



ニュートリノの加速器実験 T2K J-PARC

2016/8/8

五十嵐進 (KEK)

for the J-PARC MR Beam
Commissioning Group



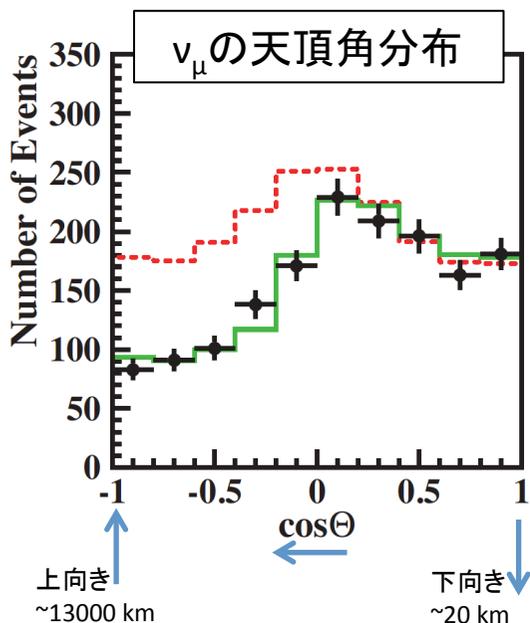
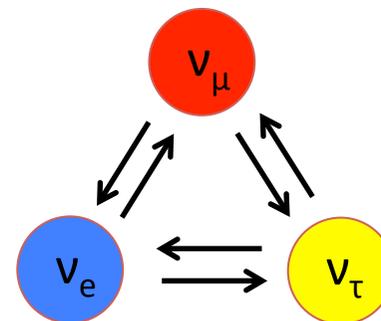
内容

- ニュートリノ振動実験
- J-PARC MR
- 速い取り出しモードの運転状況
- ビーム調整における最近の改善点
 - RCS調整による入射ビーム分布
 - 2倍高調波 rf
 - 入射キッカー
 - 不安定性の抑制
 - 共鳴補正
- 新しいチューン (21.35, 21.43) による調整
- ビームパワー目標値 750 kW のためのアップグレード
- まとめ



ニュートリノ振動実験

- 1998年 Super Kamiokande
 - 大気ニュートリノ観測でニュートリノ振動を発見。
- 1999年～2004年 K2K
 - ミューニュートリノ消失測定
- 2010年～ T2K
 - ミューニュートリノから電子ニュートリノ出現事象の発見 (2011～2013)
- 1998年の発見はニュートリノ振動という分野を作った。
- T2Kは国際的な競争の中でも一歩先行している。



太陽
(大気)

加速器
長基線

原子炉

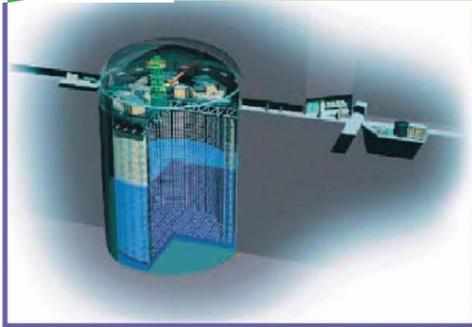
加速器
短基線

Review of Particle Data の Neutrino mixing 章で参照された実験

Experiment/Year	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Kamiokande	←																										
Super-Kamiokande	←																										
SAGE	←																										
GALLEX	←																										
GNO	←																										
Borexino	←																										
SNO	←																										
K2K	←																										
T2K	←																										
MINOS	←																										
NOvA	←																										
OPERA	←																										
ICARUS	←																										
KamLAND	←																										
Double Chooz	←																										
RENO	←																										
Daya Bay	←																										
KARMEN	←																										
LSND	←																										
NOMAD	←																										
MiniBooNE	←																										



T2K (Tokai to Kamioka)



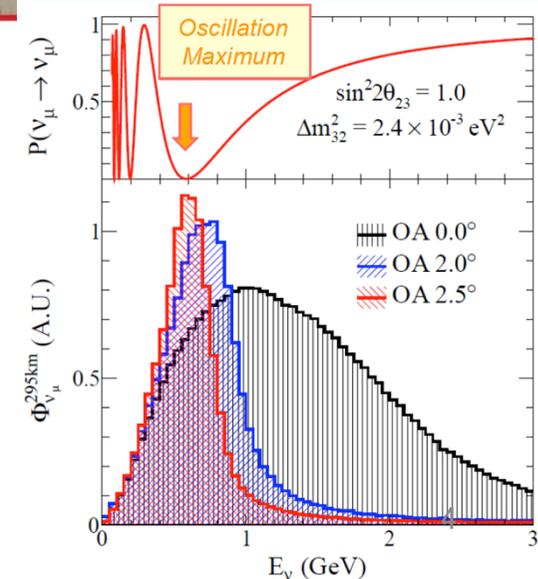
Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



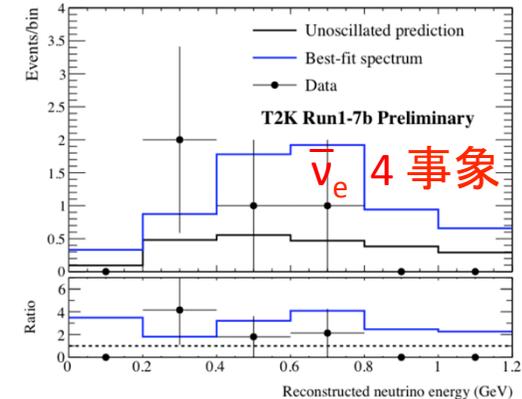
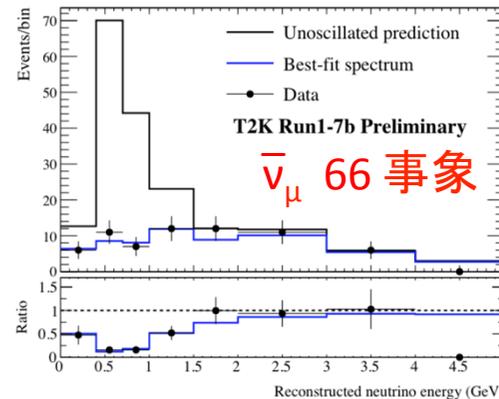
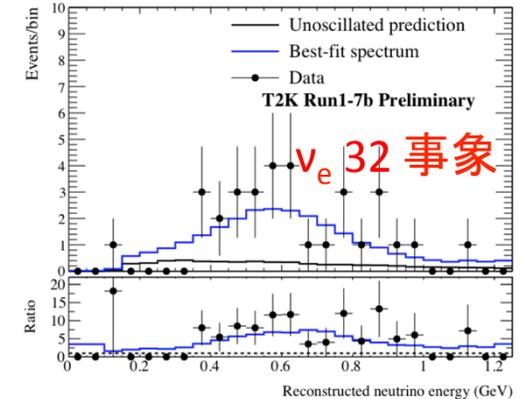
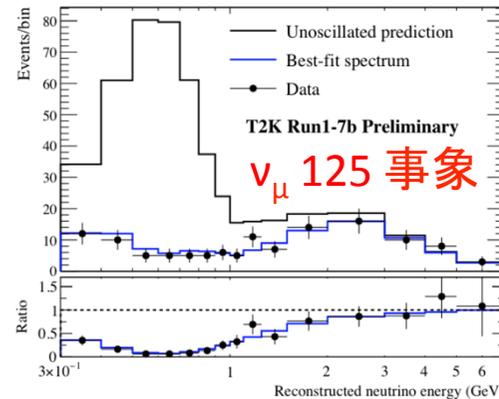
- J-PARCでニュートリノ生成 → スーパーカミオカンデで観測
- ニュートリノ振動の精密測定
 - 電子ニュートリノ出現の発見
 - ミューニュートリノ消失の精密測定
 - CP対称性の破れの発見を目指す
- 大強度陽子ビーム 750 kW(目標)
- ホーン極性の切り替えにより ν_μ または $\bar{\nu}_\mu$ を選択
- Off axis ビーム $2.5^\circ \rightarrow 0.6$ GeV の narrow band ビーム
- $L=295$ kmで振動確率最大 @ 0.6 GeV





T2K CP対称性の破れの探索結果 Preliminary!

- 2016年5月までのデータ (NEUTRINO2016で発表)
 - 1.51×10^{21} protons on target
 - (解析は 1.44×10^{21} pot 分)
 - ~90% (CP非保存の信頼度)
- T2K 承認済み
 - 7.8×10^{21} pot (2021年頃まで)
 - 2 ~ 2.5 σ
- T2K-2 提案中
 - 2×10^{22} pot (2026年頃まで)
 - 3 σ
- 2026年以降は Hyper-Kamiokande
 - 5 σ

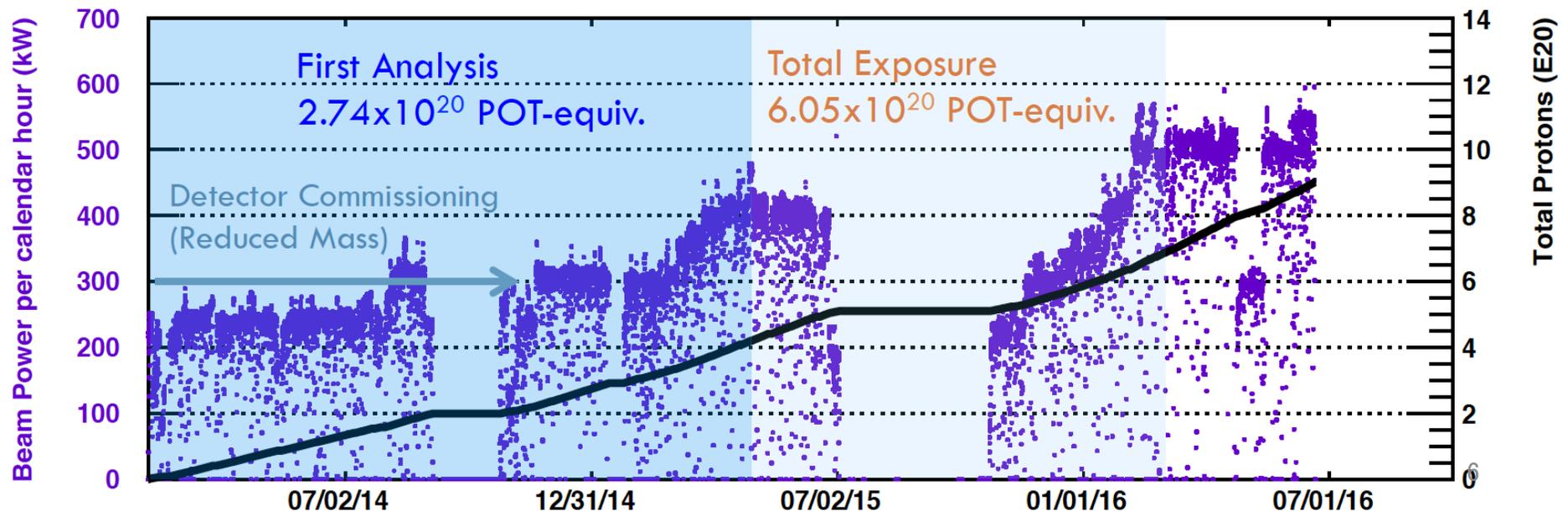
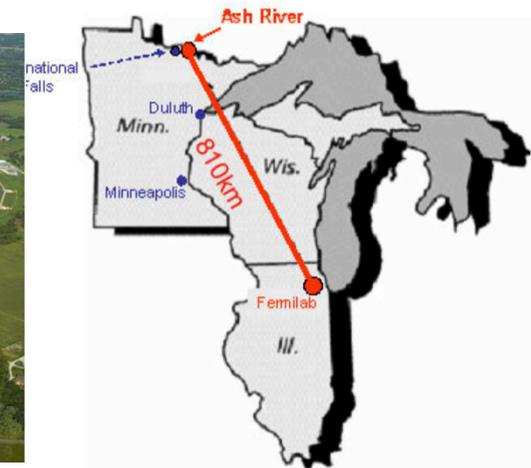


	順階層 (逆階層)			
	ニュートリノデータ		反ニュートリノデータ	
	μ 事象	e事象	μ 事象	e事象
$\delta = -\pi/2$	127.88 (129.40)	26.99 (23.94)	64.41 (65.08)	6.02 (6.45)
$\delta = 0$	127.56 (129.72)	22.74 (19.87)	64.26 (65.26)	6.91 (7.36)
$\delta = \pi/2$	127.75 (129.27)	18.45 (16.10)	64.42 (65.11)	7.68 (8.35)
$\delta = \pm\pi$	128.11 (128.08)	22.70 (20.17)	64.57 (65.95)	6.79 (7.44)
観測数	125	32	66	4



