

### 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。2011年度のSPRING-8加速器総運転時間は4918.6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。

2011年度の蓄積リングの運転時間は4904.2時間、ユーザータイムは4058.5時間（蓄積リング運転時間の82.8%）、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1.4%に当たる57時間であり、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98.5%であった。また、トラブルとして、35回のビームアポルトあるいは計画外のビーム廃棄が発生している。最も長い中断時間は真空封止挿入光源の冷却水リークによるもので27時間9分（これは2010年度のトラブルによる総ユーザータイム中断時間とほぼ同じ時間であった）であったが、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。加速器のトラブルによるものの合計時間は約1/4の13時間34分（アポルト回数は

16回）であったがこれも2010年度より増加した。ユーザータイム中のトップアップ入射継続率は98.5%に達している。また、加速器及びビームラインの調整には803時間を使ったが、例年に比べると200時間余り少ない。これは2011年3月11日の東日本大震災による福島原発の事故以後、各原発の停止が続き節電対策が必要になったために全体の運転時間を減らさざるを得なかった中、ユーザータイムの確保を優先させたためである。短期間の対応は可能であるが、長期的には対応を見直す必要があると考えている。

2011年度7月の節電要請期間では、蓄積リング及びシンクロトロンの高周波加速電圧を下げた運転を実施した。これにより、トップアップ運転時の蓄積電流の変化が大きくなるなどの問題があるが、ユーザー実験への影響は致命的ではないと判断した。また、線型加速器においても、クライストロンの運転を従来の10 ppsから5 ppsへと変更した。このように低繰り返し運転になりRFパルスの間隔が長くなるほど、クライストロン変調器のPFN（Pulse-Forming-Network：パルス形成回路）の自己放電に依る出力電圧低下、すなわちRF出力低下が大きくなるため、PFN充電電圧を高めにして低下分を補う必要がある。このためにPFN放電用サイクロトロン寿命が短くなることで若干危惧される。更に、13台のクライストロン変調器のうち2台を予備機として常時パワーを入れた状態でスタンバイとしていたが、節電要請期間中はスタンバイを1台とし、節電に対応した。しかしながら、常時この運転を行うことは、トップアップ運転の中断可能性が高くなるため望ましくはない。

以前より減少傾向にあるマルチバンチモードの運転は、2011年度はついにユーザータイムではまったく実施されなかった（2010年度は5.9%）。セベラルバンチモードでの運転の割合は62.5%で、2010年度の56.7%より増加した。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。2011年度は203バンチモードがユーザータイムの30.3%（2010年度は30.9%）、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32.2%（2010年度は25.8%）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37.5%と2010年度の37.4%と同等であった。マルチバンチモードの運転時間の減少の原因は、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ために、パルス放射

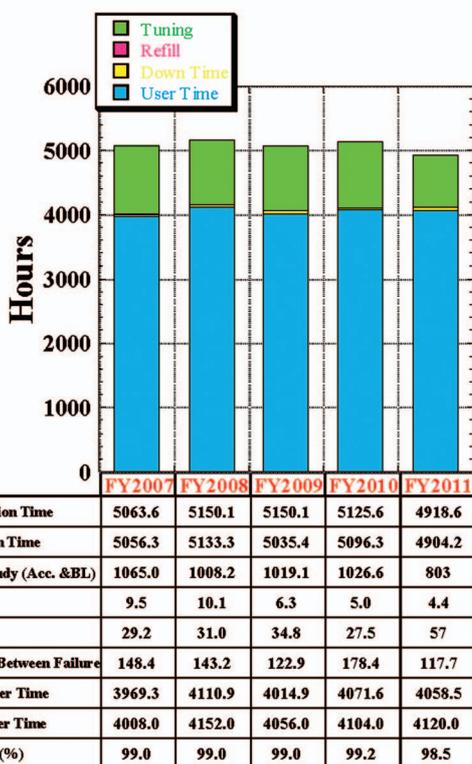


図1 過去5カ年度の運転時間の推移

光利用実験がいつでも実施できるセバ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。この傾向は今後も続くと思われる。2011年度は、6つのフィリングモードでの運転が実施されている。前述した均等203バンチ（1バンチ当たりの電子数  $1.5 \times 10^{10}$  個：電流換算 0.5 mA）、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  $9 \times 10^{10}$  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。

表1に、蓄積リングの主要なパラメータを示す。

表1 蓄積リングの主要パラメータ

Energy [GeV]	8
Number of buckets	2436
Tunes ( $\nu_x / \nu_y$ )	40.14 / 19.35
Current [mA]:	
single bunch	12
multi bunch	100
Bunch length ( $\sigma$ ) [psec]	13
Horizontal emittance [nm·rad]	3.5 <sup>\$1</sup>
Vertical emittance [pm·rad]	6.9 <sup>\$1</sup>
Coupling [%]	0.2
RF voltage [MV]	16
Momentum acceptance [%]	$\pm 3$ ( $\pm 240$ MeV)
Beam size ( $\sigma_x / \sigma_y$ ) <sup>\$1</sup> [ $\mu\text{m}$ ]	
Long ID section	297 / 10
ID section	303 / 6
BM1 section	108 / 13
BM2 section	115 / 14
Beam divergence ( $\sigma_x' / \sigma_y'$ ) <sup>\$1</sup> [ $\mu\text{rad}$ ]	
Long ID section	13 / 0.7
ID section	12 / 1.1
BM1 section	57 / 0.6
BM2 section	74 / 0.6
Operational chromaticities ( $\xi_x / \xi_y$ )	+1/+1 <sup>\$2</sup>
Lifetime [hr]:	
100mA (multi bunch)	~200
1mA (single bunch)	~20
Horizontal dispersion [m]:	
Long ID section	0.103
ID section	0.107
BM1 section	0.032
BM2 section	0.070
Fast orbit stability (0.1 – 200Hz) [ $\mu\text{m}$ ]:	
horizontal (rms)	~4
vertical (rms)	~1

<sup>\$1</sup> Assuming 0.2 % coupling

<sup>\$2</sup> With bunch-by-bunch feedback

(大熊)

### 1-2 SPring-8蓄積リングカップリング補正の改善

放射光光源リングにとって、カップリング補正は大変重要である。カップリング補正は、垂直ビーム広がりを低減

することにより高輝度放射光を生成する上で不可欠であるだけでなく、第3世代の光源リングでは一般的になりつつあるトップアップ運転において入射ビーム損失を削減するためにも必須である。

カップリングは水平垂直方向のビーム広がり比で測られるが、原理的に水平ディスパージョンによって作られる水平ビーム広がりに対して、垂直ビーム広がりには偶発的な誤差磁場による水平垂直振動の結合共鳴や垂直ディスパージョンにより生成される。加えて、結合共鳴は入射ビームの大振幅水平振動を垂直方向へ回り込ませ、水平口径に比べて狭い垂直口径による制限で入射ビーム損失を増加させるため、入射効率にも影響することになる。真空封止挿入光源の磁石列ギャップが閉じられた場合には、結合共鳴の入射効率への影響はより大きくなるので、これを補正することは重要である。

結合共鳴の補正は、摂動理論に基づく単共鳴近似によるもので、2011年度第3サイクルまでは垂直ビーム広がりへの応答により行っていた。しかしながら、垂直ビーム広がりには結合共鳴による励起以外の寄与も含んでいるため、この方法では結合共鳴を十分に補正することができなかった。結合共鳴の励起強度は、運転点を共鳴に近付けた時の測定されたベータatronチューンの差の最小値として求められるが、垂直ビーム広がりへの応答による補正では0.003程度までしか低減できなかった。図2は、共鳴からの距離 ( $= \nu_x - \nu_y - 22$ ) に対して測定されたチューンの差をプロットしたものである。ただし、 $\nu_{x(y)}$  は水平（垂直）チューンの設定値、22は結合共鳴の位数である。距離0が共鳴線に対応し、そこでチューン差は最小値を取り、これが結合共鳴の励起強度である。

