

STABILIZATION OF INJECTOR AND INJECTION KICKERS IN UVSOR-II

Heishun Zen ^{*,**,A,B)}, Kenji Hayashi^{A)}, Junichiro Yamazaki^{A)}, Masahiro Adachi^{A,B)}, Masahiro Katoh^{A,B,C)},

^{A)} UVSOR facility, Institute for Molecular Science, Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585

^{B)} The Graduate School of Advanced Studies (Sokendai), Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585

^{C)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

Abstract

For stable top-up operation of UVSOR-II facility, 750-MeV low emittance storage ring, slow feedback systems have been developed. The amplitude and timing of pulsed kickers for creating injection bump orbit have been stabilized by the developed stabilization system. The drift of amplitude and timing were reduced from 4% to less than 1% and from 100 ns to 30 ns, respectively. The timing of fast kicker for extracting electron bunches from a booster synchrotron has also been stabilized. The feedback system allows us to keep bunch filling pattern during 12-hour top-up operation. For stabilizing the circulation charge in the booster synchrotron, beam energy stabilization system has been developed. The system compensates the variation of fed RF power to linear accelerator by varying the beam current of injected electron beam to the linear accelerator. The circulating charge was successfully kept for 12 hours even with large drift of fed RF power to the accelerator.

UVSOR-II における入射器および入射用キッカー安定化

1. はじめに

放射光施設 UVSOR-II では、2008 年より Top-up 運転に向けて遮蔽の増強[1]・ビームスリットの設置[2]・入射器電磁石電源の更新[3]・入射時信号の配信[4]などを行い、夜間のテスト運転を経て昨年度よりユーザー運転への Top-up 運転の導入を開始した。

Top-up 運転の定常化に伴い、長時間定常的に入射器(15 MeV 線形加速器・750 MeV シンクロトロン)および入射用キッカーを運転するようになった。これに伴い、これまでの朝 9 時・昼 3 時に 15 分程度連続して入射系を運転する場合には気付かなかった問題が表面化するようになった。代表的なものとしては、線形加速器のエネルギー変動、シンクロトロン出射用高速キッカーの時間ドリフト、蓄積リング入射用キッカーの振幅・励磁時間のドリフトが挙げられる。

UVSOR-II では、2009 年度に最も大きな変動要因であった線形加速器からシンクロトロンへの入射効率変動を安定化するため、入射用静電セプタムの振幅の安定化を安価なオシロスコープと PC を用いた遅いフィードバック制御により行い、その安定性を大きく改善する事に成功している[5]。その後、その手法を踏襲し、オシロスコープを用いて前記の各種パルス波形をリアルタイムで計測し、その波形を元にして振幅・時間を安定化する遅いフィードバック制御系を導入する事で前述の変動・ドリフトの安定化を行った。

2. フィードバック制御の概要

図 1 に本研究にて導入した典型的なフィードバック

ク制御システムの構成図を示す。システムは PC から操作可能な可変ディレイ (DG535 or DG645, Stanford Research Systems, Inc.)、オシロスコープ (WJ314A; LeCroy, Corp., or TDS2024C; Tektronix, Inc.)、および PC から成る。キッカーなどの波形はオシロスコープで取得され、PC に送られる。PC では、波高値や動作タイミングを図 2 の様に波形より割り出し、これらを一定に保つように可変ディレイおよび装置のコントローラに命令を送る。可変ディレイおよびコントローラに送る指示値は LabView 標準の PID コントロールソフトにより決定される。

