

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。2010年度のSPRING-8加速器総運転時間は5125.6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。

2010年度の蓄積リングの運転時間は5096.3時間、ユーザータイムは4071.6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0.67%に当たる27.5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99.2%の高い値を達成した。また、トラブルとして、23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。これによる最も長い中断時間は放射光ビームラインのトラブルによるもので3時間23分であったが、その他のほとんどのものが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起因する合計時間は約1/4の7.1時間（アポート回数は9回）であった。ユーザータイム

中のトップアップ入射継続率は99.1%に達している。また、加速器及びビームラインの調整には1026.6時間を使った。

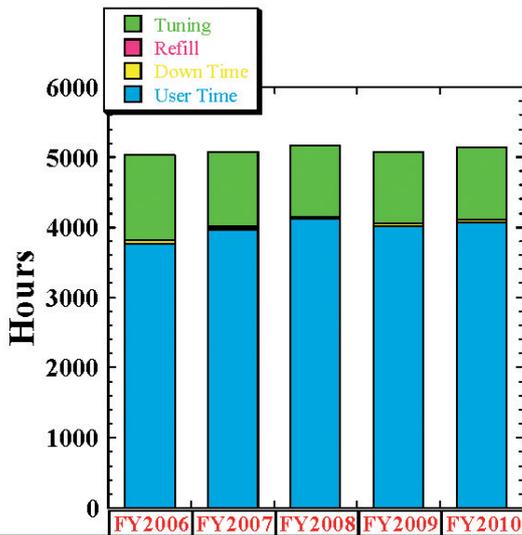
以前より減少傾向にあるマルチバンチモードの運転の割合は、2010年度は更に減少してユーザータイムの5.9%（2009年度は14.7%）となった。セベラルバンチモードでの運転の割合は56.7%で、2009年度の42.0%より増加した。セベラルバンチモードの中では、例年、際だつて多い203バンチモードでの運転がユーザータイムの30.9%（2009年度は18.9%）とさらにその割合は増加した。マルチバンチモードとセベラルバンチモードが共存するハイブリッドモードは37.4%（2009年度は43.3%）と若干減少した。マルチバンチモードの運転時間の減少の原因は、2004年以降のトップアップ運転の導入により、高電流バンチによる短いビーム

表1 蓄積リングの主要パラメータ

Energy [GeV]	8
Number of buckets	2436
Tunes (ν_x / ν_y)	40.135 / 18.345
Current [mA]:	
single bunch	12
multi bunch	100
Bunch length (σ) [psec]	13
Horizontal emittance [nm·rad]	3.4 ^{\$1}
Vertical emittance [pm·rad]	6.8 ^{\$1}
Coupling [%]	0.2
RF voltage [MV]	16
Momentum acceptance [%]	± 3 (± 240 MeV)
Beam size (σ_x / σ_y) ^{\$1} [μm]	
Long ID section	294 / 10
ID section	301 / 6
BM section	107 / 13
Beam divergence (σ_x' / σ_y') ^{\$1} [μrad]	
Long ID section	13 / 0.7
ID section	12 / 1.1
BM section	56 / 0.6
Operational chromaticities (ξ_x / ξ_y)	+1/+1 ^{\$2}
Lifetime [hr]:	
100mA (multi bunch)	~200
1mA (single bunch)	~20
Horizontal dispersion [m]:	
Long ID section	0.103
ID section	0.107
BM section	0.032
Fast orbit stability (0.1 – 200Hz) [μm]:	
horizontal (rms)	~4
vertical (rms)	~1

^{\$1} Assuming 0.2% coupling for “Low Emittance Optics”

^{\$2} With bunch-by-bunch feedback



	FY2006	FY2007	FY2008	FY2009	FY2010
Acc. Operation Time	5025.0	5063.6	5050.1	5068.8	5125.6
Sr Operation Time	5012.3	5022.3	5133.3	5035.4	5096.3
Tuning& Study (Acc. &BL)	1213.8	1065.0	1008.2	1019.1	1026.6
Refill	7.6	9.5	10.1	6.3	5.0
Down Time	38.4	29.2	31.0	34.8	27.5
Mean Time Between Fa	106.0	14.4	143.2	122.9	178.4
Achieved User Time	3770.0	3969.3	4110.9	4014.9	4071.6
Planning User Time	3816.0	4008.0	4125.0	4056.0	4104.0
Availability (%)	98.8	99.0	99.0	99.0	99.2

図1 過去5カ年度の運転時間の推移

寿命を気にする必要がなくなったために、パルス放射光利用実験がいつでも実施できる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。この傾向は今後も続くと思われる。2010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 1.5×10^{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 9×10^{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。

(大熊)

1-2 蓄積リング入射効率の改善

最近の放射光光源リングでは、その性能を遺憾なく発揮するためにトップアップ運転が不可欠になっている^[1,2]。トップアップ運転では利用運転中も常時ビーム入射が行われるので、放射線安全や挿入光源磁石列の減磁の観点から高い入射効率が要求される。SPRING-8蓄積リングにおいて、最近実施した入射効率の改善について報告する。