垂直ビーム広がりへの応答によるカップリング補正では結合共鳴を十分に補正することができなかったため、turn-

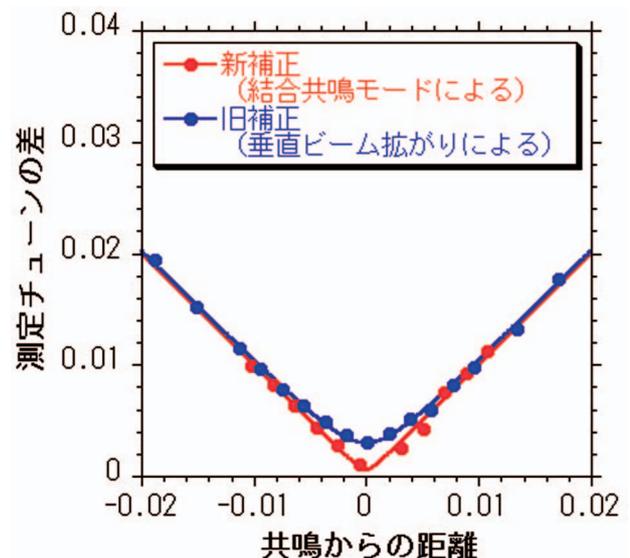


図2 結合共鳴近傍における測定チューンの差

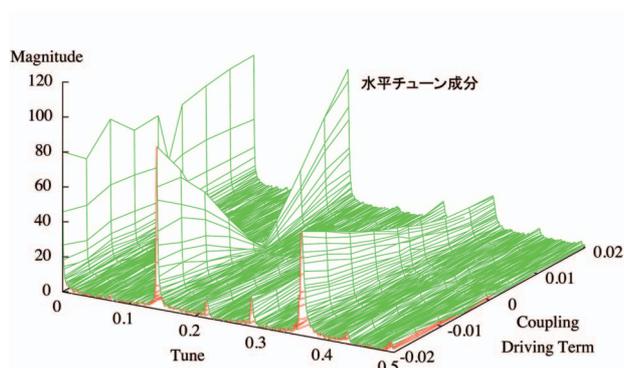


図3 水平方向キックにより誘起された蓄積ビームの垂直振動のフーリエ変換

by-turn ビーム位置モニタ (BPM) を用いて結合共鳴を直接補正する方法を考案した。入射バンパ電磁石で蓄積ビームを水平方向に入射ビームと同じ10 mmの振幅を持つようにキックし、その後のビーム振動をBPMでターン毎に測定する。誘起される垂直振動をフーリエ解析することにより、その水平振動チューン成分から結合共鳴を求めることができる。2011年度第3サイクル以降、この結合共鳴モードの応答によりスキュー四極電磁石によるカップリング補正を実施している。図3は、スキュー四極電磁石による結合共鳴励起強度に対する垂直振動中の水平チューン成分の応答をプロットしたものである。この結果、結合共鳴の励起強度は0.0006まで低減され、結合共鳴補正は1/5にまで改善された (図2参照)<sup>[1]</sup>。

(高雄)

### 1-3 蓄積リングの低エミッタンス化

輝度とフラックス密度の向上を目指し、蓄積リング低エミッタンスオプティクス設計検討を行っている。設計検討の結果、自然エミッタンスが現在の3.5 nm·radから2.4 nm·radとなるオプティクスを得た。現在の蓄積リングオプティクスから低エミッタンスオプティクスへの切り替えの際には、磁石の極性切り替えや機器の移動などは必要なく、4極及び6極電磁石などの磁場強度のみを変更するので余分なシャットダウン期間は生じない。非線形オプティクスに関しては、ダイナミックアパチャや振幅依存チューンシフトなどが最適化されるよう、遺伝的アルゴリズムを導入して設計を行った。SPECTRA<sup>[2]</sup>で計算された輝度を図4に示す。現在の蓄積リングオプティクスについては、ユーザー運転時における自然エミッタンスとして3.0 nm·radを仮定して計算を行った。現在の蓄積リングオプティクスに比べ低エミッタンスオプティクスでは、輝度が全体的に約25%増大する結果となった。

設計パラメータを機器に設定し、マシンチューニングを行っている。水平方向エミッタンスが設計値程度まで低減すること、また挿入光源ID05 (加速器診断II) からの

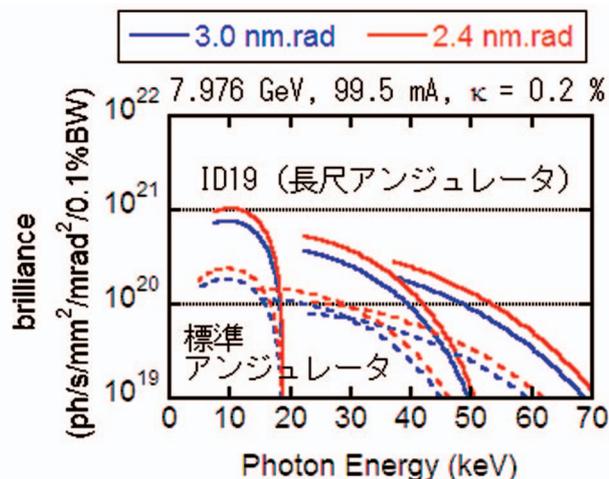


図4 現在の蓄積リングオプティクスと新オプティクスにおける輝度

10 keV放射光のフラックス密度が、他の挿入光源のギャップ全開のときに約25%増大することを確認した。垂直方向エミッタンスの補正が十分ではなく、今後更に低減させる予定である。

入射効率の改善、入射時の蓄積ビーム振動の抑制などの加速器性能を現在のユーザー運転程度まで達成させた後に、各ビームラインにて試験利用を行い、ユーザー運転への適用を検討する予定である。

(下崎)

### 1-4 局所的な長直線部ラティス改造

SPring-8 蓄積リングには長さ約30 mの長直線部が4カ所あり、長尺の真空封止型アンジュレータ (BL19LXU) や水平/垂直Figure-8アンジュレータ8台 (BL07LSU) が設置されるなど、高い光源性能を持つビームラインの建設に役立てられている。これらに加えて、残る長直線部のうちの1カ所に、短周期の真空封止型アンジュレータを設置して新たにビームラインを建設することが提案された<sup>[3]</sup>。このビームラインBL43LXUでは、短周期アンジュレータを用いることでエネルギー領域14.4~26 keVの放射光を高い強度で発生できるのであるが、それにはアンジュレータの磁石列ギャップ6 mm程度以下にまで閉める必要がある。しかし、例えば他のビームラインBL19LXUでは、入射効率の低下やビーム寿命の悪化などビーム性能に与える影響を考慮して、長尺アンジュレータの最小ギャップ値が12 mmに制限されている。従って、単に長尺の短周期アンジュレータを長直線部に設置しただけでは、6 mm以下のギャップ値が実現できない。この問題を解決するために、当該長直線部をさらに3つの直線部に分割し、各直線部の間にそれぞれ3台の4極電磁石を追加設置してラティスを局所的に改造した。ブロックタイプの4極電磁石の製作と磁場測定 (本年報、3. 加速器第IIグループ、3-2参照)、

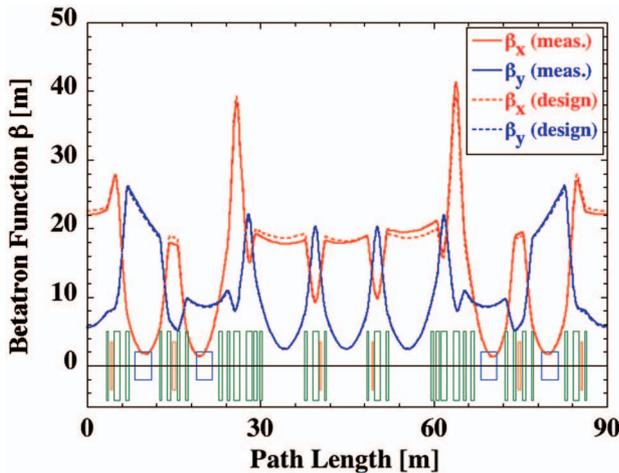


図5 改造後の長直線部のベータatron関数。応答関数解析による測定値（実線）を設計値（破線）と比較して示す。

真空チェンバ改造、機器の据え付けなど、主な作業は2011年3月までに終了し、その後9月までの半年間、マシンスタディ等の時間を利用してビーム調整を実施した。

一般には、このような局所的改造を行うと、蓄積リング全体の対称性が低下してビームの安定領域が狭くなり、ビーム性能に悪影響を及ぼすのだが、我々は「ベータatron位相マッチング」、「局所クロマティシティ補正」、「6極電磁石に起因する非線形キックの相殺」という3つの処方を組み合わせてビームの安定性を確保した<sup>[4]</sup>。図5に示すように、改造によって直線部中心の垂直ベータatron関数は2.5 mにまで下がっており、3カ所の直線部のそれぞれに5 mの短周期アンジュレータを設置することができる（合計15 m）。現在は中央に1台が設置され、最小ギャップ5.81 mmの条件でユーザー運転に供されている。残る2台のアンジュレータも2012年度に設置が予定されており、放射光輝度及びフラックスの増強が期待されている。

（早乙女）

#### 1-5 不安定性抑制

SPring-8のような蓄積リングでは、ビーム自身がビームの水平及び垂直のベータatron振動を励起するビーム不安定性と呼ばれる現象が、ビームの品質や電流を制限する大きな要因となっている。SPring-8蓄積リングでは、SPring-8で開発した、FPGA（Field-Programmable Gate Array）を用いた信号処理装置によるバンチ毎フィードバック（BBF）を用いて、このようなビーム不安定性を抑制している。BBFでは、ビーム位置モニタ信号を用いてバンチ毎にその位置を検出し、位置のターン毎の履歴から振動を抑制するのに必要なキックを計算してバンチ毎にキッカーを駆動することにより、すべてのバンチについて、ベータatron振動の励起を抑制し、不安定性に対抗している。