NOvA (NuMI Off-Axis ν_e Appearance)

- Fermilab Main Injector
 - 120 GeV
 - 560 kW operation
 - 700 kW demonstrated
- T2Kとの比較のためには、
ビーム強度、検出効率、運転
時間等を考慮する必要がある。
- 競争力としては、同程度。
- T2Kが約1年分先行している。





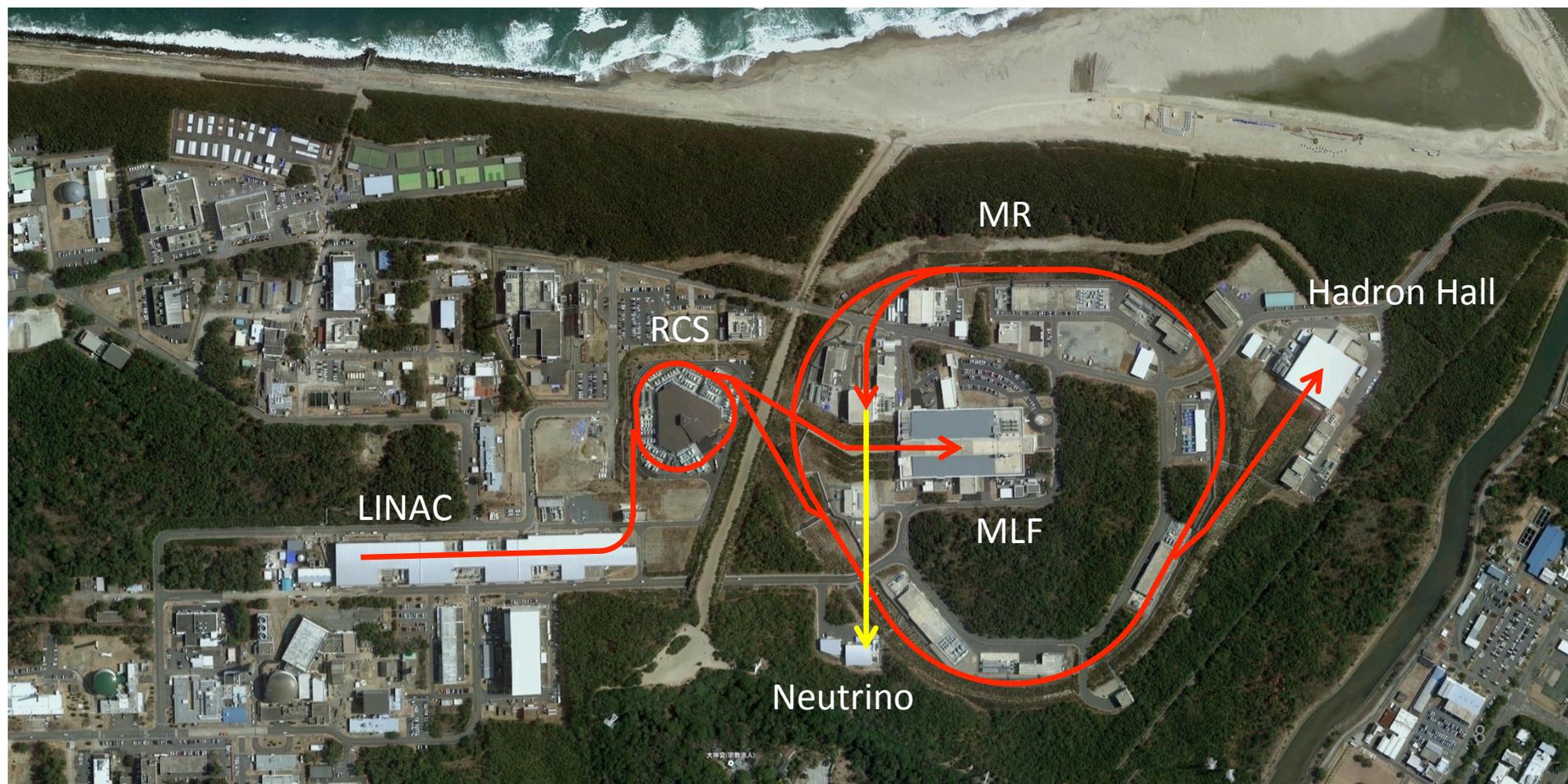
内容

- ニュートリノ振動実験
- **J-PARC MR**
- 速い取り出しモードの運転状況
- ビーム調整における最近の改善点
 - RCS調整による入射ビーム分布
 - 2倍高調波 rf
 - 入射キッカー
 - 不安定性の抑制
 - 共鳴補正
- 新しいチューン (21.35, 21.43) による調整
- ビームパワー目標値 750 kW のためのアップグレード
- まとめ



J-PARC 大強度陽子加速器施設

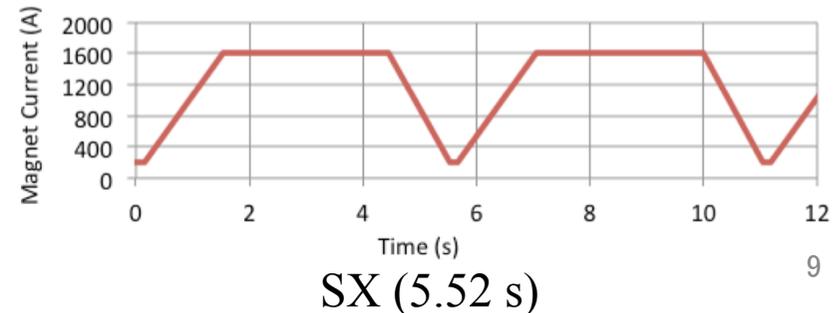
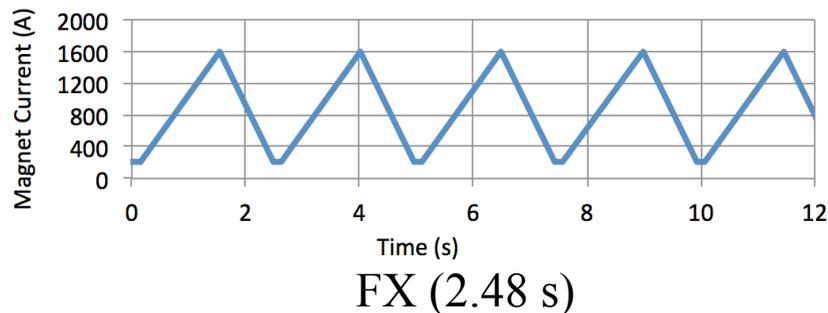
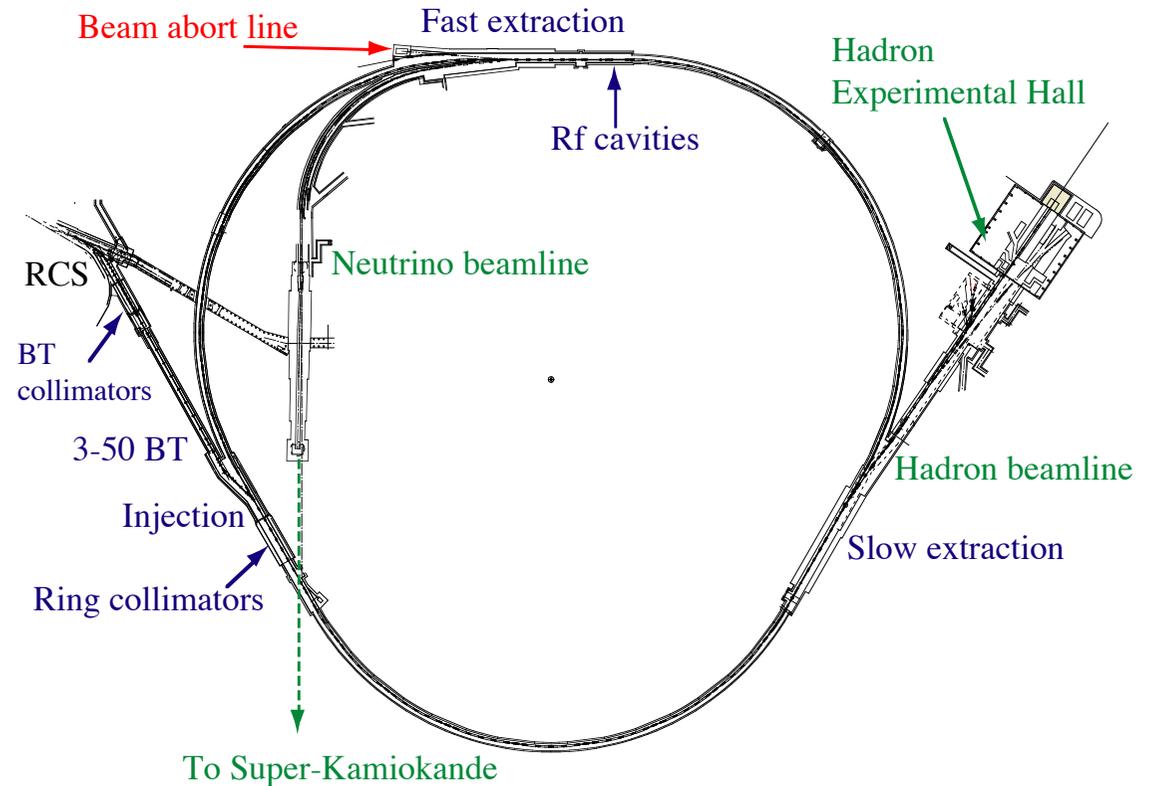
- 大強度陽子加速器
- 二次粒子を利用する実験施設
- 日本原子力研究開発機構(JAEA)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)が共同で運営。
- LINAC (400 MeV)
- Rapid Cycling Synchrotron (RCS) (3 GeV)
 - 物質・生命科学実験施設 (MLF)
- Main Ring (MR) (30 GeV)
 - ニュートリノ実験施設
 - ハドロン実験施設





MR設計と運転モード

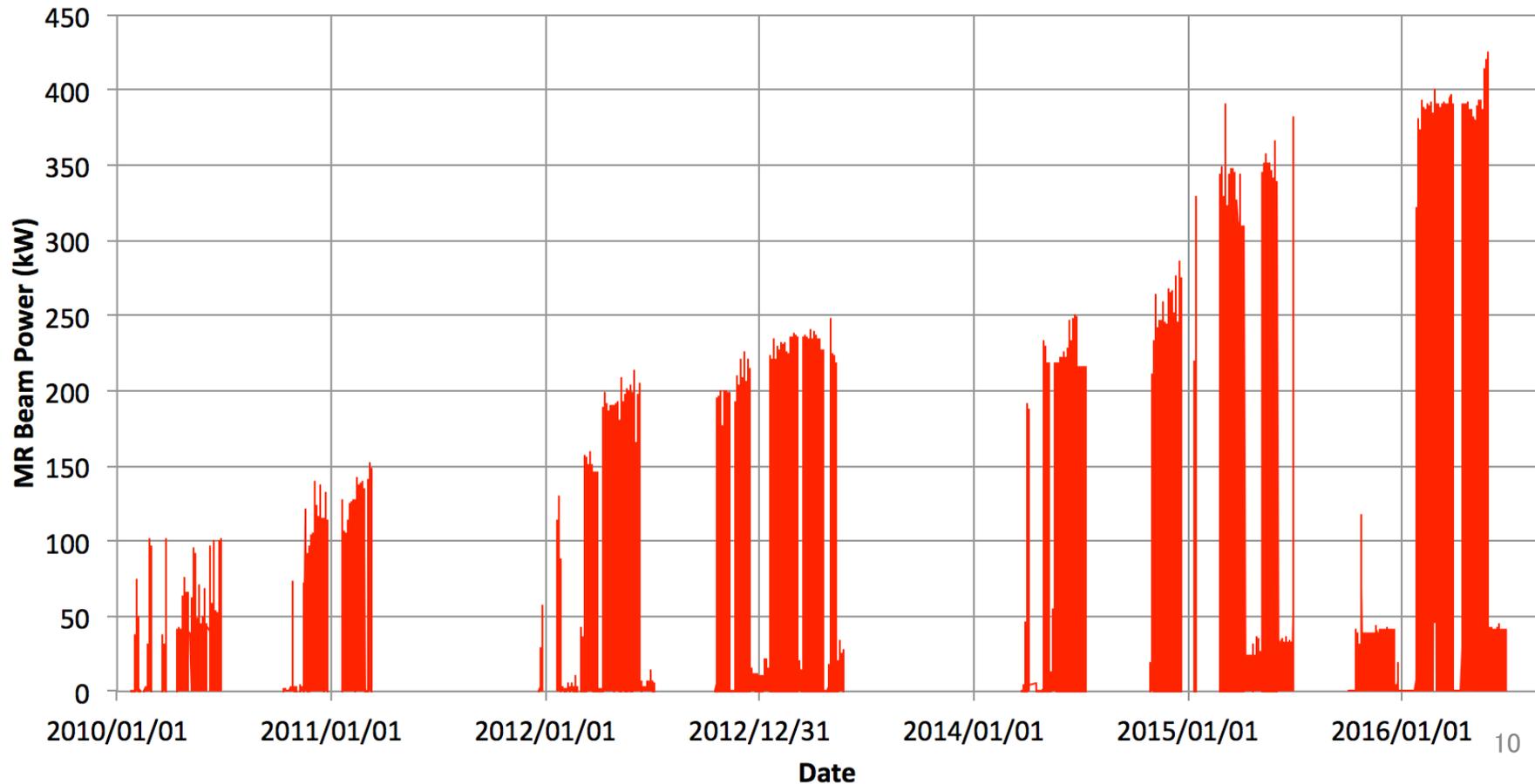
- 周長 1567.5 m
- 3回対称
- 入射エネルギー 3GeV
- 出射エネルギー 30 GeV
- 設計ビームパワー: 750 kW
- コミッショニング開始
 - 2008年5月 入射
 - 2008年12月 加速と取り出し
- 速い取り出しモード (FX)
 - ニュートリノ実験施設
 - 1 ターン取り出し
- 遅い取り出しモード (SX)
 - ハドロン実験施設
 - ~2秒のスパイル取り出し