2010年1月までは、蓄積リングはクロマティシティ $(\xi_x, \xi_y) = (2, 6)$ で運転されていた。垂直クロマティシティが6という大きな値で運転されていたのは、バンチ電流値の高いフィリングモードにおいてシングルバンチの不安定性を抑制するためであった。ハイブリッドフィリングモード”1/7 filling + 5 single bunches”（シングルバンチ電流値3 mA）においては、シングルバンチとトレイン（マルチバンチ）部のバンチ電流値の違いが大きいいため、bunch-by-bunchフィードバック（BBF）で両者の不安定性を同時に抑えることが難しい状況にあった。この問題を解決するため、バンチ電流値に応じて減衰率を自動的に変えるアッテネータを開発し^[3]、高いシングルバンチ電流のハイブリッドフィリングモードでもBBFで不安定性を抑制できるようになった。この結果、垂直クロマティシティを6から2に下げることが可能になり、その効果として利用運転中の入射効率において約10%の改善をみた（図2参照）。

クロマティシティ低減による入射効率改善の原因を究明し更なる向上を図るため、大振幅の電子ビーム運動に関するスタディを行った。図3は、水平方向に振幅を与えた時のベータトロンチューンの動きを表している。蓄積リングでは6極電磁石の非線形磁場のため振幅に応じてベータトロンチューンがシフトするが、振幅を-16 mmから+11 mmまで変えた時のものを表している。振幅0 mmが線形ベータトロン振動のチューンで、図3では通常の運転点(40.14, 18.35)にあたる。図3には、3次及び4次共鳴線が描かれている。この内、特に3次共鳴線の電子ビーム運動に対する影響が大きい。垂直クロマティシティ $\xi_y = 6$ の場合のチューンシ

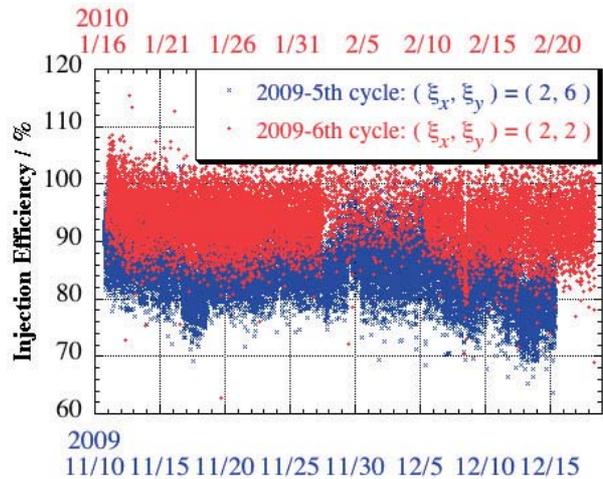


図2 利用運転中の入射効率

フトは $\xi_y = 2$ の場合に比べて大きく、大振幅の電子ビームのチューンはそれだけ3次共鳴線 $\nu_x + 2\nu_y = 77$ に近づいている。この共鳴線による水平振動と垂直振動の結合により、入射ビームのように水平方向に大振幅を持つ電子は垂直方向にも大きく振動することになる。結果として、大きな垂直振幅を持った電子はリング内の垂直障壁に衝突して失われることになる。以上のように、垂直クロマティシティを下げることによって、運転点が共鳴線に接近することを避け、入射効率の改善を図った。

電子ビーム大振幅運動のスタディを通して、運転点の重要性を改めて認識した。例えば、蓄積リングの運転点は通常 $(\nu_x, \nu_y) = (40.15, 18.35)$ に設定されていたが、 $(\nu_x, \nu_y) = (40.14, 18.35)$ に変更するだけで入射効率が数%改善することが観測された。これは、次のように説明される。図4は、バンパ電磁石を用いて水平方向に電子ビームをキックした時の誘起される垂直振動のスペクトルである。ここで、ス