さて、大きなバンチ電流を持つ少数の孤立バンチと、小

バンチ電流の多数個の連続バンチからなるトレインとから構成されるフィリングは、大電流孤立バンチの利用を可能とするとともに、高い平均電流を維持することができるため、利用側から強く要求されてきた。しかし、このフィリングでは、大電流バンチでのモード結合不安定性などのシングルバンチ不安定性と、バンチトレイン部でのresistive-wall不安定性などのマルチバンチ不安定性とが同時に発生する。そのため、BBFはこれらを同時に抑制しなければならないが、大電流バンチは、ビーム位置モニタに、非常に強い信号を発生するので、そのままでは、BBFが飽和し、大電流バンチの不安定性の抑制が困難となる。そこで、バンチ電流をターンごとに計測し、その結果に応じて自動でビーム位置モニタ信号を減衰させる自動アッテネータ、ならびに、入射時に発生する大きな水平振動の下でも、強いシングルバンチ不安定性を抑制可能な高効率水平キッカーを開発し、それらを組み合わせて、6 mA/bunchの大電流の孤立バンチと、11/29 フィルのバンチトレインからなる、ハイブリッドフィリングを、2010年度に実現した。

2011年度では、このフィリングでの放射光の試験利用を行うことにより、孤立バンチの大電流化による放射光実験の高効率化が実証され、かつ、平均電流を必要とする放射光利用に対する悪影響も問題無いことが確認された。この結果を踏まえて、2012年度の後期より、ユーザー運転に、このフィリングを投入することが予定されている。

（中村、小林和生）

#### 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

極小エミッタンスのリングを目指しているSPring-8 IIでは、非常に非線形性が強くなり、ダイナミックアパチャ（安定領域）が、ベータ関数を25 mと大きく取っても、2 mm程度の半径に制限される。このような狭い領域への入射に対して、キック位置依存性を可変とし、かつ、単一バケットのみをキック可能な超高速キッカーを新たに提案し、それを用いての、Bucket-by-bucket on-axis/off-axis入射（BBI）を提案している<sup>[5]</sup>。これにより、蓄積ビームに与える影響を最小限としたoff-axis入射、ならびに、リングの初期調整段階での、より小さいダイナミックアパチャへの入射に対して有効な、on-axis入射の両方を実現可能と期待される。2011年度は、この、キック位置依存性可変の超高速キッカーの試験機を製作した。図6にその外観・構造、図7に電極形状、図8に電場分布（計算）を示す。キッカー電極は、ストリップライン型を用いており、FID社の50 kV、3 nsの高電圧パルス発生器により駆動され、TEMモードの電磁場が生成される。このような高電圧パルスに対して、最も問題の発生が予想される入出力のフィードスルーについては交換可能な構造とすることによ

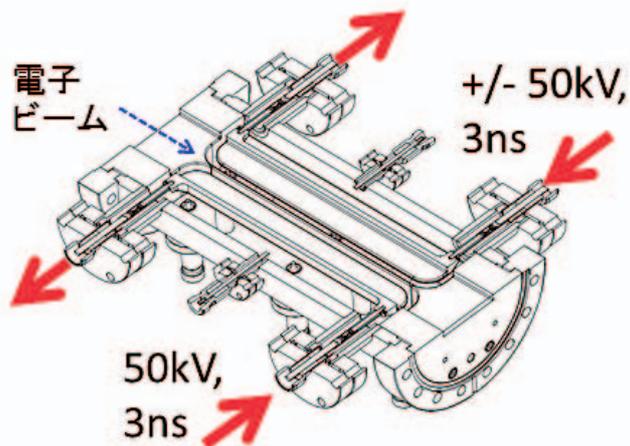
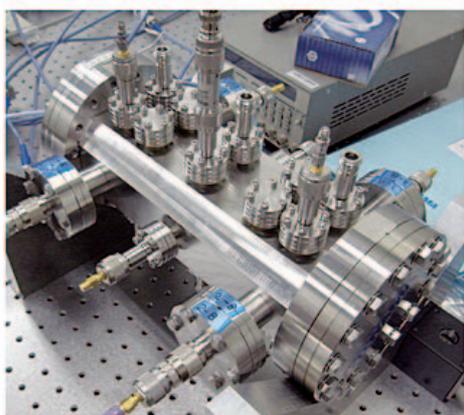


図6 キッカー外観(左)及び内部構造(右)。キッカーへの入力電磁場は、右図の実線の矢印のように流れる。左図では、入出力以外に多数のフィードスルーが見えるが、ウェーク場除去ならびに、電磁場のモニタ用である。

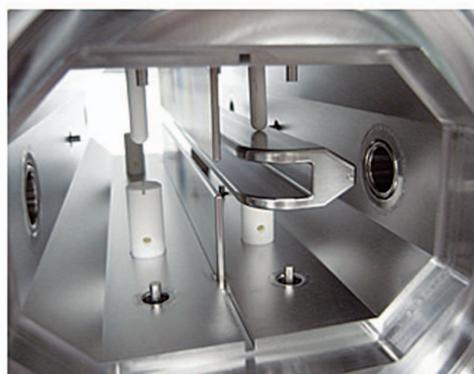
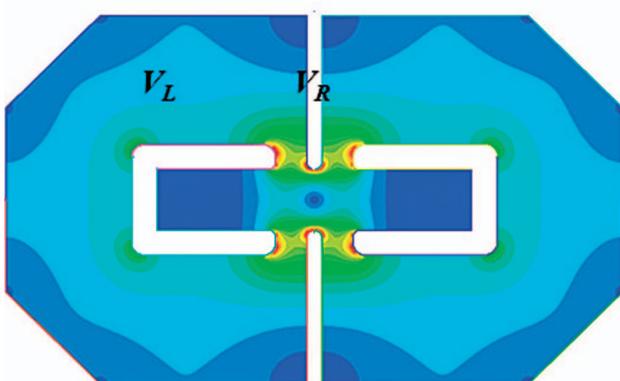


図7 キッカーの内部構造。ビーム軸に垂直な断面の形状(左)及び、右側の電極を取り付けたところの写真(右)。右図では、電極の位置決め用のセラミックス製の棒が上下に見えている。

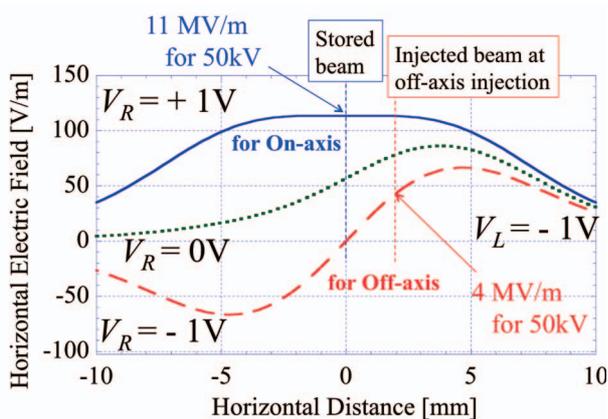


図8 キッカーでのキック電場分布。左右のキッカー電極(図7)に対して、右側の電圧( $V_R$ )を-1Vとし、左側の電圧( $V_L$ )を、+1V、0V、-1Vとした場合の計算結果である。TEMモードのため、磁場によるキックが加わり、電場のみの2倍のキックが得られる。実線(+1V)は、on-axis入射の場合に用いる双極キック、破線(-1V)はoff-axis入射の場合に用いる4極キックを発生させた場合を示している。

り、種々のフィードスルーでの試験が可能となっている。2012年度では、キッカーのベンチ試験を行い、問題点を抽出・改善するとともに、線型加速器のL3ビーム輸送ラインにおいてビームを用いたキック電場分布を計画しており、機器整備やビーム品質向上の研究を実施する予定としている。

(中村)

#### 1-7 加速器診断

加速器診断 I (BL38B2) では、光取出しミラーを改造して可視光放射光の鉛直方向の取り込み角を拡げ、従来から利用してきた光軸下側の可視光に加えて上側の光も利用可能にした。光軸下側の可視光は、2010年度に整備した第二暗室に導入し、ユーザータイム中のバンチ純度の常時監視に用いている。バンチ純度モニタを高速化しトップアップ入射1ショット毎のバンチ純度測定を実現するために、高い検出レートで動作する光子検出器と組み合わせて用いるTDC (Time to Digital Converter) による高速の

