

3. 大型放射光施設の現状と高度化

3-1 加速器

1. 運転・軌道解析グループ

1-1 加速器の運転

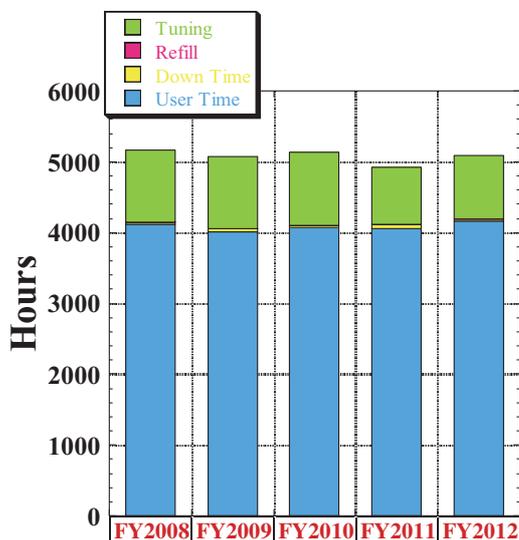
図1に過去5カ年度の運転時間の推移を示す。2012年度のSPring-8加速器総運転時間は5078.8時間であった。この時間には、加速器立ち上げ調整時の入射器系加速器の先行運転なども含まれている。

2012年度の蓄積リングの運転時間は5063.1時間、ユーザータイムは4155.6時間(蓄積リング運転時間の82.1%)、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0.94%に当たる39.2時間であり、39回のビームアポートあるいは計画外のビーム廃棄が発生している。ユーザータイム達成率は計画ユーザータイムに対しては98.9%であった。最も長い中断時間は蓄積リング4極電磁石電源のトラブルで、故障修理を行い2時間44分でユーザータイムを再開した。その他のほとんどのものは1時間以内にユーザータイム再開を果たしている。2012年度は、ビームライン、挿入光源等によ

る中断が少なかったのに対して、加速器のトラブルによる中断の合計時間は24.7時間(アポート回数26回)、全体の63%を占める結果となった。特に電磁石電源と高周波加速空洞のクライストロン用電源のトラブルが目立った。加速器運転開始以来16年が経過して、経年劣化による機器トラブル、使用部品の供給停止が問題になっている。

ユーザータイム中のトップアップ入射継続率は99.2%に達している。また、加速器およびビームラインの調整には884時間を使ったが、2011年度よりは若干回復したが、2010年度以前と比べると120時間程度少ない。2012年度も節電対応の運転を計画する必要があり、ユーザータイムの確保を優先させたためである。夏季の節電対応として、2012年度7月の運転計画を変更して、運転スケジュールの短縮、SPring-8夏の学校の対応運転として蓄積リングのエネルギーを7 GeVに下げる、という事を行った。

マルチバンチモードの運転は、2011年度と同様に2012年度もユーザータイムではまったく実施されなかった。マルチバンチモードの運転がなくなったのは、2004年以降のトップアップ運転の導入により、高電流バンチによる短いビーム寿命を気にする必要が無くなったことと、パルス放射光を用いる利用実験が益々盛んになったことによりセベラルバンチやハイブリッドモードでの運転が主体となったためである。この傾向は今後も同様と考えている。セベラルバンチモードでの運転の割合は60.6%で、2010年度の62.5%と同程度であった。セベラルバンチモードは、2009年度以後は2つのモードしか用いられていない。2012年度は203バンチモードがユーザータイムの29.8%(2011年度は30.3%)、連続11バンチのトレインをリング全周に均等に29個配置したモードがユーザータイムの30.9%(2011年度は32.2%)であった。バンチ電流の高いいくつかの孤立バンチとマルチバンチ部(連続バンチ)が共存するハイブリッドモードは39.4%と2011年度(37.5%)より若干増加した。全周の1/7にバンチ電流の少ない連続バンチと残りの6/7周に等間隔で5個の高電流バンチ(1バンチ当たりの電子数 9×10^{10} 個：電流換算3 mA)を配したハイブリッドフィリング等が実施された。2012年12月の第6サイクルから、全周の11/29にバンチ電流の少ない連続バンチとその対向側に5 mAの孤立シングルバンチのあるハイブリッドフィリング(Hモード)がユーザー運転に導入された。より強い単パルス放射光を用いた時分割測定などの進展が期待される。



	FY2008	FY2009	FY2010	FY2011	FY2012
Acc. Operation Time	5150.1	5168.8	5125.6	4918.6	5078.8
Sr Operation Time	5133.3	5035.4	5096.3	4904.2	5063.1
Tuning& Study (Acc.&BL)	1008.2	1019.1	1026.6	803	884
Refill	10.1	6.3	5.0	4.4	5.2
Down Time	31.0	34.8	27.5	57	39.2
Mean Time Between Failures	153.8	122.9	178.4	117.7	107.7
Achieved User Time	4110.9	4014.9	4071.6	4058.5	4155.6
Planning User Time	4152.0	4056.0	4104.0	4120.0	4200.0
Availability (%)	99.0	99.0	99.2	98.5	98.9

図1 過去5カ年度の運転時間の推移

(大熊)

1-2 SPring-8 蓄積リングの電子ビーム軌道の再設定

高輝度放射光光源リングにとって、垂直ビーム拡がり是最も重要なパラメータの一つである。垂直ビーム拡がりは、リングの誤差磁場による水平垂直振動のカップリングや垂直ディスページョンにより発生している。カップリングの強さは垂直ビーム拡がりの水平ビーム拡がりに対する比として測られるが、近年、カップリング比が悪化してきた。カップリングを生み出す誤差磁場の主なソースとして、6極電磁石位置での垂直方向ビーム軌道のずれ (COD) がある。長年の軌道補正エラーの蓄積やビームライン光軸調整のため作ってきたバンク軌道のため COD が増大し、カップリング比が悪化しているのではという懸念があるため、軌道補正のレファレンス軌道としてビーム位置モニタ (BPM) の原点を用いて新たに電子ビーム軌道を設定する調整 (軌道リセット)^[1] の試験を行った。

通常の軌道補正は、以前に設定したレファレンス軌道に対して補正を積み上げてきたものである。BPM の原点は 6 極電磁石の磁場中心に対して設置されているので、軌道リセットにより誤差磁場の低減が見込まれる。実際、SPring-8 蓄積リングのコミッション当初は、無補正でもカップリング比は 0.2% 程度と小さいものであった。近年は、カップリング補正を行うことによってこれを維持してきたが^[2]、最近その補正効果が低減してきた。

軌道リセットは軌道補正用のステアリング電磁石をオフした状態から軌道補正を進めていくのであるが、実際にはステアリング電磁石オフでは COD が大きくビームを蓄積することができないので、通常用いているステアリング電磁石設定から逆算した無補正の COD に対して一度だけ補正するところから始めた。図 2 に無補正の COD (計算) と、実際にビームを蓄積して補正を重ねた後の COD (実測) を示す。無補正時の COD 残差は、水平 9.24 mm、垂直 3.26 mm であった。これに対して補正を重ねた後では、COD 残差は水平 0.073 mm、垂直 0.043 mm まで低減した。この時点で通常のレファレンス軌道との差は、水平 0.236 mm、垂直 0.203 mm となった。

コミッション当初では COD を補正した段階でカップリングも低減していたが、今回の軌道リセットでは

COD 補正後の垂直ディスページョン残差が 5 mm となるなどカップリングはそれほど改善されなかった。カップリング補正後に加速器診断 I (BL38B2) に設置された X 線プロファイルモニタでビームサイズ測定を実施したが、垂直ビームサイズは軌道リセットの効果はなく、それまでと同等の 20 μm であった。

定期的に行っている測量から蓄積リングの電磁石が長期的に変位していることが分かっており、その測量データから計算される COD は無補正の COD を再現することが確認されている。そのような COD を無理に補正しても、電磁石の磁場中心を通すことは難しく、カップリングを低減できない可能性があり、電磁石の再アライメントも検討を始めている。

(高雄)

1-3 蓄積リングの低エミッタンス化

硬 X 線の輝度およびフラックス密度向上のために、オプティクスの変更の検討により、蓄積リング電子ビームの低エミッタンス化を進めている。2012 年度に設計した低エミッタンスオプティクスの自然エミッタンスは 2.4 $\text{nm}\cdot\text{rad}$ (2012 年度現在のユーザー運転では 3.4 $\text{nm}\cdot\text{rad}$) で、SPring-8 標準アンジュレータからの 10 keV 光について、輝度は 1.5 倍に、フラックス密度は 1.25 倍に増大することが SPECTRA コード^[3] を使った計算で予測されている。現在のオプティクスから低エミッタンスオプティクスへの切替えの際には、磁石の極性切替えや機器の移動などは必要なく、4 極および 6 極磁石などの磁場強度のみを変更するので特別のシャットダウン期間を生じない。

この低エミッタンスオプティクスについて、ユーザー運転適用に向けた蓄積リングの調整を行ってきた。これまでに 6 極磁場の再調整などによる入射効率の改善、バンク磁石の励磁強さやタイミングなどの調整による入射時の蓄積ビーム振動の抑制、対不安定性バンチ毎フィードバック (Bunch-by-bunch Feedback : BBF) によるビーム不安定性抑制の確認などを行った。またユーザー運転に適用できるまで蓄積リングの調整が達成できた段階で、複数のビームラインにて試験利用を行い、その効果および問題点の