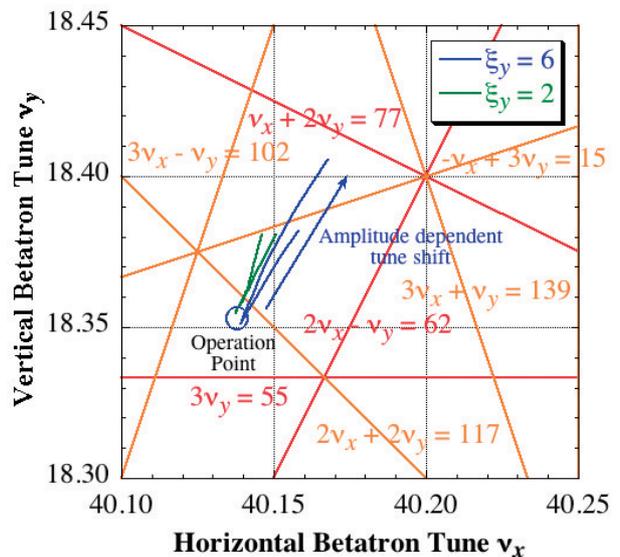


図3 大振幅の電子ビームのベータトロンチューンの動き

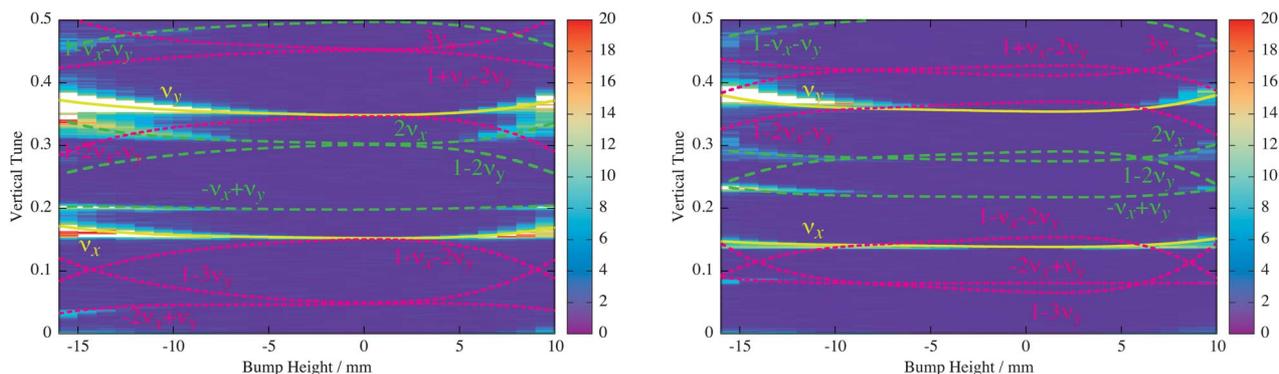


図4 バンプ電磁石による水平方向キック後の誘起される垂直振動のスペクトル。左： $\nu_x = 40.15$ 、右： $\nu_x = 40.14$

キュー6極磁場による結合モード $2\nu_x$ に着目すると、運転点(40.15, 18.35)の場合の方が強く励起されていることが分かる。これは、運転点(40.15, 18.35)が(40.14, 18.35)に比べてスキュー6極磁場共鳴 $2\nu_x - \nu_y = 62$ に近いこと、影響が大きくなっているからである。この結果、 $\nu_x = 40.15$ の場合の垂直振動は $\nu_x = 40.14$ に比べて大きく励起され、入射効率の低下に至る。運転点を有害な共鳴線から離れるよう注意深く選ぶことによって、利用運転中は93%から95%の高い入射効率を維持しているが、挿入光源磁石列ギャップが閉じられると、その磁石列磁場によるチューンシフトにより共鳴線に近づき、入射効率が低下することが観測されている。現在、挿入光源磁石列ギャップ駆動により入射効率が低下しないように、挿入光源の近くの4極電磁石に補助電源を追加して、これを用いて挿入光源によるチューンシフトを補償することを計画している。

(高雄)

1-3 水平キッカー電磁石による蓄積ビームの入射振動抑制

蓄積リングへのビーム入射時には水平方向にバンプ軌道を生成するために4台のバンプ電磁石をパルス励磁する。このバンプ軌道がバンプ電源の励磁タイミングのジッターなどにより閉じていない場合、トップアップ入射時に蓄積ビームが振動してしまうなど、ユーザー運転に悪影響を及ぼす。バンプ電磁石の磁場の立ち上がり付近では、励磁波形や励磁タイミングを4台完全に一致させることは難しく、バンプが閉じていない瞬間が生じるため、スパイク的なビーム振動が発生している。この振動を打ち消すために、速いキッカー電磁石の開発を行っている。同一の蹴り角に対する補正効率が大きい水平ベータatron関数の大きな場所としてセル36直線部上流に補正用高速パルスキッカー電磁石を設置している。ここで振動の角度と逆の角度のカウンターキックを与えることにより蓄積ビームの振動を打ち消す。この際に必要とされる蹴り角は $0.8 \mu\text{s}$ のパルス幅にて $30 \mu\text{rad}$ (3.2 mT磁場相当)である。

2009年度までに渦電流を低減した高速パルスキッカー用

セラミックチェンバの製作・設置及びキッカー電磁石の製作・設置を終え、2007年度～2009年度にかけて開発を行った高速パルスドライブ電源の開発機も試験が完了している。2009年度の時点では、開発機により達成できた蹴り角は $0.8 \mu\text{s}$ のパルス幅にて164 A/coilであった。これは、中心磁場にて2.52 mT相当であり、 $17.6 \mu\text{rad}$ のキックをビームに与えることができた。パルス幅が短いため大電流出力を実現することは難しく、目標値の半分の仕様にとどまったが、2010年度には、新たに電流値の1.5倍増を目指し目標仕様値を満たしたうえで長期的に安定して動く実機電源の開発を進めた。

開発に成功した電源のスペックは $0.8 \mu\text{s}$ のパルス幅にて247 A/coilの出力が実負荷(チェンバ負荷あり)の状態が可能である。チェンバが無い場合には270 A/coilの出力が可能である。この出力は、磁場にて3.16 mT相当であり、蹴り角としては $33.22 \mu\text{rad}$ に達し、目標仕様値を十分に満たす。この高速パルスキッカードライブ電源を用いてビーム試験を行った。振動抑制のためには振動振幅がゼロで角度が最大のタイミングでキックを与える必要がある。まず始めに、設定されたチューン値に対して最適なカウンターキックを与えられるよう、ビーム軌道がゼロクロスするタイミングの調査を行い、励磁のタイミングをビーム入射から数えて3ターン目に決定した。次に、その周回数のタイミングにて精密なタイミング調整を100 nsのステップで行い最適なキックタイミングを決定し、ビームにカウンターキックを与え、水平振動を打ち消すことができるか検証をした。図5がカウンターキック直後のターンにおける水平振動の抑制の様子である。水平残留振動のRMS値を、タイミングをシフトした時の振動抑制の様子の変化とともに示している。最適なタイミングにて-67%の振動抑制効果が見られ、ほぼバックグラウンドレベルの0.1 mm (RMS)まで低減できていることが分かる。さらに後段のターン数において抑制効果がどのように推移しているか確認した様子を図6に示す。ターン数が進んだ後でも振動は抑制されたままであることが分かる。