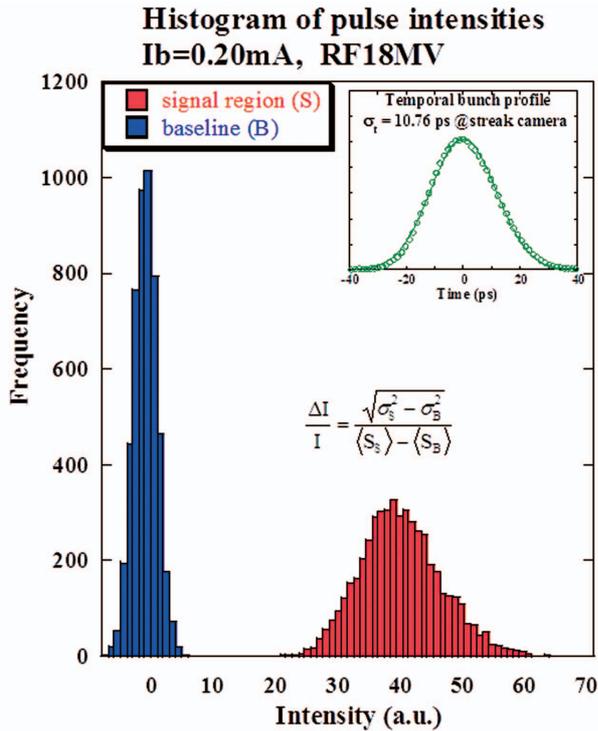


図9 加速器診断Iで測定した放射光パルス強度の揺らぎ（ヒストグラム）。中心波長632.8 nm、バンド幅1 nm (FWHM) のフィルターで単色化した光をAPDに集光し、出力パルス波形をオシロスコープで解析した。赤色は放射光パルスを含むシグナル領域の強度、青色は電氣的ノイズの寄与等を評価したベースライン領域の強度。正味の放射光強度揺らぎは、シグナル領域の揺らぎからベースライン領域の揺らぎを差し引いて計算する（図中の式）。強度揺らぎから評価したバンチ長（11 ps）は、ストリークカメラで同時に測定したバンチ長（差し込み図）と良い一致を示した。

光子計数用信号処理系の開発を進めた。開発したTDCによる信号処理系は、今後、放射光を用いる高精度バンチ電流モニタの開発にも応用する予定である。新たに利用可能となった光軸上側の可視光は、従来からある第一暗室に導入し、ストリークカメラによるバンチ長測定などに用いている。ストリークカメラの高感度化のために、入射光学系を反射型のものに更新した。従来用いていた色収差除去のためのバンドパスフィルターが不要となり、低バンチ電流領域での高精度バンチ長計測が可能になると期待している。インコヒーレント放射の強度揺らぎからバンチ長を計測するフラクチュエーション法は、周波数領域での計測であるため測定系の時間ジッターの影響を受けない特徴があり、サブピコ秒領域の短バンチ長計測の有効な方法である<sup>[6]</sup>。第一暗室に導入した可視光放射光を高感度のAPD (Avalanche Photo Diode) に集光し、フラクチュエーション法によるバンチ長測定の試験を行った（図9）。

加速器診断II (BL05SS) の高精度光軸モニタは、蓄積リング立上げ調整時を含めたユーザータイムの挿入光源光軸安定化に活用するために、挿入光源 (ID05) の白色光

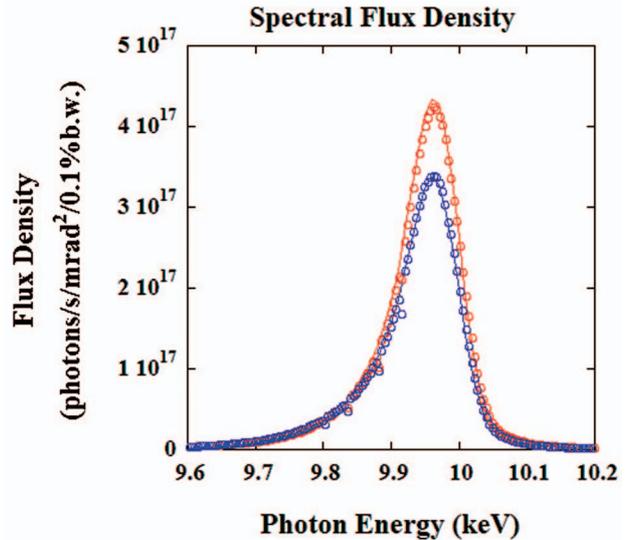


図10 通常のオプティクス（青色）と低エミッタンス（2.4 nm-rad）オプティクス（赤色）での加速器診断II挿入光源 (ID05) のスペクトル（フラックス密度）。アンジュレータ3次光によるエネルギー10 keVのX線での実測値（丸印）とSPECTRA<sup>[2]</sup>による計算値（実線）を示す。エミッタンスの低減により、現状より約25%フラックス密度が向上する結果が得られた。

ビームをダイヤモンド薄膜スクリーンで可視化して光軸の中心位置を直接測定するモニタである。2011年度は、モニタを光学ハッチ1に設置し光軸の変動を常時監視するための制御・データ収集系を整備し、常時モニタとして試験運用を行った。SPring-8の更なる高輝度化を目指す低エミッタンス化試験運転や、省電力化のため蓄積リング電子ビームを低エネルギー化した7 GeVでの試験運転調整などにおいて、ID05の放射光スペクトルの精密測定を行い、蓄積リングの光源性能を評価した（図10）。ID05アンジュレータ光の空間分布を高速のカメラを用いて電子ビームの蓄積リング周回毎に観測し、リング周回毎の電子ビームの状態を診断するターン・バイ・ターン放射光モニタの整備を進めた。2011年度は、高感度化のため蛍光体をYAG (Ce)に変更するとともに、結像光学系の改良により視野を拡大し水平・垂直の両方向に射影したプロファイルの同時測定を可能にした。トップアップ入射時の蓄積ビームの振動測定や、蓄積リング高度化の一環として進められているバンチ電流増強での大電流バンチの不安定性診断などに活用することを目指している。X線ストリークカメラは、高感度化のため2010年度に導入したフレネルゾーンプレート (FZP) X線集光システムを用いて、シングルターン・シングルショットでのバンチ長測定試験を行った。

（高野）

参考文献

[1] M. Takao, et al.: to be published in Proc. of IPAC'12, New Orleans, (2012) 1191.

- [2] T. Tanaka and H. Kitamura: SPECRA code ver. 9.02 (2012).
- [3] A. Q. R. Baron: SPring-8利用者情報 Vol.15 No.1 (2010) p.14.
- [4] K. Soutome: et al.: to be published in Proc. of IPAC' 12, New Orleans, (2012) 1188.
- [5] T. Nakamura: "Bucket-by-bucket On/Off-axis Injection with Variable Field Fast Kicker", Proc. of IPAC2011 (2011), <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2011/papers/tupc095.pdf>
- [6] M. S. Zolotarev and G. V. Stupakov: SLAC-PUB-7132, March 1996.

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

シンクロトロン（ここでエネルギー 8 GeVまで加速して蓄積リングへ輸送する）とNewSUBARUに入射するビームのパラメータを表1に示す。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ため、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。2004年9月から行っているSPring-8とNewSUBARUへの同時トップアップ運転の際、入射経路切換における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 - NewSUBARU間の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 - 蓄積リングの間のスリットで約1/2に各々別の理由ではあるが削って入射している。

図1に2011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、全てのサイクルに於いて1日1回以

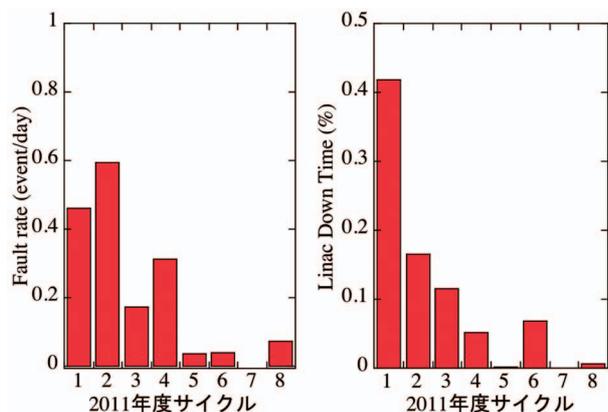


図1 インターロックフォールトの頻度(左)とダウンタイム(右)

表1 線型加速器のビームパラメータ (ECS動作)

	Synchrotron		Top-Up
Pulse Width	1 ns	40 ns	1 ns
Repetition	1 pps	1 pps	1 pps
Current	1.7 A	70 mA	660 mA
dE/E (FWHM)	0.45 %	0.55 %	0.32 %
Energy Stability (rms)	0.02 %	-	0.01 %

下となっている。2011年度においては線型加速器の運転に起因するトップアップ運転の中断は2010年度よりわずかに減少している。右のグラフがトップアップ運転の中断時間の比率である。年度後半では非常にフォールトが少なく、特に第7サイクルにおいては線型加速器が原因のトップアップ運転中断は一度もなかった。

フォールトの原因はトリガが出なくなるなどタイミング系モジュールによるもの、真空悪化などがあつた。タイミング系モジュールの老朽化については、全モジュールを交換することは難しく、トリガのモニタを増強し、トラブルに迅速に対処することでダウンタイムを減らしていく。

(鈴木)

### 2-2 加速器の改良

#### 2-2-1 クライストロン変調器の自動切り替え

これまででは、クライストロンあるいはクライストロン変調器のフォールト発生時にはトップアップ運転を中断し、これらが復旧後に運転を再開する運用を行っていた。そのためフォールト時には最低1~2分のトップアップ運転の中断があつた。このトップアップ中断を可能な限り減らす必要ためクライストロン自動切り替えを導入した。

