

J-PARC主リングシンクロトロン (MR) 高繰り返し化改造後のビーム運転

佐藤洋一(KEK/J-PARC)、J-PARC主リング加速器グループ
Yoichi Sato* on behalf of the J-PARC Main Ring

日本加速器学会年会PASJ2023, WEOB4

日時： 2023年8月30日, 10:00-10:20

会場：日本大学理工学部船橋キャンパス

目次

- ✓ **J-PARC 主リング (Main Ring, MR)のビーム増強計画**
- ✓ **MR更新機器の初期故障と対応**
 - FX高磁場セプタム電磁石コイル
 - QDN主電磁石電源火災
- ✓ **MRビーム運転状況**
 - MR増強（2021 – 2022年）とビーム調整の要点
 - FX/SX調整結果
- ✓ **まとめ**

Japan Proton Accelerator Research Complex

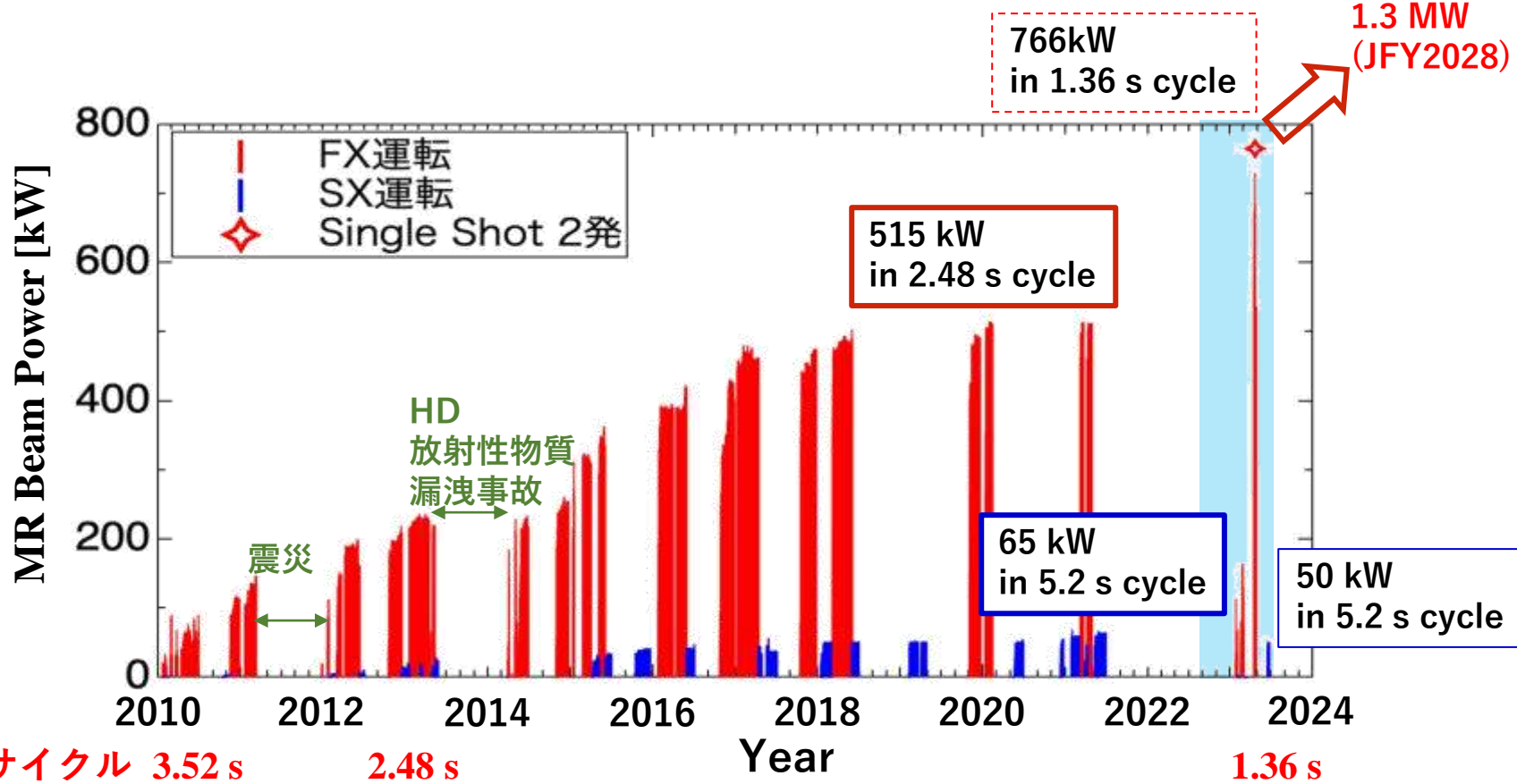
- 大強度陽子加速器施設
世界最高クラスの二次粒子生成・利用
- 日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の共同運営
- 茨城県東海村 (0.65 million m²)

- リニアック (400 MeV)
- Rapid Cycling Synchrotron (RCS) (3 GeV)
 - 物質・生命科学実験室
Materials and Life Science
Experimental Facility (MLF)

- 主リングシンクロトロン (MR) (30 GeV)
 - ハドロン実験施設
 - ニュートリノ実験施設



J-PARC MRビーム強度の推移



ニュートリノ実験施設
グラフアイト標的
周期2.48 s 強度515 kW
速い取り出しシステム
パルスあたり陽子数
2.68E14 (世界記録)

ハドロン実験施設
金標的
周期5.2 s 強度65 kW
遅い取り出しシステム
遅い取り出し効率99.5%
(世界記録)

MRでは2010年の利用運転開始以来、
運転サイクル短縮、空間電荷効果緩和、光学系改良、
それらに伴うハードウェア増強
を重ねながらビーム強度増強を進めてきた。

速い取り出しモードでは熾烈な国際競争下のT2K実験にビーム供給中。

国際競争のポイント：

- 検出器性能
- 統計量 = 加速器性能**

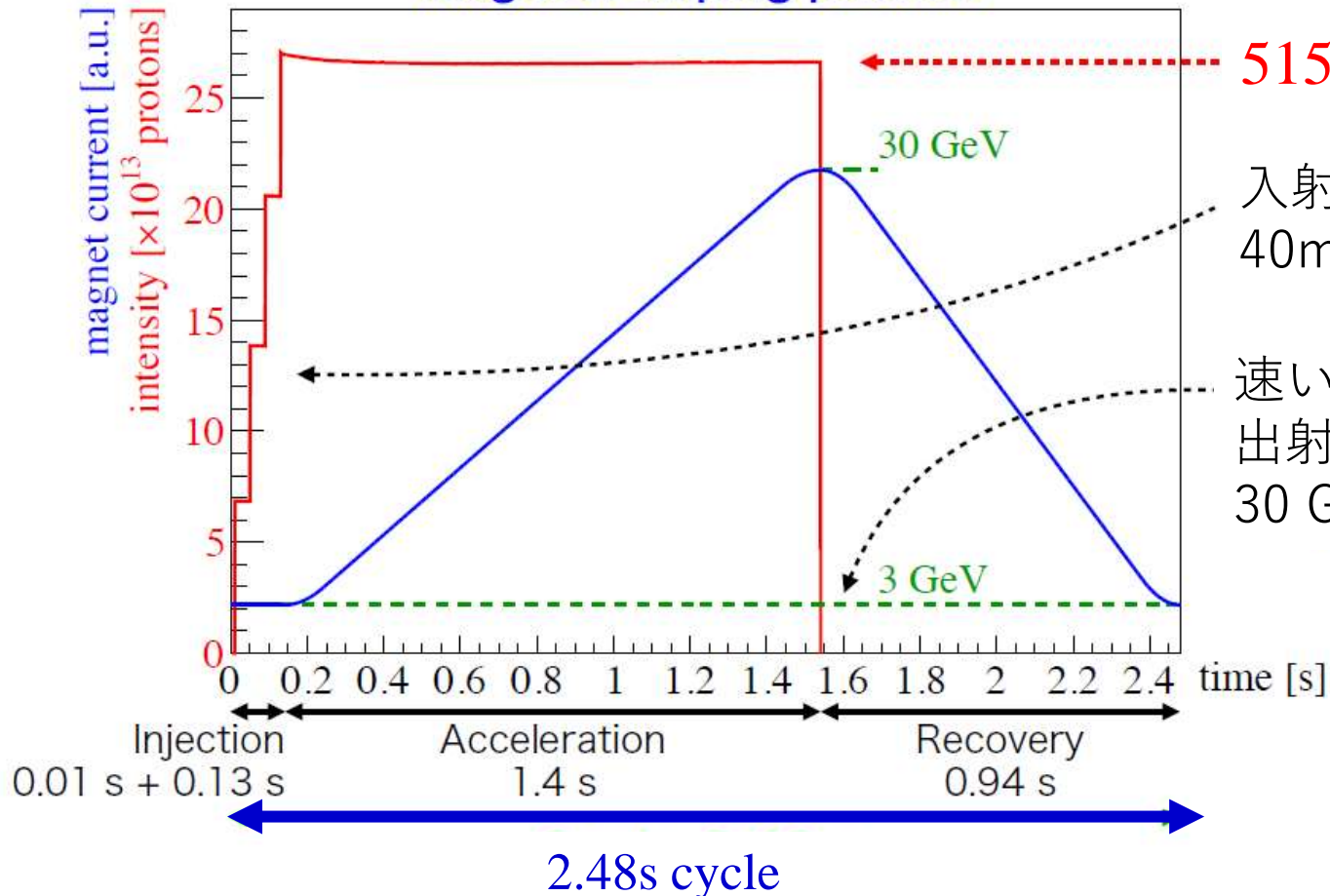
FX運転目標 1.3 MW (2028~)

MR速い取り出し運転モード (2021)

Beam Power \propto Energy (30GeV) \times $1/T_{\text{rep}}$ \times # of protons.

