

**J-PARC 主リングにおける
FX 830 kW, SX 90 kW
利用運転達成と今後の展望**

佐藤洋一、發知英明（J-PARC加速器 / KEK）

Yoichi Sato & Hotchi Hideaki on behalf of J-PARC Accelerators

PASJ2025

8 August 2025, 09:10-09:30

目次

- ✓ J-PARC 主リング (Main Ring, MR) 概要

✓ MR FX	830 kW利用運転の達成	900 kWへの見通し
✓ MR SX	90 kW利用運転の達成	100 kWへの見通し

- ✓ MR増強計画

- ✓ まとめ

Japan Proton Accelerator Research Complex

J-PARC
(茨城県 東海村)

科学技術における
社会的インパクト
の世界的拠点

加速器科学研究・技術開発
の世界的拠点

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して
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実現
しています。

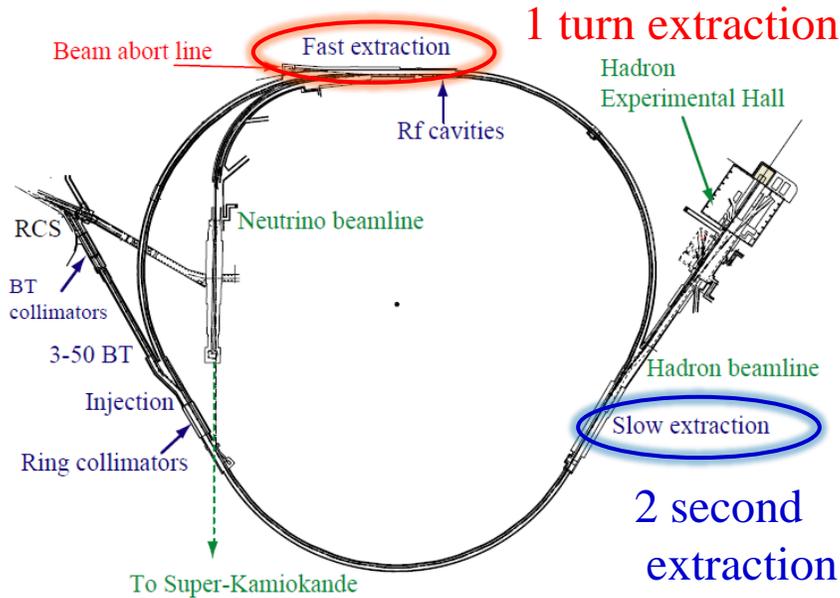


J-PARC運営機関:

- 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)

MRパラメータ

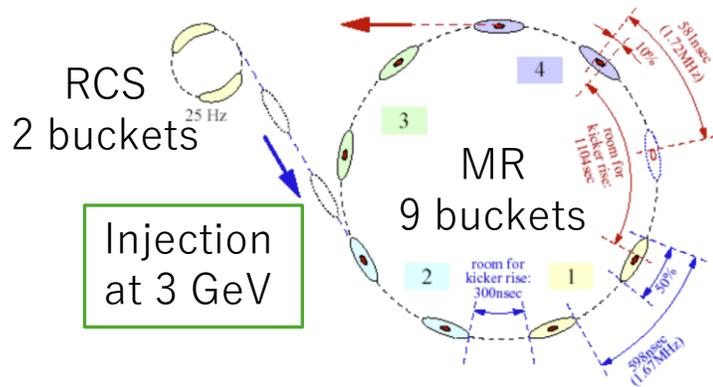
Circumference	1567.5 m
Injection energy	3 GeV
Extraction energy	30 GeV
Injection time	0.13 s
Acceleration time	0.65 s
Super-periodicity	3
harmonic	9
Number of bunches	8



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

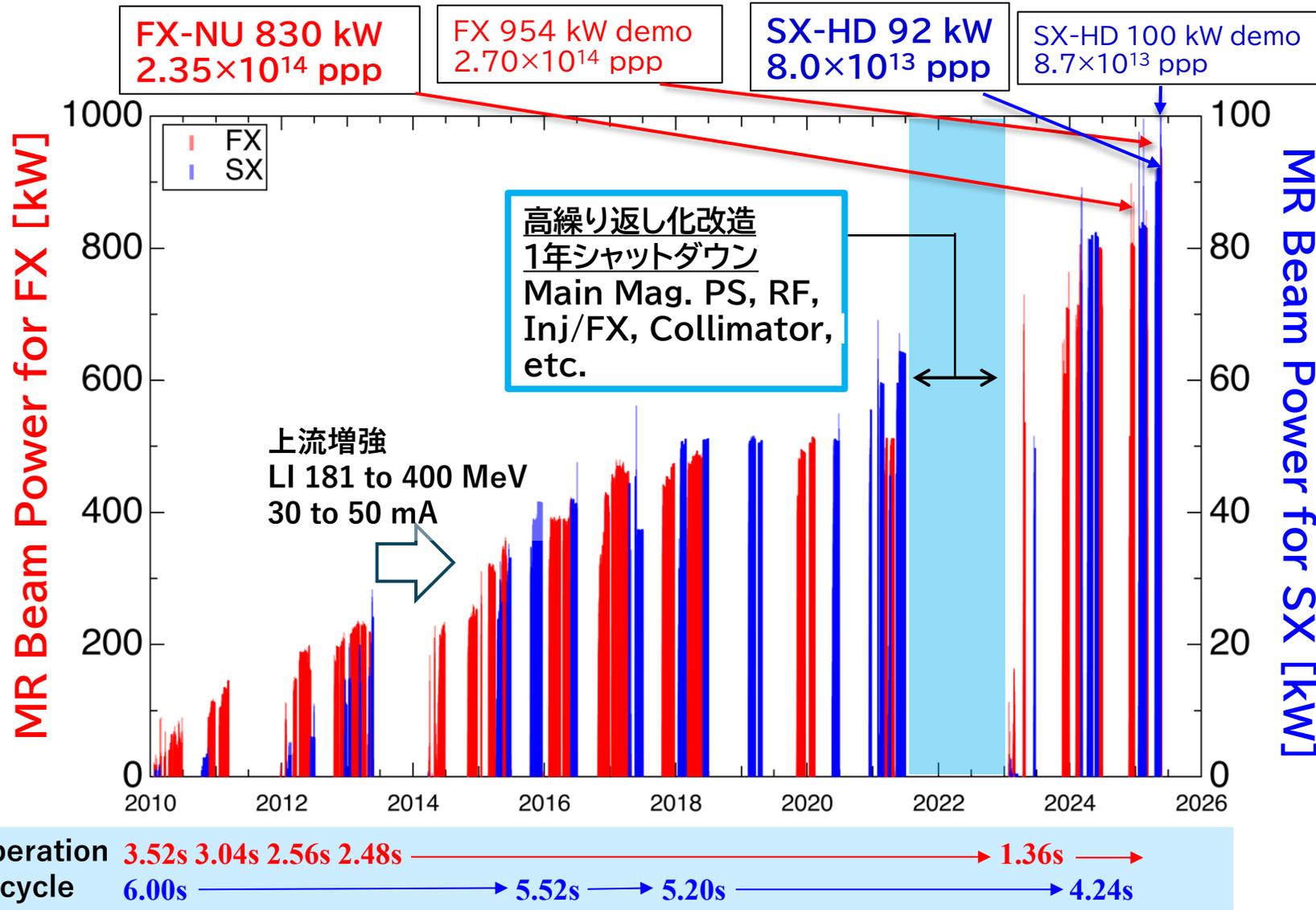
Beam Power (SX)
> 100 kW (in near future)

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)

