

HIGH POWER BEAM OPERATION OF J-PARC Main Ring

Yoichi Sato^{#,A)}, Susumu Igarashi^{A)}, Keigo Hara^{A)}, Hideaki Hotchi^{B)}, Kazuhito Ohmi^{A)} (KEK), Chihiro Ohmori^{A)}, Masashi Shirakata^{A)}, Tadashi Koseki^{A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Masaki Tejima^{A)}, Kenichirou Satou^{A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Shuei Yamada^{A)}, Shu Nakamura^{A)} (KEK/J-PARC), Fumihiko Tamura^{B)}, Masashi Okada^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakatashirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

Abstract

J-PARC main ring (MR) provided high power proton beams of 200 kW to the neutrino experiment. Beam losses were well managed within capacity of collimation system. Since this beam power was achieved by shortening the repetition rate, following tunings had been applied in order to reduce the beam losses, such as dynamic bunch-by-bunch feed-back to suppress transverse oscillation, beam loading compensation using feed-forward technique, upgrades of injection kickers, improvement of tune flatness, chromaticity correction, and balancing the collimators of MR and the injection beam transport line. The dynamic bunch-by-bunch feed-back was effective to reduce the beam losses to one-tenth during injection and beginning of acceleration. Using the beam loading compensation, impedance seen by the beam was significantly reduced, longitudinal oscillations were damped, and the beam power was increased over 5% without increasing the beam losses. In this presentation these commissioning procedures and beam dynamics simulations are shown, and our upgrade plan is discussed.

J-PARC Main Ring における大強度運転

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) は H-リニアック、速い繰り返しの 3 GeV シンクロトロン (RCS)、遅い繰り返しの主リング (MR)、3 つの実験施設から成り立っている。RCS から取出された 3 GeV の大強度陽子ビームは、物質生命科学実験施設 (MLF) での中性子と μ 粒子生成に利用され、また MR の入射ビームとしても利用されている。MR では、3 GeV 入射の陽子ビームを 30 GeV まで加速して取出している。速い取出し法 (Fast Extraction, FX) での出射ビームはニュートリノ実験施設で T2K 実験に利用され、遅い取出し法 (Slow Extraction, SX) での出射ビームはハドロン実験施設で利用されている。FX と SX では期間を切り替えて運用されている。このうち、FX 出射では 2011 年 3 月までに 145 kW、2012 年 6 月に 200 kW の陽子ビームがユーザーに利用された。ビーム強度を上げるために、繰り返し周期を 3.2 s から 2.56 s に段階的に短縮した。運転にあたっては、機器放射化の抑制のためコリメータへのビームロスの局在と、ビームロスの平均値をコリメータ容量 450 W 以下に抑えることを指針とした。ビームロスの軽減に特に効果があったのは、バンチ毎の横方向フィードバック^[1]の導入、及びビームローディング補償^[2]の導入である。また加速開始時のチューン変動を抑えるための主電磁石の調整、ビーム不安定性による横方向振動を抑制するための 6 極電磁石によるクロマティシティの調整、コリメータバランス最適化等も行った。本稿では、FX におけるこれらのビーム調整につい

て述べるとともに、シミュレーションとの比較を通して今後のビーム強度の増強について議論する。SX も含めた J-PARC MR の全体像は加速器学会誌の記事「J-PARC MR の運転状況」^[3]を参照されたい。

2. 大強度運転

2.1 ビームパワーの変遷

MR FX 運転は 2011 年 3 月 11 日の停止後、2012 年 12 月 24 日に再開された。再開後は真空度の上昇に合わせてビーム強度を上げ、途中に SX 運転期間を挟んだ上で 2012 年 3 月 5 日に T2K 実験でのビーム利用を再開した。図 1 は 2012 年 3 月 5 日から 6 月 9 日までの MR Power (図 1 上) と Beam loss (図 1 下) のヒストリーである。各種メンテナンスも並行しながら段階的に大強度化を進めた結果、2012 年 5 月に 190 kW、6 月には 200 kW の陽子ビーム (パルス当り陽子数 $1.08E14$) が T2K 実験で利用された。ビームロス量は DCCT で測定され、1 ms 平均値に基づいたものは図 1 下赤線、10 μ s 平均値に基づいたものは図 1 下緑線で示している。マシンスタディ時を除き、利用運転時のビームロスはコリメータ容量以下になるようにコミッションングを行った。コリメータ容量は今夏の作業で 450 W から 2 kW へ増強予定である。

