3-1 加速器

## 1. 運転・軌道解析グループ

## 1-1 加速器の運転

図1に過去5ヵ年度の運転時間の推移を示す。2013年 度のSPring-8加速器総運転時間は4330時間であった。こ の時間には、加速器立ち上げ調整時の入射器系加速器の先 行運転なども含まれている。例年に比べて800時間程度 短くなっているが、マシン冷却設備熱源改修工事のため 2014年1月から3月まで加速器の運転がなかったからで ある。

2013年度の蓄積リングの運転時間は4265.5時間、ユ ーザータイムは3408.5時間(蓄積リング運転時間の 79.9%)、トラブルによりユーザータイムを停止しなけれ ばならなかった時間は計画ユーザータイムの0.58%に当 たる20時間であり、16回のビームアボートあるいは計画 外のビーム廃棄が発生した。ユーザータイムの達成率は 99.3%であった。最も長い中断時間は、緊急地震速報が発 令された地震によるもので、安全確認を行った6時間4分 後にユーザータイムを再開した。2013年度は、その他に も2回の地震によるビームアボートが発生し、合計7時間 12分の地震によるユーザータイムの中断があった。2013 年度もビームライン、挿入光源等による中断は少なく、加

Refill 6000 User Time 5000 4000 Hours 3000 2000 1000 0 FY2009 FY2010 FY2011 FY2012 FY2013 Acc. Operation Time 5168.8 5125.6 4918.6 5078.8 4330.0 Sr Operation Time 5035.4 5096.3 4904.2 5063.1 4265.5 Tuning&Study (Acc.&BL) 1019.1 1026.6 803.0 884.0 898.0 Refill 6.3 5.0 4.4 5.2 3.5 34.8 27.5 57.0 39.2 Down Time 20.0 Mean Time between Failures 122.9 178.4 117.7 107.7 213.0 Achieved User Time 4014.9 4071.6 4058.5 4155.6 3408.5 Planning User Time 4056.0 4104.0 4120.0 4200.0 3432.0 Availability (%) 99.0 99.2 98.5 99.3 98.9

図1 過去5ヵ年度の運転時間の推移

速器のトラブルによる中断の合計時間は10時間19分と全体の51.6%(地震を除くと78.4%)を占める結果となった。特にステアリング電磁石電源のトラブルが、合計で6時間56分(アボート回数5回)と目立った。トラブルの原因はフォトカプラのゲイン低下など経年劣化によるもので、加速器運転開始以来17年が経過して機器の経年劣化対策は急務となっている。

ユーザータイム中のトップアップ入射継続率は99.0% に達している。この間、蓄積電流値の変動は0.03%程に 抑えられ、光源として極めて安定している。

また、加速器及びビームラインの調整に2012年度 (884時間)並の898時間を使ったが、2010年度以前に比 べると100時間以上少ない。昨今の電力事情等を考慮す ると、これまで以上の効率的な運転が必要とされる。熱源 改修工事が行われたのもこのためである。

バンチ運転モードでは、パルス放射光を用いる利用実 験が増加してきたため2011年度以降マルチバンチモード での運転がない。バンチ運転モードには、3種のセベラル バンチモード(等電流バンチ等間隔フィリングモード) と5種のハイブリッドバンチモード(高電流孤立バンチ と低電流バンチトレインからなるフィリングモード)が 用意されている。利用運転時間に占める割合は、セベラ ルバンチモードが54.6% (2012年度は60.6%)、ハイブ リッドバンチモードが45.4%(2012年度は39.4%)とな っている。ハイブリッドバンチモードでは、より強い単 パルス放射光を利用するため、全周の11/29に低電流バ ンチトレインと対向に1個の孤立バンチ(5 mA、電子数 にして1.5×10<sup>11</sup>個)を配したモードが開発され、2012 年12月より利用運転への供用を開始した。2013年度に は16.8%の割合で利用され、時分割実験などのさらなる 進展が期待される。

(後藤 俊治、高雄 勝)

#### 1-2 高次共鳴及び挿入光源の影響の抑制

SPring-8では、輝度及びフラックス密度改善のため、 電子ビームのエミッタンスをそれまでの3.5 nm・radから 2.4 nm・radに低減する蓄積リングオプティクスの変更を 行った<sup>[1]</sup>。2013年5月より利用運転に提供しており、ID 放射光の輝度は1.5倍程度改善することとなった。

しかしながら、このオプティクス変更に際して蓄積リン グのビーム安定性が低下することとなった。バンチ電流値 の高いセベラルバンチ運転では、十分なタウシェックビー ム寿命(バンチ内電子電子衝突により引き起こされるビー ム損失で決まる寿命)が必要となるが、これが短くなって いた。この寿命を制限するモーメンタムアクセプタンスが 狭くなったことが原因であった。