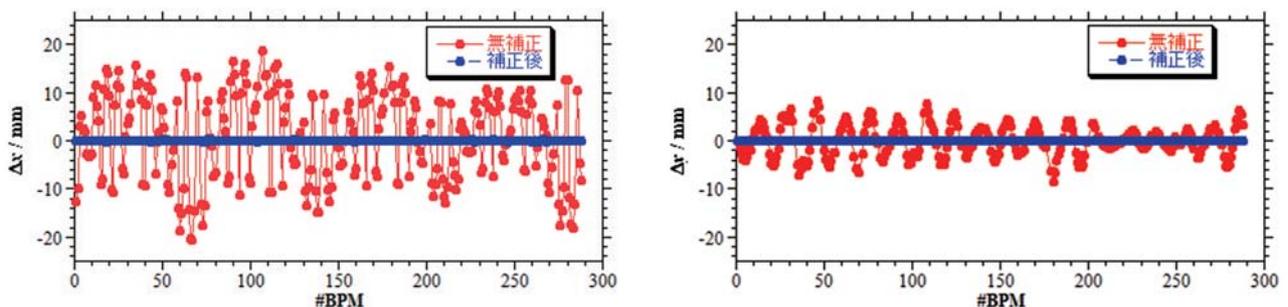


図 2 軌道リセット試験時の COD。左：水平、右：垂直。

有無の確認を行った。13本の挿入光源ビームライン及び4本の偏向電磁石ビームラインが試験に参加し、輝度が25%増大したこと、部分フラックスが10%前後増大したこと、また光量が増大したことによる熱負荷の増大は観測されなかったことなどが報告された。低エミッタンスオプティクスは、2013年度にユーザー運転へ適用する予定である。

(下崎)

1-4 挿入光源高度化への対応

蓄積リングDゾーン長直線部のビームラインBL43LXUでは、2011年度までに行った電磁石ラティスの局所的改造により、長さ5 mの狭ギャップ短周期アンジュレータを3台、直線上に配置することが可能となっている。当初設置されたアンジュレータ1台に加えて、2012年度には残り2台が追加設置され、ビームライン調整が行われた。このビームラインでは光源性能を最大限に発揮させるために、磁石列間のギャップを6 mm程度以下にまで同時に閉める必要がある。光軸の位置や放射光スペクトルの情報などをもとに、各アンジュレータに対する電子ビーム軌道調整を実施した。これにより3台のアンジュレータの光軸の一致度が改善するとともに（垂直方向は、角度にして数mrad程度以下）、軌道調整用ステアリング電磁石の励磁量も当初に比べて緩和された。電子ビーム軌道とアンジュレータ磁石列との相対位置は、入射効率のギャップ値依存性を測定することによって確認した。これらの結果から、アンジュレータ磁石列の再アラインメントの必要性が認識され、2013年度にレベル調整が行われる予定である。

また、蓄積リングのセル34直線部には、全長1.5 m、周期長15 mmの真空封止型クライオアンジュレータが設置された。当面はビームを使ったスタディのみが行われる予定であるが、このアンジュレータの性能を発揮させるには、磁石列間のギャップを3 mm程度まで閉める必要がある。これにはビーム収束用4極電磁石を追加するなど、蓄

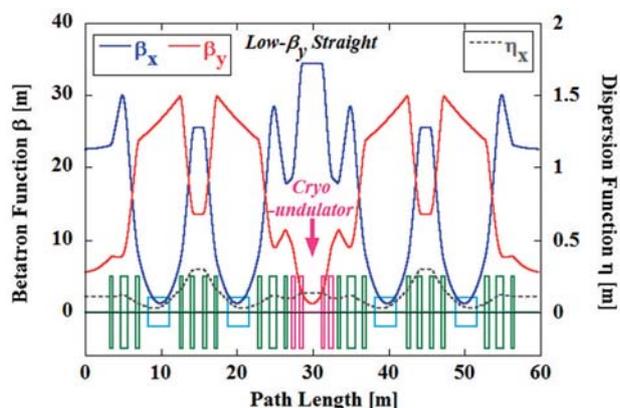


図3 通常直線部のラティス改造案。下部に示す四角は電磁石並びで、青色が偏向、緑色が4極電磁石。ピンク色は追加すべき4極電磁石を示す。

積リングラティスを改造して垂直ベータ関数を5.6 mから1.2 mに下げ、入射効率とビーム寿命に影響が出ないようにしなければならない。図3にそのようなラティスの改造案を示す。改造は局所的であり、他のビームラインの性能には影響しないが、蓄積リング全体のラティス構造の対称性が低下してビームの動的安定領域が狭くなり、入射効率の悪化などを招いてしまう。事前の計算では、動的安定領域が10～20%程度狭くなるとの評価結果を得ており、6極電磁石の励磁量の最適化など、対策を検討中である。

(早乙女)

1-5 不安定性抑制

1-5-1 Hモードの実用化と新型信号処理装置の開発

2012年度後期より、5 mA/bunchの大電流の孤立シングルバンチと全周11/29の連続バンチトレインからなるハイブリッドフィリング(Hモード)が、運転モードの一つとして利用開始された。このフィリングにおいては、孤立バンチが引き起こすモード結合シングルバンチ不安定性とトレイン部が引き起こすマルチバンチ不安定性とを対不安定性バンチ毎フィードバック(Bunch-by-bunch Feedback: BBF)により同時に抑制する必要がある。

しかし、BBFでは、位置モニタ(BPM)の信号を用いてバンチ毎のビーム位置を測定しているが、BPM信号の強度はバンチ電流に比例し、孤立バンチはトレイン部に比べて数十倍の強度の信号を発生するため、そのままではBBFは孤立バンチに対して飽和し、不安定性の抑制が困難であった。そこで、水平方向のBBFでは、バンチ電流に応じて減衰量を変化させてBPM信号の強度をバンチ電流によらずに適度に保つための自動アッテネータ^[4]を開発・設置することによりこれを克服し、また、垂直方向には、孤立バンチの不安定性がより強いことから、孤立バンチ専用のBPMや信号処理装置を用いたフィードバックを立ち上げ、調整の自由度を高めることにより高度な不安定性抑制を実現している。

2012年度は、これまでの運用経験を基に、500 MS/sの高速12-bit ADCやVirtex-7 FPGAなどの最新のデバイスを用いた新しい信号処理装置のハードウェア部分を製作した。この装置は、フィードバックの信号処理装置に、自動アッテネータや孤立バンチフィードバックの機能を統合させ、かつ、新しいフィードバック手法に適用可能な機能を持たせている。2013年度には、信号処理装置として機能させるためのFPGAプログラムの開発や制御ネットワークへの接続機能を実現し、ビーム試験を実施する予定としている。

1-5-2 縦方向フィードバック用エネルギーキッカーの開発

SPring-8蓄積リングでは、新たな運転モード探索の一つとして、低エネルギー運転の試験等を行っているが、その際、加速空洞の高次モードに起因すると思われるエネル

ギー・時間空間、すなわち、縦方向のビーム不安定性が観測され、ビーム品質の劣化を引き起こしている。この不安定性を抑制するために、縦方向BBFの開発をスタートさせ、2012年度では、そのBBFの重要な要素となる高効率縦方向エネルギーキッカーを製作した(図4)。このキッカーは、SPring-8が提案した新形状^[5]を採用することにより、単位長さあたりのキック効率が従来のoverdamped空洞キッカー^[6]に比べて3倍程度と大きく、放射光リングのような、強いキックが必要であるが設置場所が限られている場合には非常に有効となっている。2013年度では、キッカー単体のビーム試験を実施したのち、縦方向フィードバックを立ち上げ、システムとしてのビーム試験を実施予定である。

(中村)

1-6 Bucket-by-bucket on-axis/off-axis入射用のキック位置依存性可変高速キッカーの開発

将来の超高輝度放射光源として期待されている超低エミッタンスリングでは、安定領域が非常に狭いため、蓄積ビームのすぐ近くの領域へoff-axis入射を行わねばならず、

また、その際には蓄積ビームへの影響を最小限としなければならない。そのため、従来の入射方法は非常に困難となる。これを実現する新しい入射方法として、キック位置依存性可変高速キッカーを用いた手法^[7]を提案し、そのため的高速キッカーの開発を2011年度より進めている。このキッカーは、50 kVという強いパルスにより入射バケットに対してのみ瞬間的に強力な4極電磁場を作り出し、入射されたビームを狭い安定領域に投入することができる。この際の影響は、蓄積ビームのうち入射のタイミングでキッカーを通過する部分のみに限定され、影響が最小化されている。さらに、このキッカーでは、その駆動方法を変更することにより、on-axis入射も可能な電磁場を発生することが可能であり、これにより、リングの立ち上げ時等、安定領域がより狭いと予想されるような場合にも、on-axis入射による実用的な電流での利用運転を可能とする。

2011年度に製作したキッカー(図5)に対して、2012年度には、キッカーのベンチ試験^[8]を実施し、それを基により高電圧に耐えられるフィードスルーや減衰器への交換、また、フィードスルー交換のためのキッカーの改造を実施した。また、線型加速器のL3ビーム輸送系において、キッカーのビー

