

SPRING-8 蓄積リングにおける入射時蓄積ビーム水平振動の抑制

SUPPRESSION OF STORED BEAM OSCILLATION AT INJECTION IN THE SPRING-8 STORAGE RING

満田史織^{#, A)}, 小林和生^{A)}, 早乙女光一^{A)}, 中西辰郎^{B)}, 深見健司^{A)}, 正木満博^{A)}, 大熊春夫^{A)}, 佐々木茂樹^{A)}

Chikaori Mitsuda^{#, A)}, Kazuo Kobayashi^{A)}, Kouichi Soutome^{A)}, Tatsuro Nakanishi^{B)}, Kenji Fukami^{A)},

Mitsuhiro Masaki^{A)}, Haruo Ohkuma^{A)}, Shigeki Sasaki^{A)}

^{A)} JASRI/Spring-8, Hyogo 679-5198, Japan

^{B)} SPRING-8 Service Co. Ltd. (SES), Hyogo 678-1205, Japan

Abstract

In the SPRING-8 storage ring, when the injection bump orbit is not closed perfectly at the beam injection, the horizontal stored beam oscillation of the amplitude more than 0.5 mm (r.m.s.) is excited. Now, the averaged oscillation amplitude has successfully been suppressed to the level of less than 0.15 mm (r.m.s.) by applying a counter kick to the residual oscillation with a pulse width of 500 ns. To confirm the suppression effect, we observed the turn-by-turn photon beam profile at the diagnostics beamline with the insertion device. The light axis oscillation was significantly suppressed down to less than 4 μ rad from more than 30 μ rad by applying a counter kick at 3rd turn after injection. Without the kicker correction, it took about 80 turns to reduce the oscillation, which was determined by the damping time with the bunch by bunch feedback system. In the SPRING-8 user operation, in addition to the effect of providing stable photon beam, we succeeded in not only shortening the effective damping time but also filling a single high current bunch up to 5 mA to any bucket address.

1. はじめに

SPRING-8 における Top-Up 運転^[1]は 2004 年 4 月に導入が開始された。これは、ビームエミッタンスの低減の結果、タウシェック効果^[2]により実効的なビーム寿命が短くなることを緩和するためである。SPRING-8 では、蓄積リングへのビーム入射には 16.5m 入射直線部に配置 (Figure 1) したバンパ電磁石 4 台を使用し、蓄積ビームを入射ビーム軌道に寄せるバンパ軌道を利用しているが、このバンパ軌道が正確に閉じていない場合、蓄積ビームへの水平振動が誘起されることとなる。

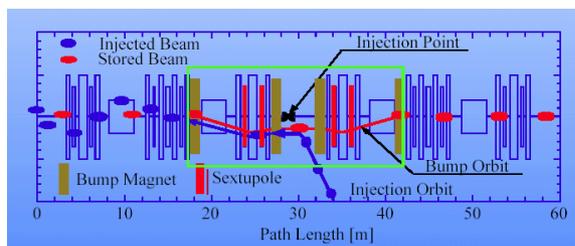


Figure 1: Bump magnet arrangement.

Top-Up 運転以前における定期入射運転では、おおよそ 10 時間毎の入射であったため、蓄積ビームの振動時間は入射間隔に比べて十分に短いと考えることが出来たが、比べて入射頻度が飛躍的に増加する Top-Up 運転 (おおよそ 1 分以内毎の入射) では、蓄積ビームの入射時の振動は放射光自身の振動として無視できない問題となる。また、近年放射光ユーザー需要が高まりつつある、高輝度放射光のための

5mA 以上の大電流シングルバンチを含むハイブリッドフィリングでの蓄積では、残留振動が大電流バンチのビーム不安定性を誘起し、高度なビームフィリングでの Top-Up 運転による電流値の維持を難しくしている。

よって Top-Up 運転においては、放射光安定供給の観点から、バンパ軌道を正確に閉じる努力をし、振動の振幅を低減するとともに、残留振動に対しては入射後の早い段階で振幅を極めて低く抑制することが重要である。

2. バンパ軌道の漏洩と残留振動

SPRING-8 蓄積リングでバンパ軌道生成に必要なとなる蹴り角は電子ビームエネルギーに対して、最大で 2mrad 以上である。バンパ電磁石 4 台はそれぞれを独立の電源にて励磁されており、出力は 8.4 μ s のパルス幅の正弦半波波形で最大 4kA 以上になる。バンパ軌道を正確に閉じさせるためには、4 台のバンパ電磁石が生成する出力電流波形、最終的には磁場波形としての相似性を高める必要があり、パルス電源及びバンパ電磁石の改善により、Top-Up 運転の開始 2004 年の段階で、水平振動の振幅を 1/10 まで低減することに成功している^[3]。