タウシェックビーム寿命とは、本来電子同士の衝突によ りエネルギー交換した電子が加速 RF バケットから溢れて 失われることであるが、ディスパージョン(エネルギー分 散関数)のあるところで衝突が起こると、水平方向にエネ ルギー偏差とディスパージョンに比例した大きな振幅を持 って振動を始めるため、モーメンタムアクセプタンスは横 方向の力学的安定性からも制限を受けることになる。図2 は、オプティクス変更前後のビーム寿命(タウシェック効 果が支配的となる1 mA/bunchでの寿命)をプロットし たものである。加速 RFで決まるモーメンタムアクセプタ ンスはRF電圧(グラフ横軸)に従って拡大していくが、 横方向によるリミットまで達すると延びなくなる。オプテ ィクス変更によりモーメンタムアクセプタンスが3.2%か ら2.4%と狭くなり、RF電圧16MV時(ユーザー運転時) のタウシェックビーム寿命が半減した。調査の結果、2次 ディスパージョンの歪みが大きくなっていたことが判明 し、6極電磁石の調整でこれを補正することによって、モ ーメンタムアクセプタンスは2.8%まで改善された<sup>[2]</sup>。

ビーム寿命に加え、トップアップ運転を行っている SPring-8 蓄積リングにおいては、放射線安全や挿入光源 (ID) 磁石列の減磁の観点から、入射ビーム損失を削減す ることも大変重要である。利用運転中、IDギャップが閉 じられることにより入射効率が低下することが観測されて いるが、特に長尺真空封止アンジュレータであるID19は 入射効率に対する影響が大きい。これは真空封止型である ためギャップに従って垂直口径が狭くなることに加え、 ID磁場によるベータトロンチューン(振動数)のシフト が大きいことによる。図3に示す通り、特に垂直方向のチ ューンシフトが大きい。SPring-8蓄積リングでは、水平 方向に入射された入射ビームは、結合共鳴により垂直方向 にも振動することになり、狭い垂直口径で制限を受けてビ ーム損失が引き起こされている。IDギャップが閉じられ ると、ベータトロンチューンは結合共鳴に近づき、垂直振 動が増幅されて入射効率が低下する。そこでID19につい ては、ID 直近の上下流各2台の4極電磁石を用いて、ユ ーザー運転中も ID ギャップ閉によるベータトロンチュー ンシフトの補正を行うことにした。これによって、ID19 のギャップに依らず入射効率80%以上を維持している。

さらに特定のIDでは、ベータトロンチューンシフトだ けでなく、高次多極磁場を発生するものもある。特に、8連 Figure-8アンジュレータであるID07はスキュー8極磁場 を発生し、高次結合共鳴を励起することが観測されている。 この共鳴を補正するため、スキュー8極電磁石がID07の アンジュレータ間に2台設置されている。利用運転中、ID



図2 タウシェックビーム寿命の加速RF電圧依存性。エミッ タンス、カップリングによるバンチ体積の差異を規格化 して比較。



図3 ID19 ギャップ閉によるベータトロンチューンのシフト

のギャップ条件によってこのスキュー8極電磁石を用い て、高次結合共鳴を補正することにより高い入射効率を維 持している。

(高雄 勝)

## 1-3 ビーム不安定性の抑制

## 1-3-1 新型信号処理装置の開発

蓄積リングのビーム不安定性を抑制するためのBunchby-bunchフィードバック用デジタル信号処理装置の高度 化を2012年度より実施している。現在の信号処理装置は、 開発後10年が経過して入手困難な部品が徐々に増え、新 たな製作が困難となりつつある。また、蓄積リングの運転 モードでは、大バンチ電流のシングルバンチと低バンチ電 流のバンチトレインから構成されるハイブリッドフィリン グが主となっているが、このようなフィリングでは、シン グルバンチが引き起こすシングルバンチ不安定性と、多く のバンチが共同して引き起こすマルチバンチ不安定性の双 方を同時に抑制する必要がある。現状ではこのバンチ電流 の大きなコントラストへの対応を複数の信号処理装置を組 み合わせて実現し、ビームを安定化しているが、これはシ

ステムの複雑化をもたらし、調整が容易とはいえない。

そこで、最近の進歩の著しいFPGAやADCをはじめと したデジタルデバイスを用いて信号処理装置を開発し、部 品供給の問題を解決するとともに、ハイブリッドフィリン グへの対応機能をもたせてシステムの簡素化を可能とする 新しい信号処理装置を開発することとなった。また、現状 の手法では、高いフィードバック減衰力を持たせた際には、 フィードバック自身の不安定性が不可避となるが、これに 対して、この現象を取り除きより強い減衰を可能とするた めの新しいフィードバック手法を提案しており、新しい信 号処理装置は、この手法にも対応可能としている。これによ り、SPring-8-II計画で生じると予想される強い不安定性 にも対応可能となる。さらに、SPring-8-IIの低いシンクロ トロン周波数での縦方向不安定性にも対応可能としている。

2012年度に信号処理装置のハードウェアを製作したが、 試験の結果、DAC及びアンプから構成される出力段の周 波数特性の不足が判明した。そこで、2013年度には、こ の出力段の改善のために、種々のDACやアンプの特性を 評価して最適な組み合わせ・パラメータを探索し、満足の できる特性を持つ出力段を見いだした。

1-3-2 縦方向 Bunch-by-bunch フィードバックの開発

SPring-8が提案した、長さあたりのキック力がこれま での数倍となるエネルギーキッカー<sup>[3]</sup>について、2012 年度に製作<sup>[4]</sup>し、リングに設置した。2013年度では、 これによりビームを実際にキックして、そのキック力及び 時間構造を測定した。その結果から、以下を確認すること ができた。

