

大型放射光施設 SPring-8 加速器の現状 STATUS OF THE SPring-8 ACCELERATORS

高雄勝、加速器部門

Masaru Takao, for Accelerator Division

JASRI/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

Abstract

SPring-8 is a third generation light source facility, which consists of 1 GeV linac, 8 GeV booster synchrotron, and 8 GeV storage ring. Here we report the present operation status of the SPring-8 accelerators, as well as the recent progress of the performance improvements, i.e. the introduction of the low emittance optics to the user time, the new hybrid filling mode with a high current single bunch, the fast switching of beam injection to the SPring-8 storage ring and the NewSUBARU, and so on.

1. 加速器運転状況

1.1 運転統計

2012年度 SPring-8 加速器運転統計は、Table 1 に示す通りである。計画利用時間 4200 時間に対して実績 4155 時間 38 分と放射光実績利用率 98.94 % を達成している。Fig. 1 に過去 8 年度の利用率を示す。2011 年度は、真空封止挿入光源の変換部からの真空リークにより 27 時間に及ぶ大きなダウンタイムがあったため、利用率 99 % を割り込む結果となったが、2012 年度はそのような重大なトラブルがなく、ほぼ 99 % の利用率を回復した。

Table 1: Operation statistics 2012fy

Total operation time	5078:48
Machine tuning and study	883:57
User time	4155:38
Downtime	39:13

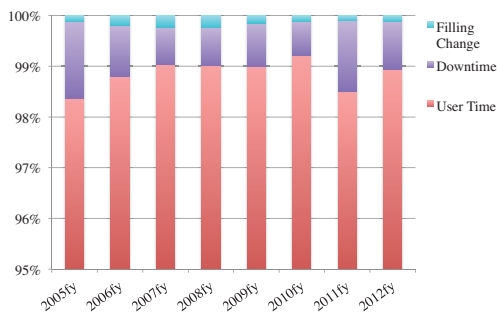


Figure 1: Availability of last 8 fiscal years.

過去 8 年度のダウンタイム内訳を Fig. 2 に示す。加速器起因 (RF、電磁石) のダウンタイムは近年漸増しており、経年劣化の懸念が増してきた。実際、電磁石関係では電源制御部の異常や出力スイッチの接触不良など経年劣化と思われるものがほとんどであった。また、軌道シフトによるビームアポートの原因も、実はステア電磁石電源の電流出力の異常であったということが最近判明してきた。電流出力変動の異常な電源を交換して以来、軌道シフトによるビームアポートが発生していな

い。RF 関係でも、サーキュレーターアーク、空洞反射のほかクライストロン電源異常が発生し、利用運転に大きな影響を与えた。詳しくは、1.3 節で後述する。

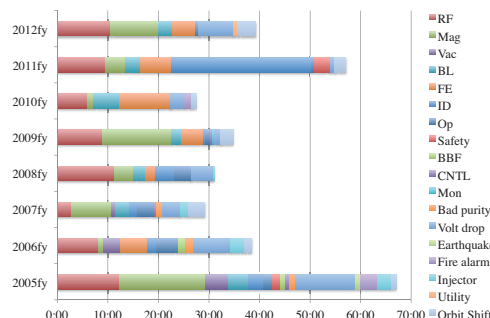


Figure 2: Breakdown of causes of downtime of last 8 fiscal years.

1.2 トップアップ運転統計

SPring-8 では、平均輝度の向上、光源強度安定化を目的に利用実験中もビーム入射を行うトップアップ運転を採用している。SPring-8 利用運転のトップアップ運転統計では、目標電流値 99.5 mA のところ、これを 0.1 mA 下回ると中断したものと定義している。2012 年度は、138 回、計 34 時間 3 分のトップアップ中断があった。実績利用運転時間の 99.2 % でトップアップ運転が継続していたことになる。2011 年度のトップアップ中断計 61 時間 38 分、継続率 98.5 % に較べて、ほぼ半減したことになる。

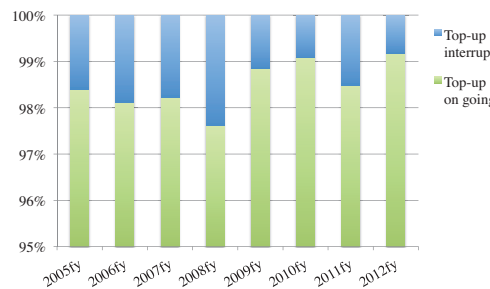


Figure 3: Duration rate of top-up operation of last 8 fiscal years.