MRビームパワートレンド

- 2016年1月から5月の運転でのビームパワーは約390 kW、加速陽子数はパルスあたり 2×10^{14} 。
- この加速陽子数と、繰り返し時間を 2.48 s から 1.3 s に早くすることで、750 kWの目標ビームパワーを達成する計画。
- 最後の3日間は 415 kWで運転を行った。





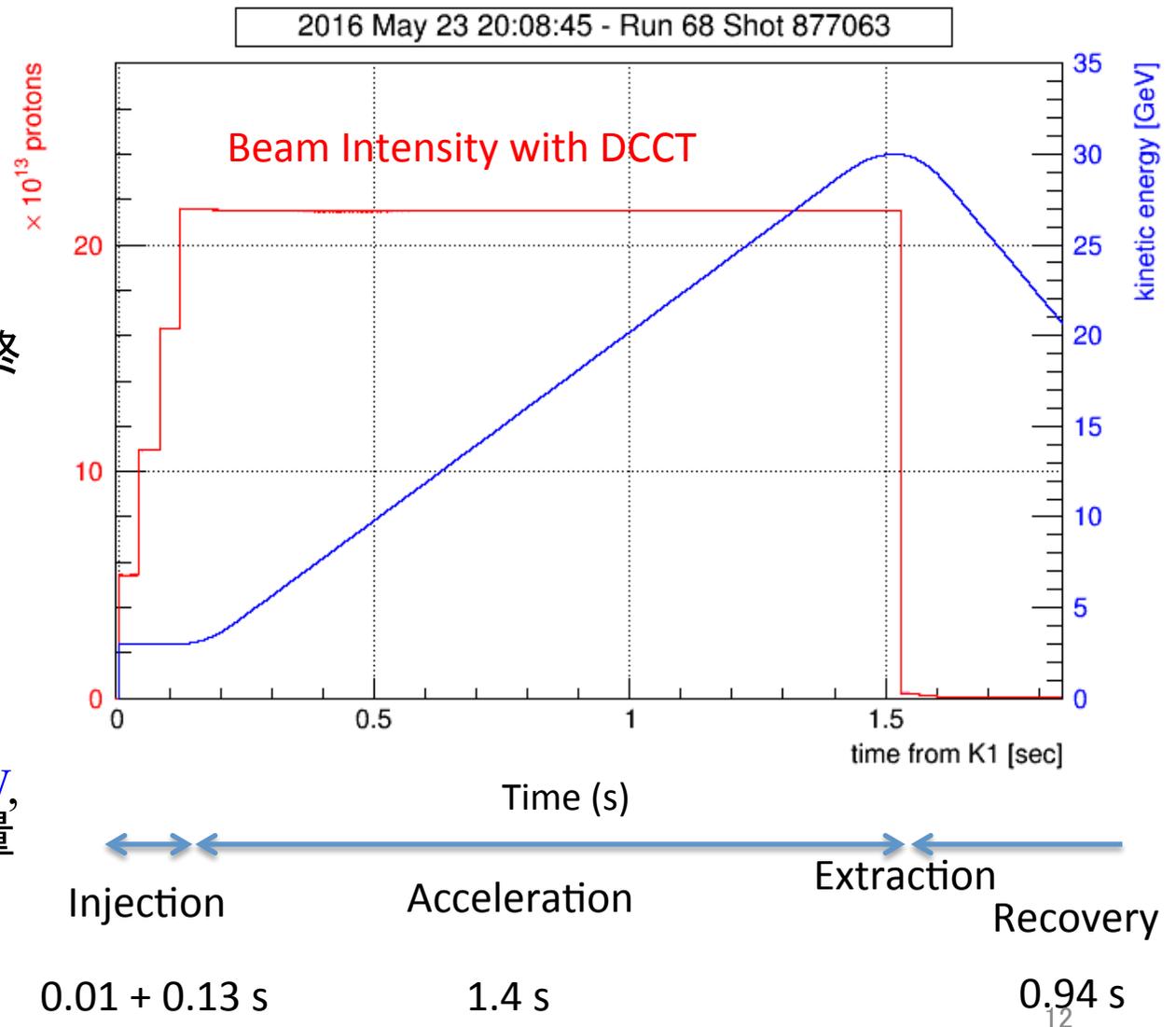
内容

- ニュートリノ振動実験
- J-PARC MR
- **速い取り出しモードの運転状況**
- **ビーム調整における最近の改善点**
 - RCS調整による入射ビーム分布
 - 2倍高調波 rf
 - 入射キッカー
 - 不安定性の抑制
 - 共鳴補正
- 新しいチューン (21.35, 21.43) による調整
- ビームパワー目標値 750 kW のためのアップグレード
- まとめ



速い取り出しモードの運転状況

- ビームパワー : 416 kW
- 繰り返し周期 : 2.48 sec
- 0.13 s の期間に 4回に分けて 8 バンチ入射
- $2.7e13$ protons per bunch (ppb) \times 8 @ 入射時
- $2.15e14$ ppp @ P3 (加速終了時)
- 入射期間中のロス : 170 W
- 加速開始時のロス (0.12 s) : 417 W
- MRコリメータのパワー許容量は 2 kW
- 3-50BTでのロス : <100 W, <3 -50BTコリメータ許容量 2 kW

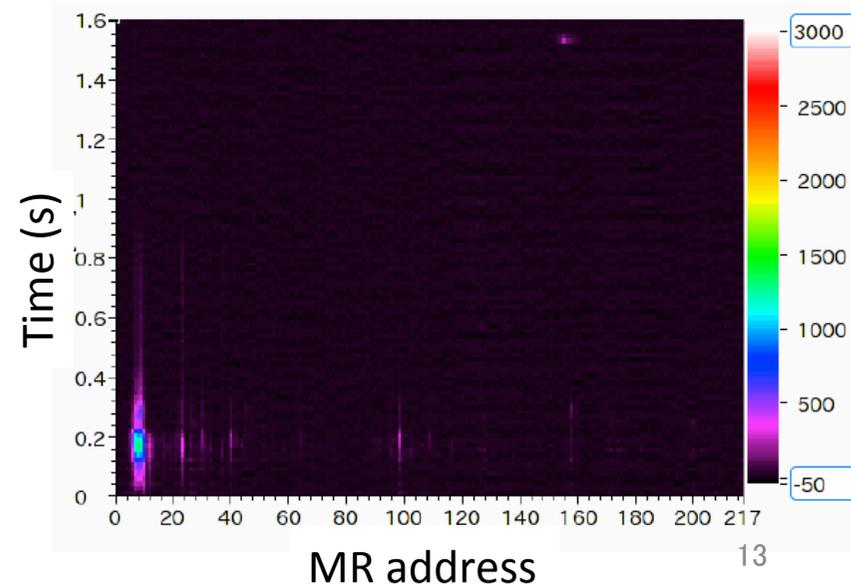
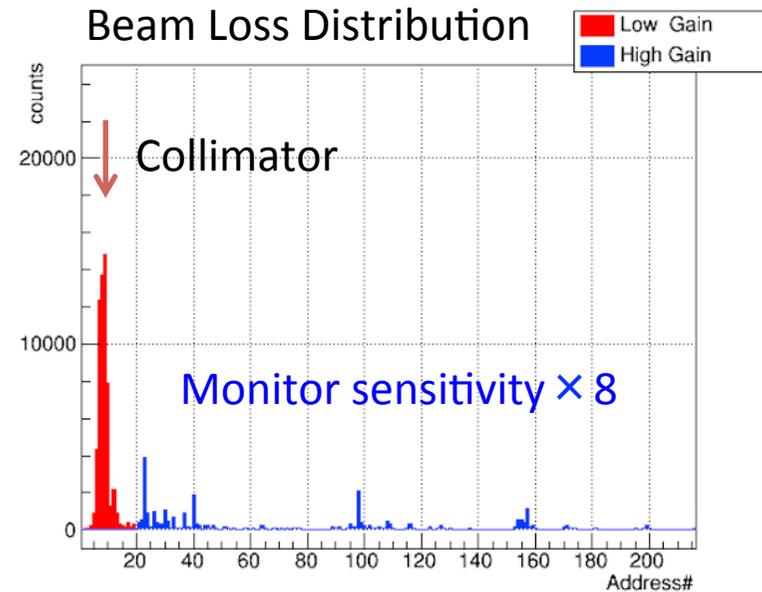




速い取り出しモードでのビーム調整項目

ビームロスを最小化することが目標

- 空間電荷効果の低減のため
 - 2倍高調波を使った rf 調整でバンチングファクターを改善する。
- 実効的な物理的アパーチャーの改善のため
 - Closed orbit distortion の補正
 - 光学測定と補正
- 力学的アパーチャーの改善のため
 - 線形結合和共鳴の補正
 - 半整数共鳴の補正
 - 三次共鳴の補正
- コリメータを使ってビームロス局在化





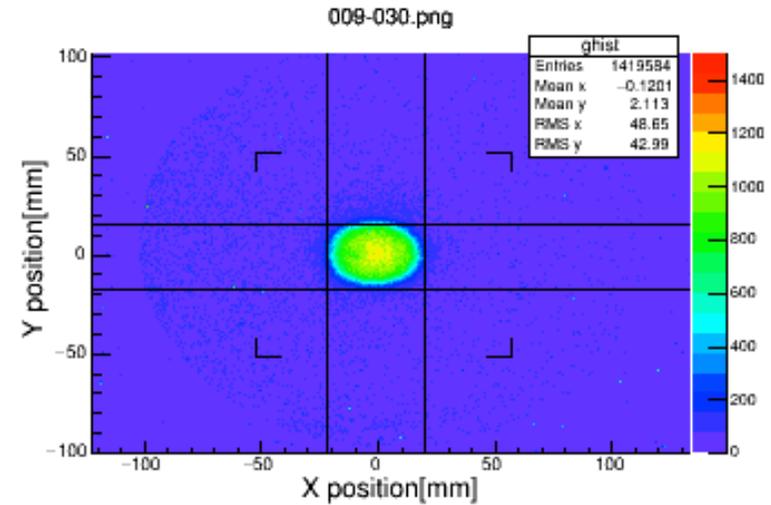
内容

- ニュートリノ振動実験
- J-PARC MR
- 速い取り出しモードの運転状況
- **ビーム調整における最近の改善点**
 - RCS調整による入射ビーム分布
 - 2倍高調波 rf
 - 入射キッカー
 - 不安定性の抑制
 - 共鳴補正
- 新しいチューン (21.35, 21.43) による調整
- ビームパワー目標値 750 kW のためのアップグレード
- まとめ