 長さあたりのキック力が、多くのリングで採用されている従来の過減衰型空洞キッカー<sup>[5]</sup>に比較して、 3倍程度と世界最高の性能である。

- キックの時間構造は、単一のバンチにのみキック力 を加えることが可能な構造となっている。
- 3) 駆動回路として、駆動信号生成において、従来の QPSK変調による複雑な回路を不要とし、受動素子 のみで構成された非常に簡単な回路での駆動を実現 し、その動作を確認できた。この回路は、本キッカ ーが、従来の空洞キッカーに比べて高めの周波数で の運転が可能であることを利用して実現している。

測定結果の一部を図4に示す。その後、このキッカーを 用いて、Bunch-by-bunchフィードバックを立ち上げ、ビ ーム試験を実施したが、ビームの位相振動を検出するフロ ントエンド回路のゲインが不十分であったため、十分なフ ィードバック減衰力を確認することが困難であった。今後、 これを改善し、現在の蓄積リングを6 GeV, 100 mAで運 転した際に発生している縦方向不安定性を抑制する予定で ある。

(中村 剛)

#### 1-4 Bucket-by-bucket 入射用超高速キッカーの開発

2 ns間隔のバケット毎に制御可能な短パルスキックを 生成し、2極場から4極場までキックの空間分布が可変で 50 kV駆動可能な2電極ストリップライン型キッカーを、 2012年度より開発している。2極キックの応用の一つと しては、極低エミッタンスリングなどの安定領域がmm 以下の非常に狭いリングへのon-axis入射があり、すべて のバケットに対してon-axis (swap)入射を可能とし、実 用可能なレベルでの蓄積電流でのトップアップ運転が可能 となる。また、数mm程度の狭い安定領域のリングへの 入射を可能とする4極キックによるoff-axis入射は、これ まで蓄積ビームへの影響が大きいため実用化されていない が、このキッカーにより蓄積ビームへの影響を入射バケッ



図4 エネルギーキッカーの特性測定。左:シンクロトロン振動の励起によるキック量測定。 右:バケットの通過タイミングに対するキックの強さの測定。



図5 水平キックの水平方向分布。左:1電極のみ駆動、右:2電極を同極性で駆動して生成した4極キック場。 測定は丸印、計算を破線で示す。

トに局在化することにより実用化することが可能である。 2013年度は、フィードスルーを50 kV対応のものに交換して50 kV駆動が可能であることを確認した後、線型加速器のL3ビーム輸送系での1 GeVビームによる試験を 実施した。測定精度向上のためにエミッタンスの低減を行う可変アパーチャーコリメータ、Ce: YAGスクリーンによるプロファイルモニタ、水平・垂直ステージに搭載した キッカーをL3ビーム輸送系に設置し、キックの空間分布 測定を実施した。図5は、2電極のうち、片側電極のみを 正極性で励起した場合のキック、及び両側電極を正極性で励起して生成した4極場を示す。ほぼ計算どおりの分布が 得られていることがわかる。また、ピークのキック電磁場の強さは、従来から世界で開発されてきた2極キッカーによるものに比較して、50%以上の向上を示している。

(中村 剛)

#### 1-5 加速器診断

## 1-5-1 光診断によるビーム監視

加速器診断I (BL38B2) では、トップアップ入射1ショ ット毎の高速バンチ純度測定の実現を目指して開発を進め てきたTDC (Time to Digital Converter) 制御系<sup>[6]</sup> ソフ トウェアを改修し、高速の信号処理を実現した。また、高 レートの光子検出が可能な検出器 HPD (Hybrid Photo Diode) 用の制御系、光学系の整備を行った。これらを導 入することにより、10<sup>-9</sup>台のバンチ純度を従来のおよそ 1/25の時間の10秒以下で評価することが可能なバンチ純 度モニタを実現した。2013年11月からトップアップ入射 1ショット毎のバンチ純度を評価するモニタシステムの実 運用を開始している。

加速器診断 II (BL05SS) では、ユーザータイム中にビ ーム軌道変動を常時監視する高精度光軸モニタ<sup>[7]</sup> を高速 化した。測定の間隔を従来の7秒から1秒に短縮したこと により、挿入光源のギャップ等が駆動される時に生じる速 い軌道変動を検出することが可能となり、ビーム軌道変動 の監視機能が強化された。

ユーザータイム中のビームエミッタンスの変動を監視す る機能を強化するために、X線プロファイルモニタ<sup>[8]</sup>や 2次元放射光干渉計<sup>[9]</sup>とは異なる光源点でビームのプロ ファイルを常時観測し、ビームのサイズと傾きを測定する、 X線ピンホールカメラの整備を進めた。2013年度は、X線 放射光取出し窓、ピンホール、ビーム像検出部等を設計・ 製作し、年度末の点検調整期間に設置した。2014年度の 第1サイクルから稼働させる計画である。

(田村 和宏、高野 史郎)

### 1-5-2 X線フレネル回折による微小ビームサイズ測定

放射光ビームライン挿入光源部におけるミクロンオーダ ーの微小な光源サイズを、シングルスリットによるX線フ レネル回折を用いて高感度で測定できる新しい手法を開発 した<sup>[10]</sup>。このX線回折法(XFD)は、スリット幅を最適 化した際に現れるダブルピーク状のフレネル回折像(図6) を用い、その中央部の谷の深さと光源サイズとの相関、す