MR における T2K 実験への陽子供給は 2010 年 1 月から始まっているが、今夏前の速い取出し運転期間の終了時 (2012 年 6 月 9 日) までに積分量として $\sim 3E20$ POT (protons on target) を供給した (図 2)。この結果、T2K 実験では μ 型ニュートリノから電子

型ニュートリノへの振動を 11 事象観測し、 3.2σ の統計的有意性をもって電子型ニュートリノの出現現象の兆候をとらえている^[4]。

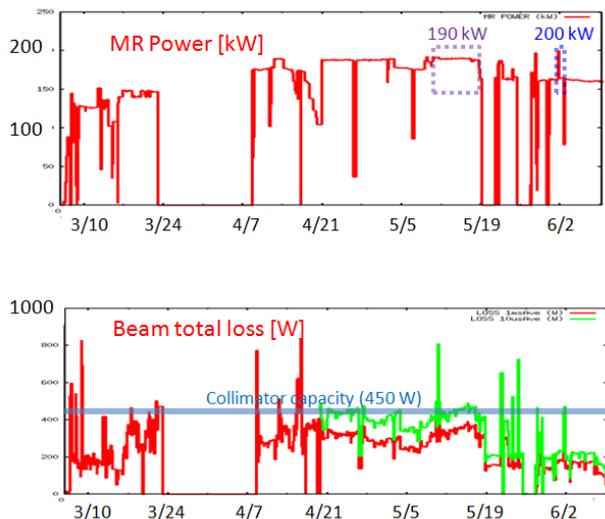


図 1 上図は 2012 年 3 月 5 日から 6 月 9 日までの MR Power (kW)、下図は同期間の Beam loss。平均ビームロスが 450 W 以下になるように運転を調整した。

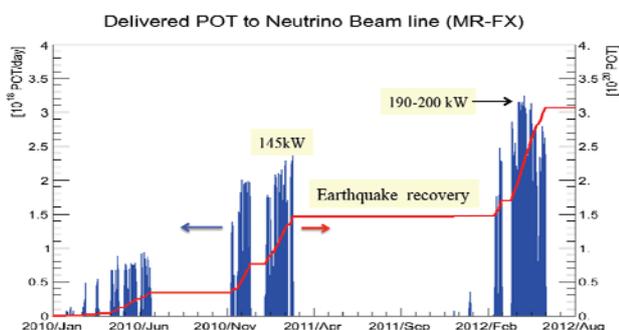


図 2 T2K 実験でニュートリノターゲットに輸送された陽子数積算。青が 1 日当り、赤が実験開始からの積算。(T2K 実験グループの好意により提供)

2.2 停止期間中に行われた改良と、それらに伴う運転再開後の調整

震災後 9 カ月間の停止期間で MR において行われた作業のうち、ビーム性能に関係する主なものは (1) 電磁石の再アラインメント^[5]、(2) 入射キッカーの traveling-wave type から lumped inductance type への変更^[6]、(3) RF 空洞の 2 台増設 (計 8 台)、(4) 線形結合共鳴補正に用いる Skew 四極電磁石 4 台の設置^[7]、(5) ビーム不安定性抑制のための八極電磁石 3 台の設置^[8]、が挙げられる。また、(6) リングコリメータエリアの改造^[9]も行われた。2012 年夏の作業と合わせてコリメータの容量増強 0.45 W \rightarrow 2 kW を図っている。

震災後の運転は 2011 年 12 月に再開し、2012 年 3 月までの大強度運転のコミッショニングでは、大気暴露によって真空ダクト内壁に吸着した気体分子の放出を兼ねてビームパワーを上げながら、上記の改良点 (1) ~ (5) に対応した調整を行った。