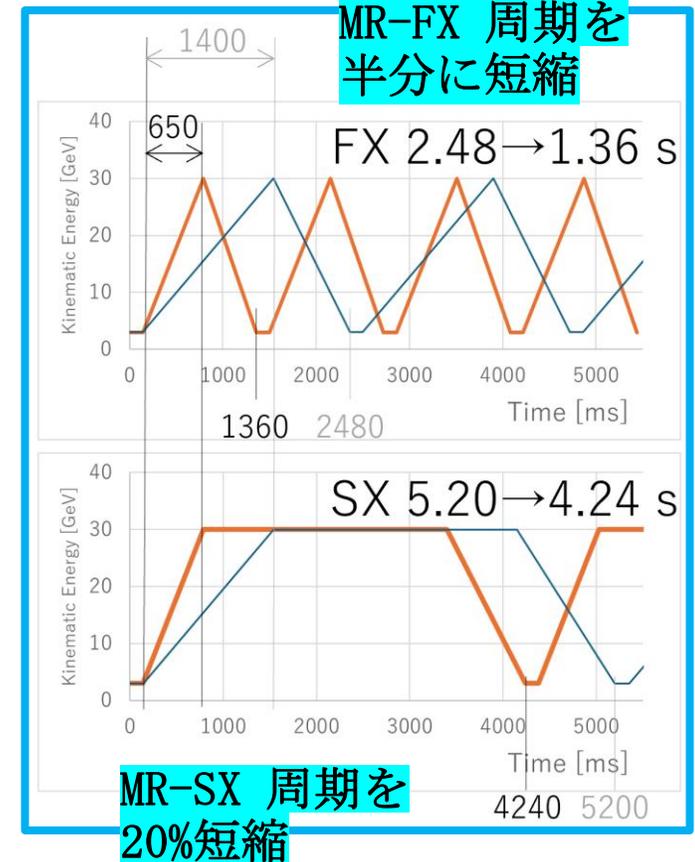
MRビーム強度の変遷



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 高繰り返し化改造 2021-2022 と改造後のビーム調整方針

Past talks for J-PARC MR:
 ・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

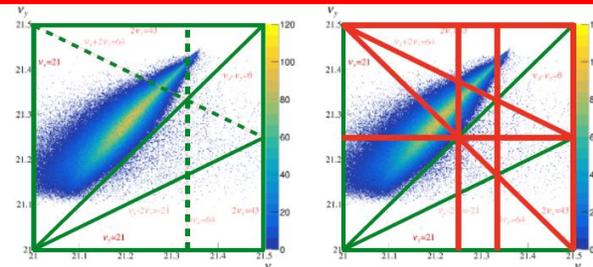
2025/8/8

MR-FX 周期を半分に短縮

MR-SX 周期を20% 短縮

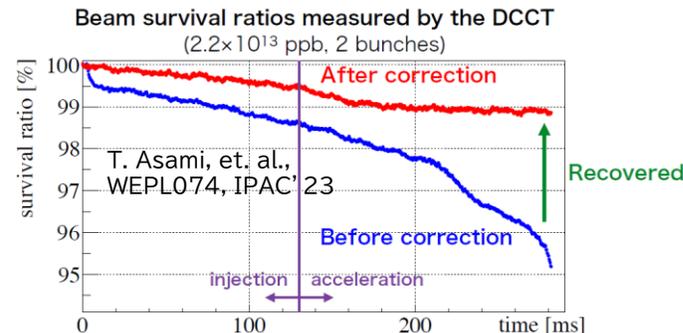
ビーム光学系は改造前をキープ

電磁石電源配線変更(非対称配線)



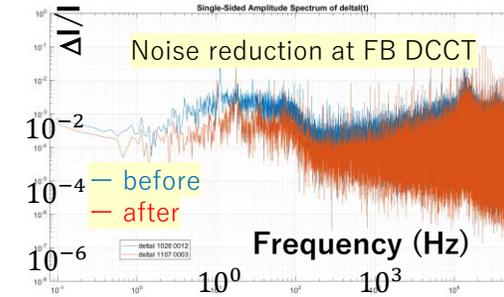
T. Yasui, TUXG1, IPAC' 23

・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



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

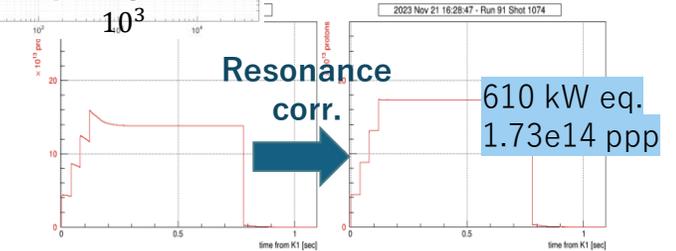
- ・主電磁石電源リップル改善
 - ・共鳴補正 (Trim-Sext) 最適化
 - ・Tune Tracking最適化
- 非構造3次共鳴の影響を更に抑制



Noise reduction at FB DCCT

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

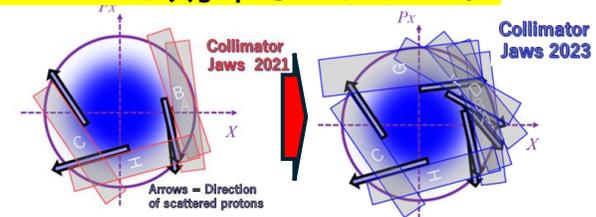
Y. Morita et al., IPAC2024, TUAD2.



Resonance corr.

610 kW eq.
1.73e14 ppp

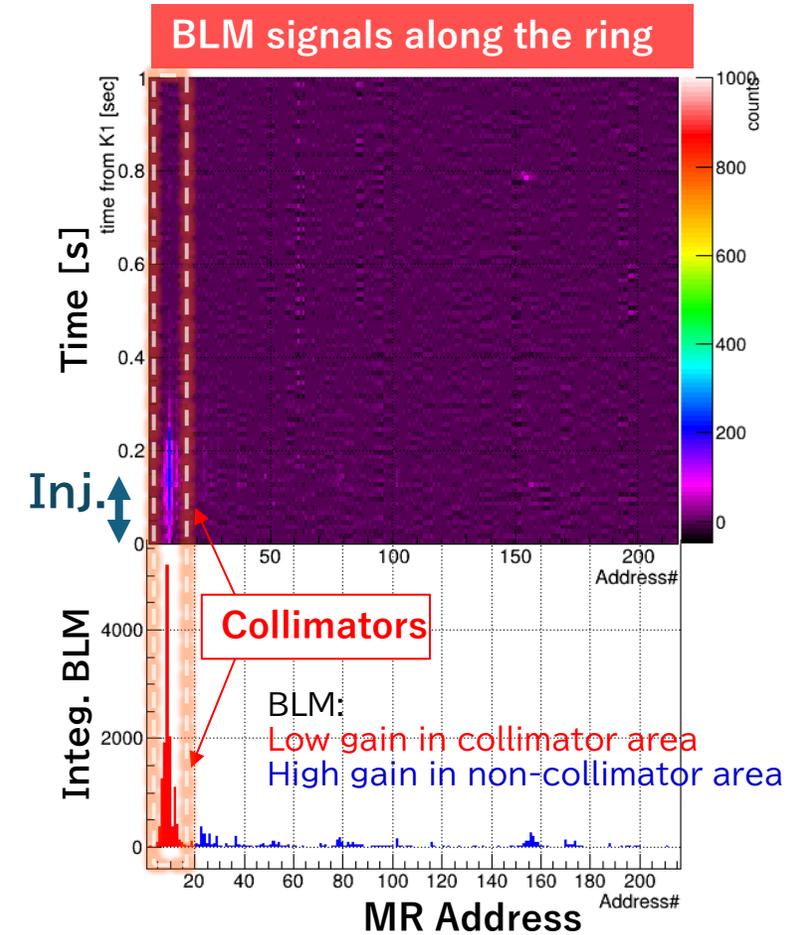
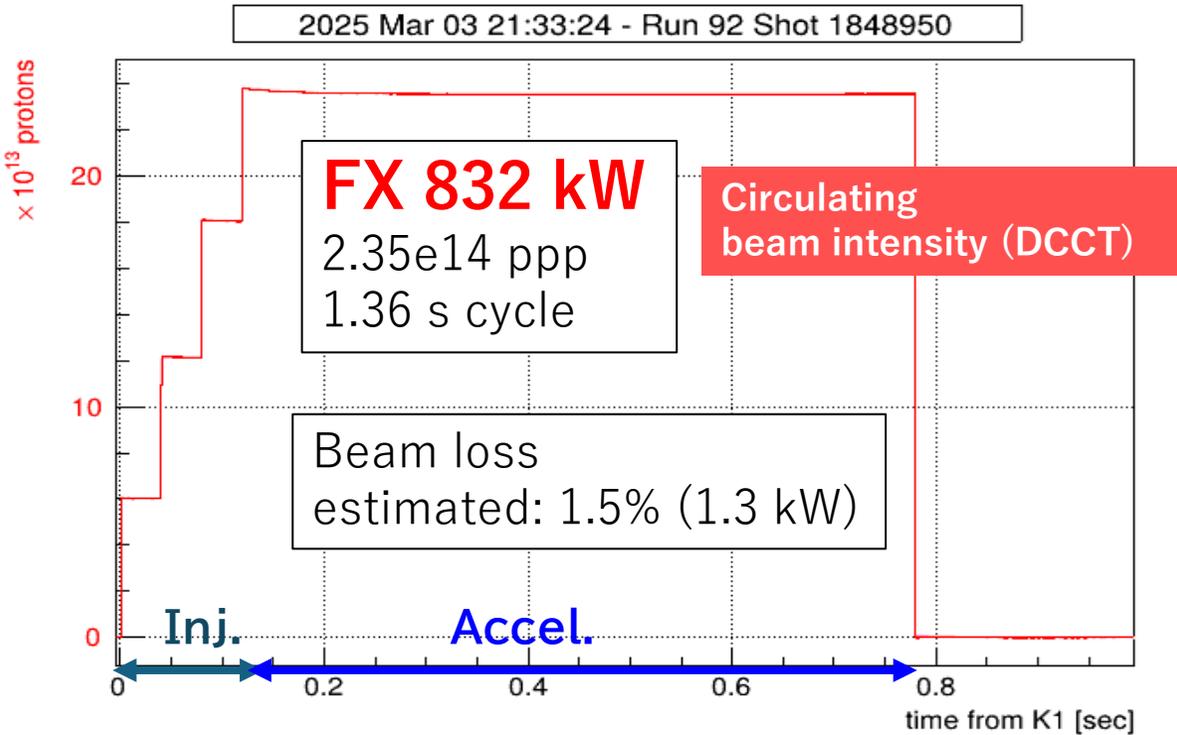
- ・コリメータ増設で
 ハローを効率よくカット