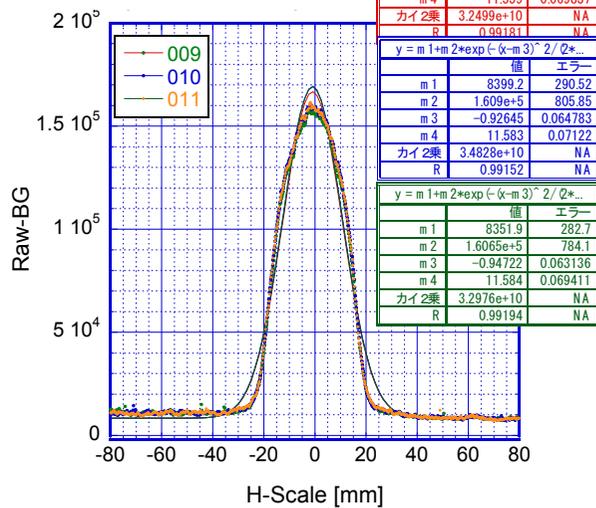


RCS調整による入射ビーム分布の改善

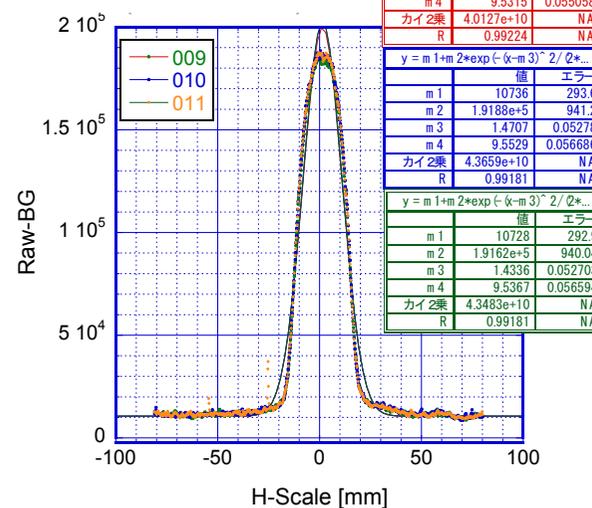
- RCSビームスタディにより、MR大強度運転のためのRCSでの入射ポイントおよびチューン設定等のパラメータの最適化を行っている。
- 3-50BTの optical transition radiation monitor (OTR) で横方向分布を測定。
- ビーム強度 3.48×10^{13} ppb
- RCS 830 kW 相当、MR 540 kW 相当。
- RCS 50π correlated point
- 水平方向エミッタンス (100%) : 26.8π mmmrad
- 垂直方向エミッタンス (100%) : 24.6π mmmrad
- OTRでの β を設計値 $\beta_x = 27.2$ m, $\beta_y = 17.9$ mを仮定。



Hori. emit. (full)
 26.8π mmmrad



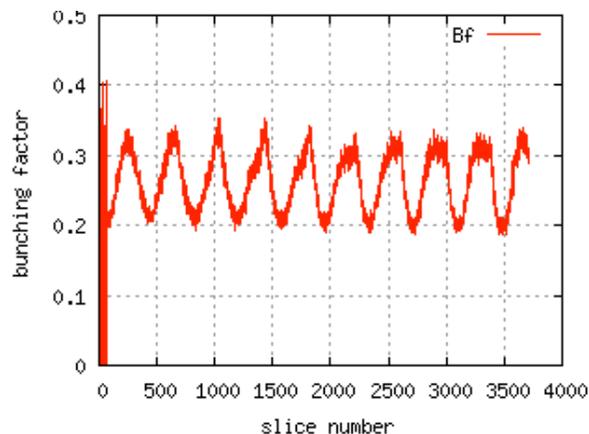
Vert. emit. (full)
 24.6π mmmrad



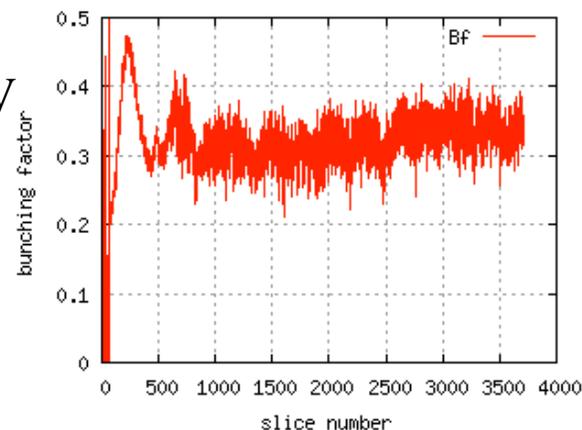


2倍高調波 rf による縦方向分布の最適化 500 kW 相当の大強度ビームについて

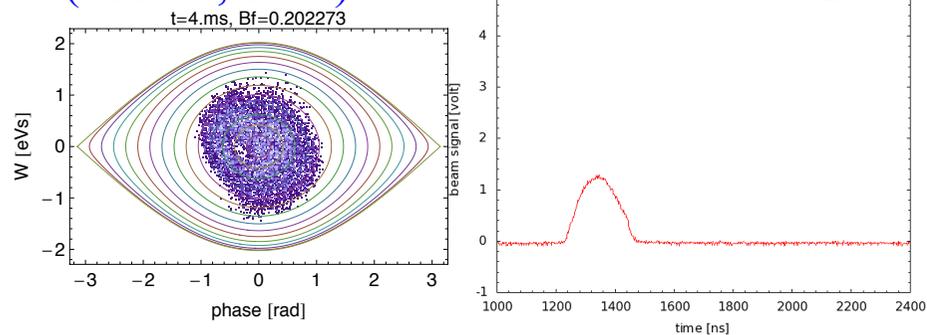
基本波 100 kV
2倍高調波 0 kV
Bunching factor
0.2 ~ 0.3
Bunch length
~200 ns



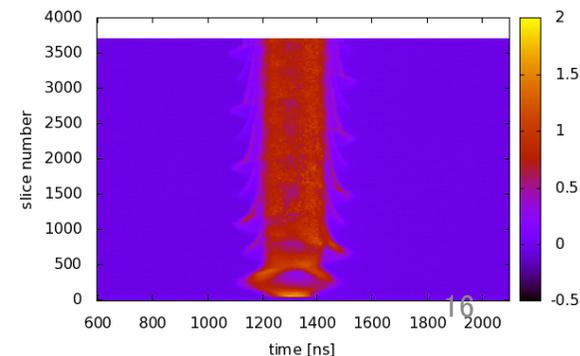
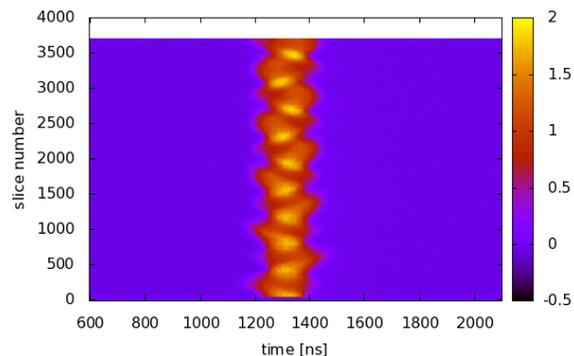
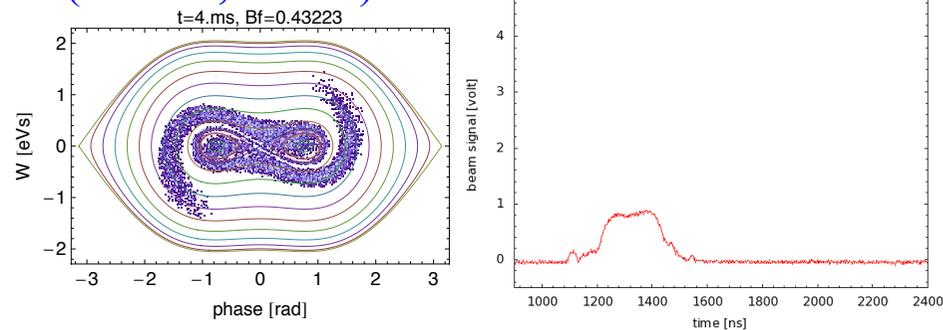
基本波 100 kV
2倍高調波 70 kV
Bunching factor
0.3 ~ 0.4
Bunch length
~400 ns



Simulation
(100 kV, 0 kV)



Simulation
(100 kV, 70 kV)

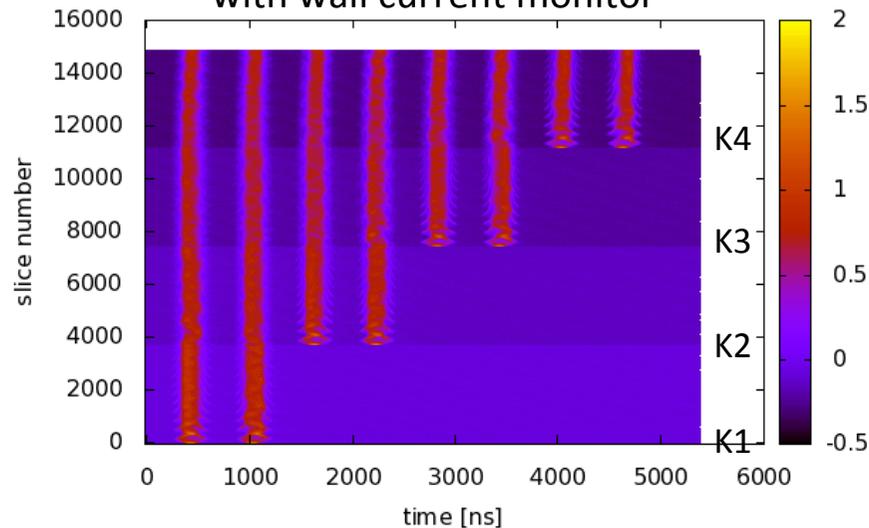




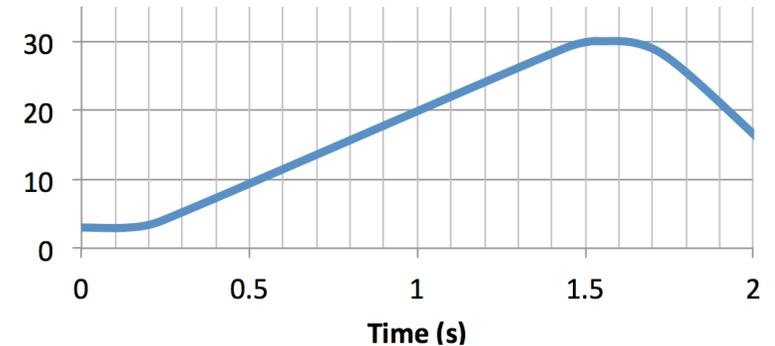
RF パターン

- RF パターン：
 - 入射：160 kV (基本波), 85 kV (2倍高調波)
 - 加速：280 kV → 256 kV (基本波)
- 大強度ビーム加速にはビームローディング補償が必要。
- バンチングファクターは入射時に 0.3 程度であった。

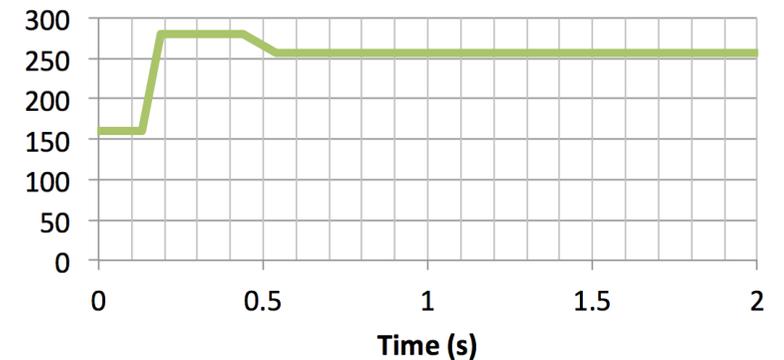
Longitudinal wave forms
during injection
with wall current monitor