図6 X線フレネル回折法を用いた挿入光源部ビームサイズ測定のレイアウト

なわち光源サイズの増加に伴い谷が浅くなるという原理を 利用している。挿入光源(ID05)<sup>[11]</sup>を持つ加速器診断II (BL05SS) において、XFDにより垂直方向の光源サイズ を測定した。測定には7.2 keVのアンジュレータ放射を用 い、最適化されたビームラインフロントエンド部のスリッ ト幅は150 µm (垂直) 及び200 µm (水平) である。4つ の異なる運転動作点とスキュー4極電磁石のON/OFFに より、電子ビームの垂直エミッタンスを変えて観測した回 折像を図7に示す。垂直方向にはダプルピーク構造が明瞭 に現れているが、水平方向はエミッタンスが大きいため像 は完全になまされ、回折による構造が見えていない。図7 にみられる回折像の山谷コントラストの減少は、XYエミ ッタンス結合比の増加に伴う光源点での垂直ビームサイズ の増大に対して、XFDが感度を有していることを示して いる。観測された回折像から評価した最小の垂直ビームサ イズは、8.1 µm (r.m.s.) であった。このXFDは、観測す るX線波長やスリットの位置などの条件によっては1μm (r.m.s.) 以下の分解能を実現することも可能であるので、 超低エミッタンスを持つ次世代光源リングの輝度性能を最 大化するためのエミッタンス診断法として有望である。 (正木 満博)



図7 電子ビームの垂直エミッタンスを変えて観測されたダブ ルピーク状回折像。最も谷が深い(a)の回折像から評 価された垂直ビームサイズは8.1 µm(r.m.s.)である。

## 1-5-3 X線ストリークカメラ

X線ストリークカメラ<sup>[12]</sup>は、高感度化・高分解能化を 目標に、フレネルゾーンプレートによるX線集光系と高速 単掃引ユニットを用いて、バンチ長のバンチ毎・シングル ターン・シングルショット観測を行った。観測に先立ち、 観測バンチ長の入射X線強度依存性並びにストリークカメ ラのMCPゲイン依存性を調査した。観測バンチ長は有意 に入射X線強度に依存するが、MCPゲインに対しては依 存しないことを確認した。観測バンチ長が入射X線強度に 依存するため、バンチ長を観測するための適切な入射X線 強度を調査する必要がある。このため、加速器診断Ⅱ (BL05SS) においてX線強度を変えながら特定のバンチ のバンチ長を測定すると同時に加速器診断I(BL38B2) の可視光ストリークカメラで同一バンチのバンチ長を測定 して、両者の結果が一致する入射X線強度を求めた。この 結果を用いて、測定するバンチからの適切なX線強度を決 定し、蓄積リングを周回している個々のバンチのバンチ長 の測定を行った。F-mode (1/14-filling + 12 bunches) における孤立バンチ部・マルチバンチ部のバンチ長を測定 しところ、孤立バンチ部は20~21 ps、マルチバンチ部 は18~19 ps (いずれもrms値) であった。また、ビー ムローディングによるものと考えられるバンチ長の Bucket ID 依存性も確認した。

(持箸 晃)

## 参考文献

- Y. Shimosaki, K. Fukami, K. Kaneki, K. Kobayashi, M. Masaki, C. Mitsuda, T. Nakamura, T. Nakanishi, H. Ohkuma, M. Oishi, M. Shoji, K. Soutome, S. Takano and M. Takao: "New Optics with Emittance Reduction at the SPring-8 Storage Ring", Proc. of IPAC13 (2013), 133 (MOPEA027).
- [2] M. Takao, K. Kaneki, Y. Shimosaki and K. Soutome: "Correction of the Higher Order Dispersion for Improving Momentum Acceptance", Proc. of IPAC14 (2014), 3029 (THPRO066).
- [3] T. Nakamura: "Resonant Strip-Line Type Longitudinal Kicker", Proc. of IPAC2011 (2011), http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2011/papers/ mopo007.pdf.
- [4] M. Masaki, T. Fujita, K. Kobayashi, T. Nakamura, M. Oishi, H. Ohkuma, S. Sasaki and M. Shoji: Proc. Of IBIC 2013 (2013), http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ibic2013/papers/ tupc18.pdf
- [5] R. Boni, et al.: "A Waveguide Overloaded Cavity as Longitudinal Kicker for the DA√NE Bunch-by-Bunch Feedback System", Particle Accelerator, Vol. 52 No.2, pp 95-115, 1996.

- [6] A. Kiyomichi, et al.: Proc. 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Japan, p.701 (2012).
- [7] S. Takano, et al.: Proceedings of IBIC2012, Tsukuba, Japan, p.186 (2013).
- [8] S. Takano, et al.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 556, p. 357 (2006).
- [9] M. Masaki, et al.: J. Synchrotron Rad., 10, p.295 (2003).
- [10] M. Masaki, et al.: "X-ray Fresnel Diffractometry for Ultra-Low Emittance Diagnostics of Next Generation Synchrotron Light Sources", submitted to Phys. Rev. ST-AB.
- [11] M. Masaki, et al.: AIP Conf. Proc., SRI 2009, Melbourne, Australia, 1234, p.560 (2010).
- [12] A. Mochihashi, et al.: Proceedings of IBIC2012, Tsukuba, Japan, p.175 (2013).

