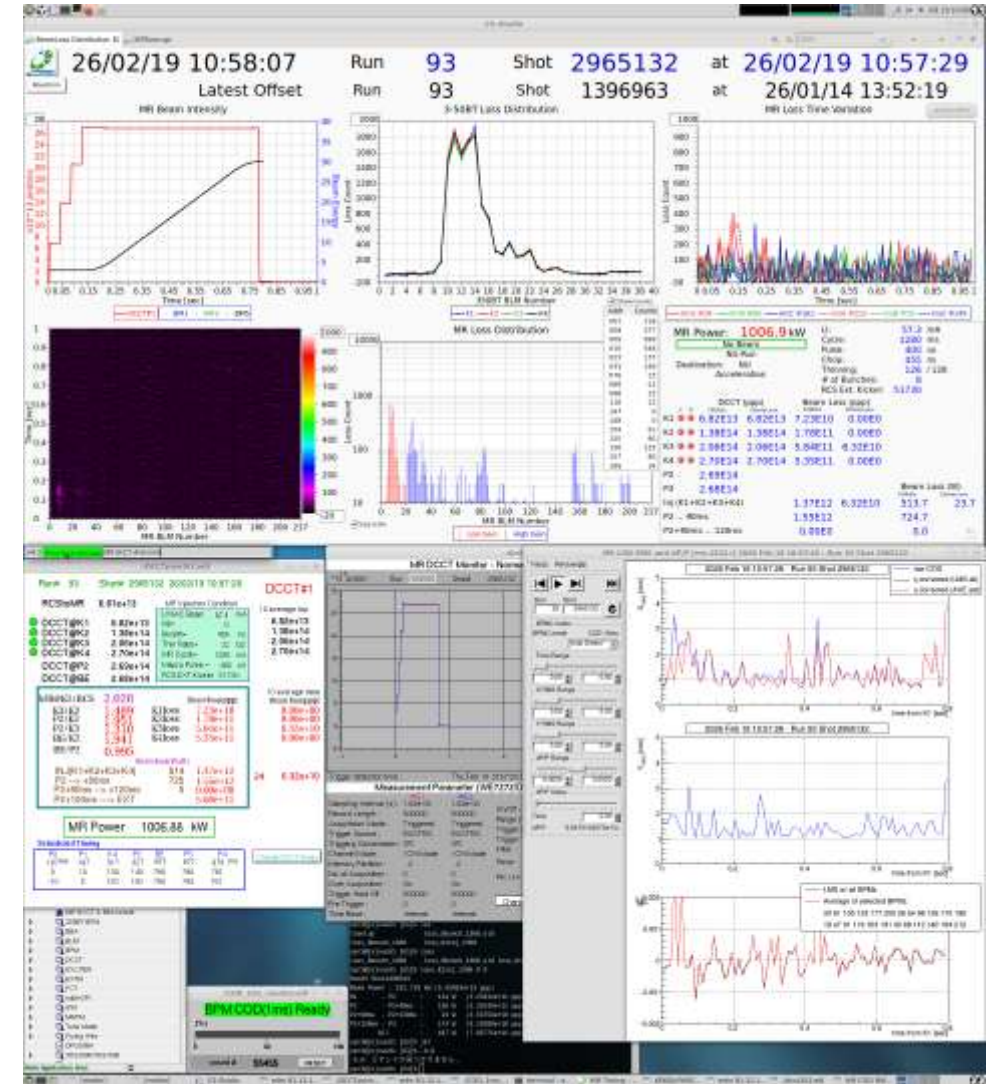
Beam intensity and loss

Beam profile measured at beam abort dump

Transverse beam orbit (Closed orbit) in the MR

Screenshot viewer

Beam orbit in the 3-50BT



「J-PARC加速器とT2Kの運転」

J-PARC加速器とT2Kの運転について、
加速器と実験側の関わり方や、運転の方針をどのように決めているか、
どうやってロスを減らしながら強度を上げてきたか

- 単純なアイデア・兆候でも有望なものを見逃さない
- シミュレーションや簡易評価で目途をつける
- Linac/RCS/3NBT/MR/NU/HD 一体となった ALL J-PARC体制を構築、
- **スタディ時間や開発環境を確保、**
- MR大強度化・安定条件確立を追求する。