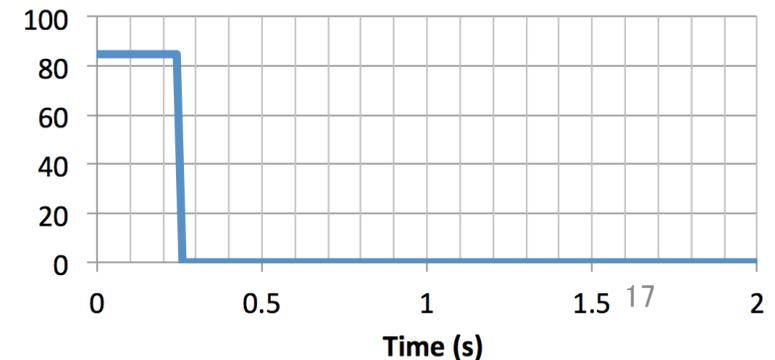
Kinetic Energy (GeV)



RF fundamental (kV)

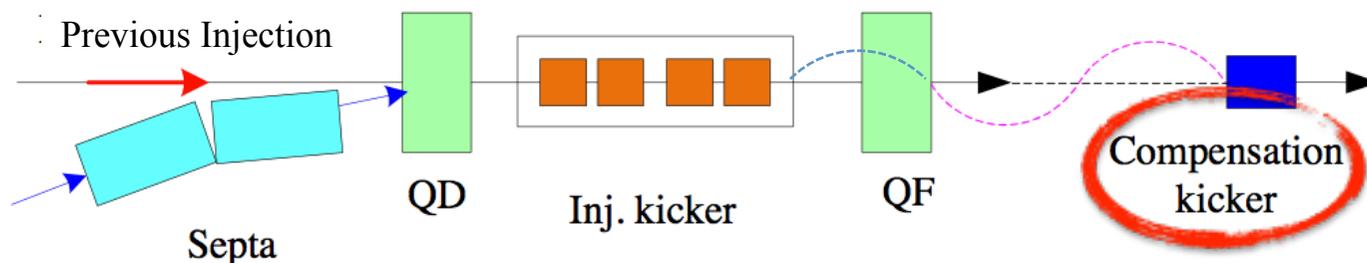
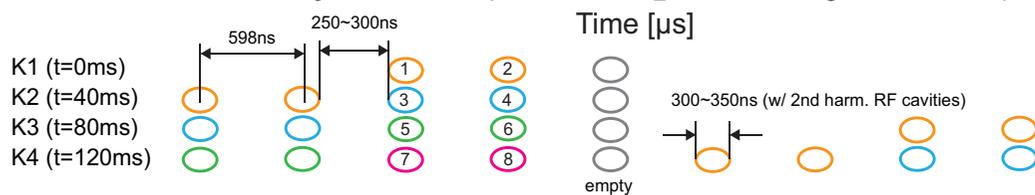
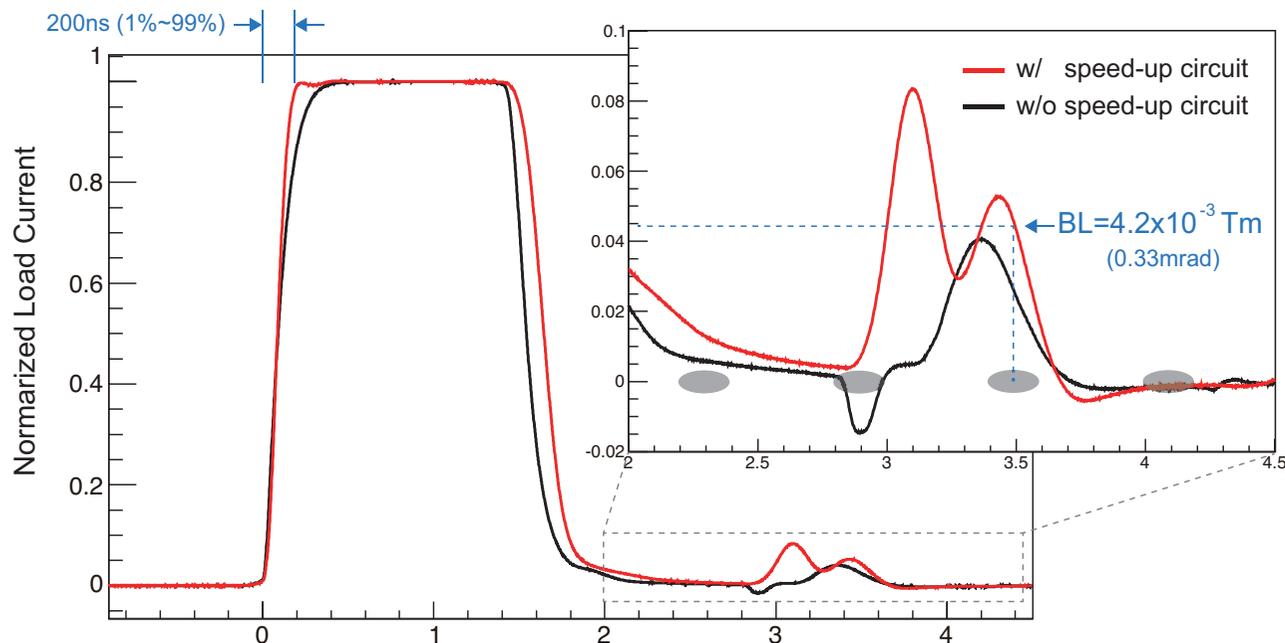


RF 2nd harmonic (kV)





入射キッカー波形



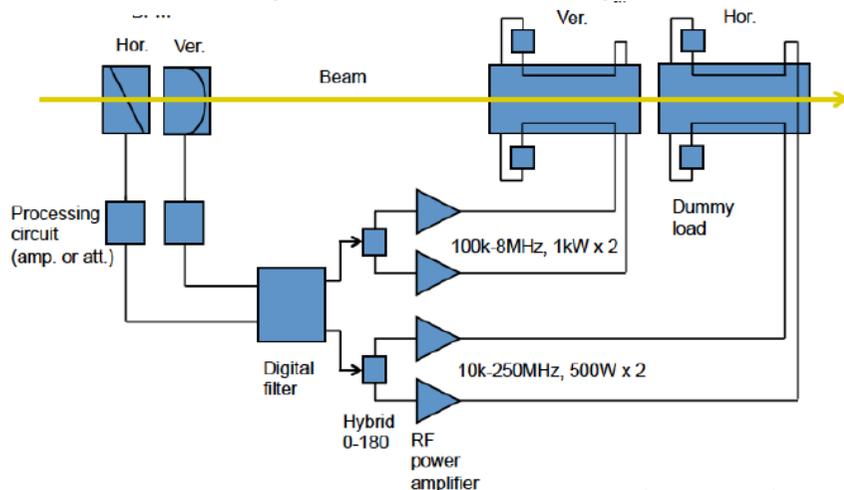
- バンチ長が長くなり入射キッカーに改善が必要となった。
- 立ち上がり時間とテールは回路の改良で改善した。
- 反射波が周回ビームをキックする。
- 補正キッカーにより余計なキックを戻すようにした。
- 入射時のビームロスも減少した。



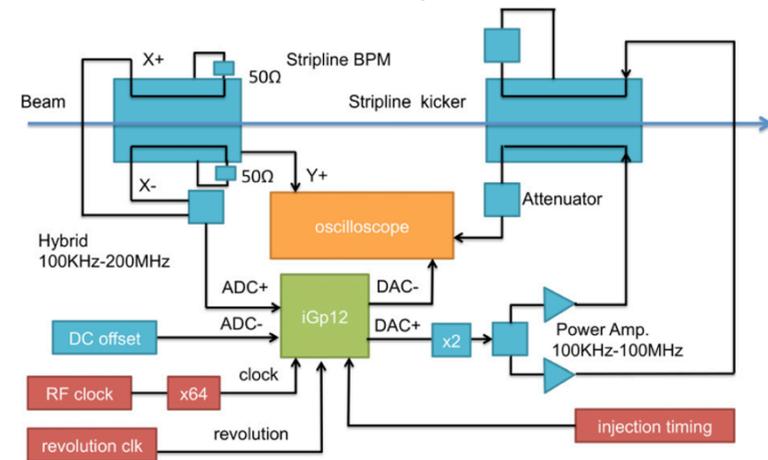
ビーム不安定性の抑制

- 不安定性を抑えるためにクロマティシティを負の値にしている。入射時には -6 程度。
- 入射期間中のコヒーレント振動は bunch by bunch feedback と intra-bunch feedback system で抑制している。
- Intra-bunch FB はさらに加速開始後 0.12 s まで使用している。

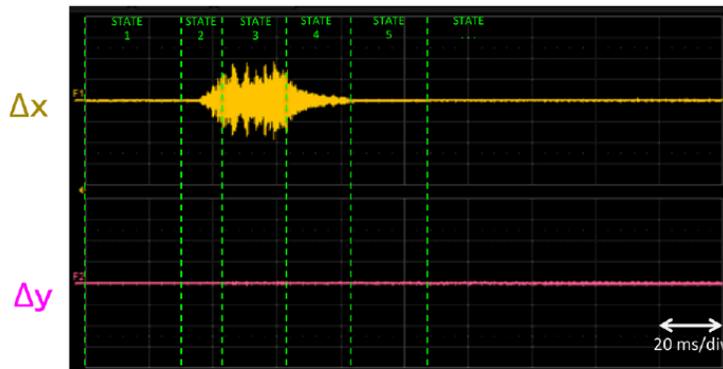
Bunch by bunch feedback system



Intra-bunch feedback system (wideband)