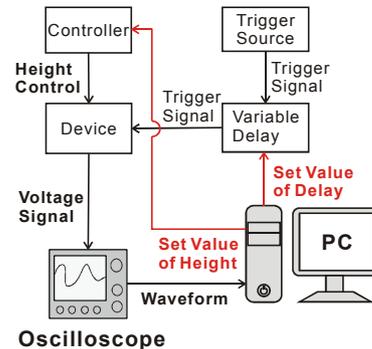


図 1: フィードバック制御の概要

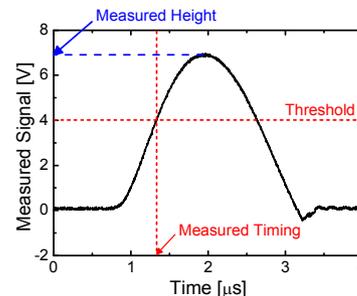


図 2: 波高値および動作タイミング決定法

* zen@iae.kyoto-u.ac.jp

** Present address : Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011

3. 入射バンプ形成用キッカー安定化

UVSOR-II では、3 台のパルスキッカーを用いてバンプ軌道を形成し、入射器から蓄積リングへのビーム入射を行っている。キッカー3 台の動作タイミングおよび波高が変化すると、バンプ軌道の大きさが変化するため、入射効率の低下や入射セプタムでの蓄積ビームのロスに繋がる。図 3(a)にフィードバック制御時のキッカー高圧電源の設定値(黒線)と波高値(赤点)の時間変化を示す。フィードバック制御によって波高値が 6.6 V に保たれ、変動が 1%以下である一方、高圧電源の設定値が 935 から 970 まで約 4%も変化している。これは、フィードバック制御を行わなかった場合に 4%もの波高変動がある事をしめしている。また、図 3(b)にフィードバック制御時の可変ディレイ設定値(黒線)と計測されたキッカー動作タイミング(赤点)の時間変化を示す。波高値同様に、フィードバック制御により、動作タイミングが一定(全幅 30 ns 程度)に保たれている一方、可変ディレイの設定値が 1.75 から 1.85 μs まで 100 ns ほど変動している。

この様にフィードバック制御を用いてキッカーの波高および動作タイミングを安定化することは、一日の内の変動を抑えることのみならず、日々の運転条件の再現性を高めるという意味でも重要である。

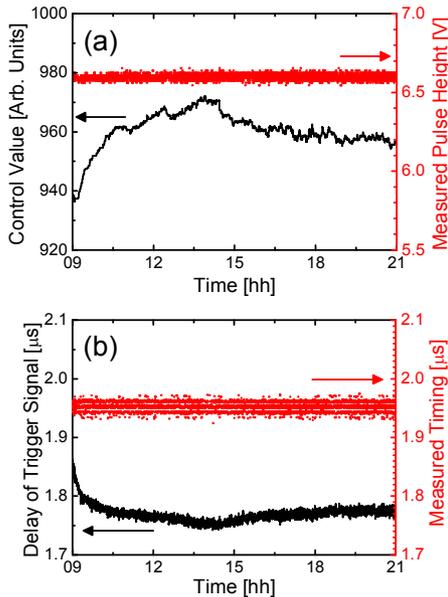


図 3: フィードバック制御時の(a)キッカーの設定値と波高の時間変化。(b)可変ディレイ設定値とキッカー動作タイミングの時間変化。

4. シンクロトロン出射用高速キッカー動作タイミングの安定化

UVSOR-II ではマルチバンチ運転時に、イオントラッピングなどに起因する不安定性を抑制するため、全 16 RF バケット中、14 RF バケットをバンチで満たし、残り 2 RF バケットを空けるパーシャルフィリングを行っている。空きバケットを維持する

為、入射器であるブースターシンクロトロンから電子を出射するために用いる高速キッカーは、蓄積リングの周回信号(~ 5.63 MHz)と同期して動作し、所定のバケットに電子バンチを供給する必要がある。しかし、高速キッカーの動作タイミングの長期変動は 1 RF バケット分よりも大きく、長時間トップアップ運転を継続して行くと、空きバケットにしていた 2 RF バケットに電子が入射され、埋まってしまふという問題があった。そこで、図 4 に示すように、出射キッカーの動作タイミングを計測し、可変ディレイを用いてその安定化を行った。図 5 にその結果を示す。