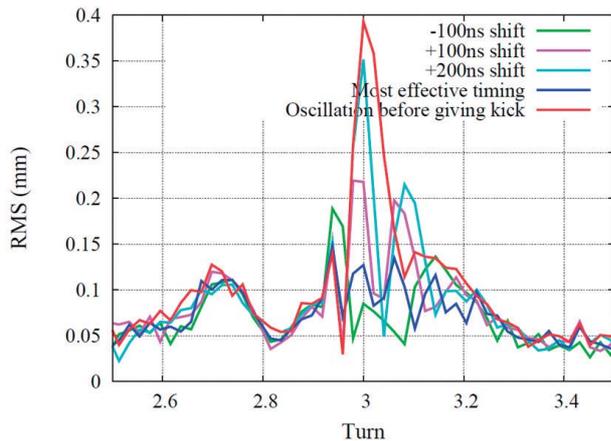


図5 カウンターキックを与えた直後の水平振動抑制の様子。タイミング調整により振動が抑制されたことを示す

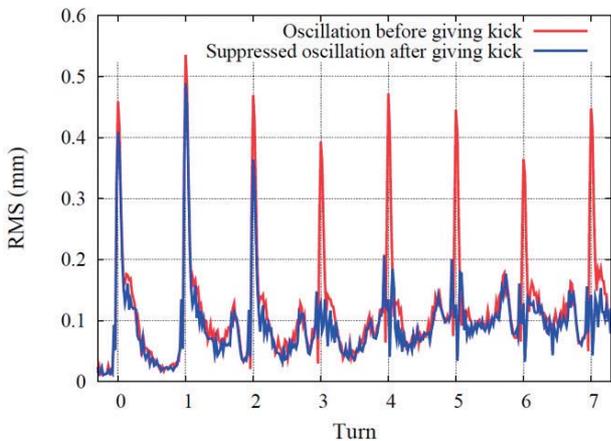


図6 水平振動抑制の様子。横軸はバンパ励磁後のビームの周回数、縦軸は水平ビーム振動の振幅（RMS値）

今後、例えば10 mA程度の大電流シングルバンチを蓄積してユーザー運転を行うような場合には、ビームへの擾乱を極力抑えてトップアップ運転を安定的に継続させるために、この水平振動の抑制が必須の技術となる。ビーム試験により水平振動抑制のための高速パルス電源の性能が十分であることが確認されたため、今後は、長期に故障なく運転できることを確保するべく、開発を継続する。また、バンパタイミングジッターによるスパイク振動はジッター調整の精密化によりスパイクがより先鋭となってきたため、800 ns以下のより高速のパルスキッカーが求められている。この要請に応えるため、更なる大電流、高速パルス電源の開発を進めていく予定である。

(満田、早乙女)

1-4 垂直キッカー電磁石を使った短パルス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ことを検討している。この方法は、電子バンチの垂直

エミッタンスが小さいこと、垂直クロマチシティが0でない場合にバンチにヘッド・テール振動が誘起され、シンクロトロン振動の半周期後にはその傾きが最大となることの二つを利用しており、傾いたバンチから放射される光の中央部分を切り出し時間幅の短い短パルスX線を生成する。2007年度よりX線生成スキームの実現のために必要となるパルス電源の開発を進め、蓄積ビームでの実証試験を重ねている。

将来の実用化を視野に入れた場合、短パルス光ユーザーと通常の放射光ユーザーを共存させる必要がある。短パルス光ユーザー用の1 mAシングルバンチと通常ユーザー用のバンチトレイン（半周分2.4 μ s）を含むハイブリッドファイリングでの適用も検討している。また、レーザー光と同期したポンププローブ実験も検討されていて、ポンプ用レーザーと同程度の繰り返しでキックすることが必要である。これらを実現するためには、ビームをキックするためのパルス幅・強度及び繰り返しに対して、ビーム周回時間の半分の2.4 μ s以下という短いパルス幅で、9.3 mTの強磁場を150 Hz以上で発生させることが要求される。これにより強い垂直パルスキックを8 GeV電子ビームに与え、振幅1 mm以上の垂直振動をビームに誘起することが可能になる。

2008年度までに渦電流を低減したセラミックチェンパに小型空芯コイルを用いた垂直キッカーを製作・設置し、短パルス大電流ドライブ電源の試験機にてビーム試験を行い理論通りのビームチルトが得られるか検証した。

2009年度には、ビームチルトを増大させるために大電流ドライブ電源の出力増強の技術開発を進め、2.5 msのパルス幅にて最大440 A/coilの出力に成功し、実ビームで2.1 mmの垂直振動を励起することに成功した（0.08 mradの垂直キックに相当）。

2010年度の成果の一つは、更なる振動振幅の励起とビームのチルトを実現するため高速パルス大電流実機電源の開発を進め、1.8 μ sパルス幅にて500 A/coilの出力、2.5 μ sパルス幅にて640 A/coil（チェンパ実負荷にて）の出力を達成したことである。このパワーは13.2 mT相当の磁場で0.14 mradの蹴り角となり、4 mmのビーム振動を引き起こすことをビーム試験にて確認した。さらにこの電源は200 Hz繰り返しにて出力することが可能であり、このスペックは当初目標としていたものを十分に満足するものである。