JFY2021	515 kW	2.48 s	2.66E14 ppp
---------	--------	--------	-------------

Beam intensity by 2021 (measured by DCCT)
Magnet ramping pattern



515 kW (2.66E14 ppp in 2.48s cycle)

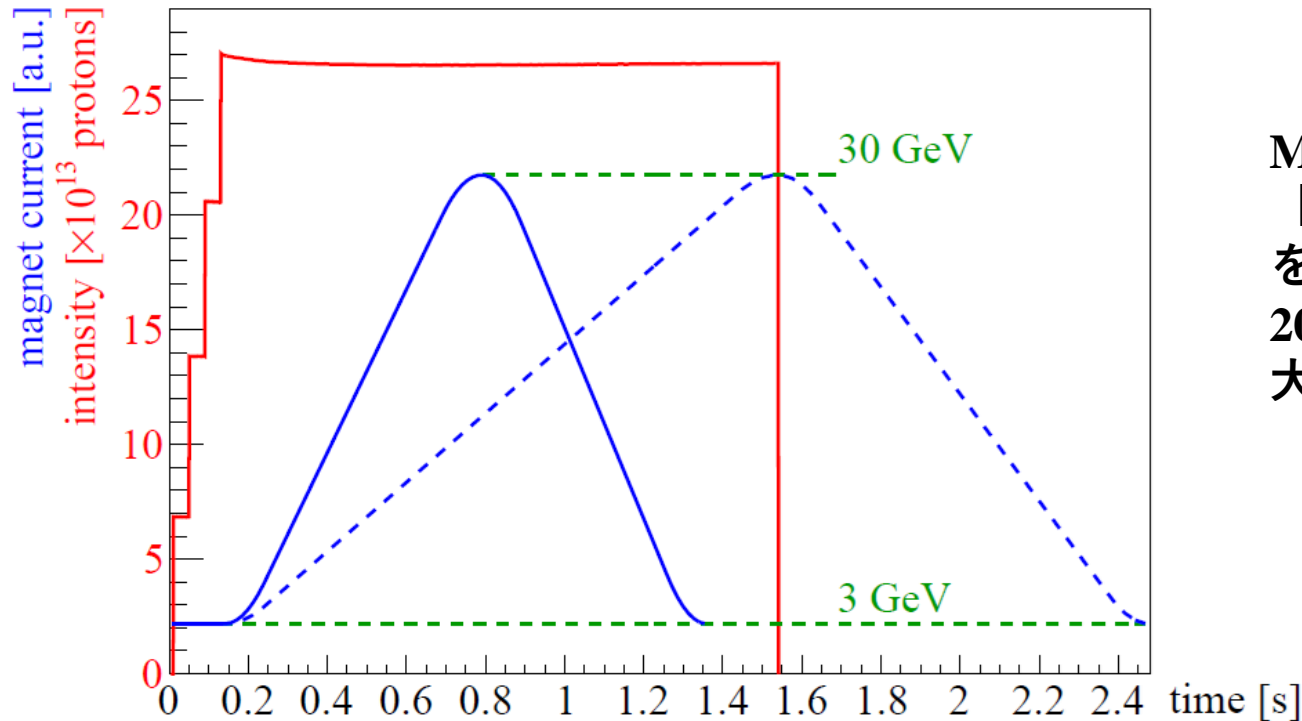
入射プロセス
40ms毎に2バンチずつ4回入射

速い取り出し (fast extraction (FX))
出射プロセス
30 GeV到達後1ターンで取り出し

MR速い取り出し運転モード (202*~)

Beam Power \propto Energy (30GeV) \times $1/T_{rep}$ \times # of protons.

JFY2021	515 kW	2.48 s	2.66E14 ppp
JFY 202*	> 940 kW	<1.36 s	2.66E14 ppp



MRに改造を施し
「入射・加速・取り出し」サイクル短縮
をすれば
2021年までのビーム光学をベースで
大幅な強度上げが出来る。

\longleftrightarrow
< 1.36s cycle

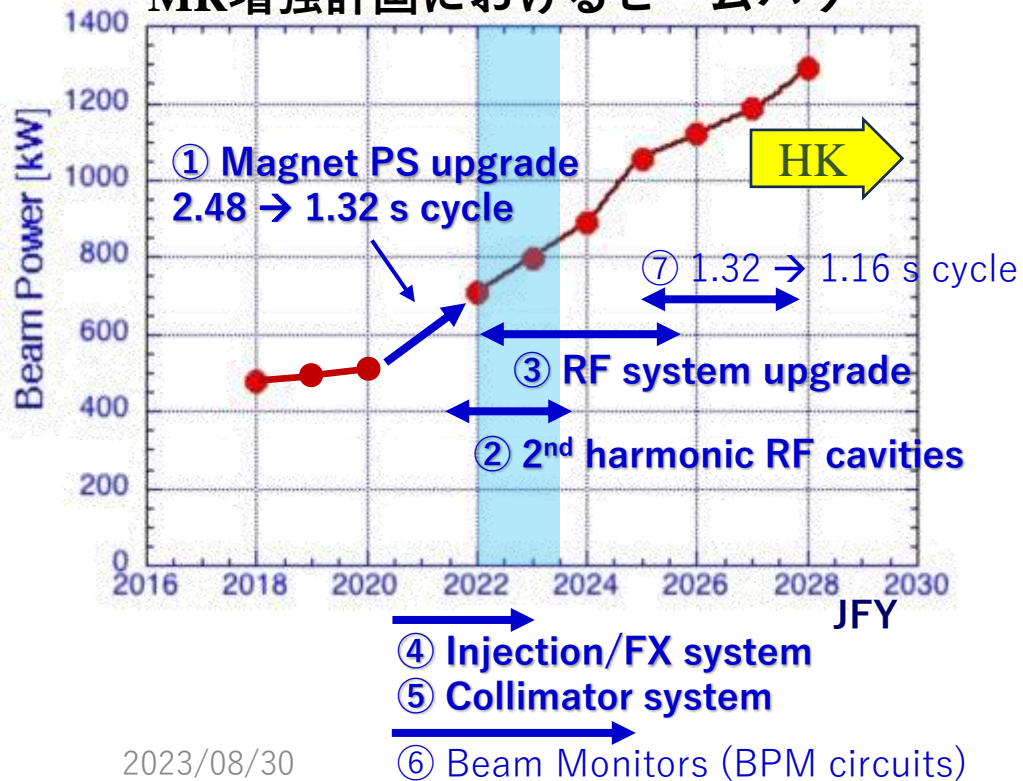
J-PARC MRのビーム増強計画

Beam Power \propto Energy (30GeV) \times $1/T_{rep}$ \times # of protons.

S. Igarashi, *et. al.*,
PTEP vol 2021,
Issue.3,p33

JFY2021	515 kW	2.48 s	2.66E14 ppp
2023 春	766 kW	1.36 s	2.17E14 ppp
JFY 2028	1.3 MW	1.16 s	3.3E14 ppp

MR増強計画におけるビームパワー



MRビーム増強シナリオ

「入射・加速・取り出し」サイクル短縮

\rightarrow ハードウェアの大幅な改造 (2021~)

まずは 2.48 s \rightarrow 1.36 s へサイクル短縮

まずはビーム光学をキープ > 750 kW (2023~)

\rightarrow ビームロス比を変えずに強度上げ

その後、数年かけて

- 更なるサイクル短縮
- 新ビーム光学開発での周回陽子数増

JFY2028に1.3 MWを目指す。

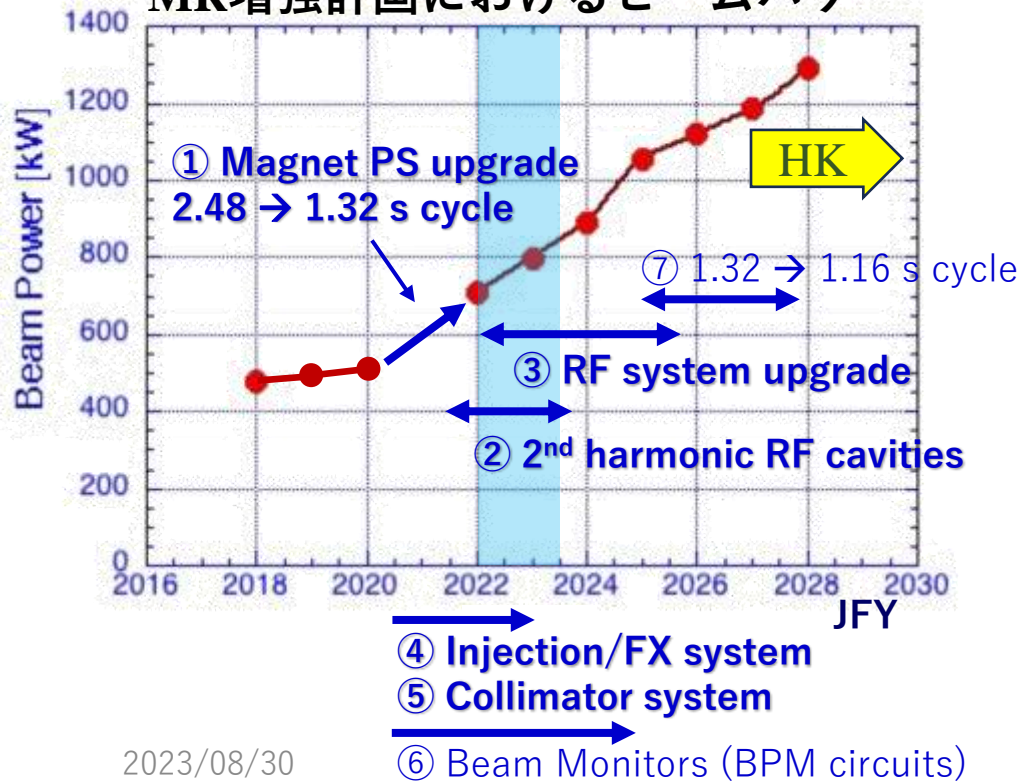
J-PARC MRのビーム増強計画

Beam Power \propto Energy (30GeV) \times $1/T_{rep}$ \times # of protons.