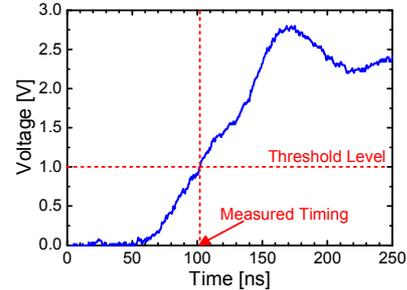


図 4: 典型的出射用高速キッカー波形と動作タイミング決定方法

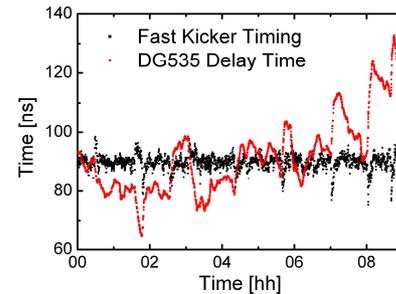


図 5: 出射用高速キッカーの動作タイミング(黒点)と可変ディレイの設定値の時間変化

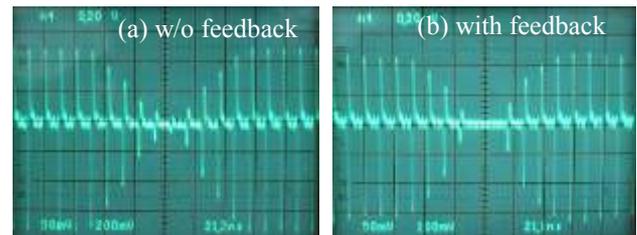


図 6: 12 時間トップアップ運転後の電子バンチピックアップ波形。(a)出射キッカー動作タイミング安定化無し。(b)安定化有り。

フィードバック制御により、高速キッカーの動作タイミングはほぼ 90 ns 一定に安定化され、一方で可変ディレイの設定値が 65 から 130 ns まで大きく変化しているのが分かる。フィードバック制御を行わない場合にはこの変化がそのまま高速キッカーの動作タイミング変動となる。この動作タイミング変動は UVSOR-II では約 5.9 バケットに相当するもので

あり、トップアップ運転後に空バケットが無くなるのは至極当然の事である。図 6 に出射キッカーの動作タイミングを安定化しない場合(a)とした場合(b)との 12 時間連続トップアップ運転後の電子バンチピックアップ波形を示す。図より、動作タイミングの安定化により、長時間トップアップ運転後も 2 バケット分が空バケットとして維持されている事が見てとれる。

5. 線形加速器ビームエネルギー安定化

UVSOR-II では、これまで 15-MeV Linac に供給される RF パワーが時々刻々と変化し、Linac からブースターシンクロトロンへの入射効率が低下、シンクロトロンを周回する電子の量が減少し、1 入射あたりの蓄積リングへの入射電子数が減少するという問題があった。これは主に、Linac から供給される電子ビームのビームエネルギー変動が支配的であると考えられる為、本研究では簡易にエネルギー変動を抑制する手法を考案した。

加速管を電子ビームが通過する際のエネルギーゲインを δE_{kin} とすると、加速管に投入された高周波電力 P_0 と加速管を通過する電子ビームの平均電流 I_b より、式(1)の様に表される。

$$\delta E_{kin} = A\sqrt{P_0} - BI_b \quad (1)$$

ここで、 A 、 B は加速管の特性により決まる係数である。一般に、エネルギーゲインを一定に保つ為には投入パワー P_0 および平均電流 I_b を一定に保つが、UVSOR-II では、クライストロンの高圧電流の変化により、 P_0 を一定に保つ事が容易ではない。そこで、平均電流 I_b が加速管上流のソレノイドコイルの励磁電流に依存する事を利用し、 I_b を変化させる事で P_0 の変化を打ち消し、エネルギーゲインを一定に保つ手法を考えた。システムの概要を図 7 に示す。

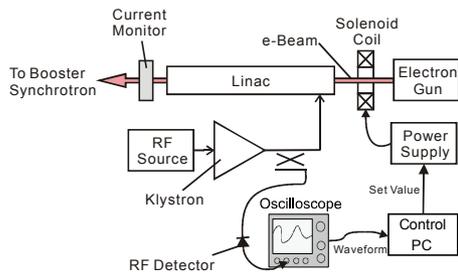


図 7: Linac エネルギー安定化用制御システム概要

加速管に投入される高周波電力の波形はオシロスコープにより計測され、制御用 PC に送られる。制御用 PC では予め作成した関数式に基づき、ソレノイド励磁電流を変化させ、電子銃から加速管に入射される電子ビームの平均電流を加速管中のエネルギーゲインが一定となる様に調整する。