ビームチルトを決めるパラメータには、キック量、垂直クロマチシティ値、キック後の観測周回数の3つがある。これまでのビーム試験において、最大チルトを得るためのこれらの最適な組合せを探索し、その結果、強いキック量による大きい振動振幅と低い垂直クロマチシティ値にて、ビームチルトをゆっくりと成長させる必要があることが理解されている。

2010年度はこのビームチルトを引き起こすパラメータの

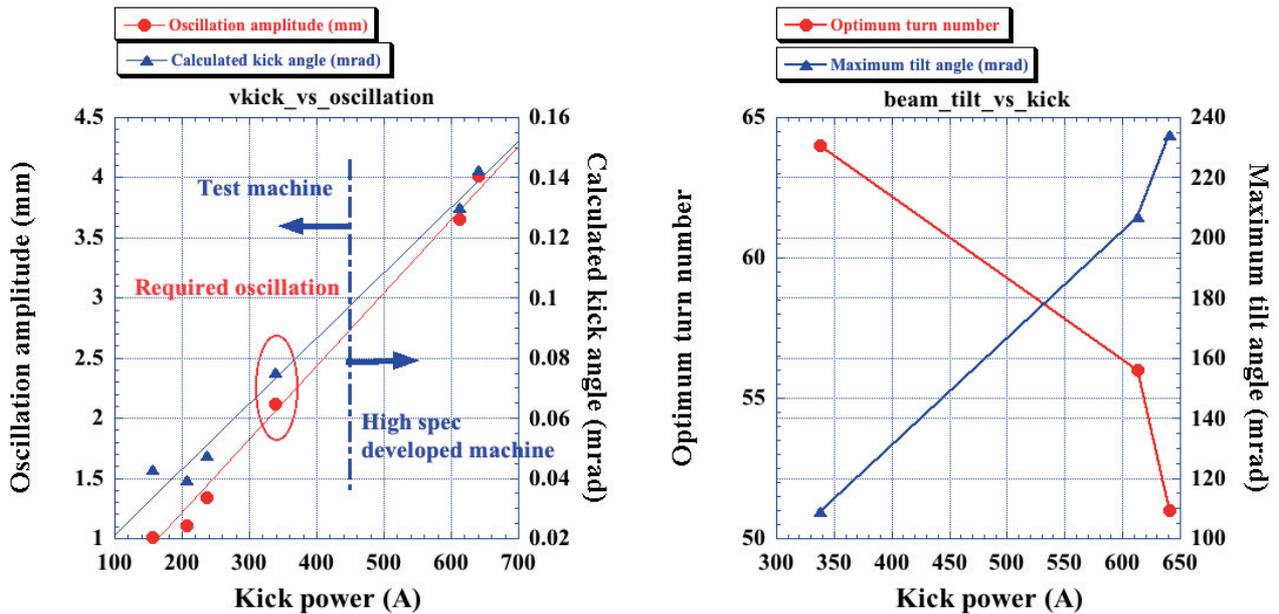


図7 左図：垂直クロマチシティ ($\xi_y = +2$) の場合について、キック量 (横軸) に比例したビーム振動振幅 (縦軸左目盛) と蹴り角 (縦軸右目盛) を示した。線型性を持って振動振幅が増加していることがわかる。右図：最適ターン数 (縦軸左目盛) 及び最大ビームチルト角 (縦軸右目盛) のキック量依存性を示す。指標GTVが最大となるサンプルを抽出している

最適化へ向けて、ビームチルトの様子を定量的に判断するための指標値を導入し、キック量に依存したパラメータの定量的な評価を行った。まず、ビームチルトの定量化であるが、ビームチルトの良し悪しはビーム中心からの傾き(T)とチルトの直線性(線型fittingで得られた直線からのずれにより評価)(L)、光軸中心からのずれ(S)により目視にて判断していた。これらをすべて数値化し、GTV (Good Tilt Value) = T/LSで定義される指標を導入し、この値によって最大ビームチルトが得られる最適ターン数、垂直クロマチシティ値、最適キック量の評価を行った。クロマチシティ値が高い場合、チルトの成長を早いターン数で観測できるが $\xi_y = 6 \sim 10$ においてはチルトの線型性の評価値(L)が悪化しGTVを下げることになるため、クロマチシティ値は4以下が良いと判断している。また、GTVが最大となる短パルス光を切り出す最適ターン数はキック量に依存し、キック量が増してチルトが大きくなるにつれターン数の前倒しが見られている。図7に、電源開発進展に伴いキック量に比例したビーム振動振幅が増大した様子と、ビームチルト及び最適ターン数のキック量依存性の結果を示す。キック量の増大は電源開発進展によるところである。

現在のビームチルトからは、50 μm スリットにて切り出される短パルス光の時間幅は、最短で1 psを下回っている可能性も考えられる。現在、観測に用いているX線ストリークカメラの分解能の評価を行っており、これをふまえた上で、短パルス光の時間幅のビームチルト依存性を測定する予定である。このため、ビームチルトが飽和するまでのビーム振動振幅の増大を目指し、さらなる電源出力の増強、そして最大チルトの生成を目指す。また、X線光学系の最

適化によりパルス幅の測定精度の向上を目指す。さらに切り出された放射光の試験利用を行う。現状のスキームではビームチルトを誘起して短パルス光を得た後も振動が継続しているため、この振動が減衰した後にしか次のキックを与えることができない。ビームチルト誘起後のビーム振動を早い段階で抑制し、高繰返しにて再びビーム振動を誘起する逆キックスキームの確立を進めていく予定である。