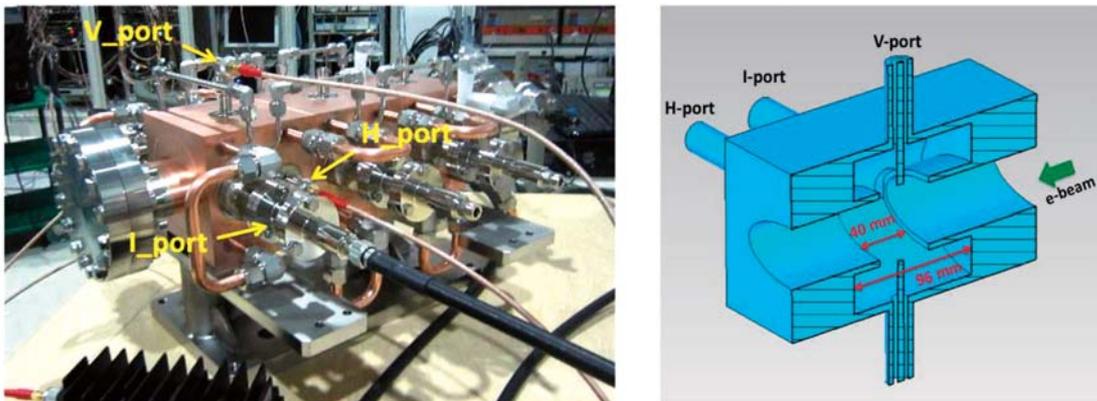


図4 高効率縦方向エネルギーキッカーの外観(左)および内部構造(右、半割して半分のみを示す)。3つのキッカーが一つの真空槽に設けられている。



図5 高速キッカーの外観(左)と、内部構造(右、左側電極は外されている)。

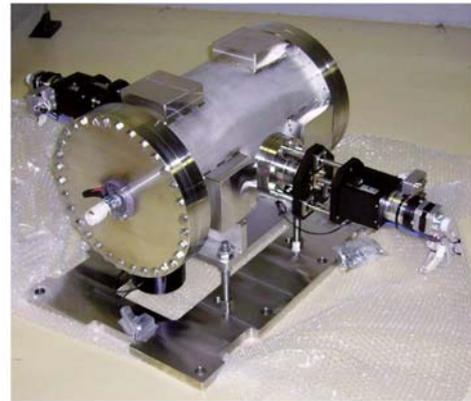
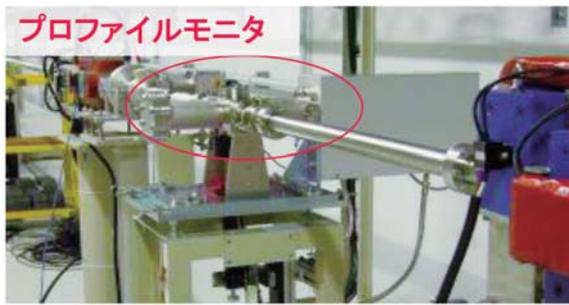


図6 L3 ビーム輸送系に設置されたプロフィールモニタ (左) およびアパチャ可変ビームスリット (右)。

ム試験を実施するための整備として、高感度のCe: YAG ビームプロフィールモニタ (図6左)、ビームを削り低エミッタンス化する可変アパチャビームスリット (図6右)、そしてキッカーの電磁場分布計測のためのキッカー搭載用X-Zステージを製作した。2013年度には、これらをL3ビーム輸送系に設置し、キッカーのビーム試験を実施する予定である。

(中村)

1-7 加速器診断

加速器診断 I (BL38B2) では、ビームサイズを測定するX線プロフィールモニタ用検出器の光電面寿命改善のため、検出器本体の改造とともに検出器に接続されているビームライン真空系の改良を実施した。また、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、バンチ純度モニタに高速での信号処理が可能なTDC (Time to Digital Converter) 信号処理系を組み込むための制御系ソフトウェアを整備した。2013年度の実稼働に向けて実ビームを用いたバンチ純度計測試験を行い、ハード、ソフトの両面から問題点の洗い出しを行った。

加速器診断 II (BL05SS) では、2011年度に整備した高精度光軸モニタをユーザータイム中に蓄積リングのビーム軌道変動を連続的に監視する常時モニタとして実運用を開始した。従来他のモニタでは見出せなかった約1日周期の微小な軌道変動を放射光ビームの光軸変動として検出し、SPring-8のビーム安定度に関する新たな情報を得た。また、軌道補正のステアリング電磁石電源の出力異常に伴って生じた軌道変動をこの光軸モニタにより初めて捉え、原因対策 (3-5参照) によりビームアポートを回避し安定なユーザー運転を維持することに貢献した。

また、ID05のアンジュレータ放射光を分光した特定の次数の高調波の放射光ビームプロフィールを、電子ビームの蓄積リング周回毎に計測することができるTurn-by-Turnビームプロフィールモニタ (TTPM) [9] が設置されている。TTPMは、トップアップ入射時のパルスバンク電磁石の励磁の影響で生じる蓄積ビームの微小振動や、大電

流シングルバンチの不安定性によって発生するビームサイズ、エネルギー拡がりの増大などの高速現象をユーザー運転中に監視することにより、蓄積ビームの安定化に貢献することを目的としている。2012年度は、バンク電磁石の励磁タイミングのドリフト等の要因によりユーザー運転中に変動するトップアップ入射時の蓄積ビームの振動を監視するために、入射と同期して自動測定を行い、水平と垂直の各方向での振動をFFT解析し結果を制御系データベースに記録するソフトウェアを整備した。図7に、TTPMで測定したID05放射光ビームの角度振動の一例を示す。パルスバンク電磁石の磁場波形が立ち上がるタイミングでキックされて振動を始めた電子バンチからの放射光ビームを観測したもので、水平方向の振動振幅は20 mrad程度である。

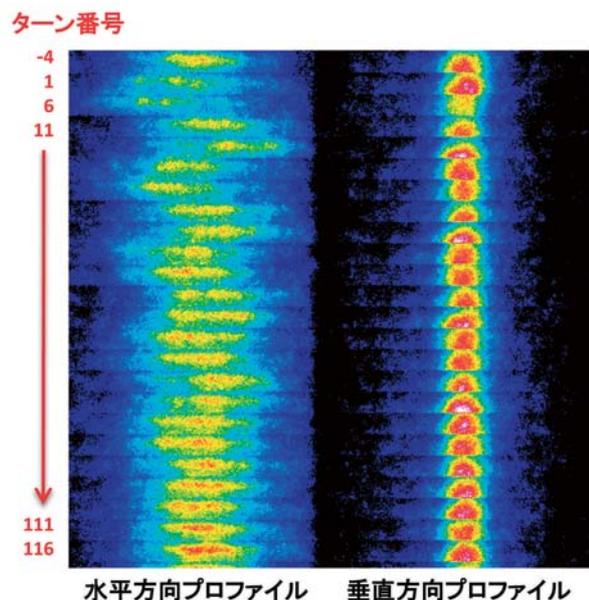


図7 TTPMで観測したトップアップ入射時に生じる蓄積ビームの微小振動に因るID05の光軸変動の例。ビーム入射に同期して電子ビームのリング周回5ターン毎に測定。左側の数字はパルスバンク電磁石の励磁を0ターン目としたターン番号であり、マイナス4と書かれた一番上のデータはパルスバンク電磁石の励磁前に当たる。

X線ストリークカメラでは、高感度化と高分解能化を目的に入射光電面の膜厚等を最適化するために、50 nm、300 nm、1000 nmの3種類の膜厚のCsI光電面について、特性を比較した。ストリークカメラに入射するX線光量を減光し、単一X線光子に対するストリーク像の時間広がり及び検出頻度を5～30 keVの光子エネルギー範囲で測定し、時間分解能及び検出効率を求めた。時間分解能は4～5 ps (FWHM) で、膜厚による違いと光子エネルギーによる違いは見られなかった。検出効率は、膜厚1000 nmが最も大きかった。

(高野)

参考文献

[1] K. Soutome, H. Tanaka, M. Takao, H. Ohkuma and N. Kumagai: Nucl. Instrum. Method A **459** (2001) 66.
 [2] M. Takao, M. Masaki, Y. Shimosaki, K. Soutome, S. Takano, C. Zhang: Proc. of IPAC'12, New Orleans, USA (2012) 1191. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2012/papers/tuppc016.pdf>
 [3] T. Tanaka and H. Kitamura: SPECRA code ver. 9.02 (2012).
 [4] K. Kobayashi and T. Nakamura: Proc. of ICALEPCS2009, Kobe, Japan (2009) 659. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/icalEPS2009/papers/thb006.pdf>
 [5] T. Nakamura: Proc. of IPAC'11, San Sebastian, Spain (2011) 493. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2011/papers/mopo007.pdf>
 [6] R. Boni et al.: Particle Accelerator, Vol. 52 (1996) 95-115.
 [7] T. Nakamura: Proc. of IPAC'11, San Sebastian, Spain (2011) 1230. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2011/papers/tupc095.pdf>
 [8] 中村 剛、安積 隆夫、出羽 英紀、小林 和生、藤田 貴弘、正木 満博、佐々木 茂樹、大熊 春夫: 第9回日本加速器学会年会プロシーディングス、大阪大学、豊中 (2012) 525. http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS057.pdf
 [9] M. Masaki, A. Mochihashi, H. Ohkuma, S. Takano and K. Tamura: Proc. of IBIC2012, Tsukuba, Japan (2012) 492. <http://ibic12.kek.jp/prepress/papers/tupb63.pdf>

加速器部門
 運転・軌道解析グループ
 大熊 春夫

2. 加速器第1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運転時には必要に応じて1日1、2回の入射を行っている。

両蓄積リング同時トップアップ運転の際、入射経路切換えにおいて加速器パラメータの変更を最小限にするため、トップアップ入射専用の共通パラメータとしてパルス幅0.5 nsビームを用いている。ただしNewSUBARU入射時は、線型加速器からNewSUBARUへのトランスポートにあるスリットでビーム電流を約1/3に、蓄積リングへはシンクロトロンから蓄積リングの途中のトランスポートラインで約1/2に、各々別の理由ではあるが削って各々のリングへ入射している。

2012年度における線型加速器総運転時間は、5078.8時間であった。蓄積リングのユーザータイムは4155.6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1に2012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、全てのサイクルにおいて1日1回以下となっている。2012年度においてはトップアップ運転中断の原因となったのは26回であり2011年度の約2/3となっている。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、2012年度は0.045%となっている。これは2011年度の半分であり、ほとんどがクライストロン電源のフォールトであり、更なる中断減少にはクライストロン電源内のサイラトロン不具合に関する早期診断方法の確立が望まれる。