(1) MR の光学パラメータを再測定：集団効果の影響を避けるために低強度ビーム \sim 4E11ppb を用いて β 関数、dispersion、corrected chromaticity の測定を行った結果、すべてモデルと測定値がよく一致していることが確認された^[3,10]。特に dispersion は非線形一次項まで一致している。(2) 入射タイミング調整：入射エラーの観測に加え、応答の速いロスを観測しながら行なった。DCCT の速い応答 (10 μ s 平均) だけでなく、空気イオンチャンバーによるビームロスモニターの信号も見ながら調整している^[11]。(3) 加速時間の短縮とその影響評価：加速時間を 1.9 s \rightarrow 1.4 s にしてもビームロスのおよそ半分を占める加速開始時のロスを抑えた調整が可能であることを確認した。これに基づき繰り返し時間を 3.20 s から 2.56 s へ短縮して利用運転をおこなった。(4, 5) Skew 四極電磁石、八極電磁石を用いたビームスタディ^[7, 8, 12]：それぞれ線形結合共鳴補正、ビーム不安定性抑制の効果を確認した。ただし利用運転時に使用する為には今夏の周辺機器整備作業を必要とする。

2.3 ビームロスの軽減

2012 年 3 月からは利用運転を再開し、機器メンテナンス、ビームコミッショニングを途中で挟みながら大強度化を進めた。ビームロスの軽減に特に効果があったのは、バンチ毎の横方向フィードバックシステムとビームローディング補償のための RF フィードフォワードシステムである。それぞれの詳細は参照文献[1, 2]を参照して頂きたい。

バンチ毎の横方向フィードバックシステムは 2010 年に不安定性抑制を目的として導入され、入射直後および加速初期のビームロスの軽減に大きな効果があった。このシステムでは、ビーム位置モニターで観測したビーム位置信号から Digital Signal Processing を通してバンチ毎にフィードバックの蹴り角とタイミングを算出する。その値をもとにパワーアンプを通じてストリップラインキッカーへパワーを送っている^[1]。バンチ毎フィードバックが OFF の場合、入射粒子数 9E13 ppp (protons per pulse) のビームでは、6 極電磁石等による調整ではコヒーレント振動が抑制しきれずに入射ビームの内 6 割が加速初期にロスする場合もあることが確認されている。バンチ毎フィードバックが ON の場合、不安定性の成長は観測されていない^[3]。Head-tail instability 抑制を目指したフィードバックシステムの開発が現在進められている^[13]。

ビームローディング補償のための RF フィードフォワードシステムの MR への導入は 2012 年 5 月末に行われた。このシステムでは、壁電流モニター (WCM) からの信号を driving RF signal に加えて空洞を駆動することで、空洞に誘起される wake 電圧

を高調波成分も含めて補償している^[2]。この RF フィードフォワードの導入により、位相ズレによるビーム運動量の振動と加速開始時のバンチ長の拡散は抑制され、加速開始時のアーク部でのロスが低減された。その結果、ビームロスを増加させることなく、利用運転でのビームパワーを 190 kW から 200 kW に増強することが可能となった。

上記 2 つのシステム以外の調整としては、通常のコミッシュニングの段階を踏んだ。注意を払ったものとしては、(1) 加速開始時のチューン変動の抑制、(2) 色収差の補正量調整、(3) リングコリメータ調整、が挙げられる。(1) は、加速開始時に四極電磁石の追従性の遅れから生じるチューン変動を、四極電磁石にパターン調整を用いることで抑制するもので、これにより待ち受け時から取出しまでの最適チューンの維持が容易となった(図 3)。なお、主電磁石に対してはリニアライザーによるリップル抑制が適用されている^[14]。(2) では、ステンレス鋼製真空ダクトにおける resistive wall impedance や入出射キッカーインピーダンスに由来すると考えられるコヒーレント振動の抑制を目的とした 6 極電磁石による色収差の補正量を少し弱めた調整(色収差-1~5)を行った。しかし、最適な色収差はバンチ当り陽子数、加速時間、RF フィードフォワードの ON/OFF によっても異なること、取出し時のエミッタンスにも影響があることを考慮する必要がある。(3) ではコリメータエリア外にビームロスが出ないことを確認しながらビームロスの最適化を図り、水平方向 63π mmmrad、鉛直方向 80π mmmrad に設定した。