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	800 kW	1.36 s	2.27×10 ¹⁴ ppp	0.8%
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

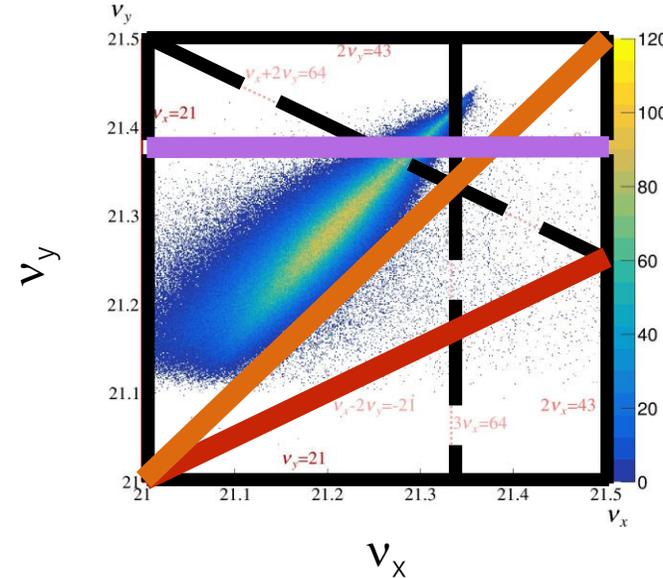
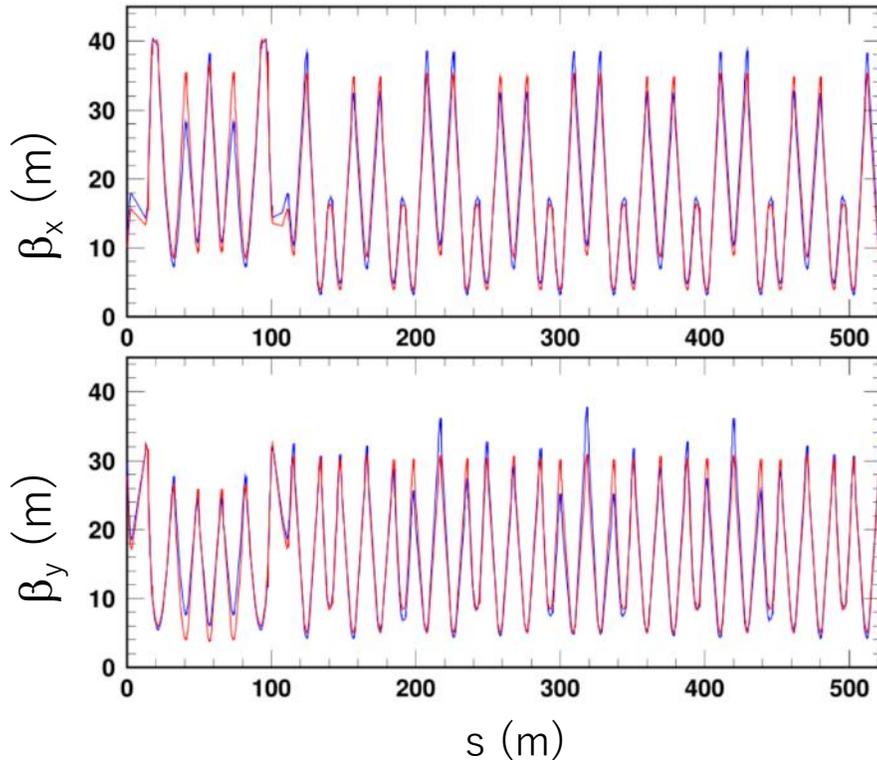
THP027 安居
WEP069 岩田
FRP065 芝田

→ 半減させたい

- 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)を採用する計画が進行中。 *1,*2
- 主電磁石電源調整 --- JFY2024で完了。

Beta function for one super-period

— Present
— New-arc



- $\nu_x - 2\nu_y = -21$
(driven by sext. field)
- $2\nu_x - 2\nu_y = 0$
(driven by space charge)
- $8\nu_y = 171$
(driven by space charge)

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

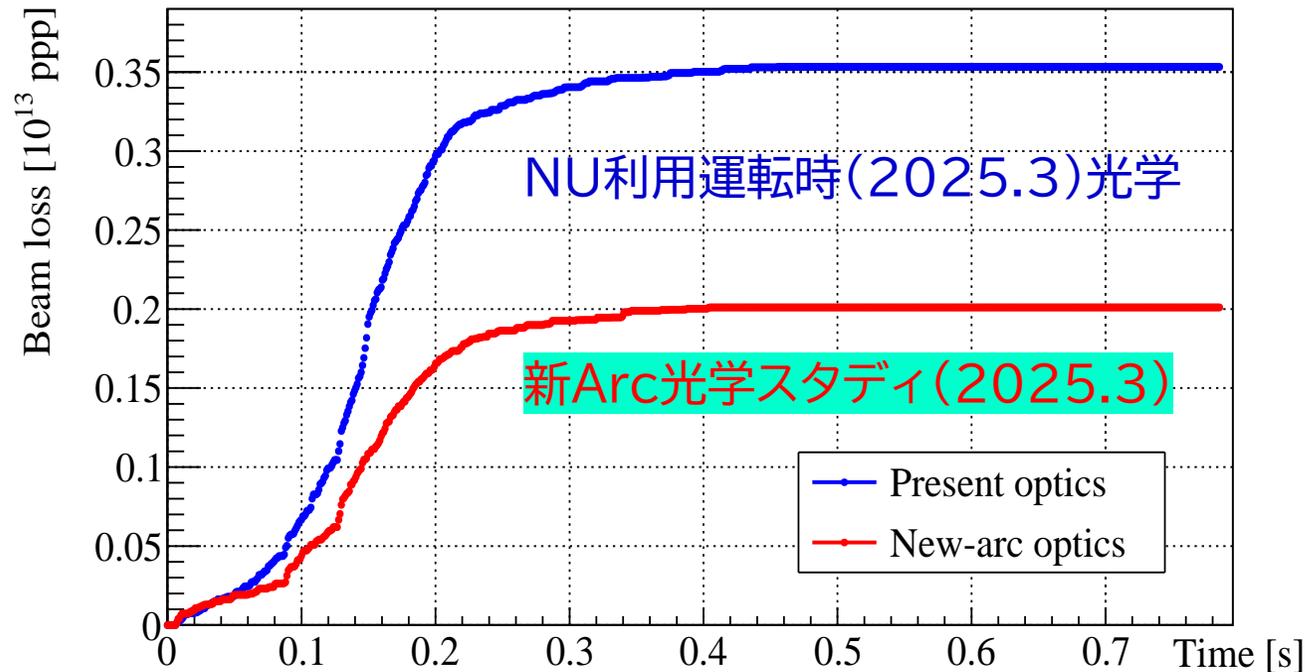
T. Yasui, S. Igarashi, Y. Sato, and T. Koseki,
“Beam optics for the compensation of third-order structure resonances”,
Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 013G01 (2022).
<https://doi.org/10.1093/ptep/ptab146>

***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>

- 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)を採用する計画が進行中。
- 主電磁石電源調整 --- 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