(鈴木)

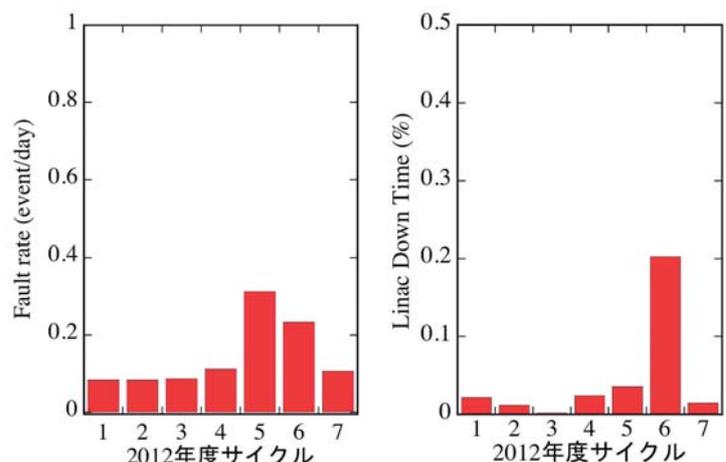


図1 インターロックフォールトの頻度 (左) とダウンタイム (右)。

2-2 Sy/NS 高速振り分け入射

シンクロトロン (Sy) とニュースバル (NS) の高速振り分け入射を 2013 年度に実施する予定である^[1]。これまで Sy と NS に交互に入射する場合には入射毎におよそ 15 秒のビームルート変更時間が必要であった。蓄積リングでは低エミッタンスオプティクスや大電流シングルバンチ運転の実施によりビーム寿命が短くなってきており、トップアップ入射を短い間隔で行うことが必要となってきた。これに対応するため Sy と NS に 0.5 秒間隔で、それぞれ 1 Hz で入射できるように改良する。

高速振り分け入射を実施するにあたり、2012 年度は以下の 3 つの項目の整備を行った。(1) Sy と NS のトリガの同期化。(2) 高速振り分け時に放射線安全インターロックシステムが正常に動作するためのシステムの改造。(3) 振り分け用偏向電磁石 BM-LS のパルス動作対応。

(1) については 2011 年度にモジュレータトリガの同期化を終えており、2012 年度は残りの電子銃トリガおよびモニタートリガを同期させ、NS の電子銃トリガが Sy の電子銃トリガから 0.5 秒遅れて出るように変更した。またローレベルの 2856 MHz のパルス RF についても 0.5 秒毎に Sy と NS で切り換えることができるように改造した。

(2) の安全インターロック改造では、従来の PLC システムでは 0.5 秒毎の速いビームルート変更に対応できないため、速いステータスの変更に関わる部分については、新規に開発した Sy/NS ビームルートスイッチを中央制御室に設置し、ここから NS の安全インターロックアラーム信号の発報および各種機器へのビームルート状態の出力ができるように変更した。

(3) については BM-LS 用の電磁石電源にトリガ入力できるように、Sy のトリガに同期してパルス励磁できるようなトリガ信号を用意した。パルス励磁電流の立ち上がり立ち下がり時間は 190 ms、フラット領域の時間幅は電源のダイヤル目盛りで調整可能で 230 ms で使用予定である。パルス励磁すると設置していたアルミ製真空チェンバでは渦電流による発熱が問題となるため、ステンレス製の真空チェンバに交換した。

以上の改造により高速振り分け入射のハードウェアの整備は終了した。2013 年度春には運転用ソフトウェアの改修を行った後、ビーム試験を行う予定である。

(出羽)

2-3 電子入射部真空立体回路系開発

電子入射部 RF 立体回路の経年劣化対策と安定性向上のため、更新計画を進めている。線型加速器の RF 立体回路は真空導波管で構成されているが、電子入射部の立体回路は定在波空洞であるプリバンチャおよびバンチャ加速管からの反射波がクライストロン側へ伝送されないようにするためのサーキュレータが必要であるため、加圧六フッ化硫黄ガス (SF6) 仕様となっている。そこで、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、図 2 のような真空型立体回路系の導入を目指す事にし、そのためには必須のコンポーネントである真空仕様サーキュレータの開発研究を行ってきた。

2012 年度は、2011 年度までに開発されたサーキュレータおよび単向管 (サーキュレータの一種で、反射波をフェライト自身で吸収する) の信頼性および性能向上のため、フェライト接合部の改良を実施した。

サーキュレータにおいては、フェライトと導波管面の間に金箔を挟み込んで熱伝導を改善するとともに、フェライト中心部のボルト固定としてきたフェライト固定方法を、ボルト固定銅リング方式にすることで耐電力の向上が実現し、必要とされる 10 MW のピーク電力に耐える事が確認できた。また単向管については、フェライトを導波管に固

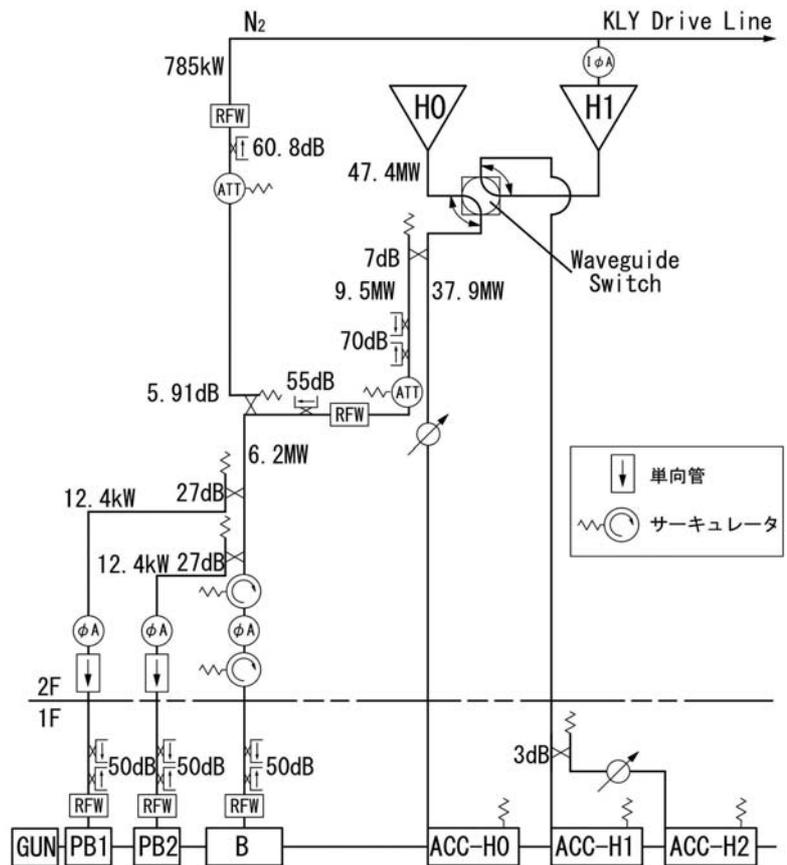


図 2 電子入射部立体回路更新案。

定する銅リング周囲に露出しているハンダ接合部がRFに曝されて溶融する問題があったが、ハンダ露出部の表面に融点の高いロウ材をレーザー溶接する方式を考案し、溶接の予備試験を行った。

2013年度は単向管実機を改修して大電力試験による性能確認後、サーキュレータ、単向管ともに長期大電力試験による安定性確認を経て線型加速器への設置を行う予定である。
(谷内 努)

2-4 6電極BPM解析

線型加速器ではビームの横方向2次モーメントを測定する6電極ビーム位置モニタ (BPM) を整備している。測定対象は2次相対モーメントで、ビームの拡がり (サイズ) に関する物理量である。2次相対モーメントを正確に測定するには、各電極間の相対減衰率 (バランス係数) を知る必要がある。正確なバランス係数を取得する手段の一つとして、ビームに基づく実験的手法である「全体較正」を開発した^[2]。

簡単のため、相対モーメントがゼロ、すなわち、ビーム拡がり全く無い点電荷か、完全円形ビームを仮定する。ビーム位置を算出する場合、各電極から出力信号電圧の差分 (C_1, S_1 等) を取り、以下のようにその差分とビーム位置 (P_1, Q_1 等) が比例関係になると云うのが今まで一般的であった。

$$C_1 = \frac{2}{R_{C1P1}} P_1, S_1 = \frac{2}{R_{S1Q1}} Q_1$$

ここで R_{n^*m} で表されるのは実効開口半径で、実効的なダクト中心からの距離を表すものである。

実際に全体較正を行ったところ、ダクト中心から離れた位置 (± 3 mm 程度) での位置測定エラーが大きく、この

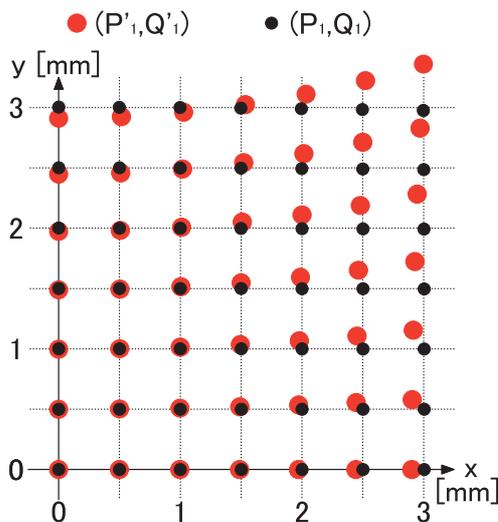


図3 出力電圧差分 C_1 及び S_1 から算出されたビーム位置。黒丸 (P_1, Q_1) は三次項を考慮し、赤丸 (P'_1, Q'_1) は一次項のみ。点電荷は破線等の交点に置いた。