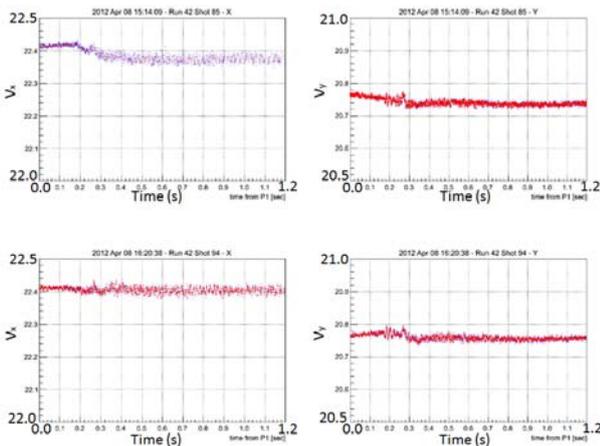


図 3 チューンメータによるチューン測定。上段は四極電磁石パターン調整前、下段は四極電磁石パターン調整後のもの。左は水平方向チューン、右は鉛直方向チューン。加速初期(0.17 ~ 0.27 s)にチューンが変動しやすいく。

2.4 210 kW 試運転

2012 年 6 月までの条件で、ビームロスを許容範囲内に留めた時の最大ビームパワーとしては 2.56 s

サイクルで 213 kW を出している。図 4 はそのときの DCCT で測定したパルス当り陽子数の時間変化を示す。RCS から 2 バンチずつ 40 ms 間隔で 4 回入射され、取出し時に $1.14E14$ ppp となっている。図 5、6 は同じショットのビームロスモニター(BLM)の信号強度分布で横軸のモニターアドレス番号はリング全周に対応している。図 5 の縦軸は BLM 信号強度のショット当り時間積分量である。入射コリメータ部(赤ヒストグラム部)の BLM の感度は、リングの他の部分(青ヒストグラム部)の 1/11 に設定されている。図 6 は、縦軸が入射からの時間で、BLM 信号強度のマウンテンプロットをならべたものである。信号強度のカラースケールは右図に表示されている。ロスの位置・時間構造をみるとロスは入射時のコリメータ部に局在していることがわかる。取出し時に見える大きな信号は Abort dump からの照り返しであり、ビームロスではない。

同条件で複数ショットを重ねてもロスはあまり変動せず、210 kW 運転でのビームロスはコリメータ部に局在し、410 - 520 W の範囲といえる。ただし、利用運転としては少し余裕をもたせて 200 kW 運転に留めた。

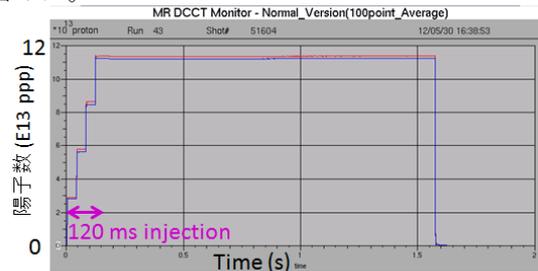


図 4 213 kW 運転時のパルス当り陽子数。

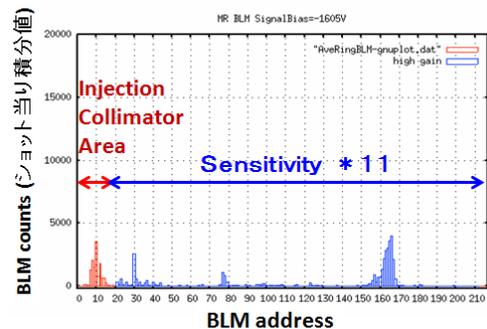


図 5 213 kW 運転時の BLM 信号強度のショット当り時間積分量。

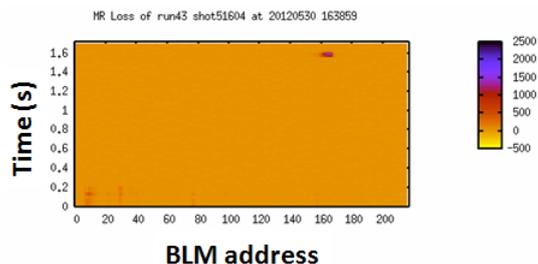


図 6 213 kW 運転時の BLM 信号強度のマウンテンプロット。

3. ビームダイナミックスシミュレーションと今秋以降の増強予定

3.1 シミュレーションと測定と比較

MR シミュレーションは SAD^[15]および SCTR コード^[16]を用いた。モデル入射ビームには SIMPSONS コード^[17]による RCS 計算結果^[18]も用いている。