2012 年度のトップアップ中断の内訳を図 4 に示す。中

E-mail: takao@spring8.or.jp.

断原因の主なものは、ブースターシンクロトロン (Sy) RF ダウン (15 時間 31 分 44 秒)、Sy 電磁石 (2 時間 50 分 22 秒)、Sy 真空 (3 時間 1 分 13 秒)、制御系 (3 時間 6 分 41 秒) であった。

依然として、Sy RF ダウンによるトップアップ中断が大半を占めているが、調査の結果この原因は可動チューナー冷却部からの漏水による真空悪化の影響であることが判明した。当該チューナーを交換した結果、2011 年度には 30 時間 23 分 42 秒であった Sy RF ダウン^[1] によるトップアップ中断時間が半減した。真空が枯れるに従って Sy RF ダウンの頻度は下がるものと期待しているが、更に改善するために RF 空洞部の他の部分についてもリークチェックなど調査を継続している。

Sy 電磁石トラブルは、出射キッカー電磁石電源のパルス幅切替器コネクタ部の放電によるものであった。DC 過電流によりフォールトしたもので、当該部が絶縁破壊しており、端末処理をして復旧した。2013 年 5 月にも発生したが、経年劣化によるものと考えられるので、未発生電源に対しても予防的に端末処理を実施した。

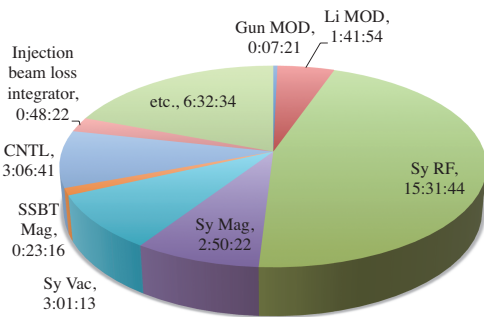


Figure 4: Breakdown of causes of top-up interruption in 2012 fiscal year.

トップアップ運転導入当初に中断原因の大半を占めていた線型加速器 (Li) モジュレータフォールトによるトップアップ中断は、モジュレータ電源改修などメンテナンスに加えて、モジュレータフォールト時にスタンバイ機と自動で切り替える機能を追加しているため^[2]、低いレベルで保たれている (1 時間 41 分 54 秒)。

電子銃やモジュレータ励振系にパワーを供給している H0 (先頭部にある) モジュレータなど、重大なトラブルが起これば長期のトップアップ中断にいたる機器については二重化がなされており、代替運転が可能となっている。電子銃については、加速管と直交する方向に第 2 電子銃が設置されており^[3]、偏向電磁石を励磁することで直ぐにビームを出すことができるよう常時スタンバイ状態にある。電子銃は、放射線安全インターロックにかかわる機器であるが、電子銃切替に対応できるようにインターロックの改造を施してある。H0 モジュレータについては、隣の H1 モジュレータと切り替えられるよう導波管切替器を設置している。

1.3 RF クライストロン電源トラブル

SPring-8 蓄積リングの RF システムは、全周で 4 ステーション、各ステーション 8 加速空洞からなり、通常は 16 MV (各ステーション 4 MV) の加速電圧で運転されている。偏向電磁石による放射損失 8.91 MeV に対

し、挿入光源 (ID) のそれは最大 3 MeV にまで達するが、加速電圧を 16 MV とすることで、多くの ID が閉じられる利用運転中も十分なビーム寿命を確保している。

2012 年 11,12 月に、そのうち 1 ステーションにおいてクライストロン電源トラブルが発生した。クライストロン電源冷却系異常のため高圧 (HV) ダウンによるビームアポートが 3 回発生し、原因調査のため 2 回 (2012/11/28 に 5 時間、2012/12/14 に 10 時間) の当該ステーションを除く 3 ステーションによる利用運転を行った。また原因が、クライストロン保護抵抗の抵抗値が経年劣化により 20 % 程高くなっており、冷却油温が上昇しインターロックが動作したものであったため、交換修理を実施した 2013 年 5 月まで当該ステーションの加速電圧を 3.5 MV に下げて運転を継続した。