S. Igarashi, *et. al.*,
PTEP vol 2021,
Issue.3,p33

JFY2021	515 kW	2.48 s	2.66E14 ppp
2023 春	766 kW	1.36 s	2.17E14 ppp
JFY 2028	1.3 MW	1.16 s	3.3E14 ppp

MR増強計画におけるビームパワー



- MR 2021 – 2022年度 ハードウェア増強
「入射・加速・取り出し」サイクルの短縮
- ①主電磁石電源増強
 - ②加速空洞増設
 - ③加速システム増強
 - ④入出射システム増強
 - ⑤コリメータシステム増設

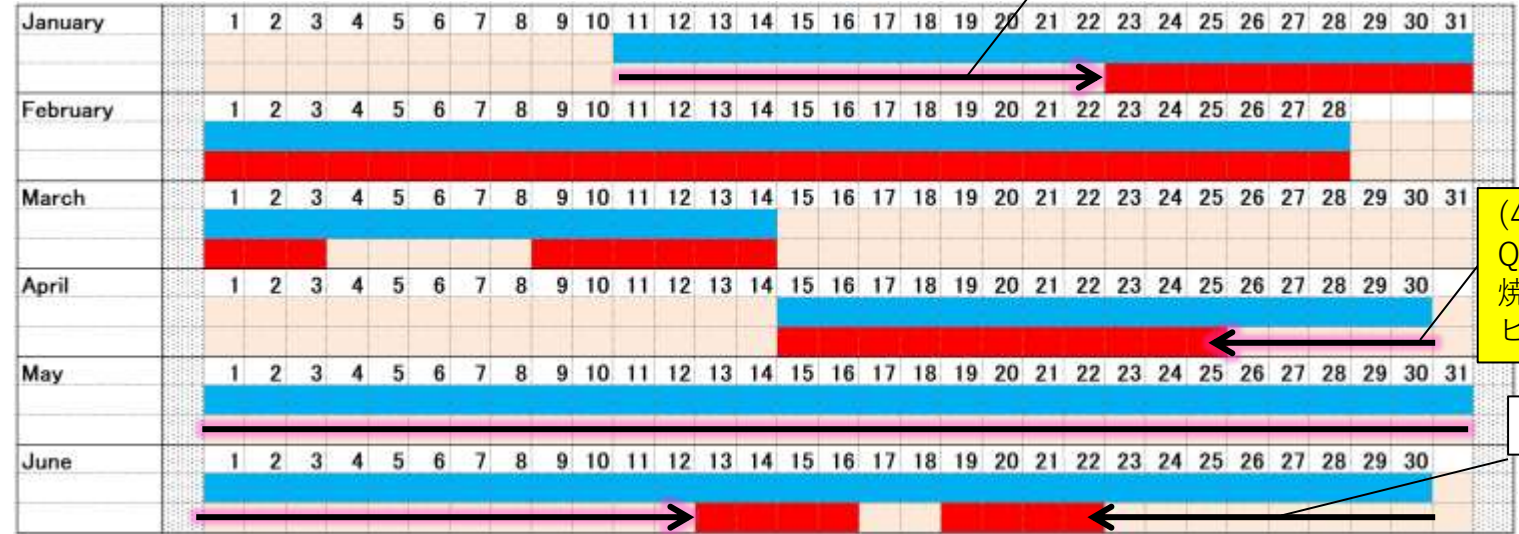
目次

- ✓ J-PARC 主リング (Main Ring, MR)のビーム増強計画
- ✓ **MR更新機器の初期故障と対応**
 - FX高磁場セプタム電磁石コイル
 - QDN主電磁石電源火災
- ✓ MRビーム運転状況
 - MR増強（2021 – 2022年）とビーム調整の要点
 - FX/SX調整結果
- ✓ まとめ

MR更新機器の初期故障

更新機器の初期運用において複数の故障が発生。その都度対策を行いビーム調整を進めた。

■ ビーム運転予定
■ 実際のビーム運転



主電磁石電源

- (1) BM-PSコンタクター故障
- (2) ヒューズ溶断
- (3) IGBTユニット故障
- (4) QDN-PS初充電回路トランス焼損

Apr.25, 2023

2023年1月からのビーム運転スケジュールに大きく影響

FX高磁場セプタム電磁石

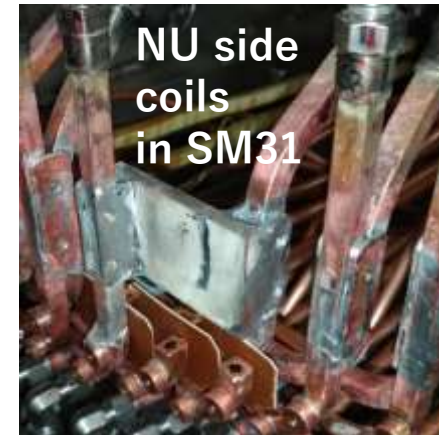
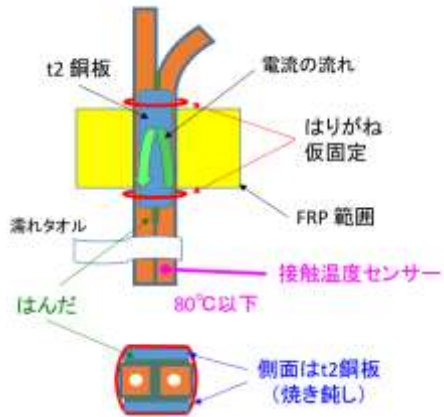
- (5) コイル故障

Jul. 28, 2021, Dec. 23, 2022

J-PARC FX高磁場セプタム電磁石の故障2022/12/23・補修

✓ FX高磁場セプタム電磁石コイル故障後、コイルを応急処置をして復旧

- 故障はコイルのターン形成部のはんだ付け不良に由来。通電時にホロコンが溶融し、水漏れ。
- SM32 → 損傷したNU側コイルは再製作して交換
- SM31 → コイル損傷部をバイパス
- SM30, 31 and 32 → はんだ付け補強 + 2 mm厚銅板でサポート → 機械的強度と電氣的接触を強化
- 安全のため、電圧と放電の監視システムを追加



応急処置・復旧
2023年1月から
安定的に運用中

岩田, 他 PASJ2023, WEP22

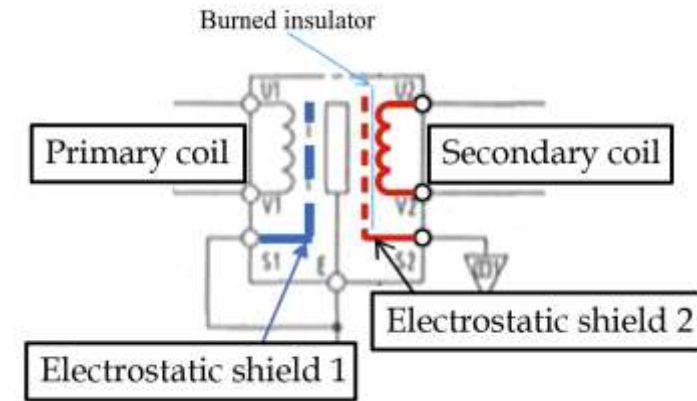
✓ 長期対策としてはコイル再製作・交換

- SM32 NU側コイル → 再製作して交換済
- SM32 アポート側コイル → 2023夏に交換
- SM31 and 30コイル → 2025夏までに再製作・交換予定

- ビーム調整中に高繰り返し用新QDN電磁石電源が、トランス温度高MPS (Machine Protection System)発報で自動停止 (17:09)
- KEK職員が該当トランスで数cmの炎を目視、消火器で初期消火 (17:15)
- 119通報 (17:23)、公設消防により火災判定・鎮火確認 (17:58)



焼損トランスの分解調査の結果、
2次巻線と2次静電シールド間の絶縁材が大きく損傷。他の部品は健全。

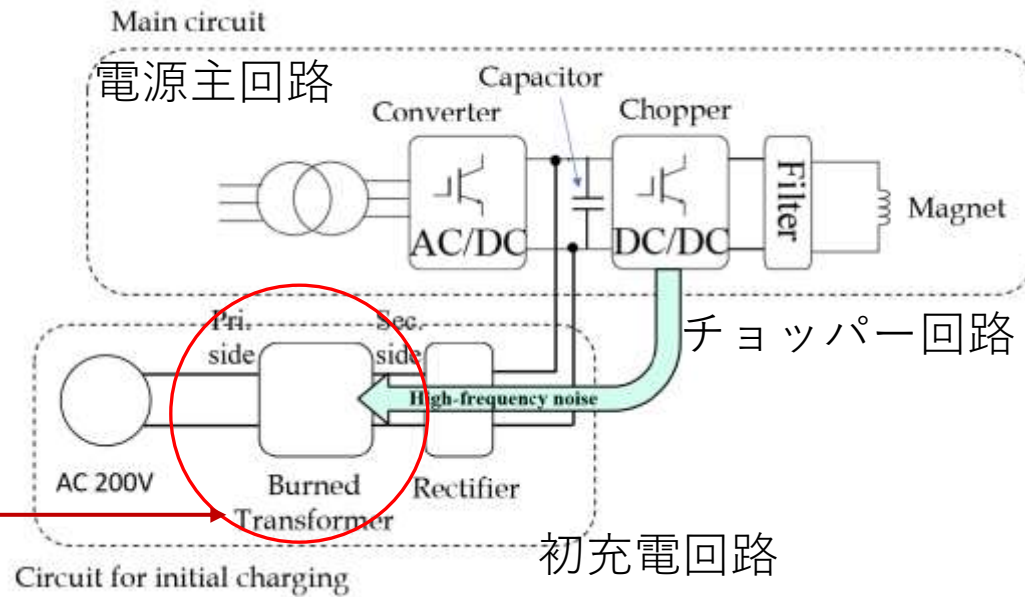


→ 2次巻線と静電シールド間でコロナ放電による絶縁劣化が徐々に進行、使用開始から約1年で火花放電に至り、絶縁材料に引火して焼損したと考えられた。

- ビーム調整中に高繰り返し用新QDN電磁石電源が、トランス温度高MPS (Machine Protection System)発報で自動停止 (17:09)
- KEK職員が該当トランスで数cmの炎を目視、消火器で初期消火 (17:15)
- 119通報 (17:23)、公設消防により火災判定・鎮火確認 (17:58)