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



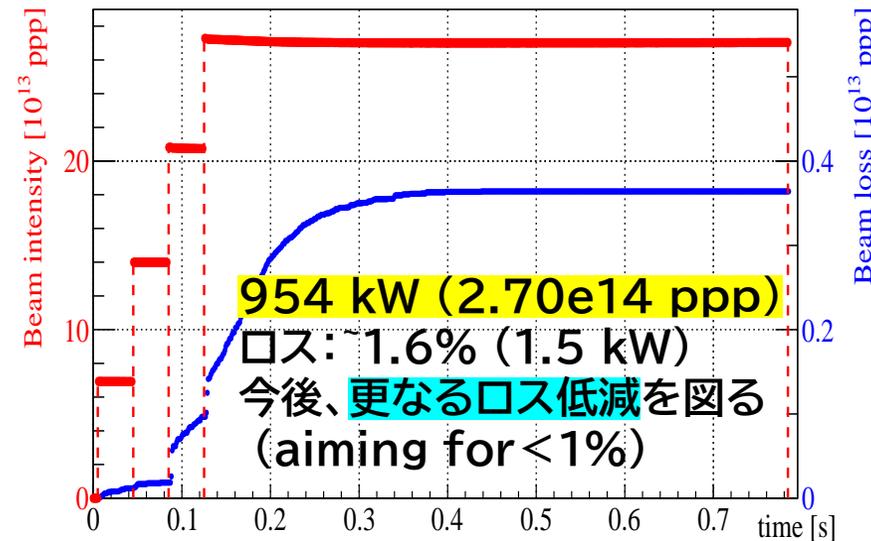
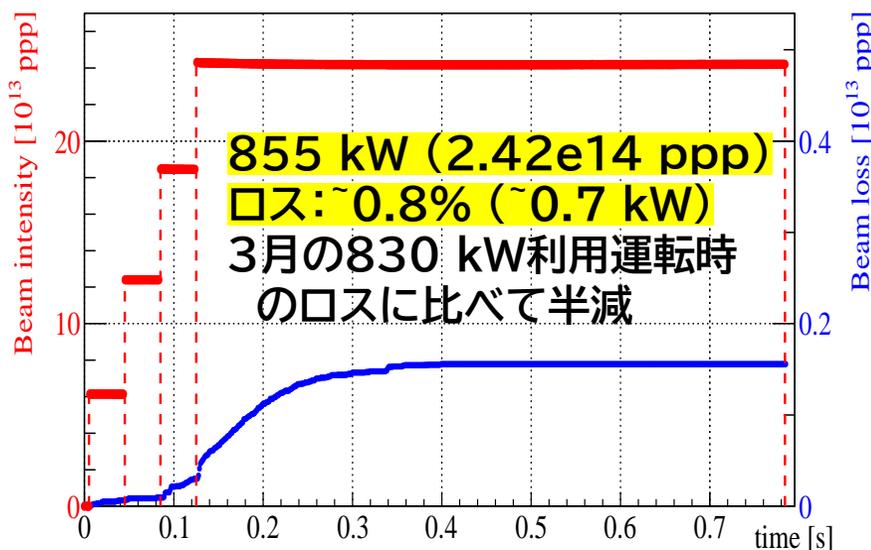
FX 830 kWに対し、
新Arc光学の採用で
ビームロス半減に成功。

2025.5月 FX大強度試験

共鳴抑制の新Arc光学系の導入や、LI/RCS調整によるMR入射ビームエミッタンスの低減などにより

- ビーム損失を大幅に低減、
- 855 kW & 954 kW相当のビーム加速に成功

THP028 Saha WEP034 足立 THO610 小島 他
FRP031 沖田 WEP032 田村 FRP078 橋本



2025.5
強度依存性の高い
既存のロス抑制の調整ノブ
(Tune, Tune tracking)
はまだ未調整

2025.夏 FX運転周期を5%短縮する予定: 1.36 s → 1.28 s

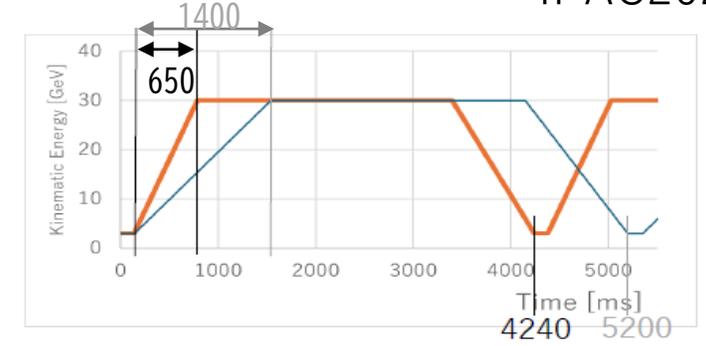
WEP073 森田
THO708 清矢

- 入射から出射までの加速パターンは1.36 s cycleと同じにし、立下り時間のみを短縮。
→ ビームダイナミクスは同じ。1.36 s cycleでの $> 2.42e14$ ppp調整は、そのまま有効
- 855 kW & 954 kW in 1.36 s cycle → 908 kW & 1015 kW in 1.28 s cycle
→ 2025.秋以降、1.28 s cycleでの $NU > 900$ kW安定利用運転の目途が立った。

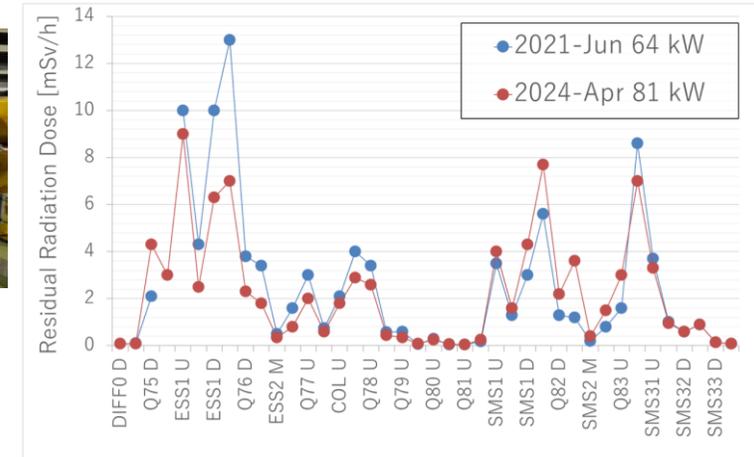
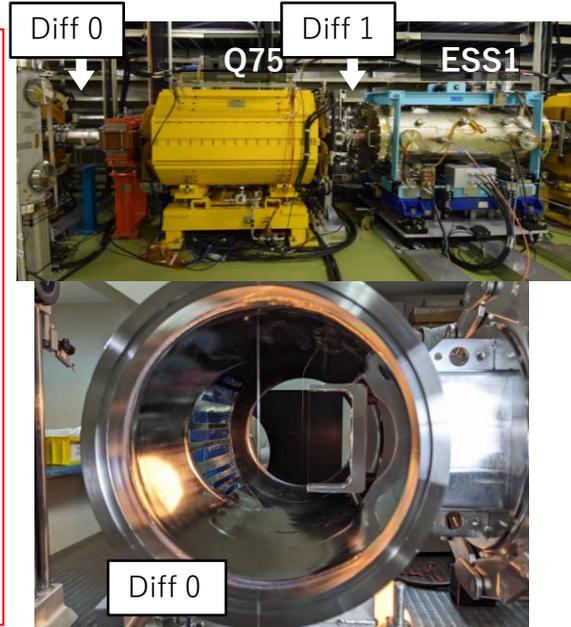
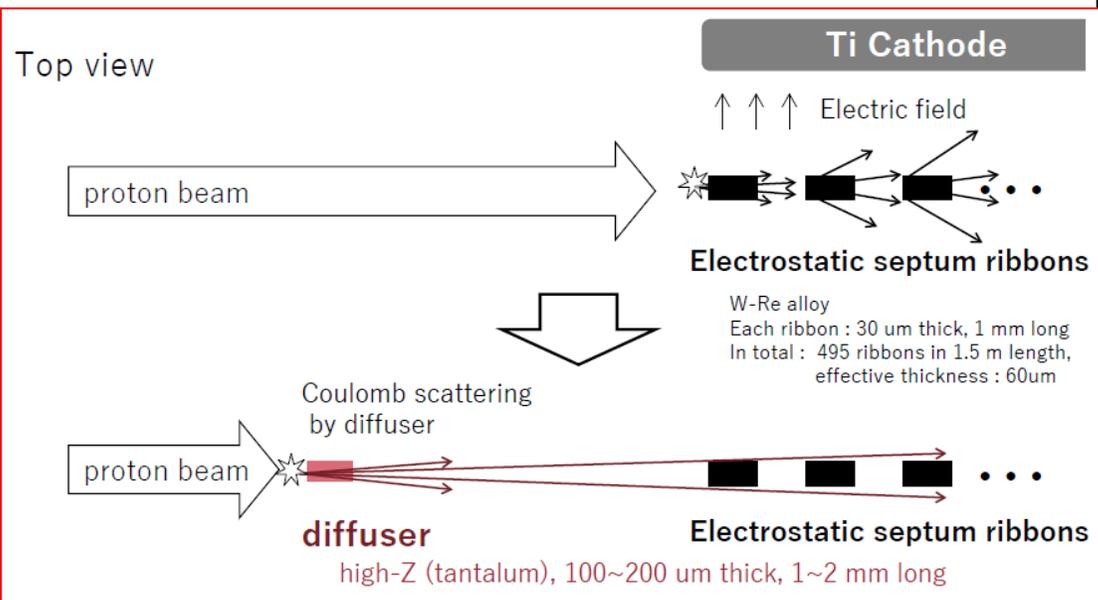
- MR高繰り返し改造(2021-2022)で、SXサイクルは **5.2 s → 4.24 s** に短縮
ただし、30 GeV Flat topは、2.61 sをキープ
- 同じパルス当たり陽子数でも **20%パワー増 (65 kW-→ 80 kW)**
- 残留線量を同等以下に抑えるには **ビームロス比を下げる**ことが必須。