3 ステーション運転では、加速電圧を各ステーション 4.2 MV に上げ、電流値を 70 mA に下げて、さらにビーム寿命を延ばすため、垂直ディスパーション補正をオフし、垂直ビームサイズを大きくして利用運転を行った。加速電圧を下げたことで同期位相がずれ、図 5 に示す通り利用運転中の入射効率が悪化したが、入射タイミング (ブースター Sy との位相差) を調整することで 80 % 以上に回復した。

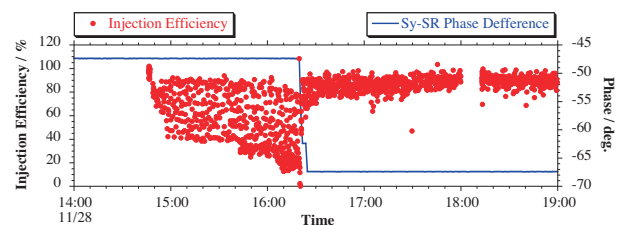


Figure 5: Injection efficiency at RF 3 station operation.

この度の 3 ステーション運転では、各ステーションの加速電圧を 4.2 MV に制限したが、2010 年度に RF 冷却系を増強していたので 4.8 MV まで上げることが可能である。トラブル後、高加速電圧の運転調整を行い、3 ステーション運転時に各ステーションの加速電圧 4.5 MV とし、蓄積電流 100 mA、ID ギャップ閉でも安定に運転できることを確認した。

2. 加速器の改善、高度化

2.1 低エミッタンスオプティクス導入

SPring-8 では将来の放射光利用を見据え、既存の放射光リングの輝度を大きく凌駕する改修計画を策定中^[4]であるが、世界では 1 nm.rad を切るエミッタンスの光源リングが計画、建設されている情勢から、改修を待つだけでなく、大規模なハードの改造をすることなくラティス変更など可能な範囲で低エミッタンス化を進めてきた^[5]。低エミッタンスオプティクスの調整を行ってきた結果、2013 年 5 月よりこれを利用運転に適用することとなった。低エミッタンスオプティクスの運転状況について、従来のオプティクスと比較しながら報告する。

低エミッタンスオプティクスと従来のオプティクスのラティスパラメータを Table 2 に、ラティス関数を Fig. 6 に示す。(以下では、前者を 2.4 nm.rad オプティクス、後者を 3.4 nm.rad オプティクスと呼ぶ。) 水平方向にビー

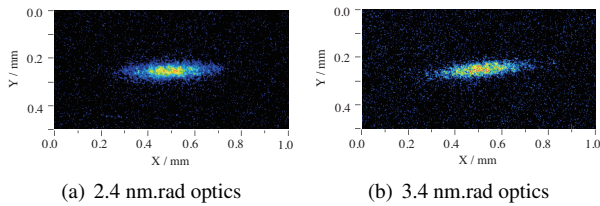


Figure 7: Beam profiles.

ムをより収束しているため、水平ベータatronチューンが1上がっており、このため natural chromaticity も大きくなっている。

Table 2: Design lattice parameters

	Optics	
	Low emittance	Past
Natural emittance	2.4 nm.rad	3.4 nm.rad
Energy spread	0.0011	0.0011
Betatron tune (H/V)	41.14/19.35	40.14/19.35
Momentum compaction	1.55×10^{-4}	1.64×10^{-4}
Natural chromaticity (H/V)	-117/-47	-91/-42

加速器診断ライン I (BL38B2) に設置された偏向電磁石を光源点を持つ X 線ビームプロファイルモニターで実測されたビームプロファイルを図 7 に、そこから求められるビームパラメータを Table 3 に示す。ほぼ計算通りのビームプロファイルパラメータが得られている。

Table 3: Measured beam parameters

	Optics	
	2.4 nm.rad	3.4 nm.rad
Horizontal beam size	100.0 μm	119.8 μm
Vertical beam size	19.8 μm	20.7 μm
Horizontal emittance	2.24 nm.rad	3.27 nm.rad
Vertical emittance	12.8 pm.rad	15.6 pm.rad