依然として残る残留振動は、出力磁場波形の立ち上がり、立下り部にける 4 台の波形の非相似性に起因し、バンパ軌道を完全に閉止することが出来ずに生じている。この振動振幅レベルは、Top-Up 運転を定常的に運用する上で問題がないが、放射光安定供給の観点からは課題となる。バンパ波形の立ち上がり部分の不整合で生じる振動は、パルス幅 400~800ns、振幅 0.5mm(r.m.s.)になり、立下り部分の不整合で生じる振動では、パルス幅 1400~1600ns、

[#] mitsuda@spring-8.or.jp

振幅 0.25mm(r.m.s.)となる。Figure 2 にバンプ磁場波形の測定結果と生じる振動の概念図を示す。

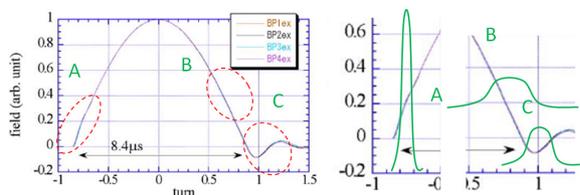


Figure 2: The field shapes of four bump magnets and conceptual shapes of horizontal oscillation excited by each field non-similarity.

この残留振動により、水平ビームサイズは入射がない状態に比べて平均して 1.1 倍 (14 μ m) 増加することになり、放射光軸の振動は、バンプ波形の立ち上がり部分の不整合による生じるスパイク振動で 30 μ rad 以上に達する。さらに、5mA 以上の大電流シングルバンチと 1/3 周分のバンチトレインが共存するハイブリッドフィリングモードにおいて、残留振動によるビーム不安定性の誘起により Top-Up 運転での蓄積電流値の維持を難しくさせている。

3. 高速カウンターキック補正

残留振動を低減させるには、4 台のバンプ電磁石出力波形の相似性を高める必要がある。しかしながら、パルス幅を蓄積リング周回時間 4.7 μ s の 2 周以内の律則条件にて、時間幅にて 10ns 以下の精度で相似性を高めることは困難であるため、振幅の大きい残留振動を逆位相の高速カウンターキックにて抑制する方法の検討を開始した。残留振動が定常的であるならば、振動ゼロクロス位相にて入射トリガーと同期しカウンターキックを与えれば、重心振動を定常的に抑制することが可能である。また、カウンターキッカー一点が固定されているが、周回数をシフトさせてカウンタータイミングを調整すれば、水平振動チューン値が 40.15 であることから 7 ターン以内の早い段階で残留振動を抑制することが可能である。当初見積もられた、高速カウンターキックに必要な補正蹴り角はパルス幅 800ns にて 30 μ rad 以上である。

このため、カウンターキックの実現のためには高速パルス電源の開発が必要であり、電源開発が水平振動抑制スキームの要である。SPring-8 蓄積リングは既に 90%以上の密度で装置群がビームラインに配置されており、キッカー挿入に確保できる平均磁極長は 0.3m 以下である。この空間律則条件で高速性能と必要補正蹴り角を実現するためには、キッカー電源開発要件として 1. 蹴り効率を高める水平 β 関数最大点でかつキッカー挿入裕度のあるいずれの場所にも設置できる自由度を有すること。2. 設置自由度を高めるため電源の小型性能を高めること。3. 電源の小型化を実現しキッカー電源をキッカー近傍でドライブし高速性能と短磁極長で高出力を実現すること 以上の 3 要件が挙げられる。

4. 高速キッカーシステム

高速性能と高出力を実現するため考案された高速キッカーシステムを Figure 3 に示す。加速器収納部内にはインダクタンスを下げるため、セラミックチャンバーを 1 ターンの磁極長 0.25m の空芯コイルで上下に挟み込んだキッカーコイルと 0.8m のリード線によりそれぞれのコイルに接続したパルスドライブ電源 2 台を設置する。このシステム設計により電源負荷は 1.0 μ H まで低減が来ている。セラミックチャンバー円筒内表面は渦電流低減のため 5 μ m 厚の Ti-Mo でコーティングをしている。加速器収納部外には、放射線損傷を避けたい、ドライブ電源への高圧印加用高圧電源、駆動トリガーを生成するトリガーシステム、ドライブ電源を制御する制御ユニットを設置している。

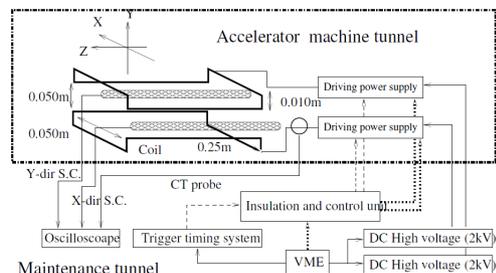


Figure 3: A schematic view of fast kicker system.