# 加速器部門 運転・軌道解析グループ

後藤 俊治

# 2. 加速器第 | グループ

## 2-1 線型加速器の運転状況

2004年5月からは蓄積リングのトップアップ運転が、 2004年9月には、SPring-8とNewSUBARUの両方同時 のトップアップ運転が始まり、現在も継続されている。 NewSUBARUでは1 GeVでのトップアップ運転のほか 1.5 GeVへの加速運転も行っている。1.5 GeV運転は必要 に応じて1日1、2回の入射を行っている。

近年のトップアップ運転では短寿命のフィリングパター ンが増え、入射の頻度が増加している。その対応として Sy/NS の2 Hz 高速切替えを 2013 年度から実施した。高速切り 替え以前に比べ NewSUBARU への入射時間が約 70%以 下に、蓄積電流変動は約 60%に改善した。SPring-8 蓄積 リングの蓄積電流の変動幅も約 50%に減少した。



2013年度における線型加速器総運転時間は、4328.3時間であった。蓄積リングのユーザータイムは3405.5時間であり、入射器トラブルにより入射を中断した場合以外はトップアップ運転が行われた。図8に2013年度における線型加速器のサイクル毎インターロックフォールト統計を示す。 左のグラフは1日あたりのフォールト回数で、第6サイクルにおいて大きな値になっているが、年平均では0.22回/日であった。右のグラフがトップアップ運転の中断時間の比率であり、2013年度は0.131%となっている。これは2012年度の倍であるが、2010年度、2011年度とほぼ同程度であった。中断原因は多岐にわたっており、事前診断と共に早期復旧の手法確立に向けて努力を行っている。

(鈴木 伸介)

### 2-2 線型加速器コンパクトタイミングシステム試作

2013年度にJASRIの研究助成「匠プロジェクト」を獲 得し線型加速器のコンパクトタイミングシステムの試作を 行った。その性能評価が終了したので報告する。

線型加速器のタイミングシステムでは多数のNIMモジ ュールを同軸線でつなげて複雑な高時間精度の回路を構成 している。しかしNIMモジュールの数が161個,NIMビ ン電源の数が22と大規模になっており、これ以上の拡張 が困難になってきたこと、またNIMモジュール間の同軸 ケーブルの接続が複雑で回路の保守が難しいことなどか ら、よりシンプルなタイミングシステムに移行すべきであ ると考えていた。

そこでFPGA (Field-Programmable Gate Array)を用 いた小型タイミング回路の試作を行った。今回の試作では (1)現在使用している個別NIMモジュールの機能を全て 含むこと (2)タイミングシステムのうち電子銃トリガ ー回路については全て回路を作成すること の2点をテー マに回路の試作に取り組んだ。ただし評価のためのプロト タイプ試作にとどめ、すぐに導入するところまでは考えて いない。むしろ可能性や問題点などを明らかにすることが 今回の回路試作の目的である。

全体の構成を図9に示す。主として(A)インターフェ ース回路、(B) FPGA主回路,(C) I/Qモジュレータ回路 からなる。

(A) インターフェース回路はNIM信号をFPGAに入 出力するためのNIM/LVDS変換回路である。出力のジッ ターを低減するためのリクロック回路を備えている。(B) FPGA主回路はXilinx社製のML623キットを使用した。 使用されているFPGAはVertex6(XC6LX240T)である。 Vertex6の内部に現在の電子銃トリガー回路を全てプログ ラムした。高速振り分け入射に対応しており、また安全イ ンターロックの機能も含んでいる。プログラムにおいては NIMモジュールに対応する個別回路はFPGAを記述する 言語であるVHDLで記述し、個別回路をまとめた全体回 以下得られた結果について述べる。今回使用した XC6LX240Tは回路規模が大きく、現在の電子銃トリガー 回路をそのままプログラミングすることができた。回路の 基本素子としてバッファー回路、インバーター回路、 FANOUT回路、AND回路、OR回路、カウンター式高精度 ディレイ、トリガーセレクター、分周器を含んでいる。また プログラムされたトリガー回路は、入出力される Sy, NS, Liそれぞれのトリガー信号に応じて、それぞれ独立した 周波数のクロック信号に同期して動作する必要がある。

電子銃トリガー系ではSy, NS, Liのトリガー信号に対し て各1台のカウンターディレイをプログラムしており、3 台のカウンターディレイでは正常に動作した。しかしカウ ンターディレイを5台分プログラムした場合は、特定のデ ィレイ値でカウンターディレイの出力が不安定になる場合 が見られた。

一方ジッターに関してはインターフェース回路でリクロ ックを行っていることで出力トリガーのクロックに対する RMSジッターは1.7 ps以下で、十分な性能を有している ことがわかった。また振り分け入射のトリガーも特に問題 なく出力できた。

今回の試作によりFPGAを用いたタイミング回路を線型 加速器のタイミングシステムに置き換える可能性を示すこ とができた。ただしカウンター回路に対する対応が今後必 要であることもわかった。実運用にむけてさらにプログラ ム開発を進め、2015年度までにモジュレータートリガー回 路をこのコンパクト回路システムに置き換える計画である。 (出羽 英紀)