加速器診断ライン II (BL05SS) に設置されている挿入光源 (周期長 76 mm、周期数 51) を用いて、K 値 1.666 とし 3 次光 10 keV の分光フラックス密度の測定を行った。図 8 で実線は SPECTRA^[6] による計算を表し、低エミッタンス化によりフラックス密度が計算通り約 25% 増大していることが確認された。

2.4 nm.rad オプティクスでは、3.4 nm.rad オプティクスに比べて 6 極電磁石が強くなっているため、ダイナミックアパーチャーやモーメンタムアクセプタンスが狭くなっている。前者は入射効率の低下として現れ、後者はビーム寿命、特に Touschek ビーム寿命に影響する。

SPring-8 では、利用実験中もビーム入射を行うトップアップ運転が行われている。放射線安全や ID 磁石列の減磁の観点から入射時のビーム損失をできるだけ避けるため、ブースターシンクロトロンから蓄積リングへのビーム輸送系にビームコリメータを設置することで、入射効率の改善を図っている^[7]。これにより真空封止 ID のギャップが全開の状態では、100% 近い入射効率が

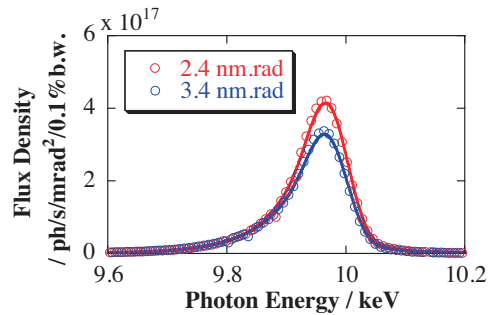


Figure 8: Flux density.

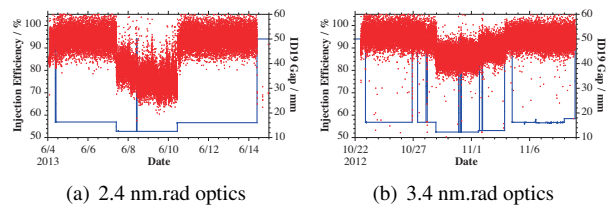


Figure 9: Injection efficiency and ID19 gap in user time.

達成されている。真空封止 ID のギャップが閉じられた時には入射効率が低下することが観測されており (Fig. 9)、特に SPring-8 蓄積リングの特徴である長直線部の一カ所に設置されている 25 m 長の真空封止 ID (ID19) のギャップの影響が大きく、3.4 nm.rad オプティクスでは利用運転中最悪の場合 85% 程度まで下がるがあった。低エミッタンス化によりこれが更に悪化して、70% にまで下がるようになったが、現在これを改善するため 6 極電磁石の最適化など調整を行っている。

モーメンタムアクセプタンスは、バンチ内電子電子散乱によるタウシェックビーム寿命から求めることができる。SPring-8 では、バンチ電流値 1 mA でタウシェックビーム寿命がビーム寿命に対して支配的となる。Figure 10 は、RF 加速電圧を変えていった際の各オプティクスでのタウシェックビーム寿命の測定結果である。エネルギー方向のモーメンタムアクセプタンスは RF 加速電圧とともに広がっていくが、横方向の力学で決まるアクセプタンスまで達するとビーム寿命は延びなくなる。2.4 nm.rad オプティクスの方が早くビーム寿命が延びなくなっており、モーメンタムアクセプタンスが狭くなっていることを示している。有効 (頭打ちになったタウシェックビーム寿命に相当する) RF 加速電圧からモーメンタムアクセプタンスを求めると、2.4 nm.rad オプティクスは 2.3%、3.4 nm.rad オプティクスは 2.8% となり、低エミッタンス化によりモーメンタムアクセプタンスが 0.5% 程狭くなっている。モーメンタムアクセプタンスを広げるため、継続して 6 極電磁石の最適化など調整を進めている。

2.2 高バンチ電流シングルバンチを含むハイブリッドフィリングモードの導入

SPring-8 蓄積リングは 2436 個の RF バケットを持ち、各バケットに任意に入射することができ、時分割実験など放射光のパルス性を利用する実験のため多彩なバンチフィリングモードを提供している。現在、Table 4 の