図 8(a)に一日の運転中での RF パワーの変動とそれを補償する為に変化させたソレノイド励磁電流の推移を、図 8(b)にブースターシンクロトロン周回電荷量の時間変動を示す。図 8(a)より、RF パワーの

変動に合わせてソレノイド電流が変化し、図 8(b)に示される様にブースターシンクロトロン周回電子数が維持されている。

その後、2011 年 4-5 月のシャットダウン時にクライストロンの交換を行ったところ、これまで見られていた図 8(a)の様な RF パワーの変動は見られなくなった。この為、現在は本フィードバックシステムの運用を停止している。また、諸々の計測データから、交換前には大きく変動していたクライストロン中を流れるパルス電流が安定になったためだと考えられる。その為、交換前にパルス電流の変動が大きかった原因として、5 年以上、使用して来た為、クライストロンの陰極が劣化し、陰極表面電流密度が低下、空間電荷制限領域を逸脱し、温度制限領域にて運転されていた為だと考えられる。今後はクライストロンの印加電圧とパルス電流の関係を定期的に記録し、温度制限領域に入らないように注意すると共に、ヒーター電流の調整等で安定な運転条件を維持できる様、努力する予定である。

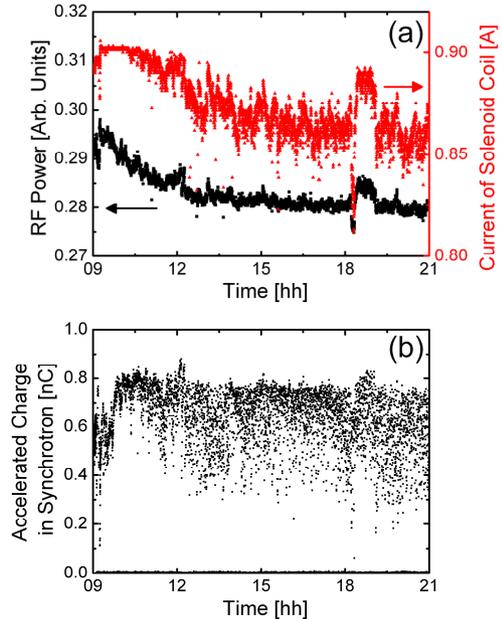


図 8: (a)RF パワーの変動とそれを補償する為のソレノイド励磁電流の変化。(b)Linac エネルギー安定化策を施した際のシンクロトロン周回電荷量の変化

6. まとめ

UVSOR-II の入射器、入射システムを安定化するため、遅いフィードバック系を導入した。波高値と動作タイミングのフィードバック制御により、バンチ形成用キッカーの安定度は 4%から 1%以下に改善され、また、動作タイミング変動も 100 ns から 30 ns 程度にまで改善された。また、動作タイミングのフィードバック制御の導入により、ブースターシンクロトロンからビームを取り出すために使用する高速キッカーの動作タイミング変動は大きく抑制され、長時間のトップアップ運転後もフィリングパターンを維持する事が出来るようになった。更に、Linac

から供給される電子ビームのエネルギーを安定化するため、Linac に入射する電子ビームの平均電流をコントロールする手法を導入した。導入したシステムにより、加速管に投入される高周波電力が大きく変動する条件下においても、長時間、シンクロトロンを周回する電荷量を保つ事に成功した。

参考文献

- [1] K. Hayashi, 分子研レターズ **61** (2010) 34.
- [2] K. Hayashi et al., UVSOR Activity Report **36** (2009) 35.
- [3] M. Katoh et al., UVSOR Activity Report **35** (2008).
- [4] K. Hayashi et al., UVSOR Activity Report **37** (2010) 33.
- [5] H. Zen et al., Proc of 6th Annual Meeting of PASJ (2009) 658.