- SX運転時のビームロスは主に 静電リボンセプタム(ESS)上流で発生
→ ESSでの陽子衝突を減らす方策:
FRP033 沼井
- ✓ **Beam Diffusers (JFY2024~)**
FRP032 武藤
- ✓ Bent Silicon Crystal (検討中)



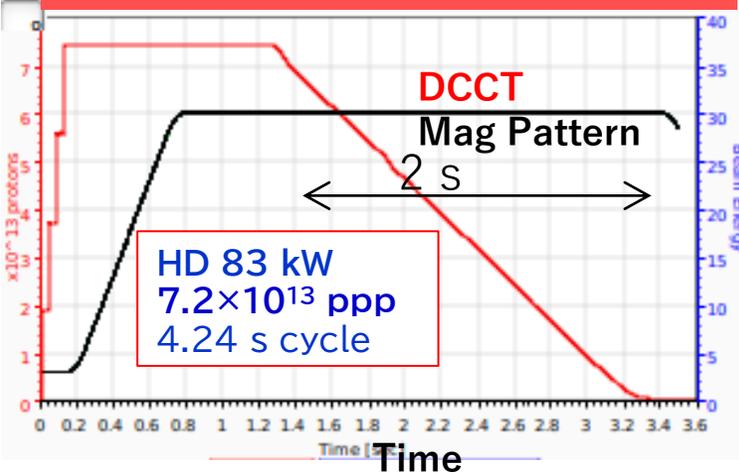
	2021	2024~
加速時間	1.40 s	0.65 s
SX サイクル	5.20 s	4.24 s



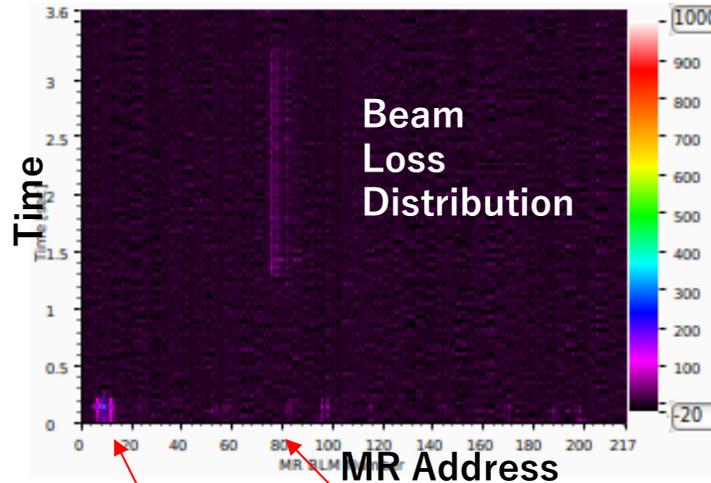
遅い取り出しエリアでのビーム損失分布 (HD利用運転 2021 vs. 2024)
Diffuserの導入で、ロス軽減に成功

- ビーム強度 83 kW
- 取り出し効率 99.64%
- Spill Duty 83%

Circulating beam intensity (DCCT)



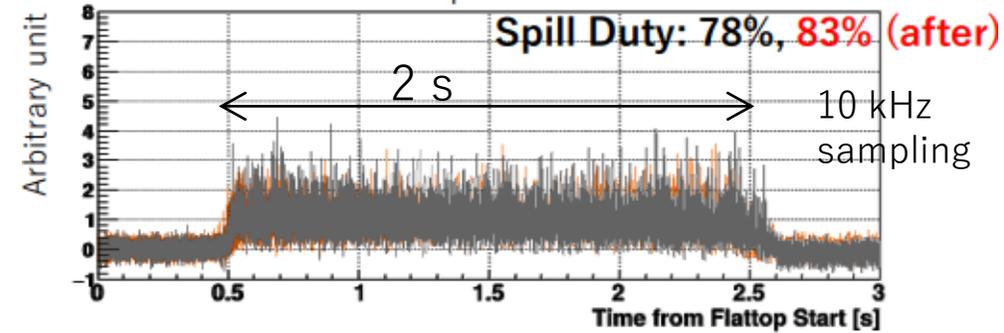
BLM signals along the ring



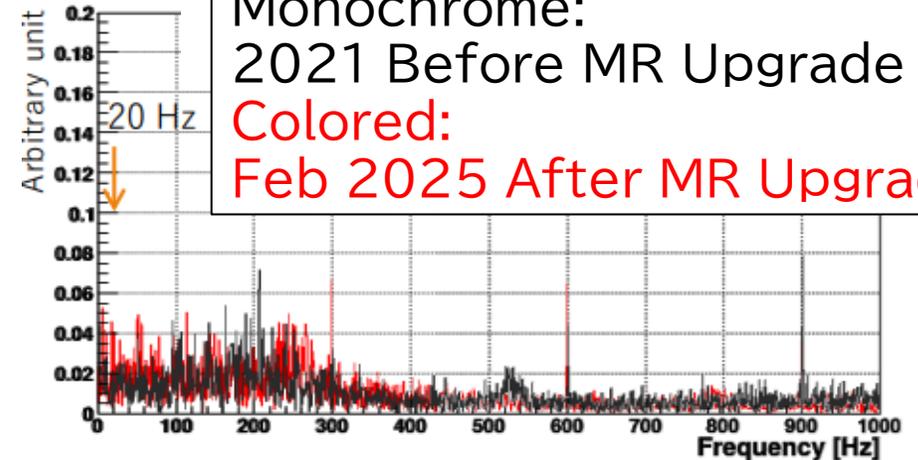
Collimators SX area

BLM:
Low gain in collimator & SX area
High gain in non-collimator area

Beam Spill Structure



Monochrome:
2021 Before MR Upgrade
Colored:
Feb 2025 After MR Upgrade



大改造前の既存の調整ノブ + 新方針開発・採用 → ビーム強度増&品質向上

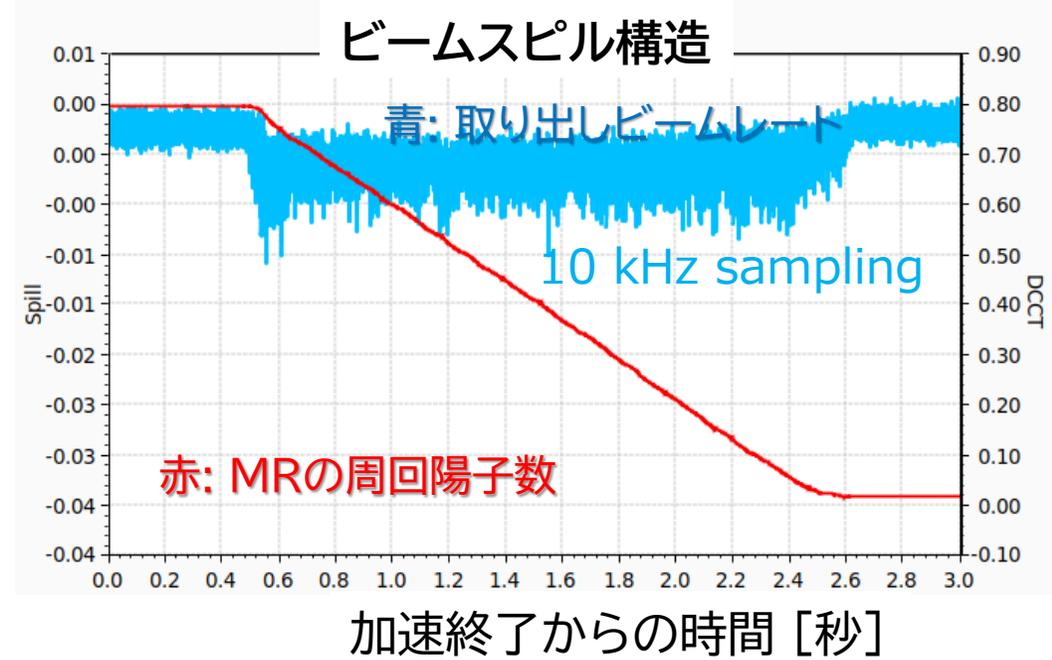
- Diffuser (Diff1) を利用運転に新規採用
→ ESSでのロス抑制 & 取り出し効率改善 99.5% → 99.6%
- 主電磁石電源のA/D boardにフィルター追加 “BM1~6, QFN, QDN, QDR, QDT, SD”
- Spill調整手法改良 (RQシステム, Trnsv RF, ...)
→ Spill構造改善、Spill Duty 78% → 83%