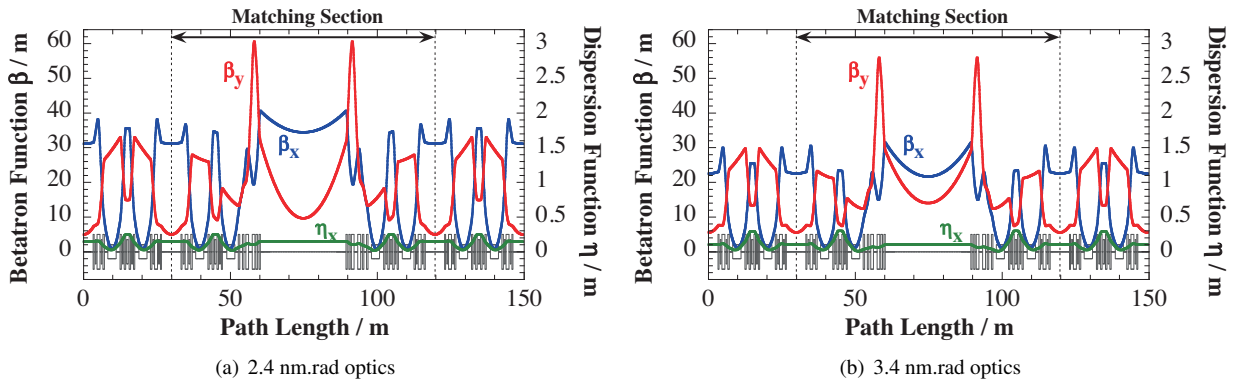


Figure 6: Lattice functions.

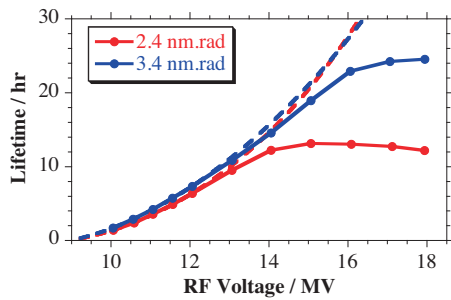


Figure 10: Touschek lifetime at 1 mA per bunch.

8モードが利用運転に供されている。A-Cモードは均等間隔、一様バンチ電流値を優先する実験用のもので、バンチトレインとシングルバンチを含むハイブリッドフィリングのD-Hモードは比較的高電流値のバンチと広いバンチ間隔を必要とする実験のためのものである。この内、5.0 mAのシングルバンチを含むHモードが高バンチ電流値に対する利用側の要求に応じて開発してきたもので、2012年12月より利用開始となった。シングルバンチ電流値の増強には不安定性抑制システム^[8,9]の高度化が不可欠であるが、この間の開発の経緯については前回(第9回)加速器学会年会^[1]で報告しているので、ここではHモードの利用運転の状況について報告する。

Table 4: Bunch filling modes at user time

Mode	Filling pattern	Single bunch current
A	203 bunches	0.5 mA
B	4 bunch train × 84	0.3 mA
C	11 bunch train × 29	0.3 mA
D	1/7-filling + 5 bunches	3.0 mA
E	2/29-filling + 26 bunches	1.4 mA
F	1/14-filling + 12 bunches	1.6 mA
G	4/58-filling + 53 bunches	1.0 mA
H	11/29-filling + single bunch	5.0 mA

ハイブリッドフィリングモードのトップアップ運転では、シングルバンチ電流値が一定になるようにビーム入

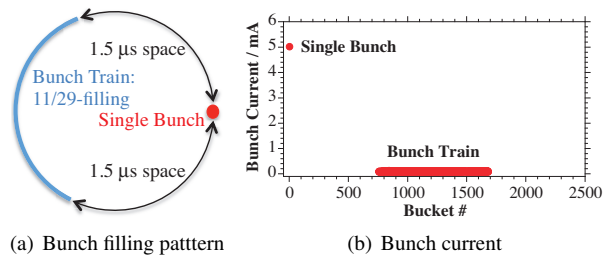


Figure 11: Bunch filling pattern and bunch current of H-mode.