通常はクライストロン13台のうち2台はホットスペアとして待機しており、専用ディレイモジュールを用いて他の変調器に対して10 μs遅延させて高圧をかけているため

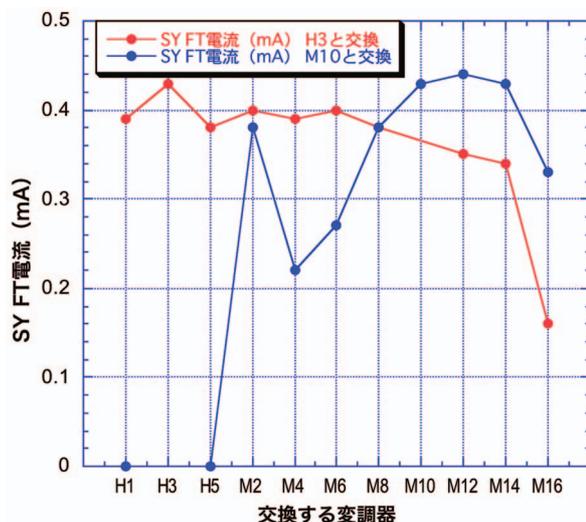


図2 変調器切り替え時のシンクロフラットトップ電流の変化

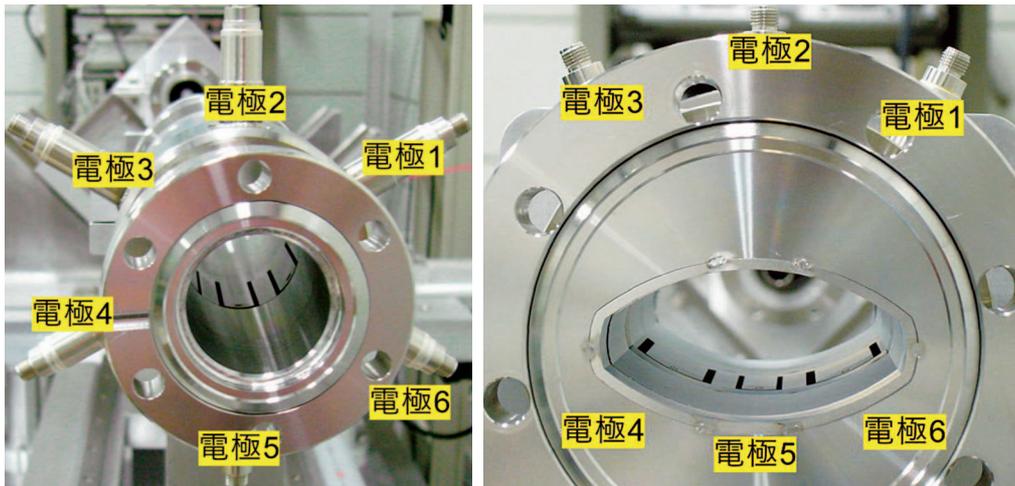


図3 円形断面（左）と准楕円形断面（右）の6電極BPM

ビーム加速に寄与しない。フォールト発生時にこの専用ディレイモジュールを自動的に切替えて、フォールトが発生した変調器を直ちにホットスペアと入れ替えることにより、トップアップ運転を中断させないようにした。ただし13台のクライストロンの内、最上流のH0は他のクライストロンやバンチャ系にRFを供給し、また最下流のM18はエネルギー圧縮を行うため、これら2台は他の変調器と代替が効かず、自動切り替えを行うことができない。

自動切り替えは専用プログラムで行われ、通常1秒以内に行えるため、フォールトとビーム入射のタイミングが重ならないうちにトップアップの中断は発生しない。

自動切り替えを行うとビームの軌道が変わるため、線型加速器からの射出電流値及びシンクロトロン入射効率が変化する。そこでH3、M10の2台をホットスペアとし、自動切り替えのビーム試験を行った。この試験で測定されたシンクロトロンフラットトップ電流値を図2に示す。赤丸のH3、青丸のM10が自動切り替え前の電流値である。この結果によれば、上流側H1～M8の変調器にフォールトが発生した場合にはH3と切り替え、下流側M12～M16の変調器にフォールトが発生した場合はM10と切り替えれば、電流量の低下は2割程度に押さえられる。いずれの場合においてもトップアップ運転が継続可能である。

2011年度第5サイクルに変調器自動切り替えを導入してから、特に動作上の問題はなく安定した運用ができていた。その結果、変調器のフォールト発生時のトップアップ入射の中断を以前よりも激減させることができた。（図1（右）、第5サイクル以降を参照）。

（出羽）

## 2-2-2 非破壊型6電極ビーム位置モニタ

線型加速器では、主にトップアップ運転時のビーム監視機能を強化させるため、ビーム位置計測と共に、通常はス

クリーンモニタなどの破壊型モニタで計測されるビーム形状（縦横比）が計測可能となる、非破壊型6電極ビーム位置モニタ（BPM）システムの整備を進めている。

2010年度は円形断面の6電極BPMを設計し、3台製作した（図3（左）参照）<sup>[1]</sup>。3台の円形断面6電極BPMは2011年7月にL4ビーム輸送系内の円形断面6電極BPM3台と置き換えられた。

円形断面6電極BPMの特性を確認するためにビーム試験を行った結果、各電極の減衰率較正が重要であり、ビーム位置を変えても相対モーメント<sup>[2]</sup>が変化しない特性を利用して各電極間の減衰率バランスを補正した。4電極磁石励磁量を変化させ、ビームプロファイルを変化させながら、6電極BPM及スクリーンモニタから得られるそれぞれの相対二次モーメントを比較した結果、値が一致した。これにより、このタイプのBPMに於いて、理論的な計算により規格化モーメントが正確に計算され、自己完結的な実ビームによるバランス較正を行えば、正常に動作させることが可能であることが示された。

図3（右）は2011年度に設計され、2台製作された准楕円形断面6電極BPMの写真である。製作時の機械加工を容易にするため、断面は楕円形ではなく、4つの円弧からなる准楕円とした。2台の准楕円形断面6電極BPMは2012年7月にシケイン部及びLSビーム輸送系内の准楕円形断面4電極BPMと置き換えられ、ビーム試験に供される予定である。

4電極から6電極に増強するに伴い、新たに追加される2系統の信号処理回路やデータ取得用デジタル入力を増設することが困難であった。そこで2011年度に従来の4回路BPM信号処理回路を見直して、低雑音化を図りつつ同じ大きさのまま6回路へ拡張し、さらにOPT-VME128ビットデジタル入力ボードも並行して開発した。

（柳田）

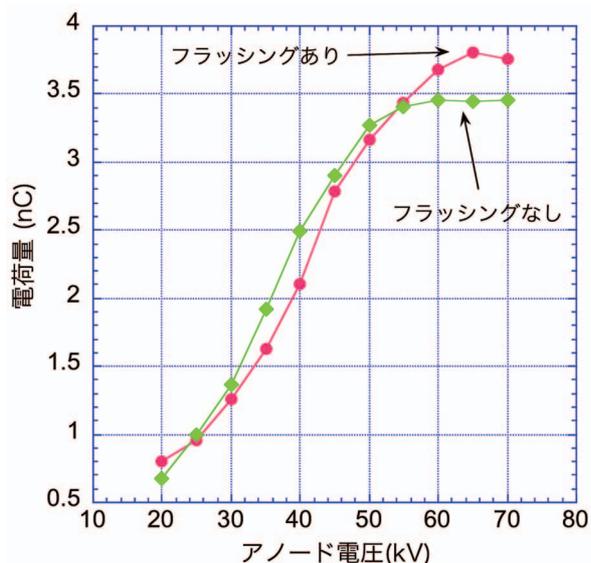


図4 ヒータ電力を一定にして測定したエミッション電流

### 2-3 電子銃カソードアセンブリのサイクル試験

2010年度に改良した電子銃テストベンチを用いてY-845電子銃カソードのエミッション試験を行った。この試験では、グリッドバイアス電圧60 V、グリッドパルス電圧300 V（1 ns幅）に固定して電子銃の運転を行った。カソード表面温度はグリッドの遮蔽により低く観測されるが、その温度分を補正し、表面温度約1000℃でエミッション試験を行っている。

同一の電子銃カソード（Y-845）について、1) 真空引きを行い、ヒータエージング後エミッション試験、2) ヒータフラッシング（通常、6.4 Vで使用るところを8 Vまで上げて30分保持）後にエミッション試験（ヒータ電圧：6.4 V）、3) カソードチェンバを窒素パージ、というサイクル試験を3回行った。3回の試験とも、ヒータフラッシングを行うとエミッションが8%程度増加し、3回ともほぼ同じ電荷量であった。図4は上記エミッション試験1サイクル分の測定結果である。

今後は、新規電子銃カソードアセンブリ購入時に、これらの試験により電子銃カソードの健全性を確認した後、電子銃保管装置（保管数5個）を用いて真空を維持しつつ保管し、線型加速器のカソード交換時には、試験済みのカソードを使用する予定である。さらに実機に近い条件でのビーム試験やコンポーネントの開発を行うため、テストベンチの電子銃加速方式を直流高電圧からパルス高電圧（200 kV）に改造していく予定である。