## 2-3 電子入射部真空立体回路

電子入射部 RF 立体回路の安定性向上と経年劣化対策の ため、真空立体回路への更新を行った。電子ビームのバン チングを行う電子入射部は、定在波空洞であるプリバンチ ャ空洞及びバンチャ加速管で構成されるため、反射波をク ライストロン側へ伝送しないようにするためのサーキュレ ータを設置する必要である。従来は加圧六フッ化硫黄 (SF6) 仕様のサーキュレータを使用していたが、SF6ガ スの圧力変動に起因する RF 位相変動の改善と地球温暖化 防止排出抑制対象ガスであるSF6の排出削減を目的とし て、真空仕様サーキュレータの開発研究を行ってきた。 2012年度までに各種の改良を施してきたサーキュレータ について2013年度に10 MW長期大電力試験を実施して 大電力性能及び長期的安定性が確認されたので、電子入射 部 SF6 立体回路を撤去し、真空立体回路を設置した。RF コンディショニング及びビーム調整の結果、所定の性能が 達成され、線型加速器の運転は順調に再開された。

(谷内 努)



図10 10 MWの長期運転試験を完了した真空仕様 サーキュレータ



図9 線型加速器コンパクトタイミングシステムプロトタイプ 回路構成図

## 2-4 極短バンチモニタ開発テストベンチ

SPring-8-II 計画における蓄積リングへの入射に必要な 基礎技術の確立を目的とし、SACLA加速器からの数10 fs の電子ビーム(極短バンチビーム)を非破壊で3次元リア ルタイム・モニタリングできるEOサンプリング法を用い たバンチモニタの開発が進められている。その開発テスト ベンチとして RF 電子銃試験装置を利用するため、2012 年度にビームエネルギー30 MeVから65 MeV (最終的に は85 MeV) へ増強するためのRF立体回路及びバンチ圧 縮系の設計と各コンポーネント(RFパルス圧縮器、加速 管、シケイン電磁石等)の製作を行った。2013年度はRF 電子銃からの出射ビームエネルギーを6 MeV に上げるた めRF電子銃空洞を独立2空洞式に置き替えるとともに、 2012年度に製作した各コンポーネントを設置し、RFコン ディショニングを経て60 MeVのビームエネルギーが確認 された。2014年度はビームラインの一部改造とRFコン ディショニングを継続し、ビームエネルギー85 MeVを達 成するとともに、バンチ圧縮を目指したビーム調整を進め る予定である。

(谷内 努)



図11 設置された1.4 m加速管と1.2 mエネルギー変調管

加速器部門 加速器第 I グループ 花木 博文

## 3. 加速器第 || グループ

#### 3-1 蓄積リング新6極電磁石電源更新

蓄積リングには主電磁石として偏向電磁石、4極電磁石、 6極電磁石が設置されている。主電磁石は1台でも動作し ないと蓄積リングの運転が維持できない状態となる。この うち4極10種類と6極7種類の電磁石は、種類(ファミ リーという)毎に36のノーマル・セルに各1台ずつ設置 され、ファミリー毎に36台の電磁石が1台の電源に直列 接続されている。 主電磁石用の電源のうち、6極電磁石電源は老朽化の影響 が著しく、近年この電源の故障によりビームアボートが複 数回発生した。その際は予備電源に切り替えることで、最小 のダウンタイムで復旧できたが、電源内部の素子の廃番等 により電源の運用継続が困難となってきていた。このよう な状況を改善するため、蓄積リング冷却水設備更新のため の長期停止に合わせ6極電磁石電源7台を製作・更新した。

電源更新にあたり以下を目標とした。1.技術進歩を考 慮した電源方式; 10年後も陳腐化しない技術。2.省エ ネ;電源力率・効率の改善。3.電源の小型化。4.保守性 向上;電源回路のモジュール化。

また、蓄積リングの運転継続に直結する更新となるため、 徹底した工程管理を行い、製作上の不具合や作業の遅延を 回避した。さらに、既存電源を予備電源として使用可能な 計画を立案した。

近年躍進の著しいIGBTスイッチング素子を用いたマル チ・チョッパー制御によるスイッチング方式を、これまで のサイリスター位相制御によるドロッパー方式に換えて採 用した。SPring-8において数百kW級電源(表1参照)に おけるスイッチング方式定電流制御の導入は初の試みであ る。導入の技術的なハードルは高いと考えられたが、将来 を見据えて主流となりつつある方式を採用し、製作・開発 の経験を蓄積することが重要であると判断した。

スイッチング方式では ON/OFF のデューティー比によ り出力を制御するため、常時通電するドロッパー方式に比 べ、抵抗及び半導体素子の発熱による損失が改善され、電 源の効率が改善し、無効電力が低減して力率が改善する。 また、スイッチング周波数を高くすることで受動素子の小 型化が可能で、その結果電源全体として小型化できる。ま た、回路が単純化され、モジュール化が容易になり、モジ ュール交換による故障からの迅速な復旧が可能となる。今 回は設計上のバランスを考え、8 kHz をスイッチング周波 数とした。

表1に新電源と既存電源の性能比較を示す。新電源では 旧電源から飛躍的に改善した性能が達成され、同時に筐体

表1 性能仕様値と旧電源・新電源性能比較。旧電源のカッコ 内の数字は台数。新電源は7台とも同一定格

	仕様値	旧電源	新電源	
出 力	180 kW	185(2),186(4),195(1) kW	180 kW	
定格電流	300 A	300 A	300 A	
定格電圧	600 V	617(2),621(4),719(1) V	600 V	
出力安定度 <100 ppm		208 ppm/day	39 ppm/day	
リップル率	<100 ppm	83 ppm	42 ppm	
力 率	0.93	0.94(0.95)	0.94	
効 率	0.95	0.84(0.80)	0.99	
高調波歪率	<2%	<3%	0.3%	
筐体寸法	<既存電源	2.0(W)x2.4(H)x1.7(D)	1.8(W)x2.4(H)x1.7(D)	
重量	<5 t	8.2 m <sup>3</sup> , 3.8 t	7.3 m <sup>3</sup> , 3.2 t	