	2025.2	2025.4
• ビーム強度	83 kW	90 kW
• 取り出し効率	99.64%	99.67%
• Spill Duty	83%	83%

SX 90 kW (2025-04-22 22:08 ~)

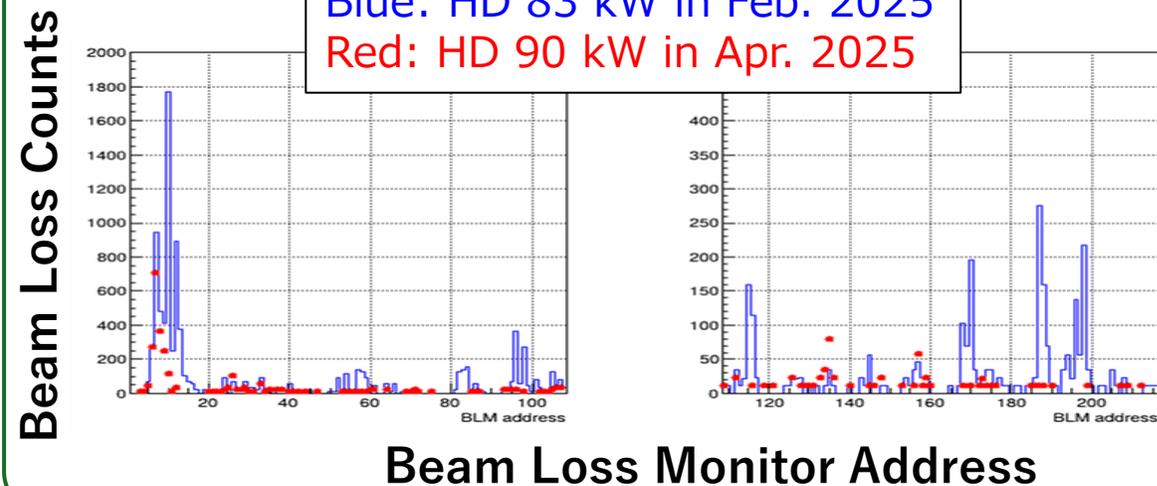
SXパルス当たり陽子数の世界記録: 79.5 TP
(BNL AGS 20年来の記録更新)

HD安定利用運転 90 ~ 92 kW 達成(-2025/5/19)



Injection beam loss: **Blue** → **Red**

Blue: HD 83 kW in Feb. 2025
 Red: HD 90 kW in Apr. 2025



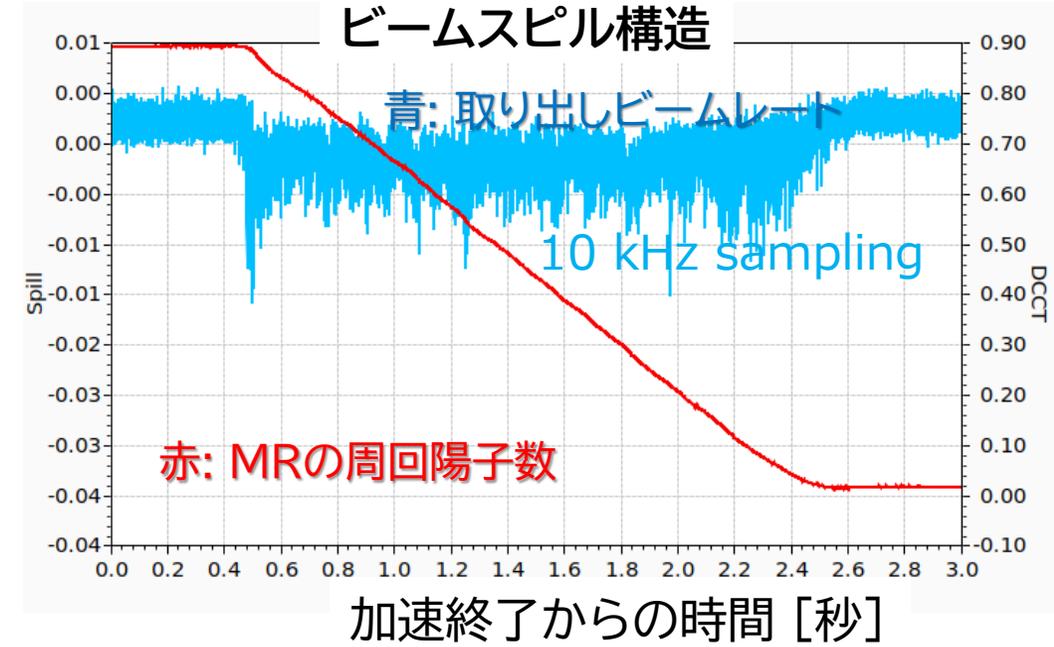
SX > 90 kW増強&高品質のポイント

- 入射時にRF 2倍高調波を導入 THP030
杉山
 RF基本波と2倍高調波の位相差を調整して、縦方向ビーム分布を平滑化。ピーク電流を下げた。
入射時のビームロス抑制
& FTデバンチ過程のビーム不安定性抑制
- 増設コリメータのフル活用
→ ビームロス局所化

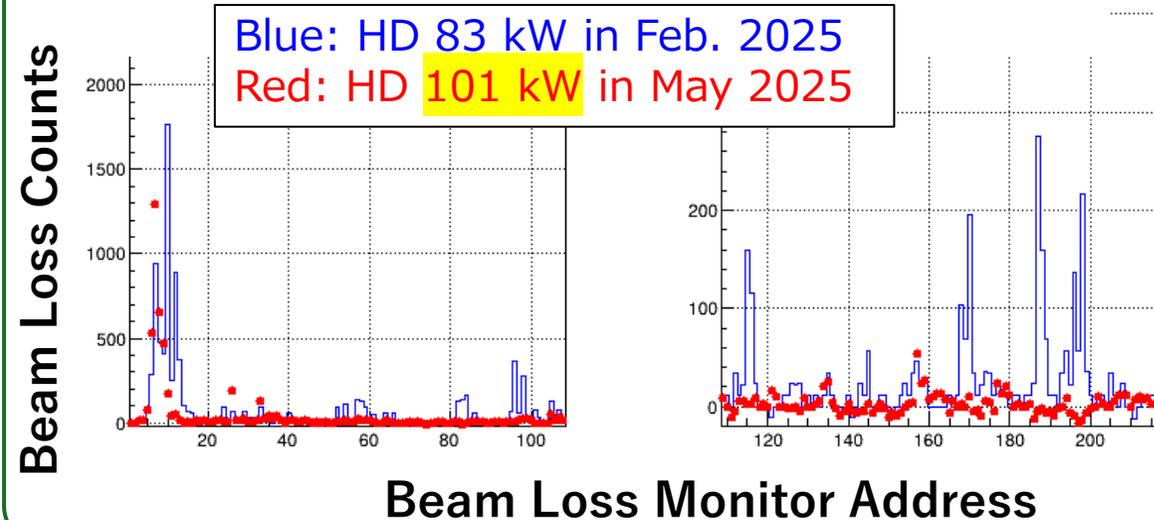
	2025.2	2025.4	2025.5
• ビーム強度	83 kW	90 kW	101 kW
• 取り出し効率	99.64%	99.67%	99.66%
• Spill Duty	83%	83%	83%