焼損
トランス

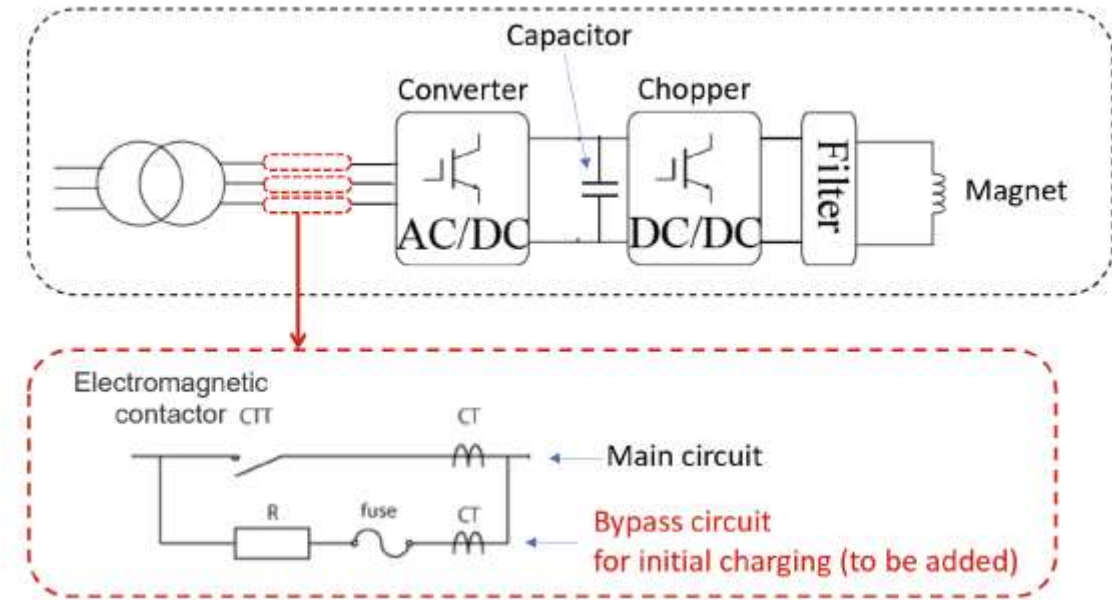


チョッパー回路から初充電回路のトランスに回り込む高周波ノイズの影響
トランスの2次巻線と静電シールド間で**コロナ放電による絶縁劣化**が進行、焼損。
設計における高周波ノイズ影響への配慮が不十分
→ **MLFビーム停止19日間、MRビーム停止49日間**

再発防止策：

トランスを使用しない初期充電方式に変更。
主回路と並列に初期充電用のバイパス回路を追加した。

- 電源起動時、主回路のコンタクタが開いているときはバイパス回路を通して初期充電を行う。
- 初期充電終了後、主回路のコンタクタを閉じて通電する。



初充電回路

電磁開閉器、抵抗、ヒューズ、電流検出器で構成

初期充電方法の変更完了後、動作試験を行い、健全性、安全性を確認した。
同型の別電源 (QFN) についても同様の対策を行った。
復旧後、電源は安定的に動作し、トラブルの発生はない。

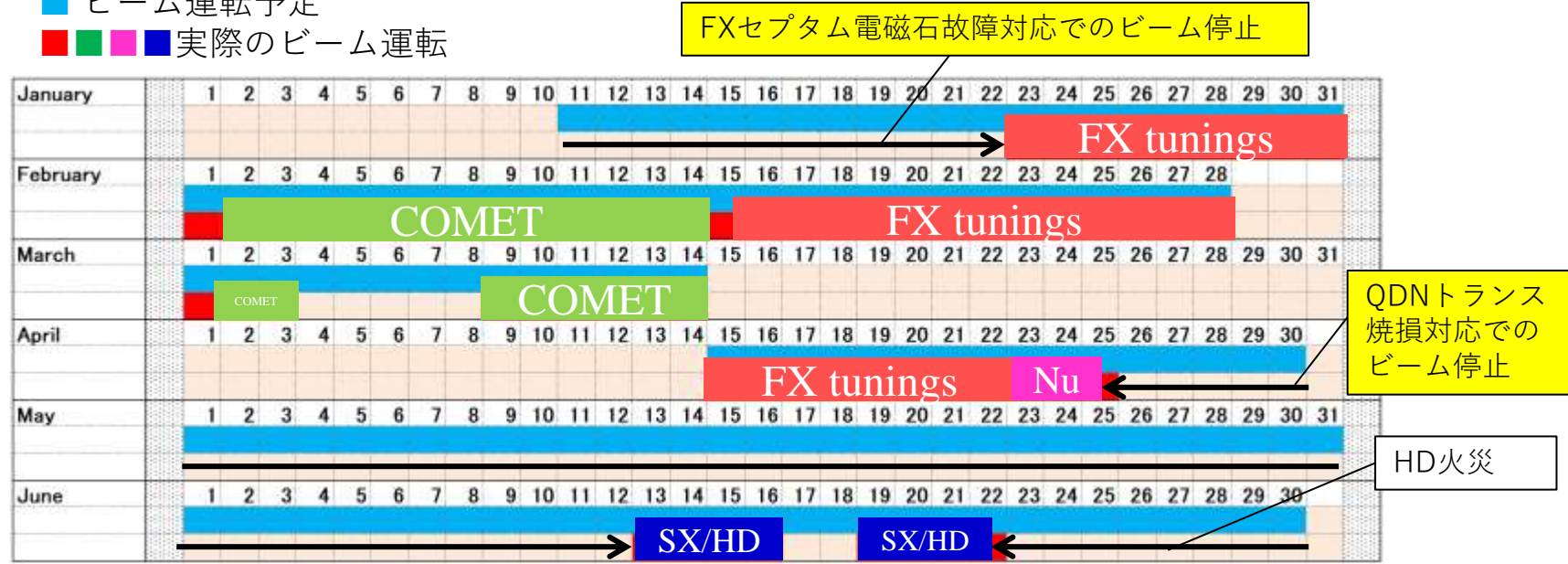
目次

- ✓ J-PARC 主リング (Main Ring, MR)のビーム増強計画
- ✓ MR更新機器の初期故障と対応
 - FX高磁場セプタム電磁石コイル
 - QDN主電磁石電源火災
- ✓ **MRビーム運転状況**
 - MR増強（2021 – 2022年）とビーム調整の要点
 - FX/SX調整結果
- ✓ まとめ

MRビーム運転状況 (2023年1月~)

更新機器の初期運用において複数の故障が発生。その都度対策を行いビーム調整を進めた。

■ ビーム運転予定
 ■ ■ ■ ■ 実際のビーム運転



- **FX調整 (30 GeVパターン 1.36 s周期)** → 766 kW eq. ビーム試験成功
- **Nu調整運転 & 真空焼き出し (1.36 s周期)** → 4月に2日間実施 Nu側に535 kW供給
- **SX/HD 8GeV 調整 & COMET実験 (4.8 s × 2 周期)**
 → 取り出し効率再現 (99%) , Spill duty改善 ~76% (62% 2021年度)
- **SX/HD 30 GeV 調整運転 (5.2 s 周期)**
 → 1週間実施。HD側に50 kWを供給、取り出し効率 99.5%を再現

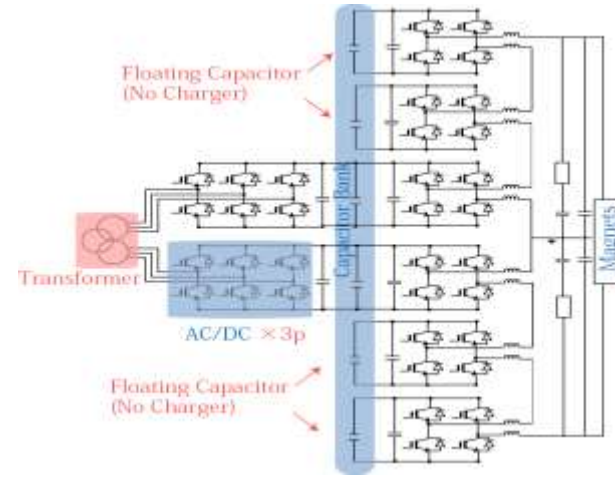
MR 2021-2022増強とビーム調整の要点

①主電磁石電源増強

Y. Morita *et. al.*, WEPM082, IPAC'23

高繰り返し化のため最大電圧～2倍

- 新電源 に入れ替え
 - 6 BM-PSs, 4 QM-PSs, 2 SM-PSs
- 元電源の転用
 - 7 QM-PSs → 12 QM-PSs (2 + ペア5組)
- 全主電磁石電源を再配線