（小林利明）

### 2-4 電子銃新型カソードの開発

線型加速器では電子銃用カソードとしてY-845カソード（Eimac/CPI社製）を使用してきたが、これまでの使用経

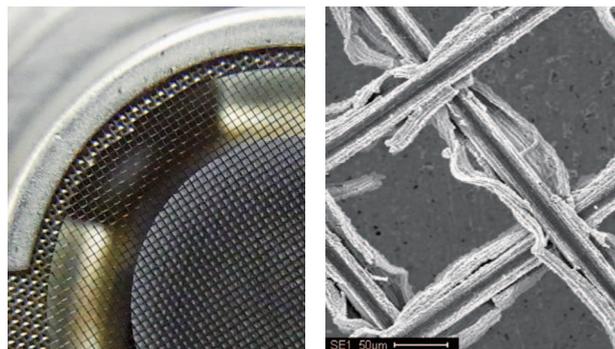


図5 使用後の電子銃カソード（左）。グリッドメッシュに付着したBa（右）。

験から品質のばらつきが大きいことが指摘されている。そこで品質の安定化に加え、現状やや不足気味である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開発を開始した。図5はグリッドエミッションの原因であるグリッドへのバリウム（Ba）付着の様子で、使用後のカソードはグリッドが黒く変色しており（左）、電子顕微鏡写真（右）を見るとグリッドメッシュ（タングステンワイヤ、線径25 μm）にBaが付着している様子が分かる。グリッドエミッションは線型加速器における暗電流の発生源の一つであるとともに、カソードでの突発的な放電、真空悪化の原因とも考えられている。

この新型カソードではビーム電流増強のためカソード径を8 mmから10 mmへ変更する。また、グリッド孔に対応させた微小凹面をカソード表面にハニカム状に形成することにより（図6）、電子ビームのグリッド透過効率を現カソードの75%から約100%に改善する（図7）。さらに同電位ダブルグリッド方式を採用しアノード側の第2グリッドへのBa付着の低減を図る。その際グリッドをワイヤ編込メッシュから孔空き金属プレートに変更することで、ワイヤの編込形状による電界のゆがみが無くなり、ビームのエミッタンスも向上することが期待される。

2011年度は前述の概念設計を行うとともに、新型カソードの重要なパーツとなる凹面付タングステンディスクを試作した。放電加工により製作された凸面ダイスを空孔率20%のタングステンディスクに押し付け、ハニカム状の凹面に成形する方法で試作したが、ダイスの製作精度が不十分、凹面成形の際に空孔が広がる、放電加工時の電極接面に炭素が付着するなどの問題があったため、現在これらの改善を検討している。2012年度は、フォトエッチングによる穴あきグリッド製作、カソードへのヒータ取り付け、アセンブリ方法の検討を経てフランジ付きカソードを試作し、通電、電流取り出し試験を行う予定である。

（谷内 努）

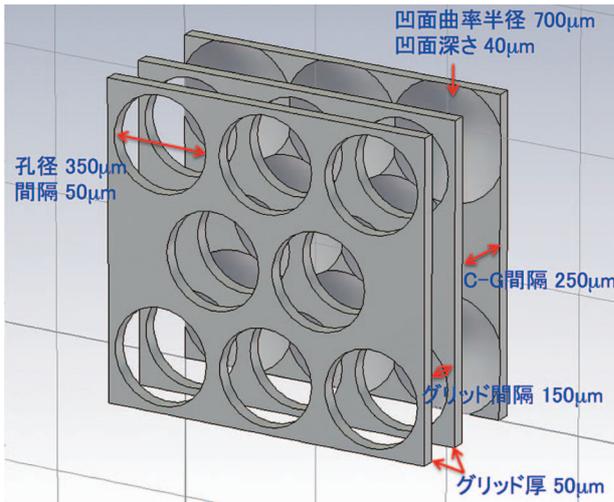


図6 新型カソードの電極構造

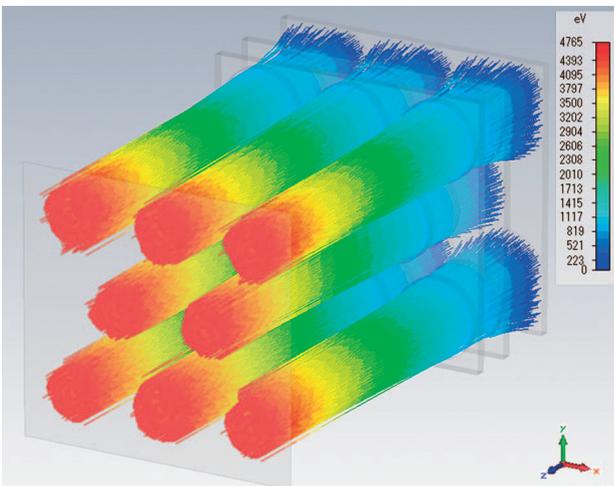


図7 シミュレーションによるビーム軌道

## 2-5 短パルス電子源のための新たなビームダイナミクス解析手法の開発

SPring-8で所有するRF電子銃試験装置などの短バンチ電子ビーム源のビームダイナミクスを解析するための新たな手法を開発した。

低エネルギーの短バンチ電子ビームの計算は、空間電荷効果を計算する際に相対論的な扱いに配慮する必要があり、 $v = \beta c$ と表した時の規格化速度 $\beta$ が大きく変化するエネルギー領域においては特に扱いが難しい。解析的手法を用いたエンヴェロップ方程式等も用いられるが、現実に即した計算は難しいため、実際のダイナミクス設計においてはもっぱら粒子シミュレーションコードが用いられる。ところが、シミュレーションコードによるエミッタンスは粒子数依存性があり、エミッタンスの値が収斂するまで粒子数を増加させると計算時間が急激に増大してしまう。この問題を回避するために、解析的手法とシミュレーション的手法を融合した方法を考案した<sup>[3]</sup>。

図8のように、初期電子バンチを長手方向、半径方向そ

れぞれに分割する。各々の交点に電子を配置し、各電子の長手方向、半径方向のエンヴェロップ方程式を全て連立させて解くものである。実際の方程式は大変複雑になるが、Octave等の数値演算ソフトウェアを用いて、シミュレーションよりも格段に短い時間で解く事ができる。更に、各電子の鏡像を考えることによって、カソードでの鏡像効果の正確な計算が可能となった。

一例として、RF電子銃空洞として世界標準になっているBNL (Brookhaven National Laboratory) タイプの1.6セル空洞を取り上げ、カソードから空洞出口までのダイナミクス計算結果を、自作シミュレーションコードと比較して示す。電荷量は0.1 nC/bunchであり、空洞出口でのビームエネルギーは5.7 MeVである。

図9は空洞出口でのバンチ形状であり、エンヴェロップ方程式の計算結果は、シミュレーション (粒子数10万個) と良く一致している。図10に、シミュレーションにおける、空洞出口でのエミッタンスの粒子数依存性を示す。粒子数を増加させてエミッタンスが収斂した状態と、エンヴェロップ方程式の結果 (右端の矢印) は一致している。

従来の解析的手法では、実際のバンチ形状分布の詳細までは計算できないことが多いが、本手法を用いると、図9のように形状の詳細まで計算することが可能である。また、シミュレーションで粒子数を無限大にした状態のエミッタンスが真値であるとすれば、本手法では図10のように真値に近いものが得られている。これは、正確なバンチ形状

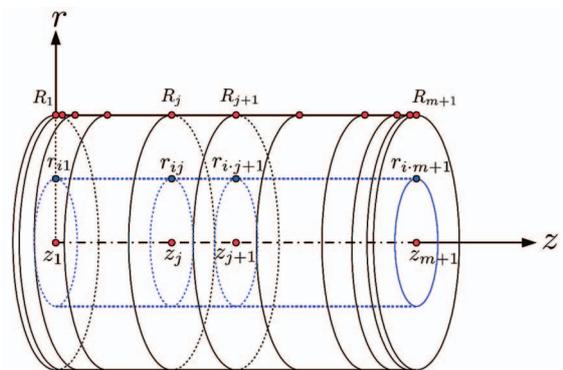


図8 エンヴェロップ方程式のための初期バンチ分割モデル

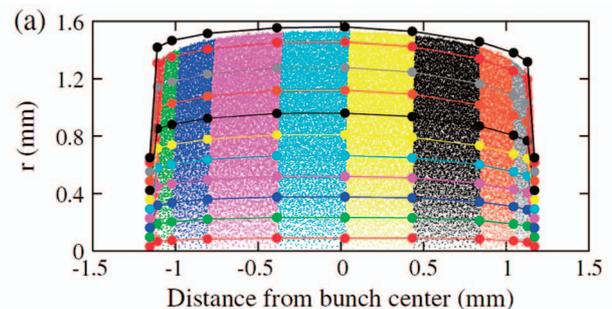


図9 電子銃空洞出口でのバンチ形状。実線がエンヴェロップ方程式の計算結果。

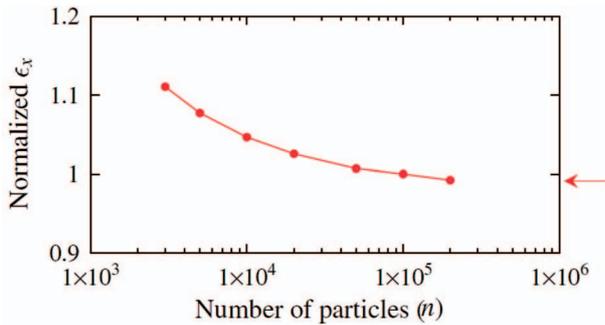


図10 シミュレーションコードにおけるエミッタンスの粒子数依存性と、エンヴェロップ方程式の計算結果

分布が計算可能であることに起因する。図10において、手持ちの計算機での計算時間は、シミュレーションで粒子数20万個の場合400時間であるのに対し、本手法を用いるとわずか30分である。

(水野)

参考文献

- [1] 柳田、他：第8回加速器学会年会（つくば市）、2011年8月、pp.446-450.
- [2] K. Yanagida et al.: to be published in Phys. Rev. ST Accel. Beams, **15** (2012) 012801.
- [3] A. Mizuno et al.: to be published in Phys. Rev. ST Accel. Beams, **15** (2012) 064201.