SX HD 101 kW (2025-05-19)ビーム試験に成功
デザインパワー

SXパルス当たり陽子数: **89 TP**
 ビームクオリティ: 利用運転可能なレベル



Injection beam loss: **Blue** → **Red**



2025.秋から

- スピル長調整
- ビームクオリティの安定性確認

を行った上で、
SX-HD利用運転100 kWを目指す

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 [2026]
- ・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

830 kW利用運転の達成

JFY2025春

900 kW利用運転(秋～)への見通し成立

2.42e14 ppp ビーム損失 ~0.8%

NU 830 kW利用運転時の半分

1 MW eq. 加速試験成功

2.70e14 ppp ビーム損失 ~1.5%

✓ MR SX

JFY2025春

90~92kW利用運転の達成

8.0e13 ppp for SX --- J-PARC4つ目のWR

100 kW利用運転(秋～)への見通し成立

加速・SX取り出しが、利用運転レベルのクオリティで成功

MRでは今後も更なる増強・大強度化計画が進行中。

J-PARC MR 関連発表

発表番号	発表者	発表タイトル
THO705	長尾大樹氏	J-PARC MRにおける新規チューンメータ開発
THO708	清矢紀世美氏	J-PARC主リングにおける陽極電流の計算と加速空洞の駆動高周波位相角の最適化
FRO603	佐藤洋一	J-PARC主リングにおける FX 830 kW, SX 90 kW の利用運転達成と今後の展望
WEP035	富澤正人氏	J-PARC遅い取り出しのためのスピル制御四重極電磁石セラミックダクトのRFシールド強化
WEP069	岩田宗磨氏	抵抗と磁場分布測定によるJ-PARC MR偏向電磁石コイルの層間短絡箇所を特定する試み
WEP073	森田裕一氏	MW級ビームパワーに向けたJ-PARC主リング主電磁石電源の増強
WEP079	佐々木知依氏	FNAL 8GeV 陽子ビームのための広ダイナミックレンジをもつビームハローモニターの開発状況
WEP083	小林愛音氏	機械学習の適用によるビーム不安定性の判定と対策
THP006	上窪田紀彦氏	J-PARC向けPLC型TIMING受信モジュールの開発
THP027	安居孝晃氏	J-PARC MR速い取り出しにおけるビームロス低減ビーム光学系
THP030	杉山泰之氏	J-PARC MRにおける二倍高調波重畳による非対称RFバケツを用いたバンチ整形
THP037	五十嵐進氏	J-PARC MRでの非線形ディスパージョン関数を用いた六極誤差磁場の探索
THP057	Tan Yulian氏	J-PARC MRにおける三次共鳴補正のためのTrim-Sアップグレードの設計
FRP010	山田 秀衛	J-PARC Main Ring向けEPICS I/Oコントローラとしての小型ファンレスサーバの運用10年
FRP027	白形政司氏	J-PARC MR 30 kWビームダンプ冷却系の設計
FRP032	武藤亮太郎氏	J-PARC遅い取り出しビームロス低減のためのシリコン湾曲結晶の開発
FRP033	沼井一憲氏	故障した静電セプタムの改修
FRP065	芝田達伸氏	J-PARC MR速い取り出し用Eddyセプタム電磁石の性能評価
FRP074	中村剛氏	J-PARC 主リングでのデバンチしたビームに対する微分特性BPMでの横方向フィードバックの検討
FRP075	中村剛氏	J-PARC 用 イントラバンチフィードバックの開発: 試作機と実機の試験
FRP076	浅見高史氏	J-PARC主リングにおける閉軌道応答を用いたチューン測定
FRP078	橋本義徳氏	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(6)

WHP011	小栗英知氏	J-PARC加速器の現状
WEKO05	松原綱之氏	J-PARCにおける高エネルギー実験の現状と今後

発表番号 発表者 発表タイトル

- 「J-PARC LI/RCS/MLF/HD/NU」
- THO603 杉田萌氏 J-PARC RCSにおける機械学習を用いたバイントランプ電源用任意波形の生成
 - THO610 小島邦洸氏 J-PARC RCS の大強度化に向けた線形和共鳴の補正研究
 - FRO601 近藤恭弘氏 J-PARCリニアック50Hz運転検証試験
 - FRO602 Yee-rendon Bruce氏 JAEA-ADS入射器のビーム物理設計
 - FRO606 高柳智弘氏 SiC-MOSFETを用いたJ-PARCキッカー用半導体LTD電源
 - WEP032 田村文彦氏 J-PARC RCS におけるシングルエンド金属磁性体空洞の運転経験
 - WEP033 吉本政弘氏 J-PARC RCS荷電変換フォイルの温度計測にむけた開発
 - WEP034 足立恭介氏 J-PARC RCSにおける2倍高調波を用いたパンチ平坦化操作の最適化
 - WEP036 小島邦洸氏 J-PARC RCS におけるビームロスの局所化に向けた研究
 - WEP057 伊藤崇氏 J-PARC SDTL空洞で発生したマルチパクタに対する抑制方法の検討
 - WEO601 井上翔一氏 J-PARC・MLF水銀標的からの熱中性子領域における180度方向中性子収量(TTNY)の測定および評価
 - WEO603 明午伸一郎氏 ビーム窓の散乱を利用した数GeV二次陽子利用法の高度化 2
 - WEKO05 松原綱之氏 J-PARCにおける高エネルギー実験の現状と今後
 - THO607 井上薫氏 高放射化場での効率的な測定を実現する三次元測定機を用いた測定手法の確立
 - WEP066 不破康裕氏 J-PARCリニアック大電力高周波源の50Hz運転対応に関する検討
 - THP013 諸橋裕子氏 J-PARCリニアックMEBT2における真空系トラブル事例と対策
 - THP028 Saha Pranab Kumar氏 J-PARC RCSにおける1MW出力を超える利用運転に向けたビームロス低減
 - THP029 山口雄司氏 J-PARC核破砕中性子源の陽子ビーム窓材の照射試験
 - THP039 柴田崇統氏 J-PARCイオン源での90mA負水素イオンビーム試験
 - THP051 ニツ川健太氏 J-PARCリニアック低電力高周波制御システムの現状
 - THP052 ニツ川健太氏 J-PARCリニアックの972-MHzデジタルシステム更新時のための実証試験
 - THP061 山口雄司氏 3GeV陽子ビーム輸送施設のためのパルス偏向電磁石とセプタム電磁石の検討
 - THP066 宮尾 智章氏 J-PARCリニアックMEBT2における縦方向ビームマッチングのためのパンチシェイプモニタのトラブル事例と進捗報告
 - THP069 山田逸平氏 J-PARC RCS用イントラパンチ型ビーム不安定性抑制装置の検討
 - FRP006 地村幹氏 J-PARC初段加速器試験装置における人員保護システムの高度化
 - FRP026 中野秀仁氏 J-PARC50Hz試験用ダンプの放射線遮蔽設計検討
 - FRP028 山本 風海氏 J-PARC 3 GeVシンクロトロン入射ダンプの中性子によるサンプル放射化評価 (2)
 - FRP030 仲野谷孝充氏 J-PARC 3GeVシンクロトロンにおける荷電変換フォイルの使用状況とフォイル駆動機構の交換作業概要
 - FRP031 沖田英史氏 J-PARC RCSの縦方向ビーム操作の現状
 - FRP043 渡辺丈晃氏 ハドロン実験施設における回転円盤型2次粒子生成標的の開発 (2)
 - FRP056 溝端仁志氏 J-PARCリニアック大電力高周波源機器のトラブル事例
 - FRP068 渡辺泰広氏 大容量加速器用電磁石電源の内製化
 - TFP003 的場史朗氏 J-PARC MLFミュオン生成回転標的の現状

「J-PARC g-2/EDM実験関連」

- WEPO704 飯沼裕美氏 J-PARC g-2/EDM実験のためのビーム入射設計と実証実験成果報告
- WEO704 近藤彩夏氏 ミューオン加速用Disk-and-Washer試作機の低電力試験
- THO703 中川鈴彩氏 低エミッタンスミュオンビーム測定のためのチェレンコフ放射型プロファイルモニターの開発
- THOP01 鷺見一路氏 J-PARCミュオン-g-2/EDM実験のための低エミッタンスミュオンビーム加速に関する研究
- FRO607 阿部充志氏 g-2/EDM 精密計測用磁石の磁場構成と調整方法の検討
- WEP012 楊敏氏 小型ミュオンリニアックにJ-PARC加速器制御システムを導入する挑戦