線形結合共鳴と空間電荷効果の合成作用と考えられるプロファイルの変化は測定とシミュレーションの双方で確認されていて、両者は良く一致している^[19]。Skew 四極電磁石を用いた線形結合共鳴補正を準備中である^[7]。

MR 200kW 運転時の測定とシミュレーションの比較も行っている。図 7 は MR 200 kW 運転時の入射から 10 ms までの Bunching factor の変化に対し、測定と SCTR シミュレーションの比較を示す。赤線は測定値、青線はシミュレーションで、双方の周期は良く一致している。運転条件は 3 GeV、RF 電圧 135 kV で、測定時には RF フィードフォワード ON となっている。入射後 60 ms での Survival ratio の比較 (表 1) ではシミュレーションと測定値に 0.5% の差がある。

表 1 : MR 200kW 運転時の入射後 60 ms での Survival ratio の測定とシミュレーションの比較

DCCT 測定値	0.992±0.002
	(ショット毎のバラつき)
SCTR 計算値	0.988

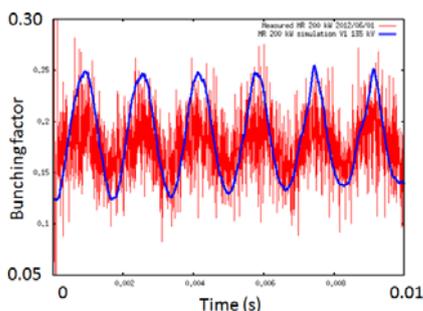


図 7 MR 200 kW 運転時の 3 GeV、RF 電圧 135 kV での Bunching factor の変化。横軸は入射からの時間。赤線は測定値、青線はシミュレーション。

3.2 RF2 倍高調波導入の効果

RF 基本波に加えて RF2 倍高調波を導入することは縦方向のバンチ形状を変えて Bunching factor を引き上げ、空間電荷効果の緩和が出来、ビームロスの軽減が期待できる。図 8 は RF 基本波のみの場合と RF2 倍高調波も合わせた場合の比較測定の結果である。左から wave form、WCM によるビーム縦方向振動測定、Bunching factor となっている。上段は基本波のみ、下段は 2 倍高調波の基本波への比を RCS 取出し時に 70%、MR では 65%としたものである。RF2 倍高調波を導入により Bunching factor の極小値

が 0.15 から 0.25 へ引き上げられていて、空間電荷効果の緩和がされている。バンチ長は 150 ns から 250 ns になるが、これは現在の入射キッカーの立ち上がり時間~350 ns と入射時の RF パケツ長 598 ns との差に対しゆとりがない。バンチ当りの陽子数が上がれば更にバンチ長が伸びる為、MR 入射キッカーの電源と Pulse forming network の改良による立ち上がり時間の短縮が計画されている^[20]。図 9 は RF 基本波のみの場合と RF2 倍高調波も合わせた場合のエミッタンスの時間変化をシミュレーションで比較したものである。横軸は入射からの時間、縦軸は 98%エミッタンスを示している。基本波のみではエミッタンスの時間増加が顕著なのに対し、2 倍高調波も合わせた場合はエミッタンス増加が大きく抑制されている。以上の測定結果とシミュレーション結果を反映した RF 2 倍高調波利用の調整が、今秋以降に予定されている。

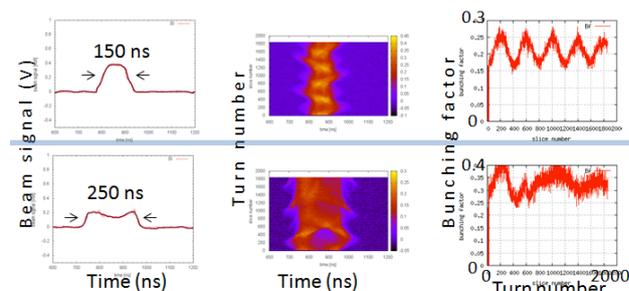


図 8 RF 基本波のみの場合 (上段) と RF2 倍高調波も合わせた場合 (下段) の比較測定。左から wave form、WCM によるビーム縦方向振動測定、Bunching factor。