トリガータイミングシステムはバンプ励磁タイミングと同じ蓄積リング入射トリガーシステムと同期させられており、遅延発生器により入射タイミングからカウンターキックまでの遅延時間を調整することが可能で、これにより水平振動のゼロクロス位相とカウンターキックを合わせこむことが可能である。また、ドライブ電源はパルス幅可変、極性切り替えつきとなっており、水平振動幅に合わせたパルス幅でカウンターキックを与えること、水平振動位相に合わせたキックを与えることが可能である。水平振動振幅高に対する調整は、高圧電源からの印加電圧により線形に調整することが可能である。ドライブ電源の寸法は 0.005m³ 以下のコンパクトな作りとなっており、キッカーコイル近傍に干渉なく設置することが可能である。出力はサーチコイル及び高速 CT により確認する。

パルス電源の開発は 2007 年より開始し、2010 年に 950V の印加電圧で、パルス幅 800ns にて 270A/coil 出力のドライブ電源の開発に成功した。ピーク電流におけるキッカー電磁石の磁場出力は 3.2mT となり、必要補正蹴り角を超える 33 μ rad を実現した。このパルス電源を利用し、実際に 800ns パルス幅の高速振動を抑制が可能かどうか 2010 年に試験実験を実施し 67%の振幅低減率で振動を抑制することに成功した^[4]。実験時の高速パルス電源の設置の様子を Figure 4 に示す。

2010 年の試験結果を受け、水平振動の高速化に対応するための、高速性能及び高出力性能を追求した電源開発を進める^[5]と同時に、2012 年には、バンプ波形立ち上がり部の不整合により生じる高速水平振

動の抑制（第 1 高速補正キッカー）をユーザー運転に定常的に適用することを開始し、2013 年にはバンブ波形の立下り部の不整合で生じる比較的遅い水平振動の抑制（第 2 高速補正キッカー）をユーザー運転に適用することを開始した。現在、SPring-8 では、第 1、第 2 の 2 台の高速補正キッカーをそれぞれ別の水平 β 関数最大点に設置し抑制を行っている。SPring-8 蓄積リングに恒常的に設置された高速キッカーシステムを Figure 5 に示す。

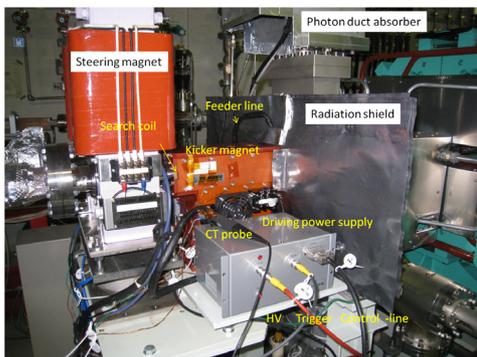


Figure 4: Test setup of kicker system for beam study.



Figure 5: Counter kick systems installed in SPring-8.

キッカーマグネットを挟む形で両翼にシールドボックスを設置し放射線、RF ノイズへの対策をしている。また、ボックス内には故障時に備えたバックアップ電源も格納している。第 1 高速補正キッカーには 400~700ns パルス幅可変電源を配置し、1.95kV 印加時 400ns、700ns パルス幅にてそれぞれ 230A/coil、383A/coil 出力が可能である。第 2 高速補正キッカーには 800~1600ns パルス幅可変電源を配置し、900V 印加時、800ns、1600ns パルス幅にてそれぞれ 270A/coil、540A/coil の出力が可能である。