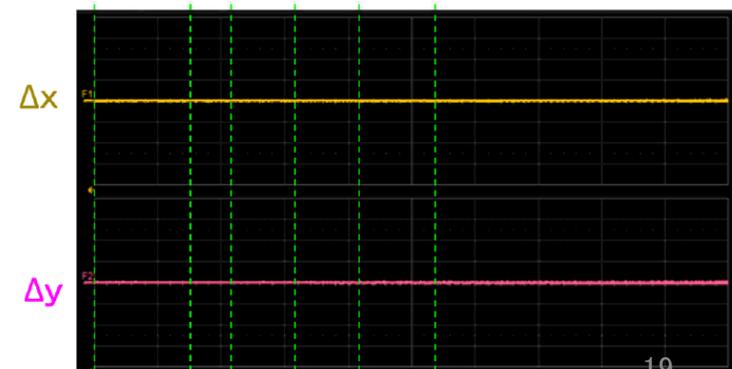


Beam Position with Intra-bunch FB off



P1+100 ms P2

Beam Position with Intra-bunch FB on



P1+100 ms P2

2.1×10^{13} ppb
 $\times 2$ bunches

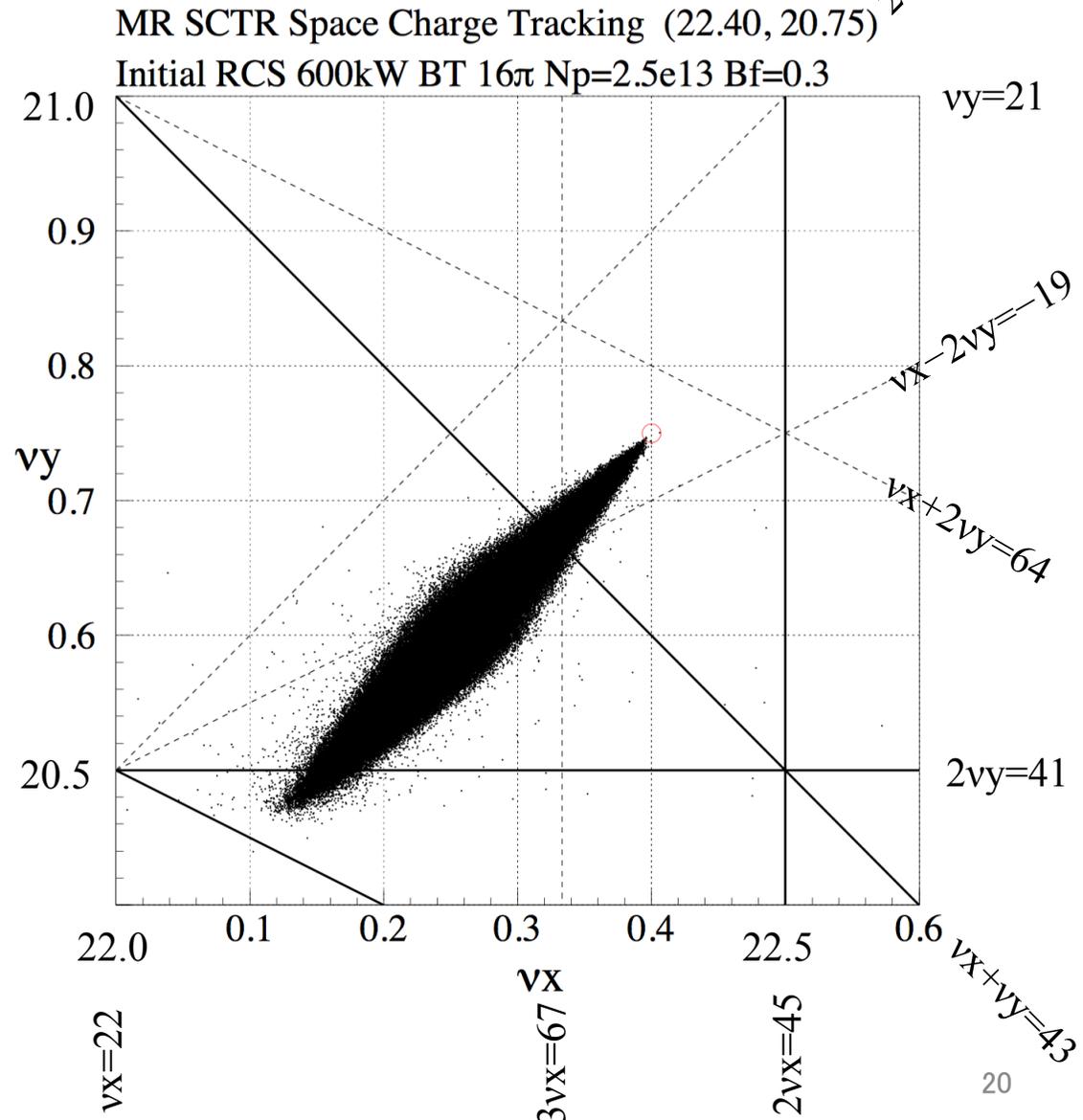


空間電荷チューンスプレッド 380 kW

- MRビームパワー 380 kW
- 繰り返し時間 : 2.48 s
- 陽子数 : 2.5×10^{13} ppb
- 横方向エミッタンス: 16π mmmrad
- バンチングファクター: 0.3
- 空間電荷チューンシフト: 0.33

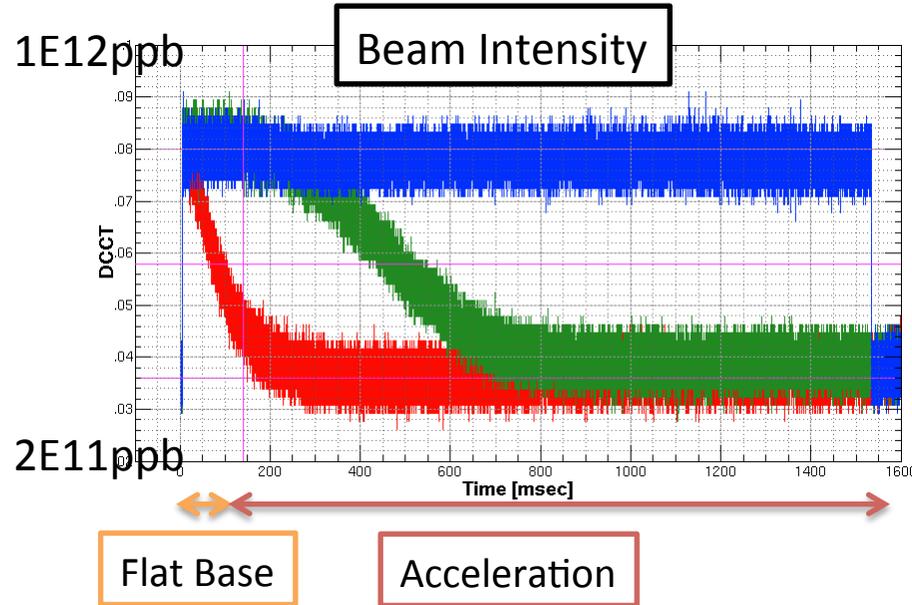
$$\Delta\nu = \frac{2\pi RNr_0}{4\pi\sigma^2 / \beta(v/c)^2 \gamma^3 B_f} = 0.33$$

- $E = 3$ GeV
- $(v/c)^2 \gamma^3 = 69.751$
- $2\pi RN = 2.5 \times 10^{13} \times 9$: Intensity
- $4\pi\sigma^2 / \beta = 16\pi$ mmmrad : Emittance
- $B_f = 0.3$: Bunching factor





スキュー四極電磁石による線形結合共鳴補正



Measured beam survival
on LCR (22.28, 20.71)
w changing Skew Q

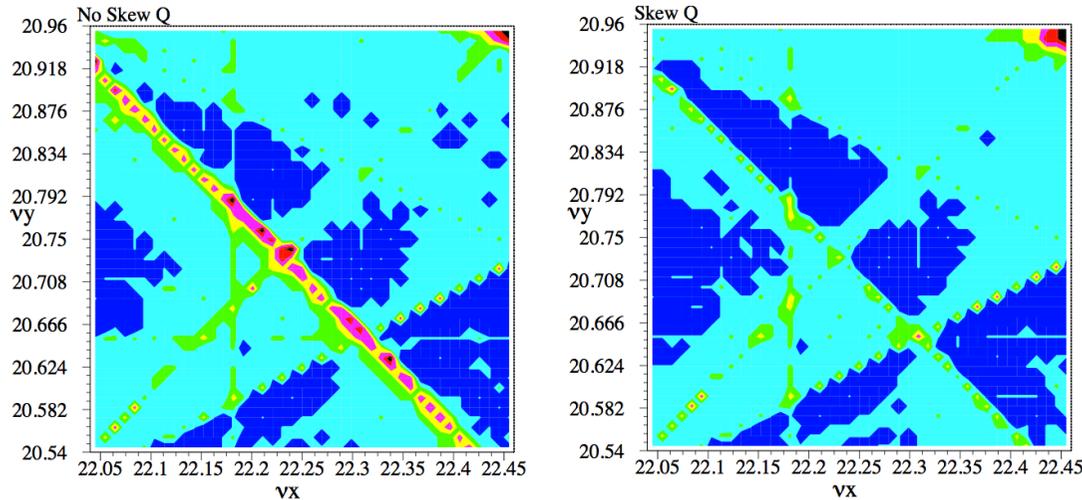
No correction

Corrected with 3 GeV DC

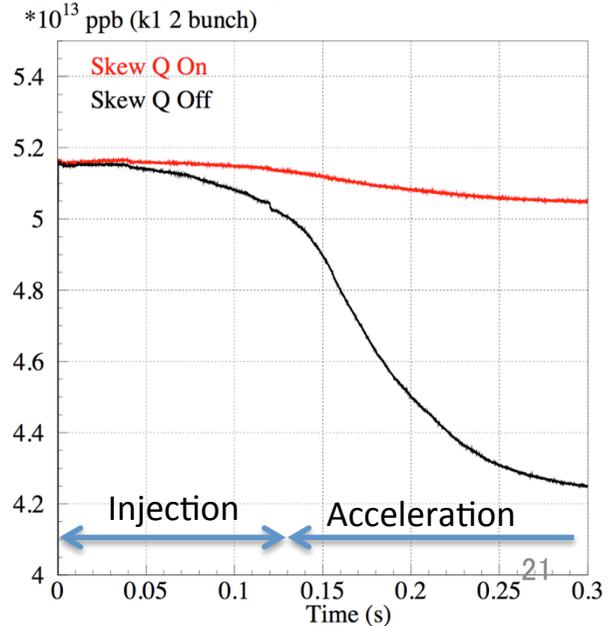
Corrected from 3 to 30 GeV

Skew Q setting reduces beam loss in high intensity operation and is used for the user operation.

Simulation for tune survey for aperture w/o Skew Q, with Skew Q



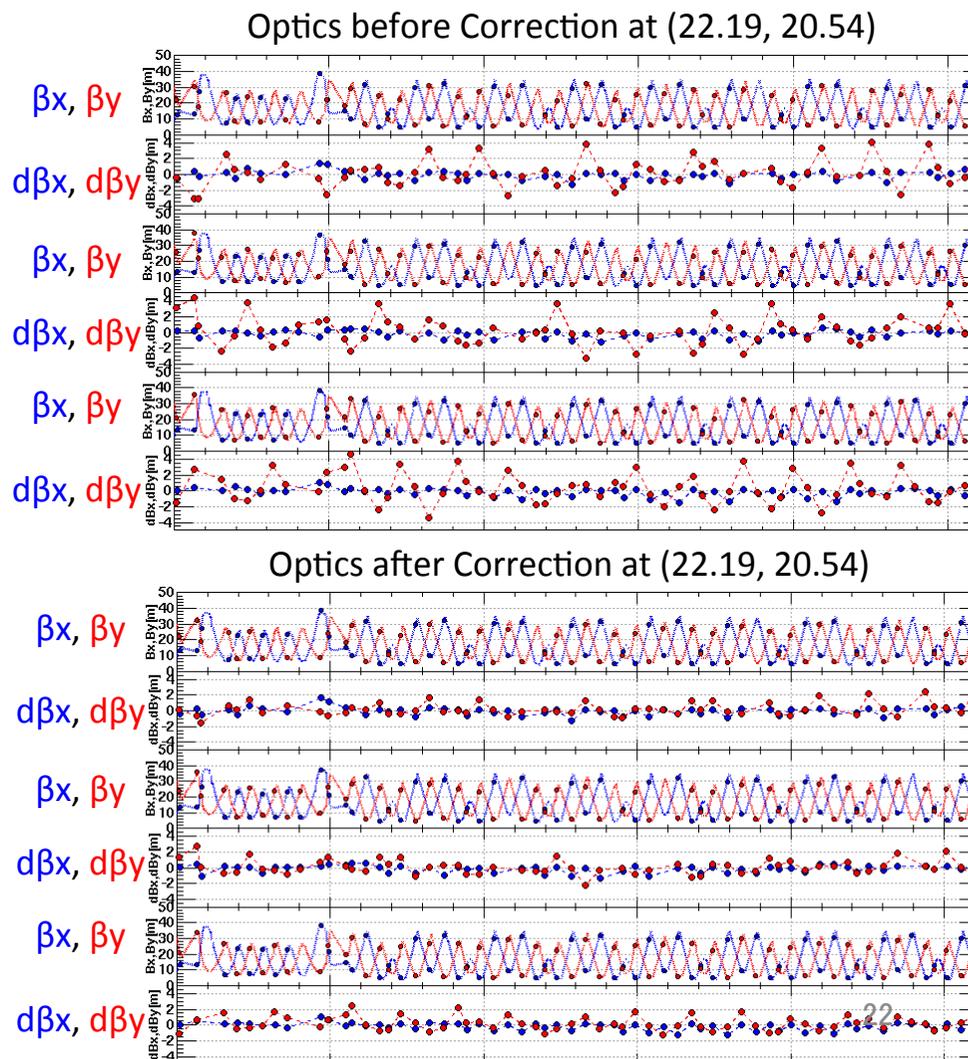
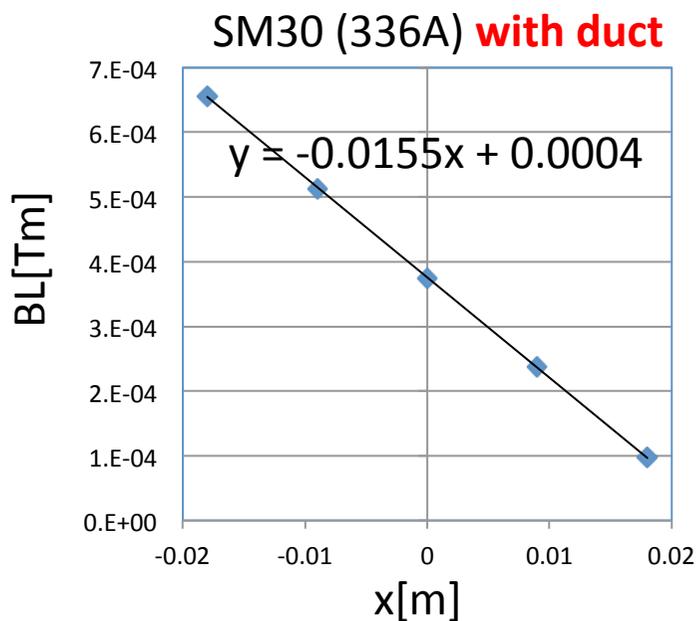
2 bunch injection 380 kW equiv.