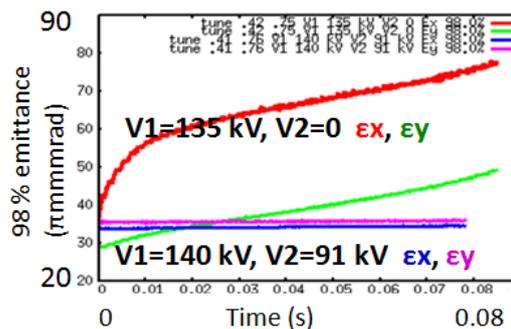


図 9 RF 基本波のみの場合と RF2 倍高調波も合わせた場合のエミッタンス時間変化シミュレーション。基本波のみの場合は 135 kV で水平方向エミッタンスは赤線、鉛直方向エミッタンスは緑線。RF2 倍高調波も合わせた場合は基本波 140 kV、2 倍高調波 91 kV。

3.3 今後の予定

2011 年 1 月から 2013 年夏までのオペレーションサマリーを表 2 に示す。

表 2 : J-PARC MR のオペレーションサマリー

期間	ビームパワー	改良点、サイクル
2011.1 - 3	145 kW	Bunch by bunch feed-back
2011.3 - 11	Shutdown	Ring collimator shields 7 th and 8 th RF system New injection kicker
2011.12 - 2012.6	100-200 kW (RCS 300 kW eq.)	Cycle: 3.2 to 2.56 s Beam loading compensation
2012.7 - 9	Shutdown	Ring collimator upgrade 0.45 to 2 kW 9 th RF system
2012.10 - 2013.7	Over 200 kW (RCS 300 - 400 kW eq.)	Cycle: 2.48 to 2.4 s Second harmonic cavities

2013 年夏には 400 MeV リニアックの導入が予定されており、RCS を通して MR に入るビームは強度、質ともに改良が見込まれている [3, 18, 21]。

4. おわりに

J-PARC MR では、震災後の再アラインメントの後、光学パラメータの設計値再現が確認された。繰り返し時間の短縮、ビームロスの低減によりビームパワーを上げ、2012 年 6 月までに最大 200 kW での利用運転を行った。バンチ毎フィードバック、RF フィードフォワードによるビームローディング補償は、ビームロスの低減に大きな効果があった。2012 年秋以降は、繰り返し時間短縮、コリメータ容量増強、RF 2 倍高調波導入により更なるビームパワーの増強を目指す予定である。

参考文献

- [1] Y. Kurimoto et al, Proc. DIPAC2011, Hamburg, Germany, p. 482.
- [2] F. Tamura et al, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 14, 051004 (2011); F. Tamura et al, in these proceedings WELR07.
- [3] T. Koseki et al, J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 9, No. 1, 2012, p30.
- [4] T2K collaboration, Phys. Rev. Lett. 107, 041801 (2011). http://seminar.kek.jp/physics/files2012/20120710_ishii.pdf
- [5] M. Shirakata et al., Proc. of PASJ8, (2011).
- [6] K. Fan et al., Proc. PASJ8, Tsukuba, Japan, 2011, p.309.
- [7] J. Takano et al, in these proceedings, WEPS017.
- [8] S. Igarashi et al, private discussion.
- [9] M. Shirakata et al., Proc. IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011, p.3496.
- [10] S. Igarashi et al, in these proceedings, WEPS015.
- [11] K. Satou and T. Toyama, Proc. IPAC12, New Orleans, USA, 2011, MORPR028.
- [12] K. Ohmi et al, in these proceedings, WEPS036.
- [13] Y. H. Chin et al, in these proceedings, WELR09.
- [14] S. Nakamura et al, in these proceedings, WEPS068.
- [15] K. Oide et al., <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>.
- [16] K. Ohmi et al., Proceedings of PAC07, 3318 (2007).
- [17] S. Machida, SSCL-PREPRINT-197 (1993).

- [18] H. Hotchi et al, Proc. IPAC12, New Orleans, USA, 2012, THPPP080.
- [19] S. Igarashi et al, Proc. IPAC11, San Sebastian, Spain, 2011, 1239.
- [20] T. Sugimoto et al, in these proceedings THLR08; K. Fan et al, in these proceedings, WEPS023.
- [21] Y. Sato et al, Proc. IPAC11, San Sebastian, Spain, 2011, p598.