5. 入射時水平振動抑制と効果

入射時水平振動はリングに沿って配置した 14 台の Single-Pass Beam Position Monitor (SPBPM) により観測する。SPBPM は入射トリガーと同期し電子ビームが蓄積リングを 1 周する際に 14 点のデータを 4096 周回分取得することが可能である。入射点 0 アドレスに蓄積したシングル 1mA の電子ビームを、入射トリガータイミング 1Hz に対してバンブ励磁タイミングを 100ns ステップでシフトさせながらキックし 128 ターン分の振動振幅データを取得する。振動振幅は 14 台の SPBPM で得られた位置データの Root Mean Square (r.m.s.)として計算される。水平振動チューンが 40.15 であるため、1

ターンから 7 ターンまでの振動振幅情報から、phase advance と第 1、第 2 高速補正キッカー点の β 関数を考慮し最大の振動低減効果をもたらす、カウンタータイミングとしての最適タイミングと位相、カウンター出力を調整する。

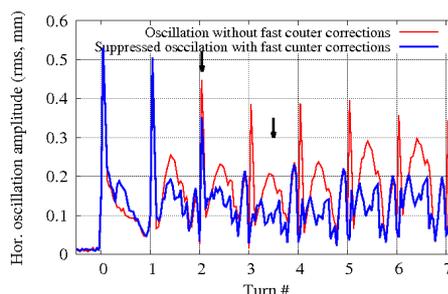


Figure 6: Horizontal oscillation suppression. The arrows in the figure indicate the counter kick timings of primary and secondary kicker at 2nd turn and 3rd turn respectively.

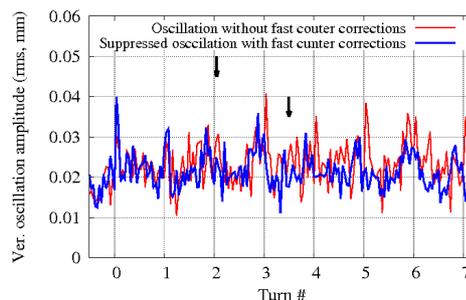


Figure 7: Vertical oscillation suppression.

Figure 6 に高速補正キッカーの調整後に SPBPM で観測された、高速カウンターキックあるなしによる水平振動の低減効果を示す。横軸は 0 で始まる入射タイミングからのビーム周回数を示している。この測定では、Bunch-By-Bunch Feedback (BBF) [6] を動作させていない。3 ターン目にて 0.38mm の振動振幅は第 1 高速補正キッカーにて 90%の低減率で抑制されている。この時の高速補正キッカーのパルス幅は 500ns で蹴り角は 31 μ rad である。更に第 2 高速補正キッカーを 3 ターン目で動作させ、水平振動振幅は平均して 0.15mm まで低減された。この時の第 2 高速補正キッカーのパルス幅は 1400ns で、蹴り角は 12 μ rad である。同時に、この時の垂直振動を確認した結果を Figure 7 に示す。リング全周に渡る磁場誤差としてのスキュー成分が存在する場合、水平振動の垂直振動への回り込みが見られる。このため、水平振動を高速補正キッカーにより抑制した場合同時に垂直振動にも抑制効果が見られることを Figure 7 は示している。

シングルバンチフィリングで観測する SPBPM での水平振動の抑制効果の観測はユーザー運転中には行うことが出来ない。そのため、ユーザー運転中の観測手段として BBF モニターによるマルチバンチフィリングに対する水平振動の抑制効果を観測した。BBF では bunch-by-bunch、turn-by-turn にてビーム位

置データを 2000 ターンまで取得することが可能である。Figure 8 は 203 バンチフィリングによる 128 ターン分の各バンチの振動抑制効果をキッカーあるなしで比較したものである。横軸はリング全周に分布するバンチ番号を示しており、縦軸は振動相対値を示している。BBF モニターにおいても振動ピーク位置での 70%の抑制効果を確認した。

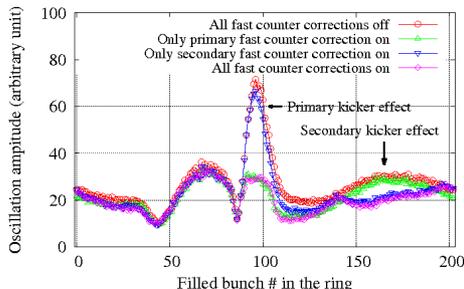


Figure 8: The horizontal oscillation suppression observed by BBF monitor.