FXセプトラム電磁石の漏れ磁場

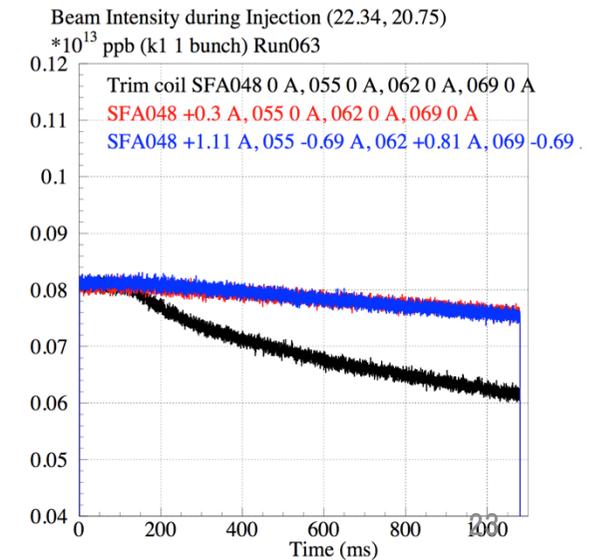
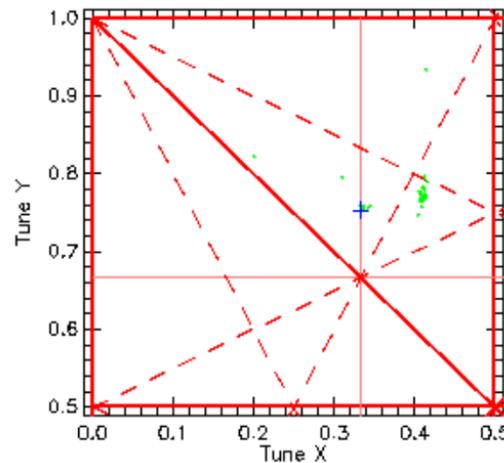
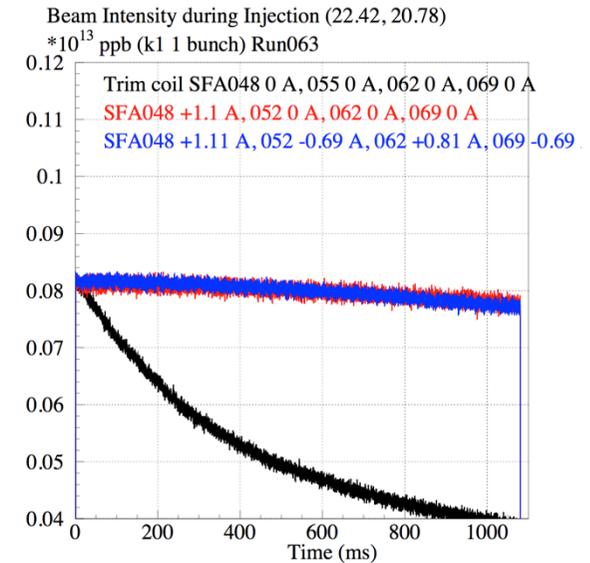
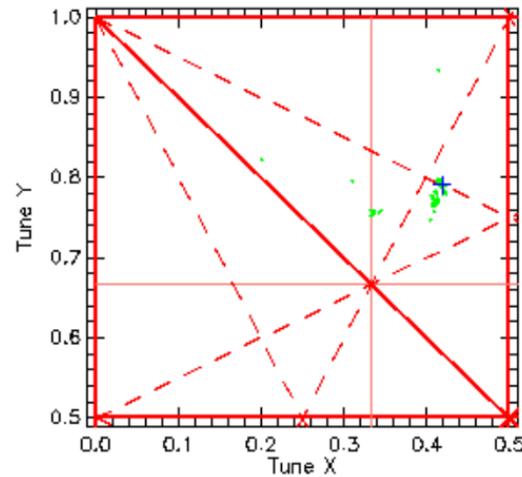
- FXセプトラム電磁石は漏れ磁場により周回軌道で不必要な四極磁場を作っている。
- 8台のFXセプトラム電磁石で、主四極電磁石の $\sim 3\%$ に相当する。
- 3台の四極電磁石の補正コイルを使って、補正している。





六極電磁石の補正コイルによる三次共鳴補正

- $\nu_x + 2\nu_y = 64$
- 低強度ビーム: $8e11$ ppb, 1 bunch injection at k1
- 3 GeV DC
- (22.42, 20.78) 付近でビームサバイバルが悪くなるチューンを探す。
- サバイバルが改善する補正コイル設定を探す。
 - SFA048: +1.1 A
 - SFA055: 0.0 A
- $3\nu_x = 67$
- (22.34, 20.75) 付近でビームサバイバルが悪くなるチューンを探す。
- サバイバルが改善する補正コイル設定を探す。
 - SFA048: +0.3 A
 - SFA055: 0.0 A





v_x+2v_y = 64 と 3v_x = 67 の 三次共鳴の同時補正

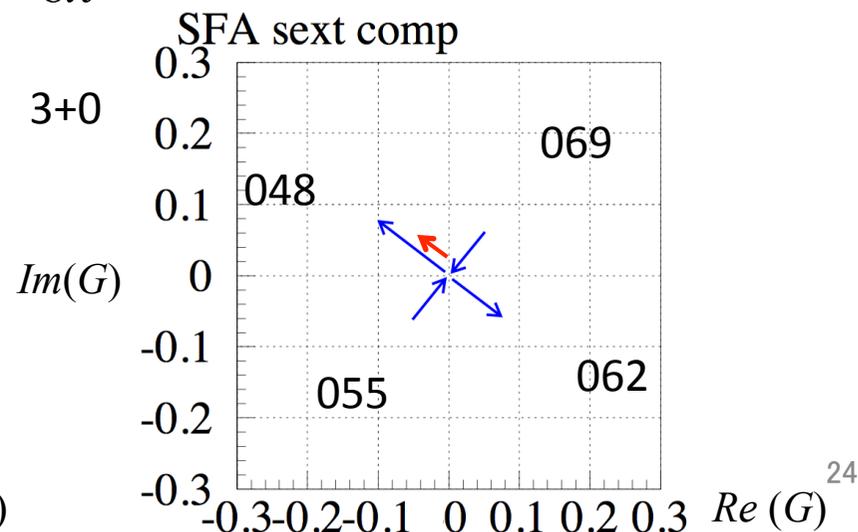
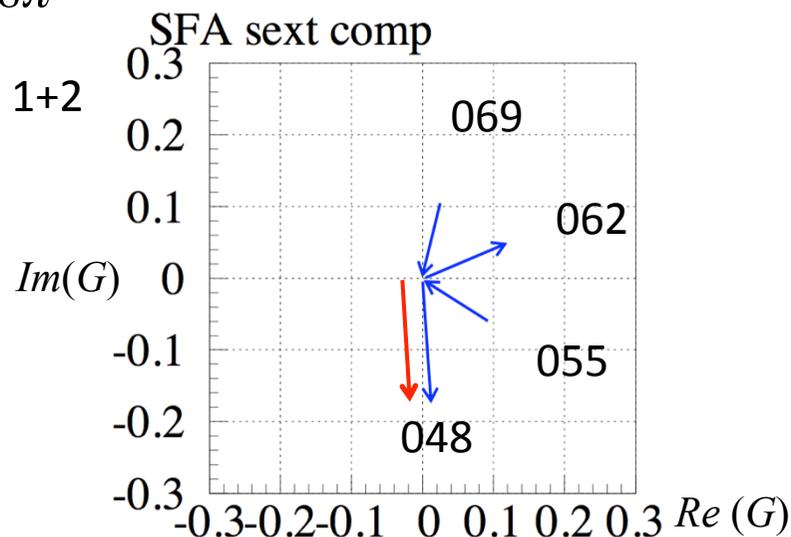
- Equations for canceling both resonances, for $k_2(1)$, $k_2(2)$, $k_2(3)$, $k_2(4)$.
- 1 = SFA048, 2 = SFA055, 3 = SFA062, 4 = SFA069

$$\sum_{j=1}^4 \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \beta_x^{3/2}(j) k_2(j) \cos[3\phi_x(j)] = \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \beta_x^{3/2}(1) k_2(1) \cos[3\phi_x(1)]$$

$$\sum_{j=1}^4 \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \beta_x^{3/2}(j) k_2(j) \sin[3\phi_x(j)] = \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \beta_x^{3/2}(1) k_2(1) \sin[3\phi_x(1)]$$

$$\sum_{j=1}^4 \frac{\sqrt{2}}{8\pi} \beta_x^{1/2}(j) \beta_y(j) k_2(j) \cos[\phi_x(j) + 2\phi_y(j)] = \frac{\sqrt{2}}{8\pi} \beta_x^{1/2}(1) \beta_y(1) k_2(1) \cos[\phi_x(1) + 2\phi_y(1)]$$

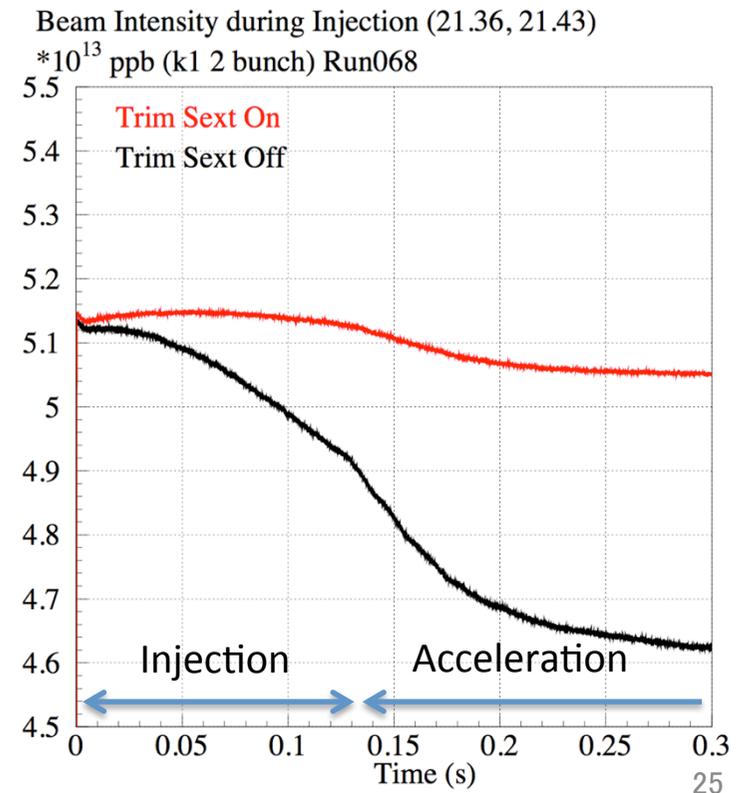
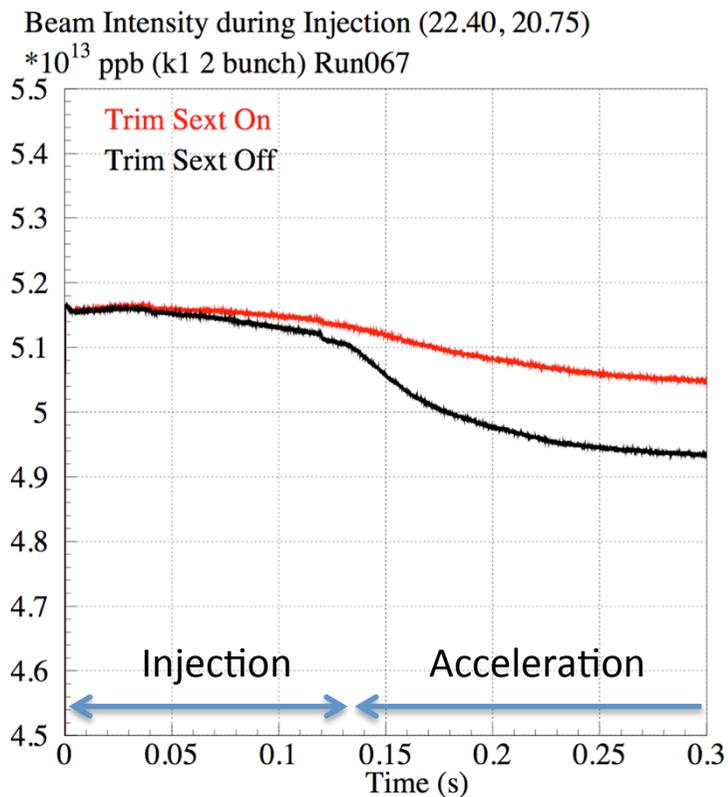
$$\sum_{j=1}^4 \frac{\sqrt{2}}{8\pi} \beta_x^{1/2}(j) \beta_y(j) k_2(j) \sin[\phi_x(j) + 2\phi_y(j)] = \frac{\sqrt{2}}{8\pi} \beta_x^{1/2}(1) \beta_y(1) k_2(1) \sin[\phi_x(1) + 2\phi_y(1)]$$