定義では全体較正には不十分であることが判明した。この原因を調査するため、円形断面6電極BPMをモデルとして解析を行った。理由は電極表面に現れる電場が解析的に求まるためである。

解析の結果、ダクト中心から ± 3 mm 程度の範囲内における出力電圧差分とビーム位置の関係は3次のオーダーまで考慮する必要があり、以下のような関係式であることが判明した。

$$C_1 = \frac{2}{R_{C1P1}} P_1 \left\{ 1 - \frac{2}{R_{C1P2}^2} (P_1^2 - Q_1^2) \right\} + \frac{2}{R_{C1P3}^3} (P_1^3 - 3P_1Q_1^2),$$

$$S_1 = \frac{2}{R_{S1Q1}} Q_1 \left\{ 1 - \frac{2}{R_{S1P2}^2} (P_1^2 - Q_1^2) \right\} + \frac{2}{R_{S1Q3}^3} (3P_1^2Q_1 - Q_1^3).$$

上記の2式を用いて C_1 及び S_1 から位置を計算した結果を図3に示す。ビームを模擬する点電荷は破線等の交点に置かれた。図3を見れば明らかであるが、3次項まで考慮する場合 (P_1, Q_1) の方が一次までの場合 (P'_1, Q'_1) よりも明らかに誤差が小さい。3次項まで考慮する式を全体較正に使う事で、円形断面BPMの全体較正は誤動作を起こさなくなった。准楕円形断面BPMについては現在解析中である。

(柳田)

2-5 電子銃新型カソードの開発

線型加速器では、品質の安定化、ビーム電流の増強及びヒータ通電時間の経過とともに増加するグリッドエミッションの低減などに対する改良を目的として新型カソードの

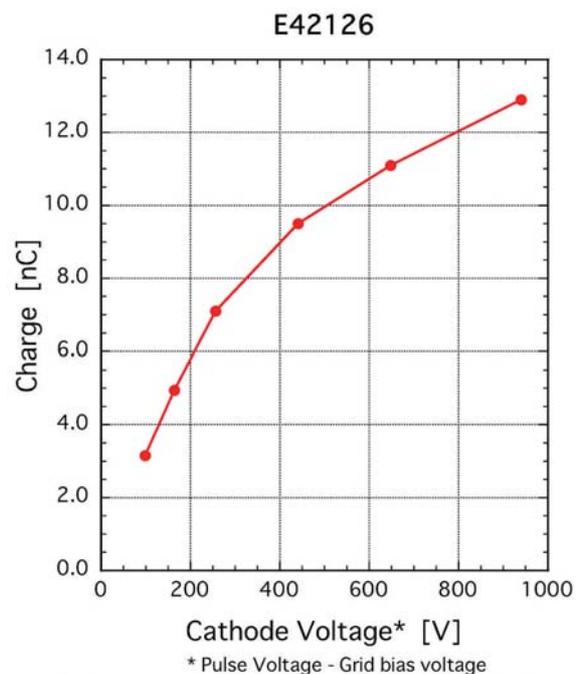


図4 試作マイクロディンプル構造を採用したカソードによるエミッション試験の結果。

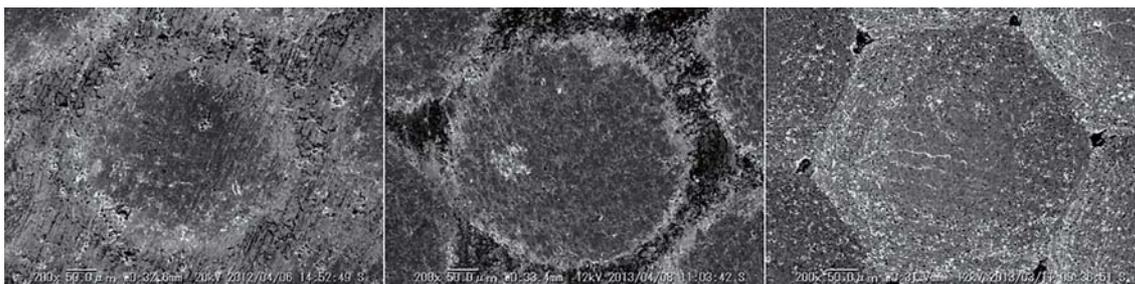


図5 最初のエミッション試験を行ったプレス式ディンプル（左）、改良されたプレス式ディンプル（中）、ダイヤモンド工具で直彫りされたディンプル（右）。

開発を開始した[3]。2011年度は、カソードからの電子ビームの一部がグリッドに衝突して起きる電流損失の低減を目的として、マイクロディンプル構造のカソード単体の試作を行った。

2012年度は、グリッドエミッションの低減を目的とするダブルグリッドを採用したカソードアセンブリを製作した。あらかじめシミュレーションコードにより、カソードの発熱に依るカソードグリッドの熱変形の解析を行い、問題のないことを確認した。

2011年度に試作したカソードのディンプル構造（図5左）は設計より浅いが、このカソードを用いてカソードアセンブリの製作を行い、エミッション試験を行った最初の結果は図4の通りである。現行カソードよりも大きなカソード面積により十分なエミッションを得ることができているが、10 A以上ではビームの一部がアノード出口で削られて、過小評価されている恐れがある。

その後改良を行い試作したマイクロディンプル構造カソードでは、図5中央および右側のように形状が改善された。2013年度にこのカソードを用いて再度アセンブリを行い、エミッション試験を行う予定である。

（鈴木）

2-6 極短バンチモニタ開発用テストベンチ

SPring-8次期計画における蓄積リングへの入射に必要な基礎技術への貢献を目的とし、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[4]の開発が進められている。このバンチモニタ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の設計を行った[5]。

短バンチビーム生成には、シケインバンチ圧縮系を用いる。圧縮するためには空間電荷効果の影響を少なくする必要がある。このため、RF電子銃装置のエネルギーを従来の30 MeVから最大85 MeVまで上げることとし、このために、RFパルス圧縮器（SLED）、および1.4 m長の高電界加速管（平均加速電界29 MV/m）を新規に設計し製作した。

バンチ圧縮はシケイン手前に設置する1.2 m長の変調

加速管でビームにエネルギーチャープを与えることにより行うが、RFの非線型性によるエネルギーチャープの非線型性、およびシケインに沿ったビーム軌道長のエネルギーに対する非線型性が原理的に存在し、バンチ圧縮に悪影響を与える。

そこでRF電子銃空洞をマルチセル空洞に変更し、ビームエネルギーを改造前（単空洞）の3.8 MeVから6 MeV（あるいは10 MeV）へ引き上げることによって、電子銃空洞出口から加速管入り口までの空間電荷効果によるバンチ長伸張を抑え、RFの非線型性を抑えた。この設計は、同時にシケイン入り口での $\Delta E/E$ を小さくすることにもなり、結果としてシケイン軌道自体の非線型性の影響も抑えることができた。

以上の設計により、図6に示すように、シミュレーションにおいてはビームエネルギー50 MeVの場合で、

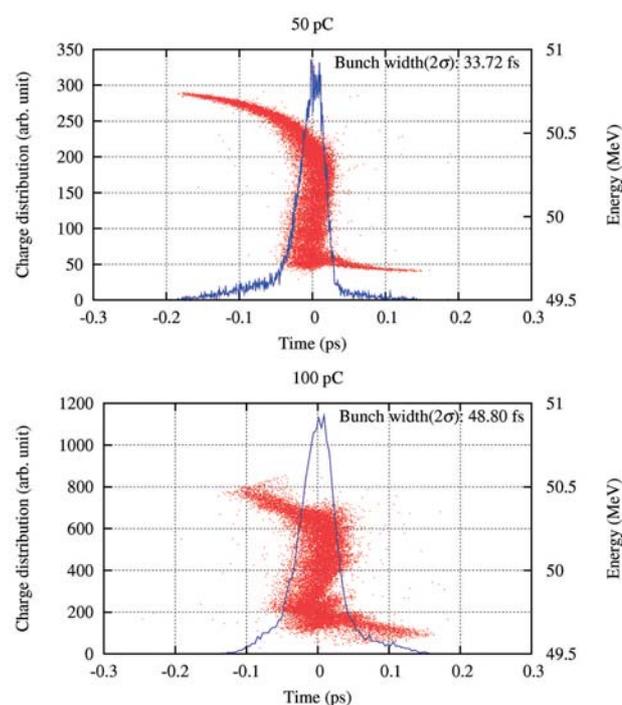


図6 シケインでのバンチ圧縮後のエネルギープロファイルと電流プロファイル。

50 pC/bunchにおいてほぼ30 fs (2σ) を達成した。

加速管2本、SLED、それらの設置に必要なRF立体回路系、およびシケイン電磁石等は既に製作が完了し、2013年度には設置工事を行って実験を始める予定である。

(水野)

参考文献

- [1] 出羽 英紀、鈴木 伸介、柳田 謙一、小林 利明、青木 毅、小林 和生、高雄 勝、佐々木 茂樹、花木 博文、佐治 超爾、松下 智裕、都筑 之彦、皆川 康幸、竹村 育浩、竹内 裕嗣、庄司 善彦、宮本 修治: 第10回加速器学会年会、名古屋大学、名古屋、2013、発表予定。
- [2] 柳田 謙一、鈴木 伸介、増田 剛正、花木 博文: 第9回加速器学会年会プロシーディングス、大阪大学、豊中(2012) 304.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/FRLR/FRLR10.pdf
- [3] 鈴木 伸介、谷内 努、小林 利明、花木 博文: 第10回加速器学会年会、名古屋大学、名古屋、2013、発表予定。
- [4] 富澤 宏光、谷内 努、出羽 英紀、水野 明彦、柳田 謙一、松原 伸一、花木 博文、熊谷 教孝、石川 哲也、前川 陽、李 基羽、上坂 充: 第7回加速器学会年会プロシーディングス、姫路(2010) 307.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj7/proceedings/SH_6AM_2/FRSH08.pdf
- [5] 谷内 努、鈴木 伸介、出羽 英紀、富澤 宏光、水野 明彦、花木 博文: 第10回加速器学会年会、名古屋大学、名古屋、2013、発表予定。