Observe(観察)

Orient(状況判断)

Decide(意思決定)

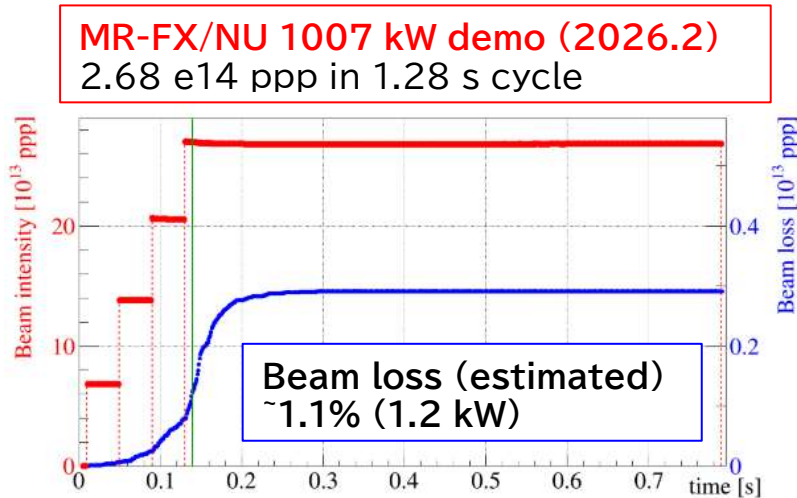
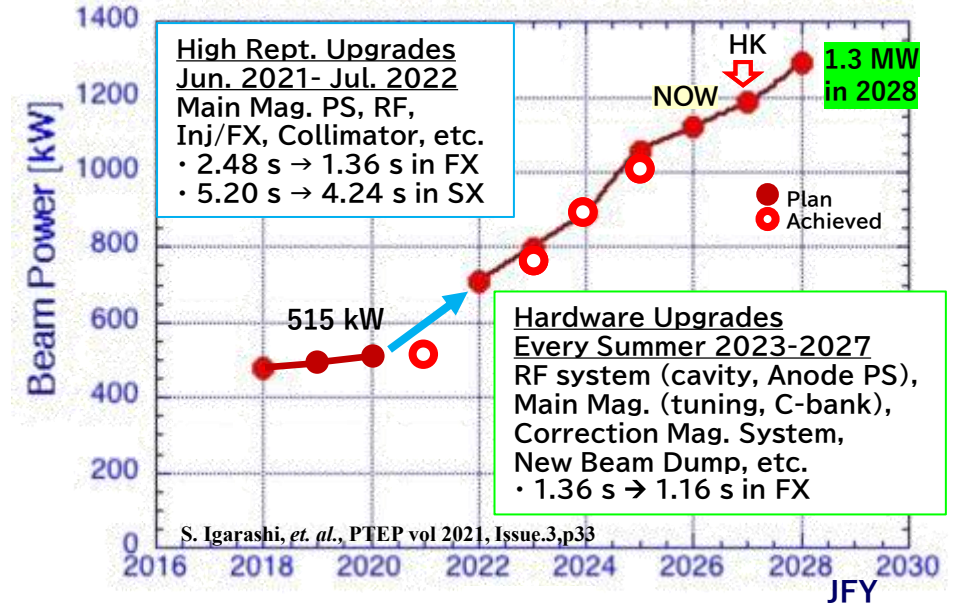
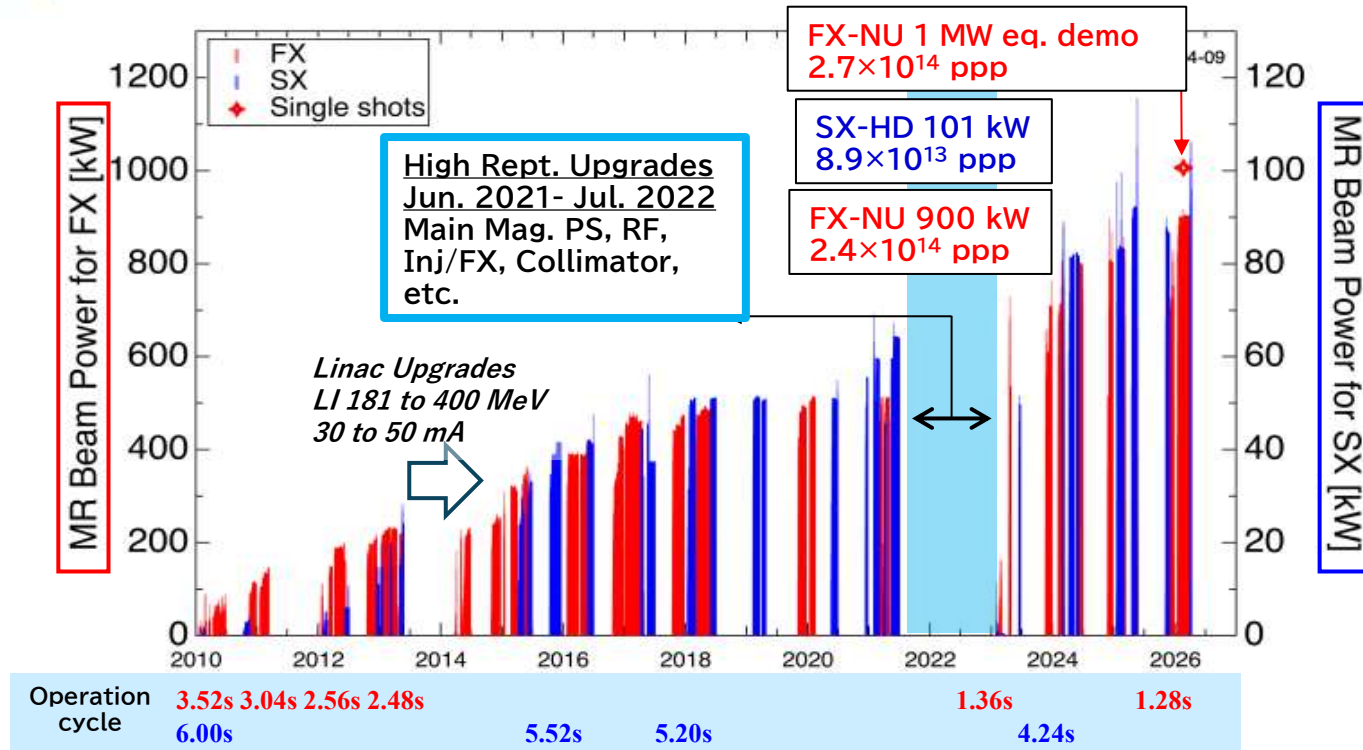
Act(実行)