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 蓄積リングスキュー6極、8極電磁石システムの導入

蓄積リングのスキュー6極、8極磁場成分による非線型結合が増加傾向にあり、電磁石アライメントの経年劣化や挿入光源の増設によるものであることがマシンスタディ等

により分かってきた。蓄積リング内にこれらのスキュー磁場成分があると、水平、垂直方向の非線型結合が生じ、それぞれの方向の振動が他方に影響するようになる。この結果、放射光の輝度の低下や、挿入光源の磁極にビームが当たることによる減磁を引き起こす可能性がある。これらの影響は主として、水平方向のエミッタンスが垂直方向エミッタンスに回り込むことによる輝度の低下、入射時の水平方向の10 mm程度の振幅のコヒーレント振動による垂直方向の振動励起と垂直方向に狭い挿入光源ギャップとが相まった減磁の可能性の増大、など水平方向から垂直方向への影響が主となる。

これらの非線型結合を補正して輝度の低下や減磁の可能性増大を防止するため、スキュー6極、スキュー8極電磁石システムを導入した。2011年度に導入したシステムは、スキュー6極電磁石4台、スキュー8極電磁石2台とそれぞれを独立に励磁するための6台の直流電源により構成されている。スキュー6極、8極電磁石の積分磁場勾配の要求値はそれぞれ 2.8 T/m、1650 T/m<sup>2</sup> であり、これらを十分カバーできるよう設計した。磁極長はそれぞれ 0.2 m、0.3 m とした。

製作後、ホール素子を用いて水平方向磁場成分の三次元磁場分布を測定し、最小二乗フィッティングにより磁場勾配を求めた。測定結果から積分磁場勾配は要求値を十分に満たしており、最大積分磁場勾配はスキュー6極電磁石では要求値の1.23倍、スキュー8極電磁石では要求値の1.73倍であった。水平方向位置±10 mmの範囲内の磁場勾配の平坦度はスキュー6極電磁石で±8.8×10<sup>-3</sup>以内、スキュー8極電磁石で±1.4×10<sup>-3</sup>以内であることがわかった。

また、ローテーティングコイルを用いて、それぞれの磁場の主成分についての積分磁場勾配と磁場中心位置を求め、機械的中心位置との差を見積もった。ローテーティングコイルでの磁場測定時のスキュー6極、8極電磁石の写真を図1に示す。

積分磁場勾配と励磁電流の関係を測定し、積分磁場勾配



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。左がスキュー6極電磁石、右がスキュー8極電磁石である。

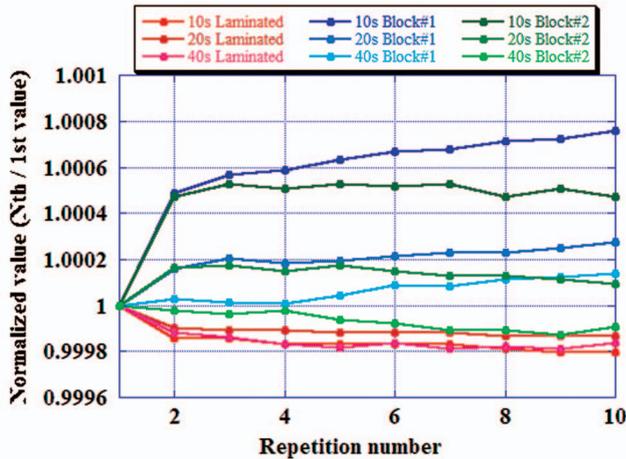


図2 初期化プロセスに対する磁場の再現性。積層型 ("Laminated") とブロック型2台 ("Block#1", "Block#2") の四極電磁石について、初期化ループの繰り返し回数(横軸)を変えて、磁場の再現性を測定したもの。最大励磁後の保持時間が10秒、20秒、40秒の各場合について、結果を示す。

の要求値を発生させるために必要な励磁電流を決定した。スキュー8極電磁石はコイルのターン数が磁極当たり108ターンと多く、磁極も多いことから励磁による発熱が多く磁極の温度も上昇する。磁場中心位置は鉄芯の温度上昇に伴い垂直方向に直線的に変化しその割合は $3.0 \mu\text{m}/\text{C}$ であり、鉄の線膨張係数から予測される値とほぼ一致した。励磁電流に対する温度上昇の割合は $5.5 \times 10^{-2} \text{C}/\text{A}^2$ で、要求磁場発生時の温度上昇は $11 \text{C}$ であり、磁場中心位置の変化量は $33 \mu\text{m}$ と見積もられた。このため、磁場中心位置の変化をアライメント精度の $50 \mu\text{m}$ 以内で使用するためには、要求値の1.3倍以内で使用することが望ましいことが分かった。これに対し、スキュー6極電磁石の励磁電流に対する温度上昇の割合はスキュー8極電磁石の場合の1/5程度であり、最大積分磁場勾配発生時においても磁場中心位置の変化は観測されなかった。

スキュー6極電磁石は4箇所の長直線部にそれぞれ1台ずつ設置した。スキュー8極電磁石はスキュー8極磁場成分が比較的強いと考えられるID07付近に2台設置した。設置の際には機械的中心位置と磁場中心位置との差を考慮し、磁場中心位置を設計軌道とアライメント精度の範囲で一致させた。2011年度中にソフトウェアの動作を含めた遠隔からの動作試験まで全て完了した。

2012年度はマシンスタディ時にビームを使って補正パラメータについてのサーベイを行い、その結果を適用してユーザー運転に供する予定である。

(深見)

### 3-2 Dゾーン長直線部用ブロック型4極電磁石の製作と磁場測定

前述したように(本年報、1. 運転軌道解析グループ、1-4参照)、2011年度に蓄積リングDゾーン長直線部にBL43LXU用に設置した極小ギャップ短周期挿入光源に対応するために新規製作した4極電磁石は製作台数が少ないことから、コストを抑えるためにブロック材からの削りだしにより製作されている。一方、蓄積リング全周に渡り設置されている電磁石は積層鋼板を用いて製作されている。蓄積リングの運転において、この製造法の違いがビーム運転に影響がないようにする必要がある。また、電磁石製造の技術的観点からも製造法の違いの影響を評価しておくことがSPRING-8における電磁石技術の蓄積上重要である。

新規製作のブロック型電磁石と予備電磁石として保管されている積層型電磁石を同一の手順で測定し比較した。比較評価は、以下の8項目について実施した；a) 励磁時温度及び磁場平衡到達測定、b) 磁場長期安定測定、c) 電磁石初期化パラメータ測定、d) ヒステリシス測定、e) 磁場中心測定、f) 磁場中心電流依存性測定、g) GL積及び多極磁場成分測定、h) 再セットアップ、再アライメント再現性。測定には項目c)の初期化パラメータ測定はホール素子プローブを使用し、その他の項目にはハーモニックコイル磁場測定器を用いた。

評価測定の結果、上記8項目中c)初期化パラメータ、d)ヒステリシス、g)GL積(励磁曲線)、a)温度平衡到達時間の4項目において製作上の明確な差異が認められた。これらの測定結果に基づき、電磁石初期化ループの繰り返し数と初期化時の最大励磁電流保持時間の最適化などが図られた(図2参照)。一方、ブロック型電磁石の磁場中心位置の再現性は、積層型電磁石の分布の $2\sigma$ 以内(建設期の測定データによる)に収まっており、また高次磁場成分の含有率も仕様値の $10^{-4}$ 以下と、積層型、ブロック型の間に顕著な差は認められなかった。

以上から、初期化パラメータ及び励磁曲線の差異を考慮して磁場設定手順や励磁電流値を制御することにより、電磁石特性の差異に起因する蓄積リングビームに対する影響は取り除くことが可能であることがわかった。また、今後局所オプティクス補正が必要となった場合の対処法についても重要な知見が得られた。