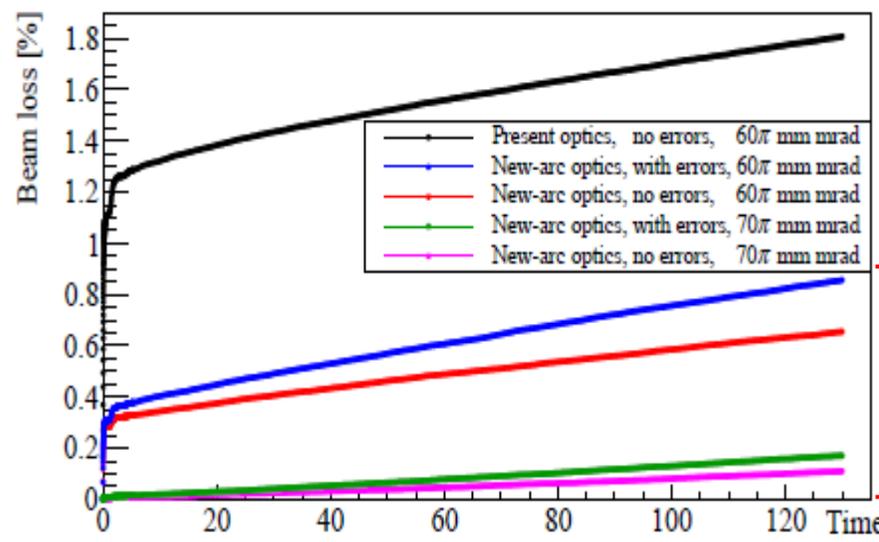
「J-PARC関係者」

- THO609 斎藤誉志大氏 多価重イオンの大強度ビーム輸送系に対するMulti-Frequency RFQを用いた質量分離法の適用可能性の検討
- WEP053 不破康裕氏 超伝導薄膜研究用ニオブ製3GHzシングルセル空洞の基本特性測定
- WEP054 仁井啓介氏 3GHzニオブ単セル空洞の縦型電解研磨
- FRP018 大谷将士氏 高専における小型加速器制作にかかわる活動報告
- FRP019 大谷将士氏 高専における加速器制作活動AxeLatoonと活動内容

Beam dynamics has been explored for 1.3 MW operation in Simulations.

Simulated beam losses for 1.3 MW eq. ($4E13$ ppb) at the working point $(\nu_x, \nu_y) = (21.40, 21.30)$ to compare the effects of

- present/**New-arc** optics
- field error setting
- MR collimator setting



← Present Optics
in $21 < \nu_x, \nu_y < 21.5$

← **New-arc Optics**
in $21 < \nu_x, \nu_y < 21.5$

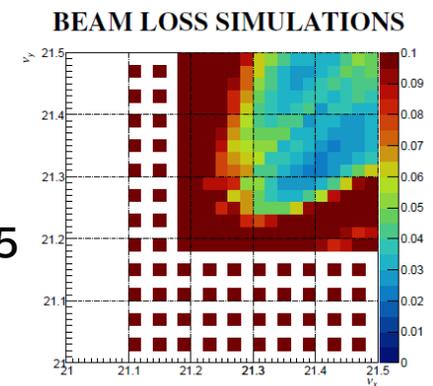


Figure 2: Beam losses in each tune with the present optics.

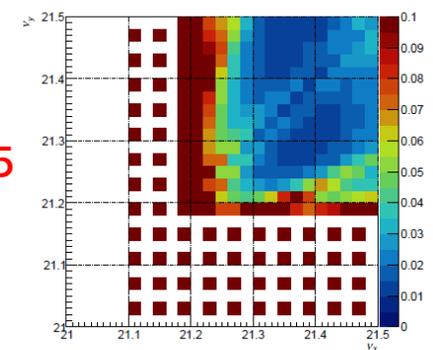
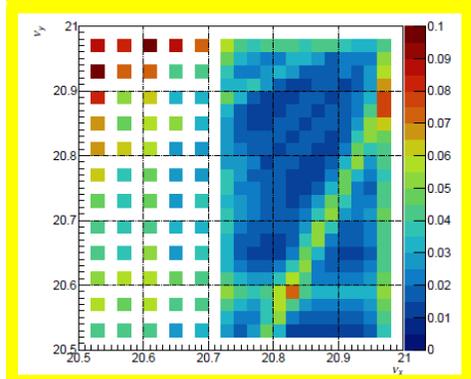


Figure 3: Beam losses in each tune with the new-arc optics.

In present user operation, the MR collimators are set in 68π horizontally, where beam losses are well localized at the collimator area.

New-Arc Optics
in $20.5 < \nu_x, \nu_y < 21$



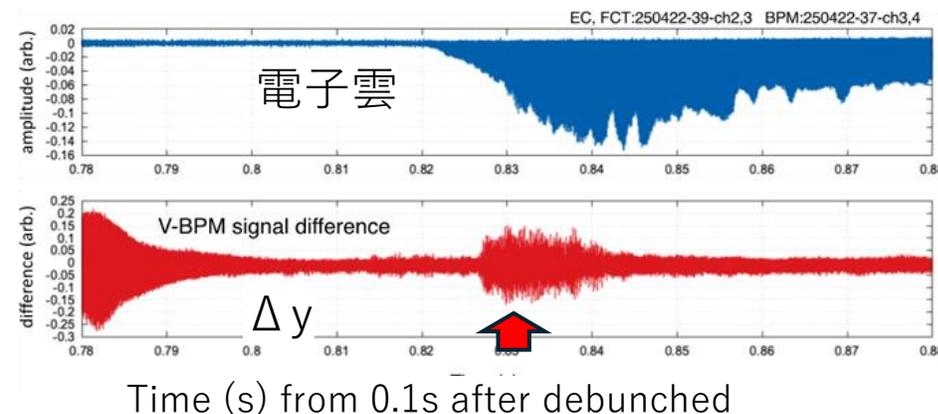
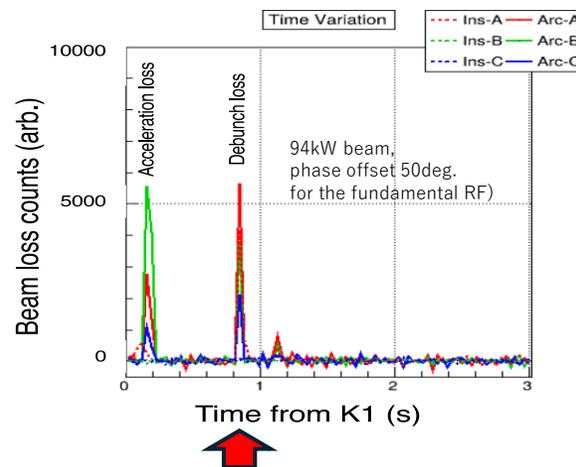
Further new working points in the region of $20.5 < \nu_x, \nu_y < 21$ are explored in simulation, adopting the concept of the new-arc optics. Hardware requirements are under investigation.

Simulated dynamic surveys in different optics. Dark-Blue points have low beam loss.

SX大強度化には、Flat topのデバンチ過程での不安定性の抑制が課題

デバンチ過程でロス大のとき、鉛直方向ゆれと電子雲が同時発生

電子雲の由来は？
陽子ビームの縦方向Microwave構造が起因となり得る



Microwave構造はSlippageの引き上げで緩和

→MR-SX向け性能を維持した上でのSlippage 1.5倍光学を検討中

The longitudinal microwave instability threshold (the Keil-Schnell criterion)

$$\left| \frac{Z_L}{n} \right| \leq \frac{2\pi\beta E \sigma_\delta^2 (\eta) F}{eI}$$

$$\eta = \frac{1}{\gamma_T^2} - \frac{1}{\gamma^2} = \alpha_c - \frac{1}{\gamma^2}$$

Table 1: K1(= B'L/Bρ) for original and ×1.5 slippage (30GeV) optics

family	K1 (original)	K1 (x1.5)
	$\alpha_c = -0.00100$	$\alpha_c = -0.00199$
	$\eta = -0.0192$	$\eta = -0.0291$
QFX	0.133	0.138
QDX	-0.169	-0.169
QFN	0.160	0.157
QDN	-0.189	-0.189
QFP	0.072	0.094
QFR	0.173	0.173
QFS	0.126	0.128
QFT	0.140	0.112
QDR	-0.173	-0.168
QDS	-0.177	-0.173
QDT	-0.150	-0.151

MR-SX Slippage factor (η)
 -0.058 (3 GeV), -0.0019 (30 GeV)
 → -0.058 (3 GeV), -0.0291 (30 GeV)