加速器部門
 加速器第Iグループ
 花木 博文

3. 加速器第IIグループ

3-1 蓄積リング増強型スキュー6極電磁石の導入

蓄積リングに設置される挿入光源の増加に伴い、水平・垂直の運動に非線形な結合を生じるスキュー6極成分が増加傾向にある。この非線形結合により入射時の水平方向の振動が垂直方向の振動として誘起される。垂直振幅が大きくなると以下のことが懸念される。1) 垂直の実効ビームサイズが大きくなり放射光の輝度が低下する。2) 挿入光源の磁極にビームがあたり減磁を引き起こす。3) 入射効率が低下する。非線形結合補正の能力を高めるため2012年度に増強型スキュー6極電磁石を4台製作した。2013年度からの運用を予定している。

蓄積リングでは入射の際、追加で入射されるビームが水平方向に約10 mmの振幅で振動する。入射時に形成するパルスバンク軌道に誤差があると本来振動しない蓄積ビ-

ムも振動する。また、結合により垂直方向の振動も誘起される。垂直のビームサイズは水平の1/5以下であることと、挿入光源部など垂直は開口の制限が厳しいことのため、垂直振動の抑制が重要である。

スキュー6極成分による非線形結合を補正して垂直振動を抑制するためスキュー6極電磁石を導入している。このシステムは最大積分磁場勾配2.8 T/mのスキュー6極電磁石4台と各電磁石を励磁する4台の直流電源からなっているが、補正能力が十分でないことが分かった。そこで、既設電磁石の5倍以上の最大積分磁場勾配の増強型スキュー6極電磁石を4台製作した。設置スペースが限られているので、磁極長は既設の電磁石と同じ0.2 mとした。製作後、水平方向磁場成分の3次元磁場分布を測定し、磁場勾配を求めた。測定結果から、定格励磁電流24 Aにおける積分磁場勾配は17.3 T/mで要求を十分に満たしていることを確認した。

また、ローテーティング・コイルを用いて積分磁場勾配と磁場中心位置を求めた。この磁場測定時の写真を図1に示す。積分磁場勾配と励磁電流の関係から必要な励磁電流を決定した。

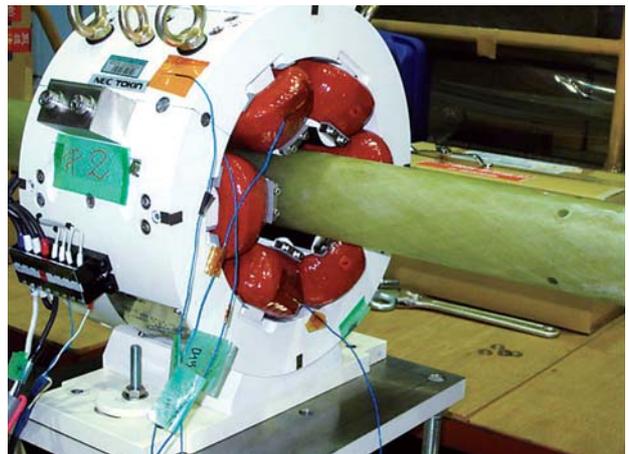


図1 ローテーティング・コイルを用いた磁場測定時の写真。

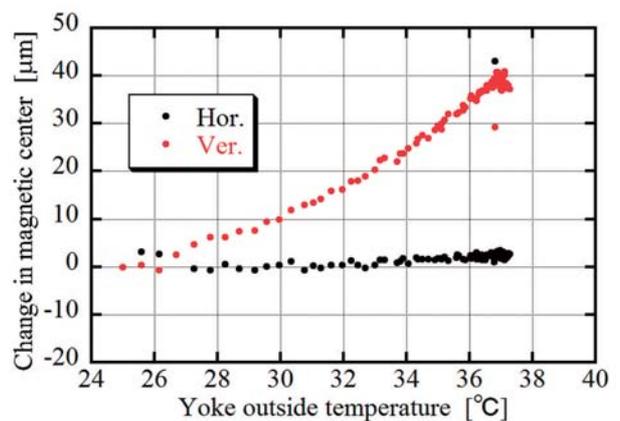


図2 ヨーク表面温度に対する水平、垂直方向磁場中心位置の変化。

増強型スキュー6極電磁石は磁極当たりのコイルのターン数が5倍の50ターンに増加し、励磁による発熱量が大きい。励磁時の鉄芯温度上昇に伴い磁場中心位置は垂直方向に直線的に変化することが分かった(図2)。この中心位置変化は鉄の線膨張係数から予測される値とほぼ一致し、定格励磁電流での磁場中心位置の変化量は $31\ \mu\text{m}$ と評価でき、アライメント精度に対し無視できる範囲である。

製作したスキュー6極電磁石は4カ所の長直線部にそれぞれ1台ずつ設置した。2012年度中に遠隔動作試験まで全て完了している。2013年度からユーザー運転に供する予定である。

(深見)

3-2 高速パルスドライブ電源の開発

蓄積リング入射時の残留水平振動の抑制^[1]、及び垂直キックによる短パルス光生成^[2]のため、高速キッカーマグネット用高速パルス電源の開発を2007年度より進めてきている。2012年度の成果は長期安定性の大幅な改善で、無故障で4ヵ月以上の長期運転安定性が確保された。

キッカーマグネットは空芯1ターンコイル2個で構成し、1コイル1電源接続とした。パルス電源を構成する高圧回路部とスイッチング出力部を分割し、出力部をキッカーマグネット近傍に設置した。高圧回路部は加速器保守通路に設置し高圧印加ケーブルでドライブ電源に給電、制御系、トリガ系信号線も保守通路に設置して蓄積リング内の占有空間を極小化した。分離したスイッチング出力部ドライブ電源の高速、高出力、高繰り返し化の開発をスイッチング回路部に半導体素子であるSi-MOSFETを使用して進めた。高圧回路部を分離し、ドライブ電源をマグネット近傍に設置したため、ドライブ電源の負荷インダクタンスが減少し、高速・高出力化が容易になった。図3にドライブ電源回路図を示す。

MOSFETは、1) 半導体素子であるため長寿命と長期に渡る出力安定性の確保が容易。2) 回路寸法を小さく抑えたまま、多段化により、短パルス化、高繰り返し化、高出力化が可能。3) 素子の耐圧の進歩とともに回路の高耐圧化が容易。等の利点がある。

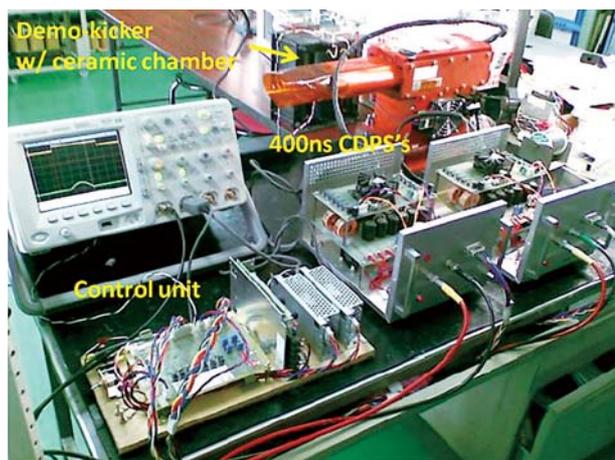


図3 高速パルスドライブ電源回路模式図。

電源の開発は2007年度に開始し、500 V耐圧のSi型MOSFETを400 V、2並列で使用し $1.0\ \mu\text{s}$ パルス幅67 A/coilの出力を確認した。その後2008～2011年度にかけて入手可能なMOSFETの耐圧が飛躍的に向上した。

2011年度に1200 V耐圧のMOSFETを使用して運転電圧を900 V～1000 Vにし、電圧マージンをあげて安定性が向上した。さらに、6並列×2直列接続として運転電圧を1950 Vにし、 $0.4\ \mu\text{s}$ パルス幅232 A/coil、または $0.7\ \mu\text{s}$ パルス幅83 A/coilを達成した。図4に各パルス幅での出力波形を示す。

ユーザー運転のためには無故障長期安定運転が必須で故障率を低減する必要がある。素子の選定、除熱方法、浮遊インダクタンスの改善により、工場試験で2週間以上の長期安定性を得た。しかし、ビーム運転では継続時間が5日間に短縮した。故障原因の統計を調べた結果、故障プロセスがフィリングモードとバンチ電流に依存していることを確認した。

バンチ電流3 mAを閾値として故障確率が上昇し、5 mAでは瞬時に故障する。また、バンチ電流1 mA以下でも203バンチ・フィリングモードで故障確率が上昇するなど、フィリング依存も見られた。