偏向電磁石新電源 (BM-PS)



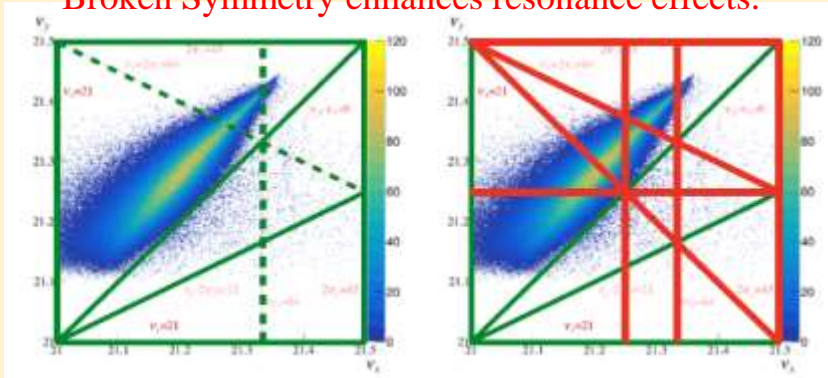
交流系統からの電力変動を抑制
エネルギー回生システム採用

MR光学系の3回対称性の維持調整が必須

T. Yasui, *et. al.*, Nufact 2022

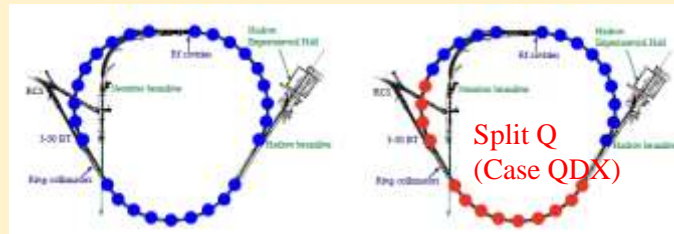
T. Yasui for MR, TUXG1, IPAC'23

Broken Symmetry enhances resonance effects.



2023/08/30

四極電磁石電源の一部は
非対称配線に変更



ペアバランス調整

アーク部の72台の主偏向電磁石
は6台 BM電源で運用

$$\Delta x = \eta_x \frac{\Delta B}{B}, \quad |\Delta K_1| = |K_2 \Delta x|$$

↓ dispersion
↓ sext. field

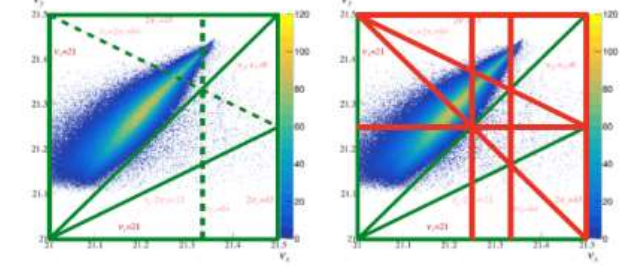
新電源でバランス再調整

MR3回対称性の光学調整 I

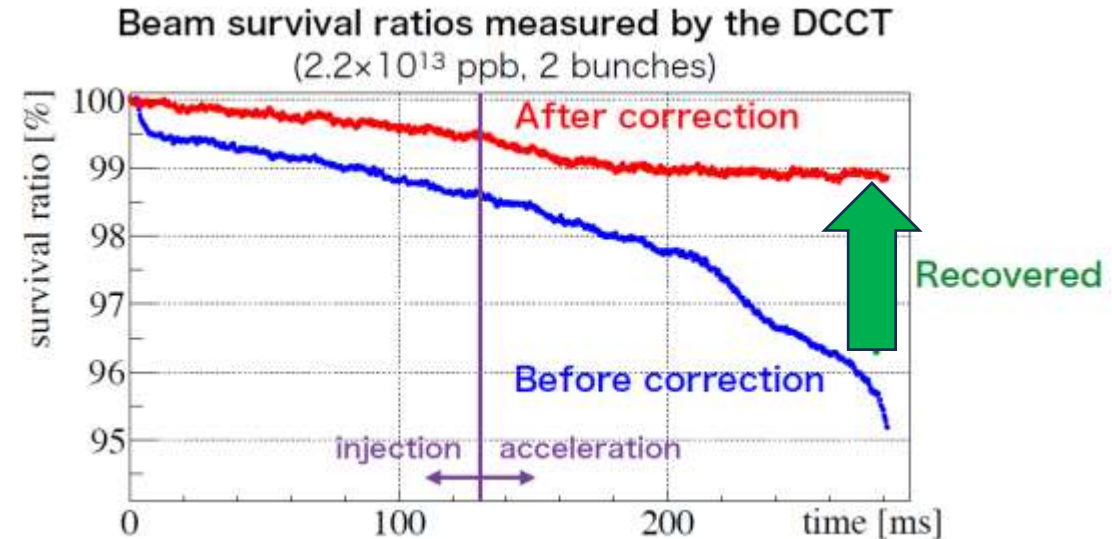
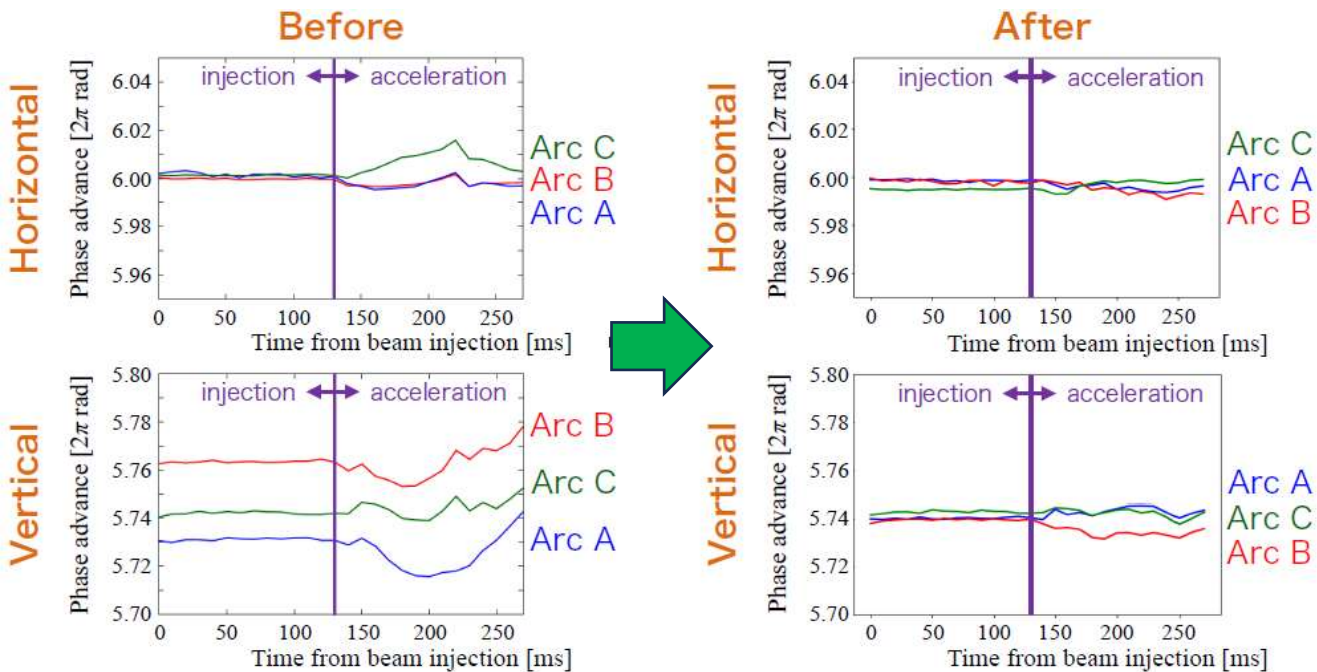
✓ 四極電磁石の一部の電源の非対称配線

光学測定で位相進み3回対称性を評価しながら MR全周のK1*L配置の対称化調整

Broken Symmetry enhances resonance effects.



T. Asami, et. al., WEPL074, IPAC'23
T. Yasui, TUXG1, IPAC'23



浅見,他 PASJ2023 TUP21

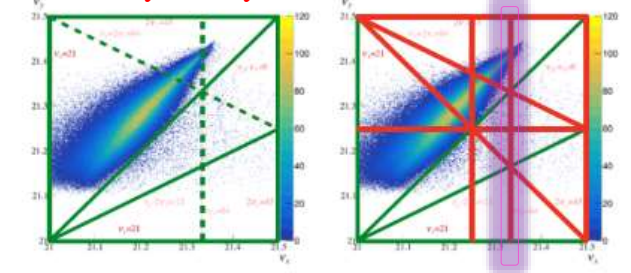
J-PARC MR 1.3MW化計画のための光学測定によるリング全周の誤差四極磁場評価

MR3回対称性の光学調整 II

✓ **アーク部の主偏向電磁石（72台）は6 BM-PSsで運用**

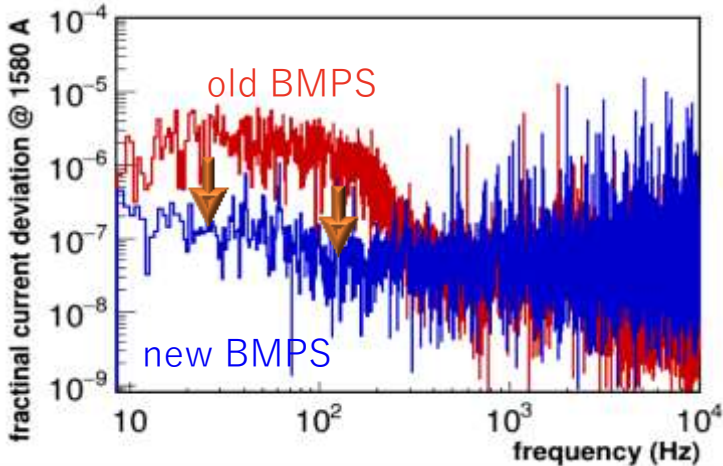
新電源化に伴い**バランス調整**を行い3回対称性確保
 ただし、BM電源調整途上でのビーム試験のため、
 残っている低周波リップルが ΔK_1 バラ付きを成し、**3回対称性を破る**

Broken Symmetry enhances resonance effects.