(満田、早乙女)

1-5 不安定性抑制

横方向のビーム不安定性は、大きな平均電流や、高いパンチ電流を蓄積した際に発生し、水平や垂直方向のベータatron振動を引き起こす。この不安定性に対して、SPring-8蓄積リングでは、SPring-8の開発したbunch-by-bunchフィードバック (BBF) を用いて抑制し、安定的な大電流蓄積を実現している。BBFは、ビーム位置をターンごとに検出し、その位置の履歴をもとに、減衰に必要なキック量を計算してビームにキックを与え、その振動を抑制するシステムであり、この処理をバンチ毎に行っている。BBFは、十分な蓄積電流を達成するとともに、リングパラメータの自由度の広がりによる入射効率の改善や、入射に伴うビーム振動の高速での減衰を実現しており、安定的なトップアップ運転に大きく寄与している。

このBBFの核となっているのは、SPring-8で開発した、デジタル信号処理装置である。これは500MHzの高パンチレートの領域では初めてとなるFPGAを用いた装置であり、これまで、国内外10カ所近くの研究所・施設に技術移転を行ってきた。

さて、10 mA/bunch程度の大電流の孤立バンチと、その1/200の小さなバンチ電流をもった多数のバンチからなるバンチ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ユーザー及び高デューティの平均電流を必要とするユーザーの要求を両立できるため、利用者から長い間、要望されていた。しかし、このフィリングでは、大電流バンチの引き起こす非常に強いモード結合不安定性と、トレイン部が引き起こすresistive-wall不安定性などのマルチバンチ不安定性とを、BBFにより同時に抑制することが必須である。このため、BBFでは、この数年の間、以下の様な開発を行ってきた。

1) ビーム位置モニタの信号強度は、バンチ電流に比例するが、バンチ電流は2桁におよぶ大きな幅を持っているので、モニタ信号を直接にBBFが処理することは非常に困難である。そこで、SPring-8のデジタル信号処理装置を元にして、バンチ電流をバンチ毎に測定し、それに応じてモニタ信号の強度をバンチ毎に調整する、バンチ電流感応型自動アッテネータを開発した(図8)。これをモニタとBBFの間に設置することにより、モニタ信号は、バンチ電流によらずにほぼ一定となり、BBFにより処理することが可能となった。

2) 入射時には水平方向に大きな振動が発生するが、この振動のもとで、大電流バンチの強い不安定性を制御する必要がある。そのために必要な、強力な高効率水平キッカーを開発した。

これらの装置を用いて、2010年度において、トップアップ入射の条件で、6 mA/bunchの孤立バンチと、94 mAのバン

チトレインとからなるフィリング、トップアップ入射を行わない場合には、10 mA/bunchの孤立バンチ及び90 mAのバンチトレインでの蓄積を達成した。2011年度では、まず、6 mA/bunch + 94 mAで利用運転の試験を実施するが、水平キッカーを増強することにより、10 mA/bunch + 90 mAでのトップアップ運転試験を行う予定である。

(中村、小林和)

1-6 加速器診断

加速器診断 I (BL38B2) のX線プロファイルモニタを用いて、2010年度に増設されたBL07LSU長尺アンジュレータの安定運用のために実施された長尺アンジュレータ磁場による共鳴励起調査や、SPring-8アップグレード計画が目指す極低エミッタンスビームに関する試験のための蓄積リング低エネルギー運転試験(6 GeV及び3 GeVでの運転試験)で、ビームサイズ測定によるエミッタンス診断を行った。トップアップ運転での蓄積ビーム電流の安定度向上に役立てるために、可視光放射光を用いた高精度バンチ電流モニタの開発を進めた。約2 ns間隔で2436個存在する蓄積リングの全てのRFバケット内のバンチ電流を計測するのに必要な時間分解能を実現するため、光子検出器にMCP-PMTを用い、信号処理回路にTACとADCを3台ずつ併用する光子計数システムを構築した。加速器診断 I で試験測定を行い、回路系の処理速度やバンチ電流測定精度の評価を行った。またXFEL/SACLA線型加速器からの高品質ビームを蓄積リングに安定的に入射するのに必要となる高精度入射ビーム診断技術を確認するために、加速器診

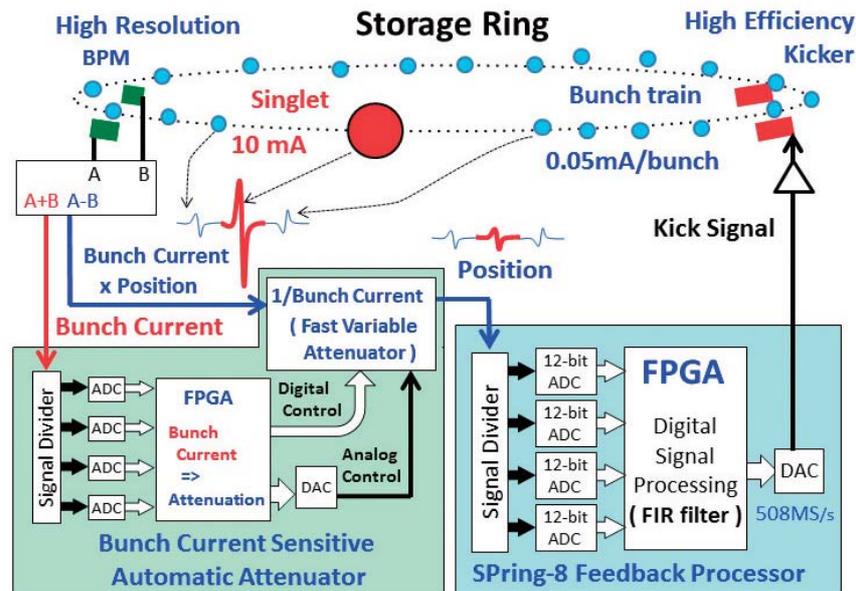


図8 バンチ電流感応型自動アッテネータ。左下が自動アッテネータであり、右下が、BBFである。大電流孤立バンチのシングルバンチ不安定性と、バンチトレインのマルチバンチ不安定性を同時に抑制し、6 mA/bunchを含むフィリングでのトップアップ運転を実現した