これらからノイズの強度と周波数成分のいずれもが電源故障の要因であると推測された。ノイズ耐性強化のため、

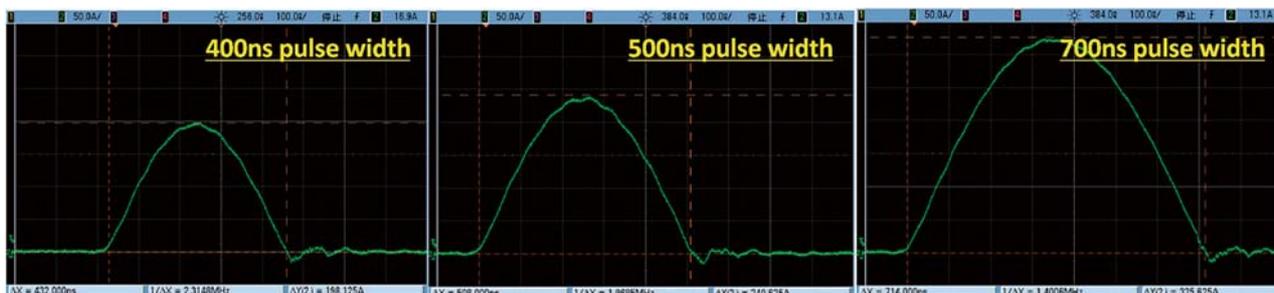


図4 高速CTプローブによる400 ns、500 ns、700 nsパルス幅における出力電流の測定結果(垂直軸 50 A/div.、水平軸 100 ns/div.)。

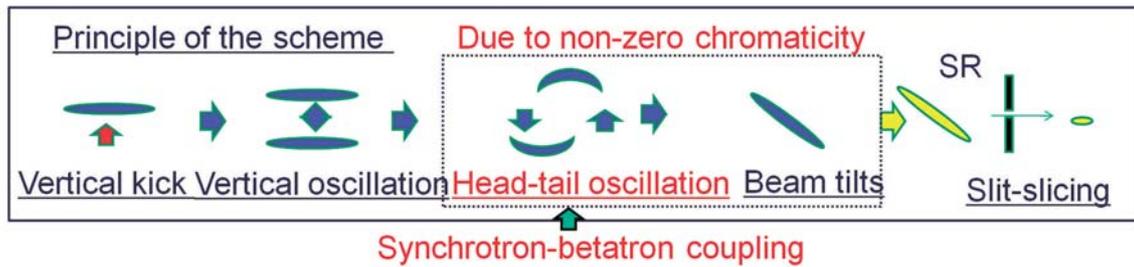


図5 垂直キック法による短パルス光生成の概念図。

リード線から回路に侵入するノイズ除去回路の追加、放射線シールドを兼ねるノイズ・シールドによる空中伝搬ノイズの低減、ドライブ電源回路のグラウンド・フローティング化などを施した。この結果、ノイズ耐性が向上し、バンチ電流 10 mA の大電流バンチ・フィリングや 203 バンチ・フィリングを始めとする各種フィリングモードに対しても無故障での連続運転が可能となった。さらに、ユーザータイム中に連続運転して4ヵ月以上の長期運転安定性を確認した。

(満田)

3-3 垂直キック法による短パルスX線の生成

短パルスX線を生成する方法として垂直方向のビームをキックした結果、傾いたバンチから放射される光を 1 ps 以下の時間幅の短いパルスとして切り出す方法の実用化へ向け検討を続けている。この垂直キック法は、バンチ長 (6~15 mm (r.m.s.)) に対し垂直ビームサイズが 6 μm (r.m.s) と小さいこととシンクロトロン振動の半周期後 (キックの約 50 ターン後) にビーム長手方向の傾きが最大となることを利用している (図5)。

この垂直キック法に必要な装置は、高速垂直キッカー、放射光利用側で用意するスリット、最大傾き時のタイミング信号のみであり、蓄積リングへの導入が容易である。また、高速キッカーの性能次第ではバンチ毎に短パルス光生成が可能で、蓄積リング全周の任意のビームライン (BL) に短パルス光供給が可能である。さらに、一部 BL へ短パルス光を供給するとともに、その他の BL へは通常放射光を供給することが可能となるような柔軟性も備えている。得られるビームの傾きとビームの垂直振動振幅は比例しており、短パルス光のパルス幅をキック量で調整することが可能である。

スリット切り出しのためバンチ当りに放射される光の一部しか使用できないこと、50 ターン周期での短パルス光生成のため繰り返し率が低いことによる光量の減少が欠点である。これに対しては短パルス化の繰り返しを周回周波数の 208 kHz まで高める可能性を検討している。

2007~2010 年度に電源開発及び短パルス化原理実証試験を進め、2011 年度からは実用化へ向けてプロジェク

トを遂行している [3, 4]。2012 年度はバンチの最大傾きとパルス光切り出し時間幅との関係を実測することを目指した。ビームの傾きは偏向電磁石光源を用い可視光ストリークカメラで取得した側面からのターン毎のスナップショットで評価した。パルス光の切り出し時間幅は、アンジュレータ光を X 線ストリークカメラにより測定した。この測定により、傾きと切り出し時間幅の関係を、単純に扁平ビームを傾けて切り出した場合の幾何学的計算で説明できるのか。あるいは、垂直振動でビームサイズが増大し短パルス化に限界があるのか、の検証を進めた。偏向電磁石光源を用いて観測された周回ごとのビーム傾きとそれに伴う垂直振動の様子から、30 ターンを超えたあたりから傾きが増大し、50 ターン前後で傾きが最大を迎え、その後シンクロトロン振動の 1 周期である約 100 ターンで垂直キックを与える前の状態に戻ることを確認した。

この最大の傾きは、垂直振動振幅と比例しており、キック量により制御可能である。ビームが傾いた際にビーム軸中心で切り出される時間幅をスリット幅 50 μm を仮定して計算すると、傾き 100 mrad で X 線パルス光の時間幅は 1 ps を下回ると期待できる。

図6に偏向光源で観測されたビームの傾きをアンジュレータ光源での傾きに直して横軸とし、アンジュレータ光を 50 μm スリットで切り出して観測された X 線パルス幅を縦軸としてプロットした。

傾きが 40 mrad より大きい領域では、傾きが増大しても

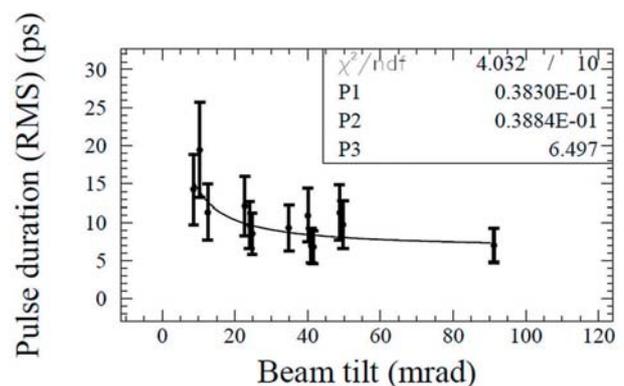


図6 ビーム傾きに対する X 線短パルス光時間幅の観測結果。

X線パルス幅がそれ以上短くならない。この飽和時間幅は 6.5 ± 2.0 ps で、X線ストリークカメラの時間分解能 4.7 ± 0.5 ps を差し引いた後のパルス幅は 4.5 ± 2.1 ps となる。40 mrad のビーム傾きで期待されるパルス幅は 2.6 ps であるため、観測された飽和は検出限界と考えられる。

短パルスの飽和をX線ストリークカメラの検出限界であると論じたが、垂直振動によりビームサイズが変化するサイズの増大効果によるものなのか、検証を進めていく。

(満田)

3-4 ID07 アブソーバー・チェンバ

2010年夏にBL07LSUの光源として蓄積リングの長直線部に水平および垂直8の字アンジュレータが合計8台設置された(ID07)。8台の内、偶数セグメントに設置された垂直8の字アンジュレータからは下流真空チェンバの垂直開口で許容されるより大きい発散角を持つ光が放射され、下流で最も垂直開口が狭い偏向電磁石チェンバ(BMIC)で温度上昇が観測された。

BMICはアルミ合金製水冷チェンバであるが放射光が照射されることを想定したものではないため、放射光が照射された場合局所的な温度上昇が起こり、チェンバが溶け、最悪では真空破断を起こす可能性がある。チェンバの溶融や真空破断を回避するため、ID07運用開始以降BMICの温度監視を行い、温度が上昇した場合は蓄積ビームをアポートする、上流2台の垂直8の字アンジュレータのギャップを制限して、発散角の大きい放射光の強度を落とすことによりチェンバの温度上昇を防ぐ運用を続けてきた。

しかしながら、ギャップ制限を設けたままでは必要なエネルギーの光を出すことができない。ID07のギャップ制限を解除してもBMICに放射光が当たらないようにするため、2012年にBMICの上流に設置するアブソーバー・チェンバを設計・製作した。製作は東京大学が担当し、2013年3月に完成した。図7に外観写真、図8に外観と内面図を示す。

アブソーバー・チェンバは既存のアルミ合金製ペロー

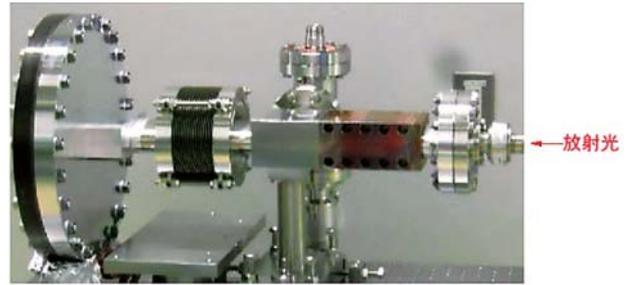


図7 アブソーバー・チェンバ写真。

ズ・ダクトと同じ全長の574 mmとし、両端はアルミ合金製フランジとした。ペローズは既存のアルミ・ペローズと同等の伸縮量のステンレス製溶接ペローズを採用した。中央部はダクトを支持できるように強度のあるステンレスで製作し、側面にはアブソーバーからの放出ガスを排気するポートを取りつけた。アブソーバーの内面は放射光のパワー密度を軽減するため3.5度の傾斜を付けた。