6. 放射光軸水平振動抑制効果

電子ビームの水平振動の抑制が放射光軸振動の抑制にどれほどの効果があるのか、2012 年より蓄積リングビーム診断ビームラインに整備された Turn-By-Turn Beam Profile Monitor (TTPM) [7]により検証を行った。この TTPM はアンジュレーター光の単色 X 線ビームプロファイルを周回ごとに測定することが出来、入射時のビーム振動だけでなく、ビーム不安定性により誘起されるビームエネルギー広がりや横方向広がりなどの早い過渡現象を観測することが出来る。また、光診断であるため、特別なフィリングモードなどに依存せず、ユーザー運転中の電子ビーム水平振動の様子を常時監視することが可能である。SPBPM、BBF、TTPM、各キッカーの蓄積リングの配置関係を Figure 9 に示す。

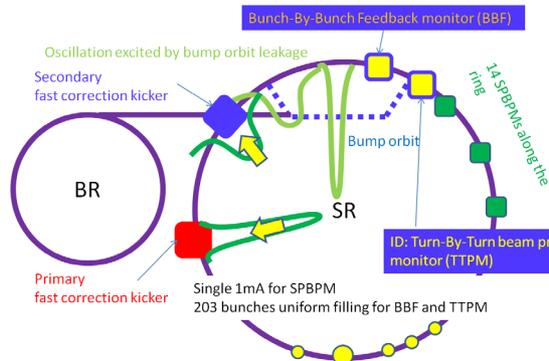


Figure 9: A schematic view of kickers and monitors arrangement in the storage ring.

この TTPM を使い、ウィンドウ幅 200ns のゲートウィンドウを 500ns のスパイク状の最大振動が生じる時間点に固定し、キッカーあるなしでの周回ごとに観測を行った結果を Figure 10、Figure 11 に示す。Figure 10 は実際に取得されたある時期の光プロファ

イル (Figure 11 とは別の時期に取得、1 つのプロファイルで 5 ターン分の積分がされている) を示しており、Figure 11 は光プロファイルから光軸振動の振動角として周回ごとにプロットした結果である。Figure 11 におけるキッカーがない状態でのプロットでは、光軸振動が TTPM の角度アクセプタンス $30\mu\text{rad}$ を超えてしまい振動角の計算が出来ていない。キッカーがある状態では、カウンターを与える 3 ターン以降に振動位相が変化し、 $4\mu\text{rad}$ 以下まで光軸振動角が抑制されている。キッカーがない状態では、このレベルまでの光軸振動角の減衰に 80 ターンまでダンピングに時間がかかっている。キッカーあるなしでダンピング時間を比較すると 1.3 倍の差がある。この検証では BBF を常時 ON としている。BBF では早い巨大な振動に対しての抑制効果が限定されてしまうが、BBF で抑制可能な振動振幅水準まで高速補正キッカーにより抑制した結果、ダンピング時間を改善することにつながっている。

高速補正キッカーの導入により、ユーザーサイドから見る光軸振動振幅減衰に 3 ターン以内での早い段階で 87%以上の抑制効果があること、また、BBF と相補的にダンピング時間の改善に効果があることが確認された。

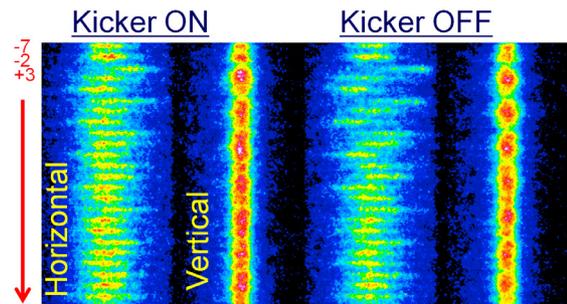


Figure 10: An example of beam profile observed by TTPM. The number indicates revolution number.

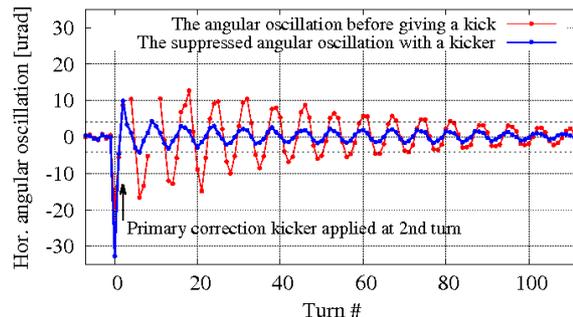


Figure 11: Horizontal light axis oscillation acquired by the TTPM. The two dashed lines indicate $\pm 4\mu\text{rad}$ level.