断Ⅰの可視光ストリークカメラを用いてシンクロトロンからの入射ビームをターン毎に観測する測定試験を行った(図9)。

加速器診断Ⅱ(BL05SS)で単色X線を実験ハッチに輸送する放射光輸送系を2009年度に完成させたのに続き、実験ハッチ内に高速光モニターとX線ストリークカメラとを整備した。高速光モニターは、加速器診断Ⅱ挿入光源^[4]の高次光放射の空間分布を観測することにより、電子ビームのエネルギーの広がりや水平エミッタンスをリング周回毎に同時計測するモニターであり^[5]、大電流シングルバンチビームなどの不安定性の診断、XFEL/SACLA線型加速器から蓄積リングへの高品質ビームの入射調整のための診断などを行い、蓄積リングのビーム性能向上と運転・調整の効率化に役立っている計画である。2010年度は、モニターを構成する機器を設置し、シンクロトロンからの入射ビームを観測するビーム試験を行い、入射ビームなど微小電流バンチに対する測定感度の評価、高次光の空間分布の観測に用いる光学系の性能評価を進めた。X線ストリークカメラを高感度化するために、放射光X線をストリークカメラの入射スリットに集光するシステムを実験ハッチに設置した。X線集光システムは、集光素子に用いるフレネルゾーンプレート(FZP)、FZPの位置調整を行う機構、及びこれらを格納する真空チェンバから構成される。引き続き2011年度は、X線集光システムを用いて電子バンチのシングルターン・シングルショット観測、入射ビームなど微弱な電子バンチの観測試験を進める。

短い停止期間の蓄積リング立ち上げなどに有用な迅速な光軸安定化(クイックスタート運転)のために、加速器診断Ⅱ光学ハッチ1に挿入光源の光軸を常時監視するためのモニターとして、ダイヤモンド薄膜スクリーンで挿入光源放射光ビームを可視化して測定する高精度光軸モニターを製作

した。2011年度早期の運用を計画している。

(高野)

1-7 アップグレード計画のための極低エミッタンスラティスの検討

SPring-8アップグレード計画では、硬X線領域における「回折限界」光源の実現を、究極の目標に置いている。このような放射光源を実現するには、電子ビームのエミッタンスを $10 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ オーダーにまで低減させる必要がある。このために、蓄積リングの電磁石配置(ラティス)を全面的に変更し、現在のDouble-Bend型からMulti-Bend型への改造を行う案を検討している。電子ビームのエネルギーについても、現在の8 GeVから下げることによって(i)エミッタンスとエネルギー広がりの低減(ii)電磁石設計上の制約条件の緩和(iii)放射光アブソーバの熱負荷の軽減(iv)ダンピングウィグラーによるエミッタンス低減効果の増進を図る。Double-Bend型の検討から始めて、Triple-Bend型、Quadruple-Bend型とラティスのMulti-Bend化を進めながら問題点を洗い出し、解決手法を検討しながらその実現可能性を探ってきた。特に、ビームが安定的に周回できる動的安定領域を確保するため、非線形6極磁場の最適化に注意を払ってきた。現在、Sextuple-Bend型のラティス構造を採用して運転エネルギーを6 GeVに下げ、 $60 \sim 70 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ のエミッタンスを実現させる案を、第一候補として検討している。アンジュレータ利用時にはダンピング効果によってエミッタンスがさらに低下することが期待され、長直線部に設置されるダンピングウィグラーと組み合わせて、 $10 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ 台に到達できる可能性がある。