皆で課題を乗り越えてきた数々の強烈な成功体験が、
現在も私の活動の基盤になっています。

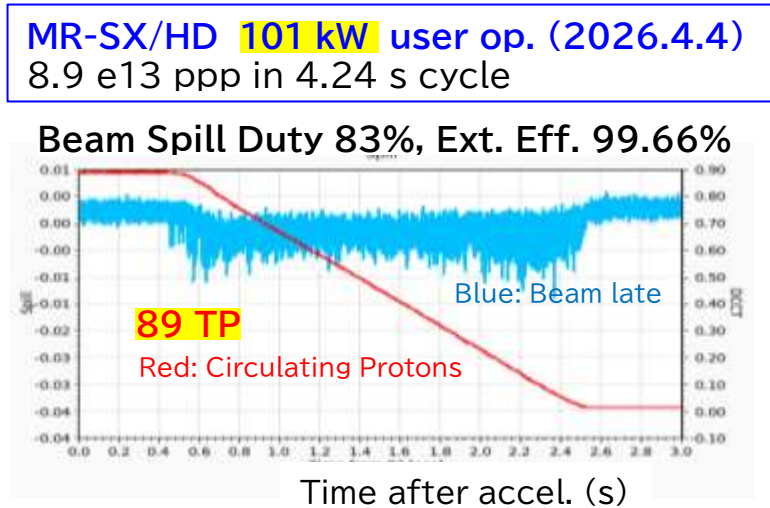
R&D試行錯誤の一時的POT足踏みは、NUとの相互理解により合意された

諸先輩からの厳しくとも暖かい励ましが実は大事

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

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、特別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>