は予定通り小型化に成功した。

スイッチンング方式の導入により仕様値が定格電流から 運転電流までの広範な領域で維持される;出力安定度・リ ップル率は定格電流の50%の電流値においても精度が維 持されている。同様に、力率、効率についても、定格電流 の50%まで、それぞれ、99%、90%以上が維持されてい る。これらはドロッパー方式では実現できなかった性能で ある。

図12に電源筐体外観と一部の内部モジュール回路を示 す。運転操作はタッチパネル(図13)から行い、故障時 にはパネルを切り替えて自己診断機能を用いて状況をいち 早く把握し、迅速な故障時対応を可能としている。また、 電源の内部情報の表示量が増えた場合にも、ソフトウェア の改修により柔軟に対応することができる。

上述の利点があるものの、スイッチング方式には課題が 2つ存在する。1つは、スイッチング・ノイズの輻射であ る。ノイズが他電源に影響して誤動作などを引き起こすこ とが想定される。2つ目は、高周波スイッチングによる電 源内部構造体の共鳴振動から発生する騒音である。

1番目の輻射ノイズについては、VCCI規格 Class A (CISPR
22., EN55022)に準じ設計・
製作を行うことを明示した。これに基づきノイズ遮断策を実施し、放射電界強度試験の結果、
>30 MHzにおける基準値
50 dBµV/mを下回る40 dBµV/mが確認され対策が十分機能したことがわかった。

2番目の騒音について、スイ ッチング周波数の8 kHzは可聴 域で、不快音として80 dB以上 の騒音が生じている。この騒音 対策として共鳴音源となってい るトランス部の構造の改善を進 めている。

新電源方式による数百kW級 電源の製作は、初の試みであっ たため、計画通り電源が導入さ れた場合でも長期運用に関して は未知数であった。そのため、 旧電源を並設し、新電源の故障 時はブスバー(図13右)を切 り替えて負荷(電磁石)と旧電 源を接続し旧電源での運転が可 能な構成とした。図14に電源 の据え付け完成状態を示す。 (満田 史織)

## 3-2 蓄積リング入射時水平振動の抑制

蓄積リングでは、2004年度から適用を開始したトップ アップ運転により入射の際に実験を中断せず、放射光によ る熱負荷も安定し熱平衡状態を維持して、より安定した状 態で放射光利用実験が行える状態となっている。しかしな がら、入射時に蓄積ビームの残留振動があると放射光実験 に影響を与える可能性がある。また、この残留振動はビー ム不安定性の誘起を通じてハイブリッドフィリングにおけ る孤立バンチの電流に制限を加える要因となりうる。

トップアップ運転が導入された際、導入以前にあった入 射用バンプ軌道漏洩に起因する水平振動振幅は大きく改善 され、およそ1/10の0.4~0.5 mm (r.m.s.) まで低減さ れた。残留振動は、バンプ軌道を生成するための4台のパ ルス電磁石のパルス波形の立ち上がり、立ち下がり部の 相似性の悪さに起因している。相似性の悪い部分でバンプ 軌道が閉じず、現状で、立ち上がり部では400~700 ns、 0.4 mm (r.m.s.) 以上の振幅、立ち下がり部では800~ 1600 ns、0.3 mm (r.m.s.) 以下の振幅の残留振動がそ れぞれ誘起されることが観測されている。相似性の改善に



図12 電源筐体外観及びモジュール化した回路



図13 電源盤操作タッチパネル及び新旧電源切り替えブスバー



図14 左:新電源据え付け前、旧電源のみ5台配置 右:旧電源3台、新電源 5台配置 手前から奥へ向かい旧盤3台、新盤5台が並べられている。

は立ち上がり、立ち下がり部で10 ns以内での出力波形の 相似性の確保が必要であるが、現バンプ電源の様なパルス 幅8.4 µs、電流4 kA以上に達する大電流を出力する電源 ではこの相似性の実現は困難である。

そこで、残留振動に対し、その時間・振動に応じた高速 パルスキックによりカウンター・キックを与える手法の開 発に2010年度より着手した。2013年度にはユーザー運 転に対する高速補正キッカー・システムの体制が完成し、 バンプ波形立ち上がり部の残留振動抑制システム(第1高 速補正キッカー・システム)、バンプ出力波形立下り部に おける残留振動抑制システム(第2高速補正キッカー・シ ステム)をユーザー運転時に運用開始した<sup>[1, 2]</sup>。

高速補正キッカー・システムの性能を表2に示す。現在 のユーザー運転時の高速補正キッカーによる残留振動抑制 効果を図15に示す。入射を0ターンとし、周回ごとの振動 の全周に渡る振動振幅を root-mean-square 値で示してい る。高速補正キッカーは、残留振動の位相を考慮したタイ ミングでカウンター・キックを当てるよう駆動している。 図15に示される通り、第1、2高速補正キッカーを組み合 わせて残留水平振動振幅を0.15 mm以下に抑制している。 第1高速補正キッカー部分による抑制効率は90%に達する。