6. 残された課題

フィードフォワードスキームでは高速補正キッカーによる水平振動の抑制効率が定常的に維持されていることが重要である。2013 年よりユーザー運転

期間中における高速補正キッカーによる水平振動抑制効率の連続的な観測を TTPM により開始した。この長期測定期間に、水平振動の抑制効率が日々、減少していくこと、昼夜変動していることを確認した。この現象は、バンプ電源出力電流波形の立ち上がりタイミングがバンプ電源室室温の昼夜変動、季節変動により各バンプ間で相対的に変化しており、4 台のバンプ磁場形の不整合の度合いが変化したためである。バンプ出力タイミングの shot-by-shot のジッターはサイクロトンの特性に起因しており、5~7ns である。昼夜変動では、10~20ns の変動である。

この現象を定量的に評価するため、TTPM で光軸の水平振動角を観測しながら、バンプ電源出力タイミングを相対的に昼夜変動に相当する $\pm 20\text{ns}$ シフトさせ、初期抑制効率の変化を検証した。TTPM ではゲートウィンドウを入射タイミングに対して 200ns ステップでシフトさせながら水平振動角の振幅を観測することにより、SPBPM と同様に、水平振動角の入射タイミングからの分布を見ることが出来る。Figure 12 に横軸をゲートウィンドウのタイミングとし、縦軸を光軸振動振幅とし、キッカーあるなし、バンプ 4 台のうち、バンプ 1、4 をそれぞれシフトさせた結果を示す。キッカーなしにおいて、振動形状が光軸角の振動としても SPBPM と同形状で見えているのがわかる。また、キッカーのある状態で振幅ピークが 1/5 まで抑制されていることが確認できる。ここにバンプ 1、4 の励磁タイミングを相対的にシフトさせると、初期値 $\pm 10\text{ns}$ のバンプタイミングジッター水準では、抑制効率が 10%以内で失われることはなかったが、昼夜変動水準である 20ns のシフトでは、水平振動位置とともに振動形状が変化し、抑制効率が 80%以上失われることを確認した。

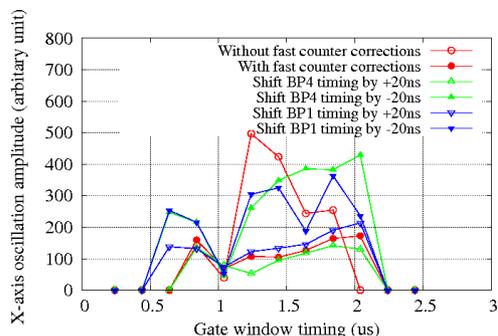


Figure 12: The observed horizontal light axis oscillation structures as a function of TTPM gate window timing.

7. まとめ

高速補正キッカーシステムは光軸が安定した放射光の提供だけでなく、入射時に誘起される大電流バンチフィリングにおけるビーム不安定性の抑制に重要な役割を担っている。SPBPM、BBF、TTPM によって観測された振動抑制の低減率は一貫しており、

高速補正キッカーがない時に比べて 90%以上の抑制率となっている。また、フィードフォワードスキームにより入射から 3 ターン目にして振動を十分に低い水準まで低減している。これは、光積分型ユーザーにとって、メリットがあり、将来的にさらに低エミッタンス化され光軸振動がビームサイズに対して相対的に顕著になる場合に大きな役割を果たすことになる。

フィードフォワードスキームにとって、ターゲット水平振動振幅、振動位置、振動形状が一定であることが前提であるが、各バンプ間の相対的な時間距離が 20ns シフトするだけで、振動形状と振動位置が変化し、低減効率が減少してしまうことが分かった。これは、バンプ励磁タイミングの電源室温と相關する昼夜変動、季節変動によるものであるが、今後、フィードフォワードスキームによる初期抑制率の長期ユーザー運転期間における維持を目指す必要がある。

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., proc. of EPAC'04, Lucerne, Switzerland, (2004), p222.
- [2] M. Takao, et al., proc. of APAC'04, Gyeongju, Korea, (2004), p49.
- [3] T. Ohshima, et al., proc. of EPAC'04, Lucerne, Switzerland, (2004), p414.
- [4] C. Mitsuda, et al., proc. of IPAC'10, Kyoto, Japan, (2010), p2252.
- [5] C. Mitsuda, et al., proc. of IPAC'13, Shanghai, China, (2013), p666.
- [6] T. Nakamura et al., proc. of DIPAC 2005, Lyon, France, (2005), p304.
- [7] M. Masaki et al., proc. of IBIC 2012, Tsukuba, Japan, (2012), p492.