(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、垂直方向に傾いたバンチから放射される光を時間幅の短いパルスとして切り出す方法の実用化に向けた開発を進めている。電子バンチは垂直ビームサイズが水平ビームサイズの $300 \mu\text{m}$ (r.m.s.)に対して $6 \mu\text{m}$ (r.m.s.)と大変小さいので、これを垂直方向に傾け、傾いたバンチから放射される光の中央部分をスリットにより切り出すことにより時間幅の短い短パルスX線を生成することができる。

バンチを傾けるいくつかの方法のうち、垂直パルスキックをバンチに与えることによりコヒーレントな垂直方向ベータatron振動が誘起されるとともに、ノンゼロの垂直クロマチシティがある場合、さらにヘッド・テール振動が誘起され、ベータatron・シンクロtronカップリングによるビーム変調によりバンチが傾き始め、シンクロtron振動の半周期後には傾きが最大となることを利用する方法を採用している。

2011年度は可視光ストリークカメラによりターン毎の横方向からのバンチプロファイルを観測することによりバンチの傾き（以下ビームティルト）の定量的な評価方法を確立した。この方法で、垂直クロマチシティ、垂直チューンとビームティルトの相関を測定し、キック後のビームティルトの成長の様子を観測し、ビームティルト最適ターンの存在を確認した。

まずビームティルトの垂直クロマチシティ  $\xi_y$  依存性についてであるが、高い  $\xi_y$  ではビームティルトの誘起は早く起きるがそのティルト角は小さく、ターン数が進んだ後では線型性のあるビームティルトを得られないこと、また  $\xi_y < 4$  の場合にビームティルトがゆっくりと成長し、線型性のある高角のビームティルトが得られることがわかった。図3に、キック後54ターン目と20ターン目におけるビームティルトの様子を、 $\xi_y = 2, 6, 10$  の各場合について示す。

またキック後のビームティルトの成長の様子を、ティルト角、光軸が垂直方向に外れる度合い、ティルトの線型性に着目して詳細に解析した結果、ビームティルトが最大かつ垂直方向のずれが最小で線型性も最大となる、スリット切り出しに適した最適ターン数が存在することが示された。例えば、セル38偏向電磁石（B2）の光源点（加速器診断I）においては、最大ティルトは378 mrad、切り出しに適した最適ビームティルト角は273 mradである。電源

出力の制御によりビームティルトが可変で、従って短パルス光幅も可変である。挿入光源からX線の短パルス光利用を考えるとベータ関数の違いによりこの角度は0.45倍と約1/2程度になると考えられる。

なお、キッカー電源は時間ジッター30 ps以下、パルス高及びパルス幅のバラツキがいずれも1%以下で制御されており、垂直チューン、垂直クロマチシティの加速器の各パラメータをそれぞれ0.01及び0.1の再現性で設定することにより、垂直振動の振幅は2%以下で再現できることを確認している。

今後の展開として、可視光ストリークカメラの観測で判明した諸条件のもと、X線での短パルス光の検出や6極電磁石の非線形磁場に起因すると考えられる垂直ビームサイズの増大の抑制、垂直キックの高繰り返し化など、実用化に向けたプロセスを進めて行く必要がある。

（満田）

### 3-4 大口径チタンペローズ試作

SPring-8蓄積リングの真空系では外径約300 mmの大口径ペローズを使用している箇所がある。偏向電磁石下流において水平方向に約80 mm離れた軌道上の電子と放射光が同じチェンバ内を通過するため、また真空ポンプ素子を挿入する目的のために水平方向に大きな開口を有しているためである。真空チェンバと同様に大口径ペローズもアルミ合金製で、成形には大型の液圧成形装置が必要であるが、製造メーカーにおける製造装置の廃棄に伴い同形状の大口径のアルミペローズが入手できなくなった。

このため、真空系保守、改善の為に必要な大口径ペローズを確保するため、2009年度よりステンレス製溶接ペローズの開発を開始した。アルミ合金製ペローズは大気圧に耐えられるように0.6 mm厚のアルミ板を使用した成形ペローズであるためバネ定数が大きく、真空チェンバ据え付

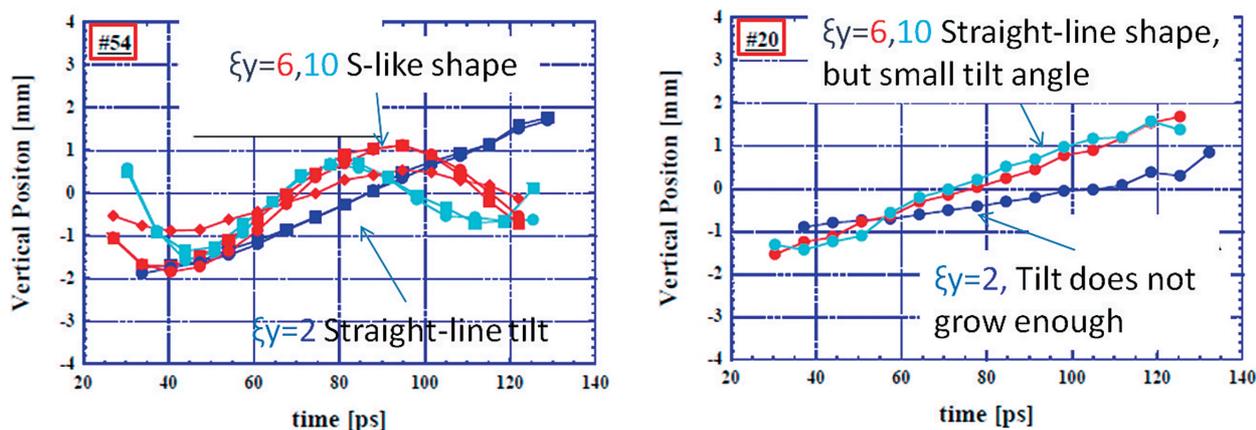


図3 可視光ストリークカメラにより観測されたビームプロファイルをもとに、ビームティルトを定量化した結果。垂直クロマチシティ  $\xi_y$  が 2, 6, 10 の各場合について示す。左図はキック後54ターン目、右図はキック後20ターン目の観測結果である。

表1 ベローズ形状の違いによるバネ定数の比較。レーストラック形アルミ成形ベローズ (SPring-8) のバネ定数は、製造時に測定したデータであり、測定器が異なる。

名称		溶接ベローズ	アルミ成形ベローズ (SPring-8)	アルミ成形ベローズ (2011年試作)	チタン成形ベローズ (2011年試作)
形状		円 310/350×0.3t×34 山	レーストラック 270/310×302/342 0.6t×6 山	楕円 200/310×230/340 0.3t×9 山	楕円 200/310×230/340 0.2t×9 山
伸縮量	ビーム軸方向	±5mm	±5mm	+5/-15mm	+5/-15mm
	軸直角方向	±3mm	±3mm	±3mm	±3mm
大気中 バネ定数実測値	軸方向	14.4 N/mm	80 N/mm	20.1 N/mm	12.2 N/mm
	短軸直角方向	255 N/mm	1500 N/mm	184 N/mm	220 N/mm
	長軸直角方向			640 N/mm	345 N/mm
内部真空 バネ定数実測値	軸方向	15.2 N/mm	---	19.2 N/mm	10.6 N/mm
	短軸直角方向	295 N/mm	---	220 N/mm	238 N/mm
	長軸直角方向			820 N/mm	510 N/mm

け時の誤差吸収が容易ではない。これに対し、ステンレス製溶接ベローズは成形ベローズに比べてバネ定数が小さく、据え付けの労力を軽減できることが期待できた。

2009年度より試作を初め、2010年度にはアルミ成形ベローズとほぼ同形状、同伸縮量のものを試作することができた。また2011年度はセル31の真空チェンバ改造時に大口径ステンレス製溶接ベローズを製作し、蓄積リングに組み込んだ。しかし、ステンレス製ベローズは、既存のベローズより5 kg以上重い25 kgを超える重さとなり、リング組込み時にアルミ成形ベローズより取扱が難しいなどの問題があるため、2011年度はこれに替わるベローズの開発に着手した。

2011年度は必要最低限の内径を確保した小さな成形ベローズを試作して、ベローズ単体での性能試験を実施した。このベローズの製作には既存大口径成形ベローズのように大型成形装置を必要としない。形状はレーストラック形より外圧に強い楕円形とし、材質もアルミよりも丈夫だがステンレスよりヤング率が低いチタンとした。また性能を比較するために、チタンと同じ成形型を利用してアルミ製の成形ベローズも製作した。

表1に試作したベローズのバネ定数を測定した結果を示す。チタンベローズの板厚は0.2 mmで、これはステンレス溶接ベローズと同程度のバネ定数を得られ、なおかつメーカーで製品として製造実績がある値である。バネ定数を見る限りでは、試作した板厚のチタン成形ベローズは2010年度に製作した溶接ベローズに匹敵する性能が得られているため、溶接ベローズに置き換え可能と判断できる。アルミの成形ベローズもバネ定数を見る限りは条件を満足している。

今後は成形ベローズ単体での寿命試験やベーキングによるクリープ試験を実施し、ベローズの耐久性を調査して実機に使えるベローズであるかどうかの判断をする。

(小路)

加速器部門  
加速器第Ⅱグループ  
佐々木 茂樹