蓄積リングには誤差磁場によるスキュー成分が存在し、 水平振動が垂直振動へ回り込む。このため、水平振動の抑 制により垂直振動に対しても抑制効果があることが図から わかる。

表2 第1	、2	高速補正常	キッカー	・シフ	ステム諸源	
-------	----	-------	------	-----	-------	--

パラメーター	第1高速補正キッカー	第2高速補正キッカー	
設置場所	C30	C48	
水平β関数	30 m	32 m	
磁極長	0.25 m	0.22 m	
電源定格電流	230 A/coil~383 A/coil	270 A/coil~540 A/coil	
電源出力パルス幅	400~700 ns	800~1600 ns	
ユーザー運転適用蹴り角	32 µrad@230 A	12 μrad@114 A	

放射光供給の観点からは電子ビームの残留振動の抑制の 結果、放射光軸が安定していることが重要である。 BL05SSに2012年度に整備された ID光を使った、Turn-By-Turn Beam Profile Monitor (TTPM)<sup>[3]</sup>を使用し抑 制効果を検証した。TTPMではビーム振動、ビーム横サイ ズ、エネルギー広がりなどを周回ごとに観測することがで き、早い過渡現象をとらえることができる。

図16に、キッカーON /OFFで観測した放射光プロフ ァイルにより振動抑制効果を観測したものを示す。高速補 正キッカー駆動により明らかに放射光の振動が水平・垂直 ともに抑制されているのが分かる(図16左)。

これとは別の時期に行ったプロファイル測定から光軸の 水平振動を導出した結果を示す(図16右)。ビーム不安定 性抑制に関しては、Bunch-By-Bunch Feedback (BBF)<sup>[4]</sup> のみでは4 µradの振幅まで低減するのに80ターンを必要



図15 左:水平残留振動抑制効果結果 右:垂直残留振動抑制効果結果 図中矢印は2ターン目が第1高速補正キッカー適用タイ ミング、3ターン目が第2高速補正キッカータイミングとなっている。



図16 左:TTPMで観測されたキッカーあるなしでの光プロファイルの振動結果 赤矢印がターン数を示している。右:横軸をタ ーン数、縦軸を光軸振動角としている。図中点線は±4µradの振幅幅を示しており、矢印は第1高速補正キッカーを駆動し たターン数を示している。振動の位相が変化しカウンターが効いていることが分かる。キッカーなしの状態が赤線で示され ているが、早いターン数では振動振幅が大きすぎるため角度アクセプタンスを超えて、データー点がない。

とするところ、3ターン目のカウンター適用以降短時間に 振動が低減できている。この振動抑制効率は4 µradまで の低減で87%以上である。また、3ターン目以降、BBFの 実効的なダンピング・タイムに30%の改善が見られた。

今後は、残留振動振幅の季節変動などに対応する改善を 進めて行く予定である。

(満田 史織)

## 3-3 改造型リングゲート弁への交換

SPring-8 蓄積リングでは、種々の運転モードが採用さ れており、孤立バンチに5 mAなど高いバンチ電流を有し た運転モードも実施されている。孤立バンチの電流の制限 は、ビーム不安定性とリングゲート弁の RF シールドの発 熱が主である。ゲート弁の RF シールドの発熱対策を実施 してきたので報告する。

RFシールドや真空チェンバなど電子ビームを囲むもの には、バンチ電流の二乗に比例する熱が発生する。ゲート 弁には、RFシールド部(図17の(3),(4),(5))と弁本体 側(図17の(2))との熱接触が良くない物があり、発生 した熱を十分に逃がすことができず異常に温度上昇してい たものがあることを2009年度の年報で報告した。

2012年度から、発熱を起こす恐れのあるゲート弁の交換を開始した。外したゲート弁は、異常な温度上昇が発生しないように以下の改造を施した。

①熱移動の面積を確保するため、部品(図17の(2),(5))の接触面積を確認しながら加工。

②発熱を小さく抑えるため、電子ビームから見える RF シールド以外の部品(図17の(2),(5))を無酸素銅製 に交換。

③ベリリウム銅製のRFシールド(図17の(3))に少し でも抵抗が小さくなるように銀メッキを施工。

改造後は、熱移動性能確認試験を実施し、性能を確認している。図18に熱移動性能確認試験のためにクリーンル ームに並べられたゲート弁の写真を示す。

なお、交換作業は、挿入光源や高周波加速空洞も含んだ ゲート弁両側の超高真空部を大気開放する必要があるた め、超高真空の再立ち上げなどに時間を要する。2012年 度に12台、2013年度に11台のゲート弁を交換した。 元々発熱の恐れの無いゲート弁もあり、2013年度末で、 全98台のゲート弁のうち44台が健全なゲート弁となっ た。

(大石 真也)

## 参考文献

- [1] C. Mitsuda, et al.: proc. of IPAC'13, Shanghai, China, (2013), p666.
- [2] C. Mitsuda, et al.: proc. of IPAC'10, Kyoto, Japan, (2010), p2252.



図17 ゲート弁断面



図18 改造後の熱移動性能確認試験中のゲート弁

- [3] M. Masaki, et al.: proc. of IBIC 2012, Tsukuba, Japan, (2012), p492.
- [4] T. Nakamura, et al.: proc. of DIPAC 2005, Lyon, France, (2005), p304.

加速器部門 加速器第 II グループ 佐々木 茂樹