蓄積リングのビーム・ダクトの急激な内面形状変化は電子の鏡映電流由来の高周波電磁場が滞留して発熱をおこす。これを回避するため、ダクト出口と受光部は約10度で、受光部からアブソーバー出口は約7度でなめらかに形状変化させた。

下流のBMICの最も狭い開口 (± 6 mm) にID07からの放射光ができる限り照射しないように、また、通過する電子に影響を与えないようにアブソーバーの最低開口は ± 4.9 mm にした。アブソーバー部の材質は、強い光が照射された際の熱負荷を考慮してアルミナ分散強化銅(GLIDCOP)とした。

熱計算によると、100 mA 蓄積時に表面最高温度は 200°C 以下、冷却面最高温度は 100°C 以下という問題無い結果が出た。またビーム軌道が垂直方向に ± 20 μrad 変動した場合でも、表面最高温度は 300°C 以下、冷却面最高温度も 100°C 程度となり、アブソーバーの損傷や冷却面での膜沸騰が起こらない値が得られた。なお、電子ビームの軌道が垂直方向に ± 20 μrad 以上変動した場合は、軌

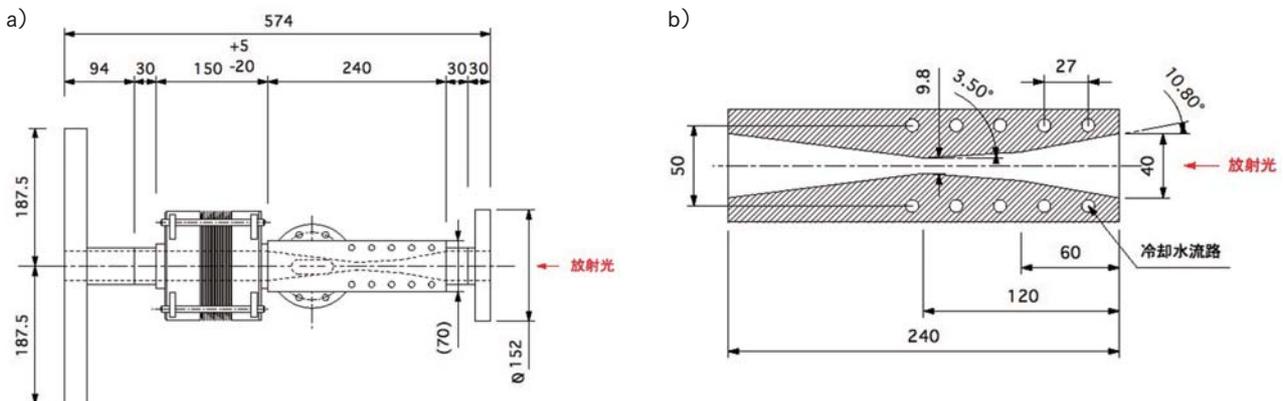


図8 a) アブソーバー・チェンバ側面図。b) アブソーバー内面図。垂直方向の最も狭い開口は9.8 mmである。

道変動を検知してビームをアポートして機器を保護するため、蓄積リングの運転条件下で問題ない設計であることが確認できた。

このチェンバは2013年の夏期点検調整期間に設置し、2013B期以降ID07におけるギャップ制限は解除される予定である。

(小路)

3-5 蓄積リング自動軌道補正高速化

周期的な蓄積リング軌道補正の補正頻度を1 Hzまで高速化するための整備を継続して行っている。2011年度にはIDギャップ駆動に伴う軌道変動を改善できることを確認したものの、定常的な軌道変動を悪化させてしまうことが分かったため、IDのギャップ駆動および定常的な軌道変動のどちらも改善するパラメータ調査が課題となっていた。2011年度末に最適なパラメータを確認し、2012年度から1秒毎の軌道補正をユーザー運転に適用している。これにより、IDギャップ駆動に伴う間欠的な軌道変動を抑制しつつ、定常的な軌道変動の改善にも貢献している。図9 a), b)はXBPMを用いて定常的な軌道変動の差を高速化前後の軌道補正で比較したものである。水平方向に改善が認められ、0.02 Hzから10 Hzの積分では10%~30%の改善が確認された。

一方で、当初から予測された事項ではあるが、ごくまれに軌道データの遅延によって軌道補正が停止する事象が発生している。さらなる高速化と、安定な稼働を目指して、専用のデータ転送経路を使用するためデータの遅延が生じないリフレクティブ・メモリの導入を進めている。

(藤田)

3-6 速い軌道変動によるビームアポート対策

2012年度は1秒以下の短い時間で軌道が変動する速い軌道変動によるビームアポートが他の年度に比べて頻発した。調査の結果アポートのパターンは次の3パターンに分類できることが分かった。

- ①水平方向に100 ms程度で軌道がシフト
- ②垂直方向に10 msで軌道がシフト
- ③数msで水平方向に軌道がシフト

ビーム軌道が動いたことを検知するには、リングのどこか1ヵ所に観測装置を設置すればよいので、比較的簡単であるが、軌道を動かした原因を特定するには、変動を生じさせた場所を絞り込むために蓄積リング全周でのビーム軌道を同期して測定することが必要である。また、この同期測定は変動の特徴的な時間よりも速い周期で行うことが必要である。そこで、原因を捕捉するために、既存の軌道測定システムの論理を変更し、ビームアポート直前の軌道を15 ms毎に数秒間記録する改造を行った。

これにより、ステアリング電磁石電源の不具合によってパターン①の軌道変動を生じた事象を捕捉し、該当するステアリング電磁石の電源を交換した。これ以後、同様の時定数によるビームアポートは起きていない。

なお、CODデータの更新レートを15 msから1 ms程度にし、パターン②の10 ms程度での軌道変動によるビームアポートを捕捉する改造を行っており、2013年度中に導入する予定である。

(藤田)

参考文献

- [1] C. Mitsuda, K. Fukami, K. Kobayashi, M. Oishi, Y. Okayasu, M. Shoji, K. Soutome, H. Yonehara, T. Nakanishi and T.

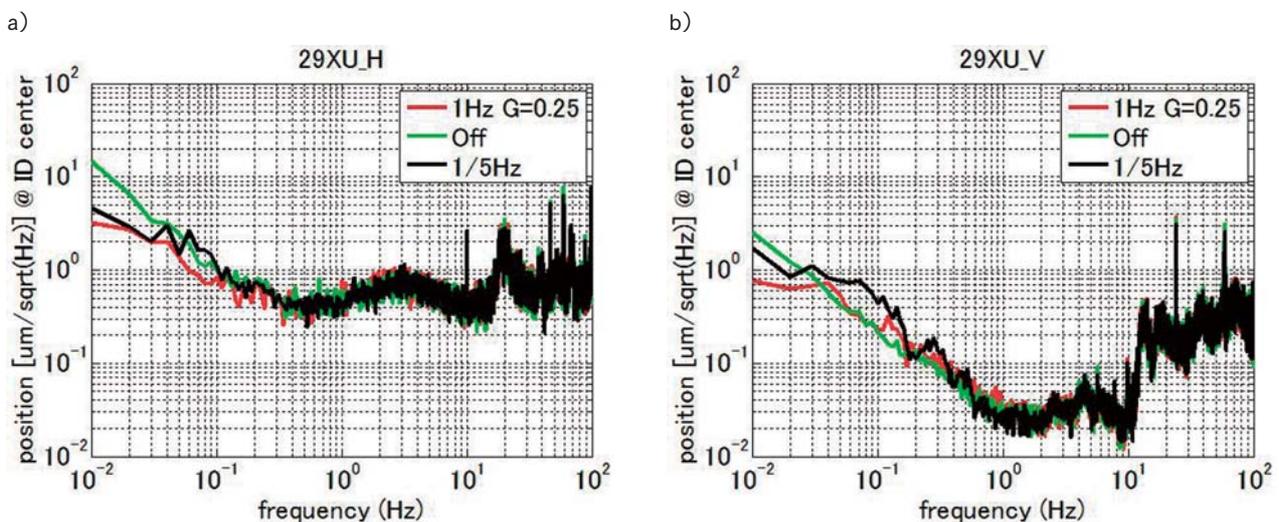


図9 BL29XUのXBPMで観測した定常的な軌道変動の周波数依存性。a) 水平方向、b) 垂直方向。

- Ohshima: Proc. of IPAC'10, Kyoto, Japan (2013) 2252.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC10/papers/wepea031.pdf>
- [2] C. Mitsuda, K. Fukami, M. Masaki, A. Mochihashi, M. Oishi, J. Shimizu, Y. Shimosaki, M. Shoji, K. Soutome, K. Tamura, H. Yonehara, K. Kobayashi and T. Nakanishi and T. Ohshima: Proc. of PAC09, Vancouver, Canada (2009) 1171.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/PAC2009/papers/tu5rfp035.pdf>
- [3] C. Mitsuda, K. Fukami, K. Kobayashi, M. Masaki, A. Mochihashi, T. Nakanishi, M. Oishi, J. Shimizu, Y. Shimosaki, M. Shoji, K. Soutome, K. Tamura, H. Yonehara and T. Ohshima: Proc. of SRI09, Melbourne, Australia, 2009, AIP Conference Proceedings, Vol. 1234, p193.
- [4] C. Mitsuda, K. Fukami, K. Kobayashi, M. Masaki, A. Mochihashi, T. Nakanishi, H. Ohkuma, M. Oishi, K. Soutome and K. Tamura: Proc. of SRI2012, Lion, France, 2012, Journal of Physics: Conference Series, **425** (2013) 042012.

加速器部門
加速器第IIグループ
佐々木 茂樹