射が行われている。バンチ電流値は、ボタンピックアップからの信号をオシロスコープで測定することにより求めており、Figure 11にHモードの測定例を示す。利用運転中のHモードのシングルバンチ電流値をFig. 12に示す。この間の平均シングルバンチ電流値 5.00 mA、標準偏差 18.2 Aであった。

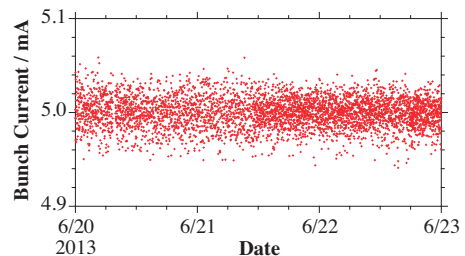


Figure 12: Single bunch current of H-mode.

利用運転中のトップアップ入射状況を Fig. 13 に示す。各入射における入射バケットをプロットしたものである。この間のシングルバンチ、トレイン部の入射頻度は、それぞれ 2131 回と 2232 回であった。2 回に 1 回の割合でシングルバンチに入射されており、このため先に述べたとおりのシングルバンチ電流値の変動となっている。

2.3 高速振分け入射の導入

SPring-8の線形加速器は、隣接する中型放射光リング NewSUBARU (NS) へもビーム入射を行っている。NSもトップアップ運転を行っており、線形加速器終端部に設置された振分け偏向電磁石を切り替えることで、SPring-8へのビーム入射と両立している。

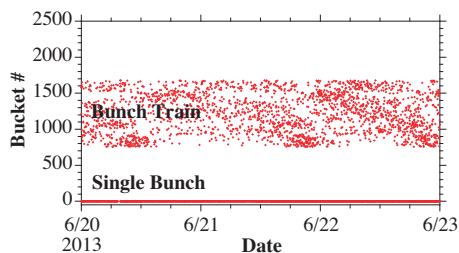


Figure 13: Injected bucket number.

SPring-8 のトップアップ運転における入射頻度は 15 秒から 60 秒に 1 回程度であるが、これまでは振分け偏向電磁石を DC 的に励磁/非励磁することで、ビームルートを切り替えていた。SPring-8 と NS の RF 周波数はそれぞれ 508.58 MHz と 500 MHz と異なるため、線形加速器のタイミングソースの切り替えも行っている。これらの切り替えを上位 WS 上のソフト (運転 GUI) で行っていたため、以前の振分け入射では SPring-8 の入射に要する時間は 10 秒近くを必要としていた。SPring-8 蓄積リングの高度化で、低エミッタンス化やシングルバンチ電流値増強などが図られると、ビーム寿命が短くなりビーム入射頻度を上げる必要に迫られることになる。

最近、これに対応するため振分け入射の高速化する改造を実施した^[10]。振分け偏向電磁石の 1 Hz パルス運転を行い、これと同期してタイミングソースを切り替えるハードを設けることで、SPring-8 と NS の両方向とも 1 Hz のビーム入射の並立が可能となった。この結果、NS のビーム入射待ち時間がなくなり、SPring-8 では NS ビーム入射時間を確保するため設けてあった入射間隔の下限 (15 秒) を撤廃することができた。2013 年 6 月より実運用を開始している。

参考文献

- [1] M. Takao, JASRI Accelerator div., Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2012), THPS013.
- [2] S. Suzuki, et al., Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2011), 903 (TUPS027).
- [3] T. Kobayashi, et al., Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2008), 978 (TP124).
- [4] Y. Shimosaki, et al., Proc. of IPAC11 (2011), 944 (TUOAB01); Y. Shimosaki, et al., Proc. of IPAC12 (2012), 1182 (TUPPC014); Y. Shimosaki, et al., Proc. of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2012), WEPS037.
- [5] Y. Shimosaki, et al., Proc. of IPAC12 (2012), 1182 (TUPPC013); Y. Shimosaki, et al., Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2012), THUH07.
- [6] T. Tanaka and H. Kitamura, <http://radiant.harima.riken.go.jp/spectra/index.html>
- [7] K. Fukami, et al., Proc. of APAC04 (2004), 103.
- [8] T. Nakamura, and K. Kobayashi, Proc. of EPAC04 (2004), 2649.
- [9] K. Kobayashi, and T. Nakamura, Proc. of ICALEPCS2009 (2009), 659.
- [10] H. Dewa, et al., in these proceedings, MOOS05.