T. Yasui, TUXG1, IPAC'23

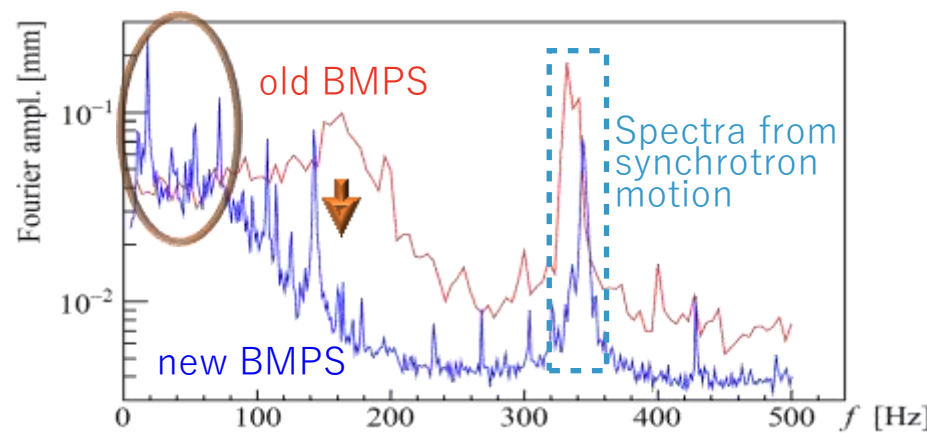
BM電源リップル（ベスト調整時）



T. Shimogawa *et al.*, in *Proc. IPAC'19*, pp. 1266-1268.

Morita *et. al*, WEPM082, IPAC'23

BM-PS調整途上でのビーム軌道リップル



BM電源は、6台のうち、一部のBM-PSでも低周波リップルがあると、アーク部Dispersionピークの六極電磁石で軌道ズレを成し、3回非対称な ΔK_1 バラつきを生む

$$\Delta x = \underbrace{\eta_x}_{\text{dispersion}} \frac{\Delta B}{B}, \quad \underbrace{|\Delta K_1|}_{\text{sext. field}} = |K_2 \Delta x|$$

→ チューントラッキング $v_x = 21.33$ 共鳴 (< ~4 GeV補正適用) を加速直後に回避

→ BM電源調整を更に進め、全BM電源の低周波をリップル抑制

MR 2021-2022増強とビーム調整の要点

② 加速空洞増設

3 GeV → 30 GeV 加速時間

1.4 s (2.48 s cycle) → 0.65 s (1.36 s cycle) に短縮

M. Yoshii *et. al.*, in Proc IPAC'18 p984
K. Hasegawa *et. al.*, in Proc IPAC'22 p2031



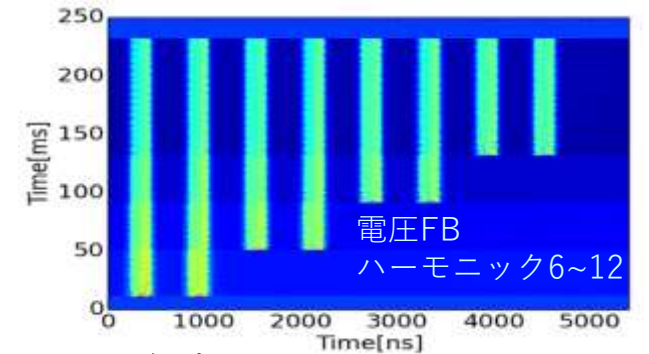
	2021	2023	2026
MR Cycle	2.48 s	1.36 s	1.16 s
FT3L 4GAP Cavities	7	9	11
2 nd Harmonic Cavities	2	2	2
Accelerating Voltage	300 kV	510 kV	600 kV
2 nd Harmonic Voltage	110 kV	110 kV	110 kV

空洞と陽極電源の生産を5年かけて進めている

③ 加速システム増強

LLRFフィードバック
システム導入の完了

Y. Sugiyama *et. al.*, TUPM056, IPAC'23



大強度ビーム 2.5×10^{14} ppp
縦方向バンチ振動 (WCM)

加速時間短縮に伴う調整

- 主電磁石電源新パターンとのマッチング調整
- 大強度ビームでのRF周波数調整、RF陽極電源負荷評価

2021年までのMR大強度調整とほぼ同等のプロセスだが、
LLRF FBシステム導入の完成により調整時間は大幅に短縮された

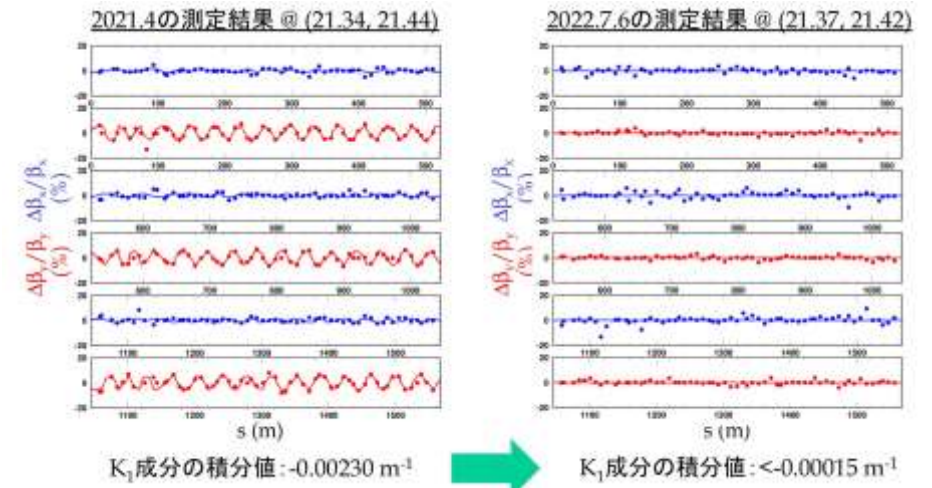
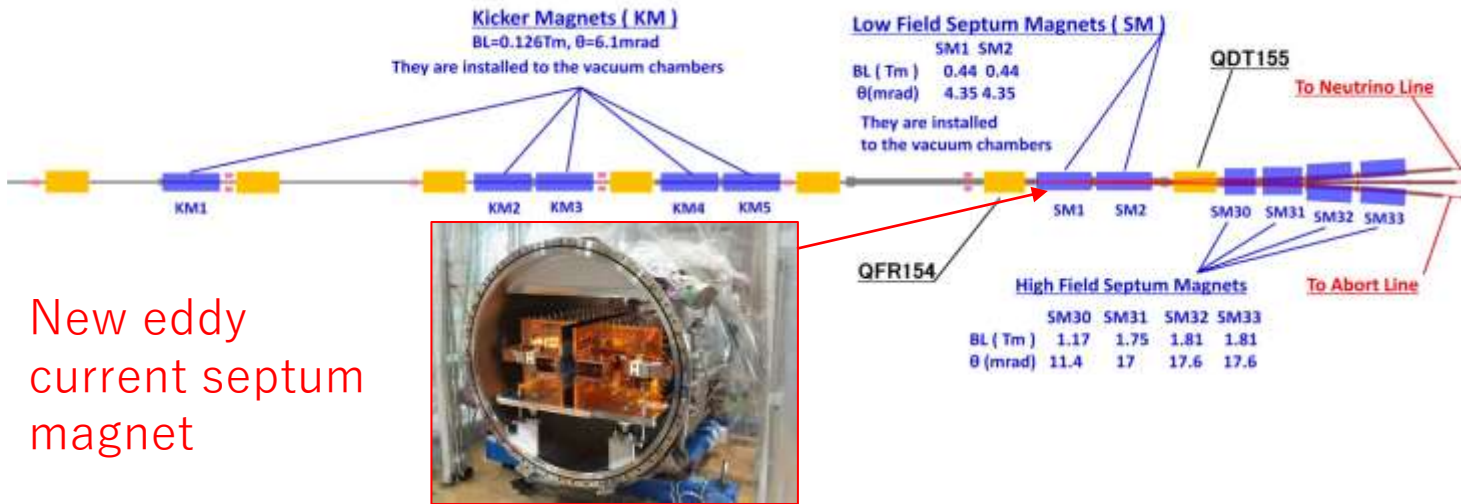
MR 2021-2022増強とビーム調整の要点

④ 入出射システム増強

K. Fan *et. al.*, in Proc IPAC'14 p821

- 高繰り返し(~1 Hz) 大強度運転に対応すべく入出射を増強
- **FXセプタム電磁石** (低磁場用2台、高磁場用4台中3台) **新作**
- FXセプタムアパチャー拡張、漏れ磁場低減、インピーダンス軽減