$v_x + 2v_y = 64$ と $3v_x = 67$ (or 64) の 三次共鳴の同時補正

- この補正により 380 kW 相当の大強度ビームについて入射期間中と加速開始時のロスが改善した。
- チューン (22.40, 20.75) の運転のための $v_x + 2v_x = 64$ と $3v_x = 67$ の同時補正
- チューン (21.36, 21.43) の運転のための $v_x + 2v_x = 64$ と $3v_x = 64$ の同時補正





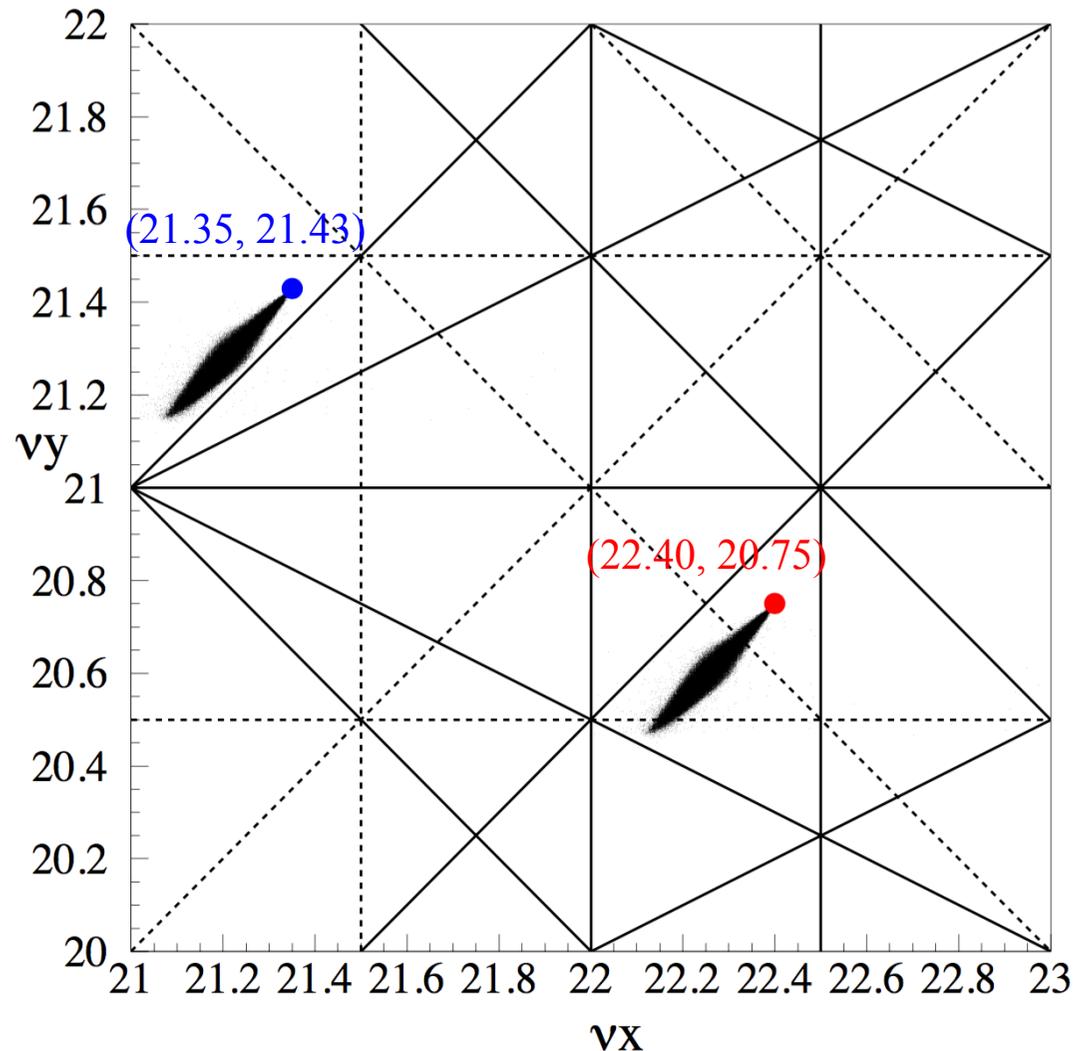
内容

- ニュートリノ振動実験
- J-PARC MR
- 速い取り出しモードの運転状況
- ビーム調整における最近の改善点
 - RCS調整による入射ビーム分布
 - 2倍高調波 rf
 - 入射キッカー
 - 不安定性の抑制
 - 共鳴補正
- **新しいチューン (21.35, 21.43) による調整**
- ビームパワー目標値 750 kW のためのアップグレード
- まとめ



新しいチューン (21.35, 21.43) での調整

- RCSはビームパワー 1 MWを達成しており、MRでそのビームを受けられる条件を探している。



空間電荷チューン
ンスプレッドは
MR 380 kW相当
RCS 600 kW相当
ビーム。

3次までの構造
共鳴 (実線)

非構造共鳴の半
整数と線形結合
共鳴 (点線)

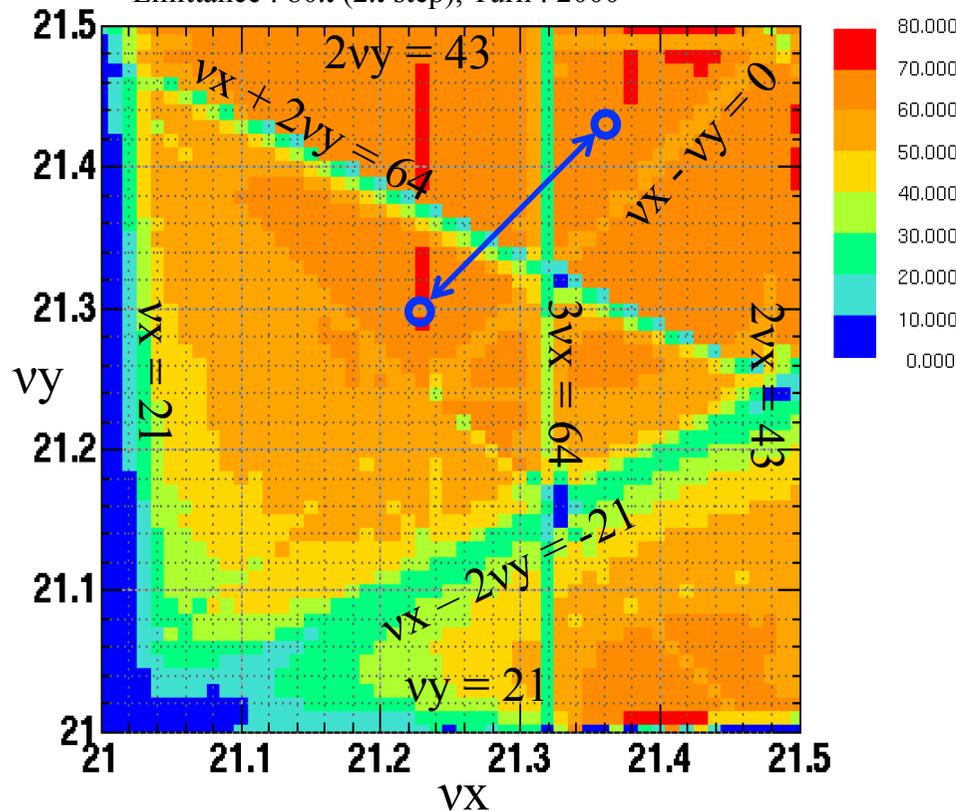


(21.35, 21.43) のための調整

- 440 kW 試験
- ビームロス : 1.2 kW

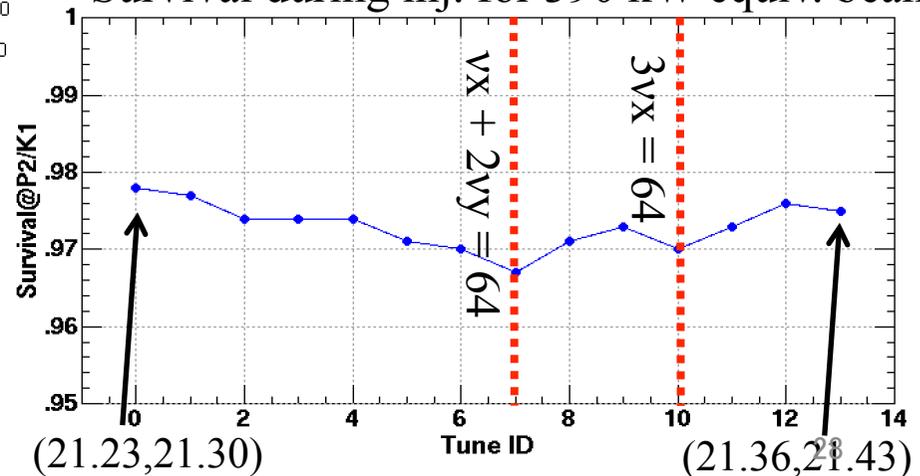
Dynamic Aperture Survey Simulation

B,Q,S field and Alignment errors : ON
 $dp/p_0 = 0.0\%$
 FX septum leakage : OFF
 3rd resonance corr. (Trim-S) : OFF
 Emittance : 80π (2π step), Turn : 2000



- 光学補正
- チューンスキャン
- Rf 2倍高調波調整
- FXセプタム漏れ磁場のための trim Q 補正
- 三次共鳴のための trim S 補正
- $v_x - v_y = 0$ 共鳴のための skew Q 補正
- 八極電磁石による補正
- 不安定性抑制
 - クロマティシティ: -7
 - Bunch by bunch と intra-bunch FB
- ニュートリノラインのための取り出し軌道
- 補正キッカーは要調整。

Survival during inj. for 390 kW equiv. beam





内容

- ニュートリノ振動実験
- J-PARC MR
- 速い取り出しモードの運転状況
- ビーム調整における最近の改善点
 - RCS調整による入射ビーム分布
 - 2倍高調波 rf
 - 入射キッカー
 - 不安定性の抑制
 - 共鳴補正
- 新しいチューン (21.35, 21.43) による調整
- **ビームパワー目標値 750 kW のためのアップグレード**
- まとめ



MRの中期計画

- 目標ビームパワー 750 kW のために繰り返しを2.48 s → 1.3 s にする。
- 必要な機器を 2018年度までにアップグレードする予定。

JFY	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
最大ビームパワー (kW)	390	425-450	450-500	700	800	900	1060
施設		新電源棟					
繰り返し周期 新主電磁石電源	2.48 s	製造・設置/試験		1.3 s	1.3 s	1.25 s	1.20 s
高勾配加速空洞 2倍高調波空洞	設置		製造・設置/試験				
コリメータ	設置 (2 kW)		設置 (3.5kW)				
入射機器 出射機器		キッカー電源改善、セプトラム製造/試験					
		キッカー電源改善、FXセプトラム製造/試験					



まとめ

- ニュートリノ振動実験において国際的な競争力を維持するために大強度の陽子ビームの供給が求められている。
- J-PARC MR では FXモードで 415 kW のビーム供給を達成した。
 - RCS調整による入射ビーム分布
 - 2倍高調波 rf
 - 入射キッカー
 - 不安定性の抑制
 - 共鳴補正
- 新しいチューン (21.35, 21.43) による調整を行った。
 - RCS 1 MW相当ビームを受けるためのMRの条件を探索。
 - 440 kW 試験を行った。
 - 速い繰り返しと合わせて、1 MWを超えるMRビームパワーを目指す。
- 目標ビームパワー 750 kW のために、繰り返しを 2.48 s \rightarrow 1.3 s に速くする計画で、必要な機器を 2018年度までにアップグレードする予定。
 - 主電磁石電源
 - 加速空洞
 - 入出射機器
 - コリメータ