T. Shibata *et. al.*, TUPM103, IPAC'23 芝田、他 PASJ2023 TUP18 A. Kobayashi, *et. al.*, NIMA1031 (2022) 166515



FXセプタム改造前後で光学歪み1/10

取り出し軌道調整、取り出し光学の評価 岩田、他 PASJ2023 THP18

FXセプタム漏れ磁場低減を周回ビーム光学測定で評価 H. Hotchi

MR 2021-2022増強とビーム調整の要点

⑤ コリメータシステム増設

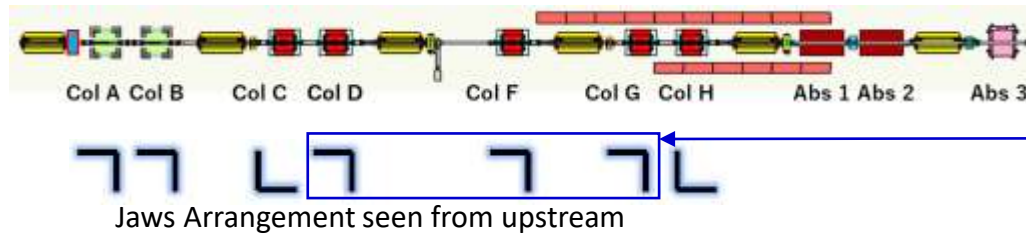
S. Igarashi, *et. al.*, PTEP vol 2021, Issue.3,p33

M. Shirakata *et. al.*, Proc HB2016, p543

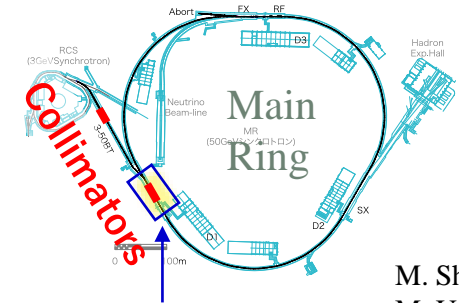
白形,他 PASJ2023 FRP20

・ ビームロス許容量増

2021: 2.0 kW (4台体制) → 2023~: 3.5 kW (7台体制)



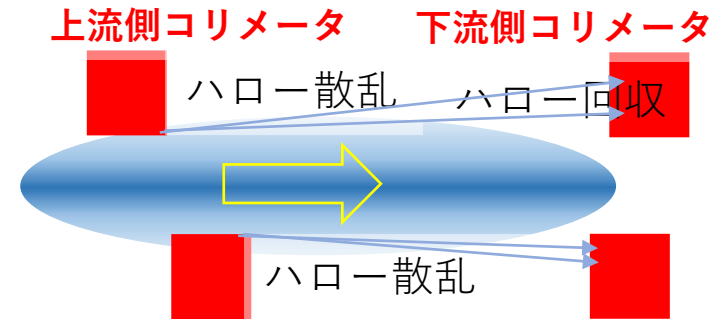
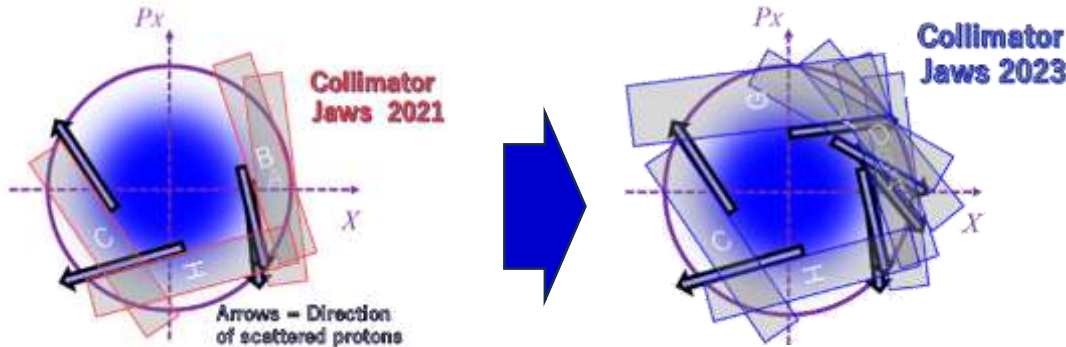
New Collimators
 D: Fall 2022
 F: Summer 2023
 G: Fall 2022



M. Shirakata
 M. Uota
 K. Kadowaki
 T. Sasaki

門脇, 他
 PASJ2023
 FRP06

・ コリメータ部でのビームハロー回収効率化



- ・ コリメータ部へのビームロス局所化調整 (ビームロス分布・残留線量測定)
- ・ FXセプタム漏れ磁場低減評価 (周回ビーム光学測定)

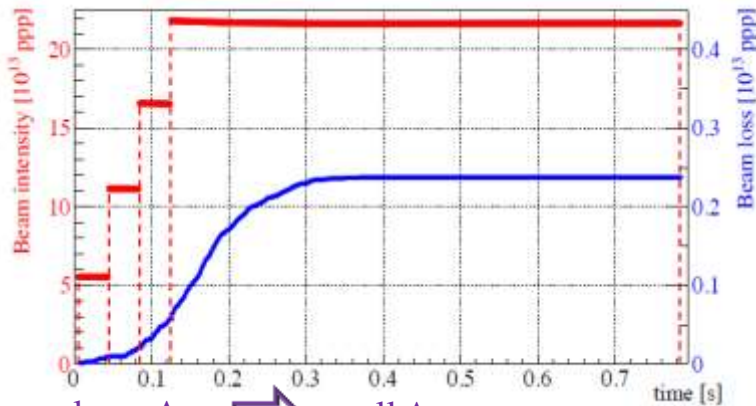
MR FX 760 kW 試験

Apr. 20, 2023

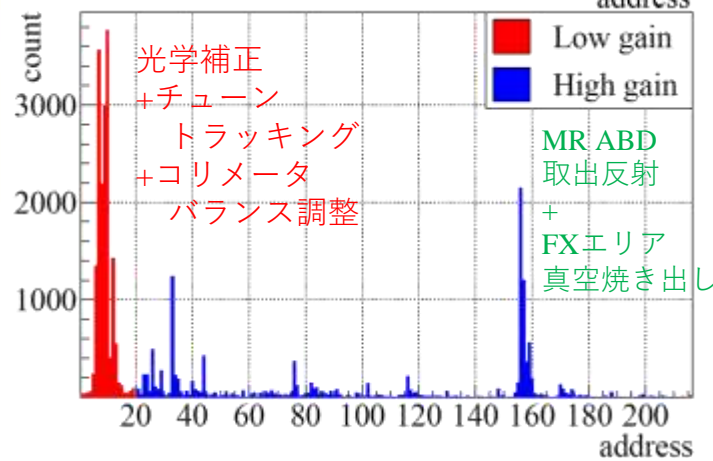
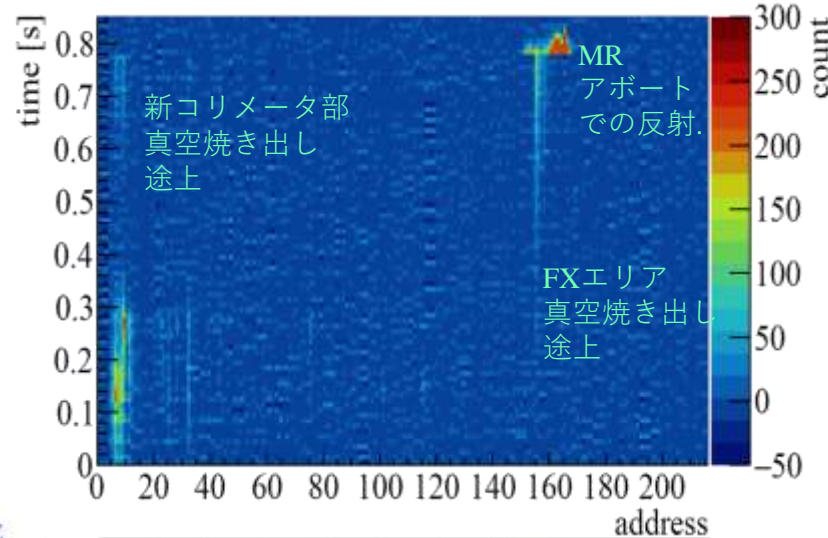
FX-ABD 試験 in 1.36 s cycle:

766 kW eq. (2.17e14 ppp)

loss ~840 W eq. (2.4e12 ppp)
(DCCT推計)



large Δv_x \rightarrow small Δv_x
素早く $v_x=21.33$ を移動回避



MRコリメータ設定 Hori55pi e-6 & Vert61pi e-6
MR周回アパチャー > 81pi e-6

増強後に新たに適用した
共鳴線対策:

- ✓ 非対称配線Q \rightarrow 位相對称性
- ✓ BM低周波リップル由来での
3次共鳴 $v_x = 21.33$ 影響増加
 \rightarrow 加速直後回避

$$v_x = 21.35 @ P0+0.2s$$

$$\Rightarrow 21.27 @ P0+0.3s$$

真空焼き出し後に

魚田,他 PASJ2023 FRP29

**760 kW利用運転が
視野に入るビーム条件を用意。**

今秋の更なるBM電源調整で
3次共鳴 $v_x = 21.33$ 影響軽減
ロス抑制を期待

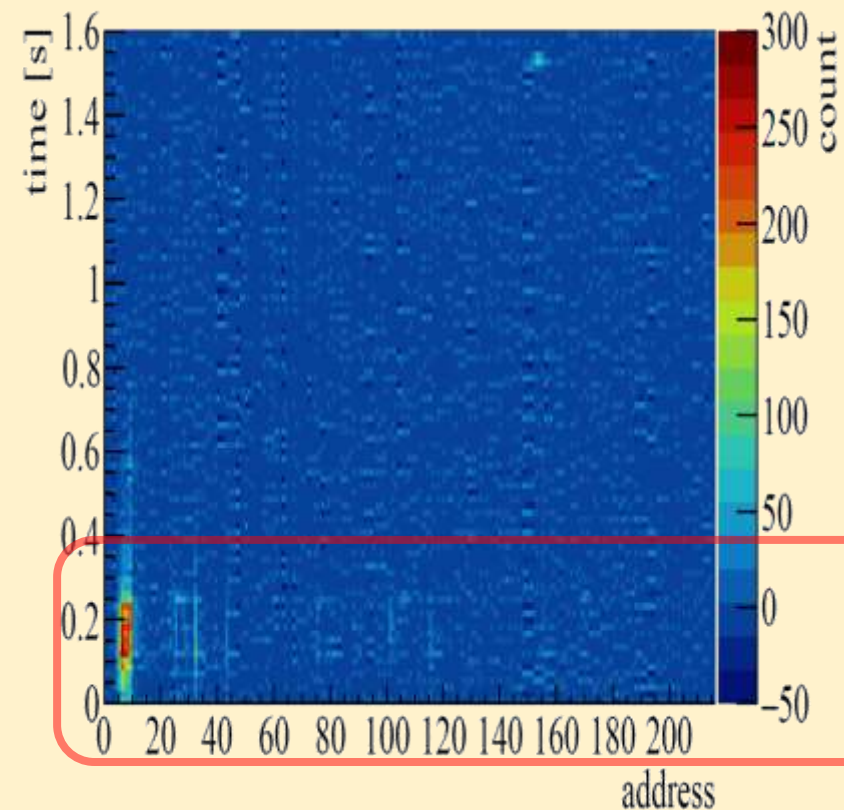
Jan 30, 2020

Nu利用運転 in 2.48 s cycle:

515 kW eq. ($2.66e14$ ppp)

loss ~800 W eq. ($4.1e12$ ppp)

MR コリメータ Hori64pi_{e-6} & Vert61pi_{e-6}



Apr. 20, 2023

FX-ABD 試験 in 1.36 s cycle:

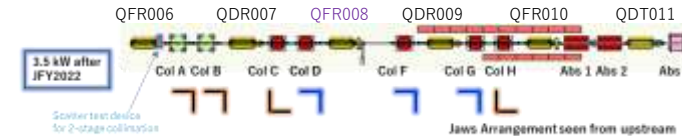
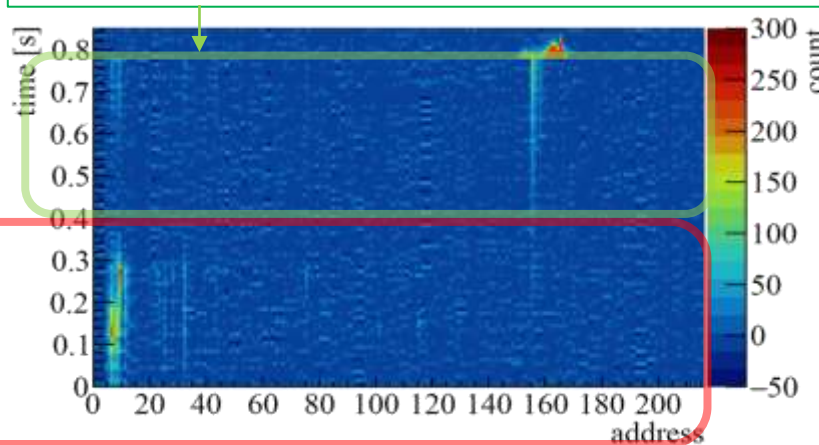
766 kW eq. ($2.17e14$ ppp)

loss ~840 W eq. ($2.4e12$ ppp)

MR コリメータ Hori55pi_{e-6} & Vert61pi_{e-6}

MR コリメータ (007-010)は
真空焼き出し中 (加速後半のハローサイズ増大)
のFXエリア放射化抑制を念頭に閉め気味で調整
焼き出し完了後にコリメータバランスは再調整

加速後半ロスには真空焼き出しの影響が大きい。
ビーム調整判断は加速前半までのロス分布を主に見る



MRコリメータ

4台(-2021) → 6台(2022) → 7台(2023秋)

コリメータ部：

台数増 → ロス局所化効率向上

コリメータ部内では良く分散

非コリメータ部：

ロスは軽減

焼き出しの完了後に

Run84 BLMの半分なら

当時と同程度の放射化を期待

Nu運転でのビーム条件は

最終的にはメンテナンス日の残留

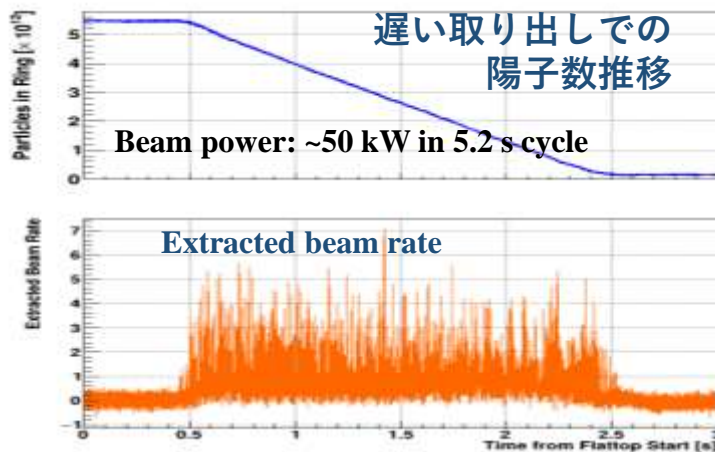
線量評価に基づく

MR SX/HD 30 GeV調整 (5.2 s周期)

2023年6月 SX/HD 30 GeV調整 1週間実施

2022-23のMR増強後、2021年度達成の65-kW-SX運転(5.2 s周期)の再現を目指した

- SX 30 GeVパターンビーム光学を再現
- 30 GeVデバンチ過程のビーム安定強度更新 (66 kW in 2021 → 70.8 kW in 2023)
新FXセプタム電磁石インピーダンス軽減効果、RF LLRFフィードバックを導入
- BMs/QDsトリップ時の対策システム (QFNとの連動でのチューン操作) 導入



Spill duty factor: ~48%
(53% in 2021 51kW operation)

遅い取り出しエリアのビームロス分布



吉井,他 PASJ2023 WEP21

「J-PARC MR SXに於ける短パルスビーム抑制のための装置間連動停止システム」

M. Tomizawa, et. al., TUPM105, IPAC'23

SX/HD 50 kW in 5.2 s cycle
取り出し効率

2021年記録 99.5%を再現

2024年冬に、4.24 s周期、BM-PSs低周波リップル抑制でのSX運転を予定

J-PARC MR関連発表

TUSP01	8月29日	15:40-16:40	別所 光太郎 氏	加速器施設における安全性向上への取り組み
THOA7	8月31日	11:10-11:30	山田 秀衛 氏	J-PARC MR制御システムの15年間の運用と今後の展望
TUP08	8月29日	13:30-15:30	佐々木 知依 氏	J-PARC Main Ring の入射ビームのための OTR と蛍光を用いた ワイドダイナミックレンジプロファイルモニターの開発 (4)
TUP18	8月29日	13:30-15:30	芝田 達伸 氏	J-PARC MR速い取り出し用セプタム電磁石の漏れ磁場測定
TUP21	8月29日	13:30-15:30	浅見 高史 氏	J-PARC MR 1.3MW化計画のための光学測定による リング全周の誤差四極磁場評価
WEP21	8月30日	13:30-15:30	吉井 正人 氏	J-PARC MR SXに於ける短パルスビーム抑制のための 装置間連動停止システム
WEP22	8月30日	13:30-15:30	岩田 宗磨 氏	J-PARC MR速い取り出し用新セプタム電磁石コイルの製作不備への対応
THP03	8月31日	10:10-12:10	小林 愛音 氏	J-PARCメインリングにおけるRF加速空洞のインピーダンスのモデル化
THP07	8月31日	10:10-12:10	外山 毅 氏	J-PARC MR の全周ビーム位置モニター信号処理回路の リレースイッチの健全性の回復とチェック
THP14	8月31日	10:10-12:10	三浦 一喜 氏	J-PARC MR 8GeV運転時における主電磁石への磁場ヒステリシス影響
THP18	8月31日	10:10-12:10	岩田 宗磨 氏	J-PARC MRにおける加速途中のビーム取出し軌道の最適化
FRP01	9月1日	10:10-12:10	富澤 正人 氏	偏向電磁石電流リップルによるコヒーレントシンクロトロン振動
FRP06	9月1日	10:10-12:10	門脇 琴美 氏	シンチレータによるコリメータでのビームハローカットの評価
FRP20	9月1日	10:10-12:10	白形 政司 氏	遮蔽用鉄材を再利用した四軸コリメータの製作
FRP22	9月1日	10:10-12:10	武藤 亮太郎 氏	静電セプタム上流の散乱体による周辺機器の放射化量評価
FRP29	9月1日	10:10-12:10	魚田 雅彦 氏	J-PARC MRに新品の機器を加える場合の焼き出し運転の評価

まとめ

- ✓ **MR 増強計画として2021年から高繰り返し化改造を段階的に実施。**
2021 – 2022実施項目：
主電磁石電源、RF加速システム、入出射システム、コリメータシステム
- ✓ **更新機器の初期故障はその都度対応してビーム調整を進めた。**
FXセプタム電磁石故障、主電磁石QDN電源火災
- ✓ **2023年1月から改造後のMRビーム調整・運転を進めている。**
FX/NU 30GeV 1.36s周期 766 kW eq. 利用運転が視野に入った。
SX/HD 30GeV 5.2 s周期 50 kWまで調整を進めている。
遅い取り出し効率の記録 99.5 % を再現。
- ✓ **2023年度内に Nu 750 kW & HD 65~80 kW利用運転を計画。**
ビーム停止期間中に、BM PS 調整、RFシステム増強を進めて臨む。