このような極低エミッタンスラティスを構成するには、強い磁場勾配を持つ4極、6極電磁石を、限られたスペースに多数設置しなければならない。磁場の干渉などにも注

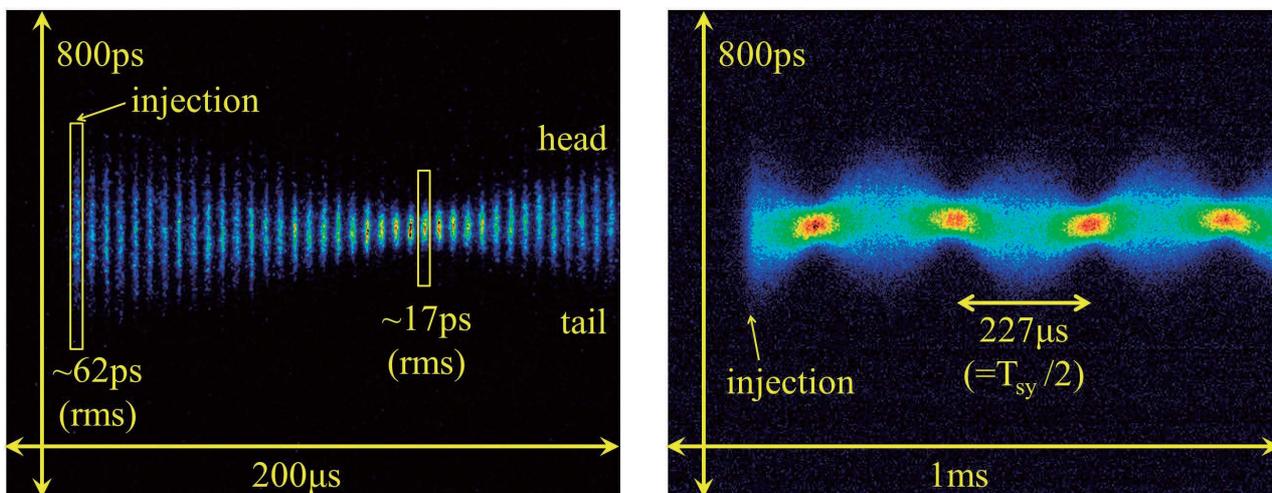


図9 可視光ストリークカメラでターン毎に測定した、シンクロトロンから入射されたビームのバンチ長。単バンチビームの入射と廃棄を繰り返し、100回の積算を行って取得したデータである。縦軸がバンチ長を表す時間軸で、上側がバンチの前方である。横軸は入射後の経過時間を表す時間軸であり、各々 (a) 200 μs 、(b) 1 msに相当する。入射直後に約62 ps (rms)であったバンチ長が、周回を重ねる間に、シンクロトロン振動(振動数2.2 kHz)により伸縮を繰り返す様子が明瞭に観測されている

意しながら、必要な磁場勾配を出せる電磁石の設計と配置の最適化が検討されている。またラティスのMulti-Bend化を進めたことで、電磁石の設置誤差に対する感度が上がっている。電子ビームの平衡軌道と6極磁場中心は、10 μm程度以下の精度で一致することが要求され、高精度のビーム位置モニタやアラインメント技術などの検討・開発も始められている。そのほか、計画実現の鍵となる入射システム、高周波加速システム、真空チェンバなどに関しても、検討が進められている。

(早乙女)

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al.: Proc. of EPAC04, Lucerne, Switzerland (2004) 222.
- [2] H. Ohkuma: Proc. of EPAC08, Genoa, Italy (2008) 36.
- [3] K. Kobayashi and T. Nakamura: Proc. of ICALEPCS2009, Kobe, Japan (2009) 659.
- [4] M. Masaki, et al.: Proc. of SRI09, Melbourne, Australia (2010) 560.
- [5] 正木、他：第6回日本加速器学会年会（姫路市）、2010年8月、p.596.

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

SPring-8蓄積リングトップアップ運転へのビーム入射は、電流値が設定を下回ったときに入射を行う電流値優先モードで運転しており、セバラルバンチモードの時で約15秒~30秒に1回、マルチバンチの時で1分に1回程度となっている。蓄積リングの蓄積電流の安定度は0.03%p-pである。振り分け運転を行っているNewSUBARUでは蓄積電流によるが6、7秒に一度の入射を行っている。トップアップ入射中の入射ビームエネルギーの安定度は、0.01%rmsであった。NewSUBARUでの1.5 GeV運転は現在夜間のみ行っているが、1日1、2回の入射を行っている。

両蓄積リングに入射するビームパラメータは、昨年までと同じく表1の通りである。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1 nsビームを用意している。ただしNewSUBARU入射時は、入射路途中のスリットでビーム電流を約1/3に削減する。

2010年における線型加速器総運転時間は、5124.3時間であった。図1に2010年度のサイクル毎のインターロックフォールト統計を示す。左のグラフは1日あたりの回数で、全サイクルにおいて1日0.5回以下となっており、今まで

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%

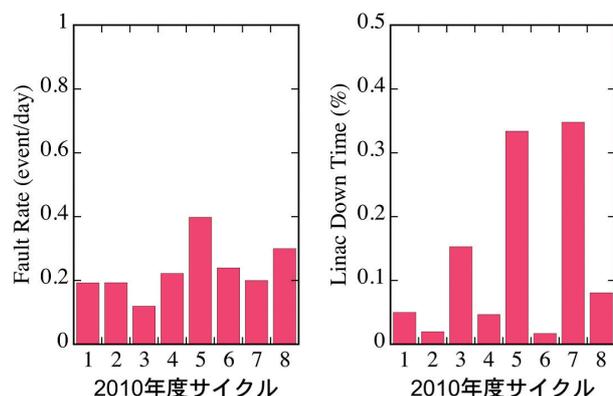


図1 インターロックフォールトの頻度

で一番少ないフォールトレートになっている。フォールトの原因のほとんどはクライストロンモジュレータによるものであるが、13台のモジュレータで3日に1回程度まで下がっている。2009年夏にサイラトロンスタンドの更新を行ったことによりモジュレータ筐体内での放電がなくなり、そうした放電によるノイズが誘発していたと思われるフォールトが減っているが、交換したスタンドについているサイラトロン冷却用ファンの電源がノイズによりダウンすることがあり、改修を予定している。

図1右のグラフは線型加速器のフォールトを原因とするトップアップ運転の中断時間の比率である。前半のサイクルでは大きなトラブルはなかったが、後半のサイクルでは前述のサイラトロン冷却用ファン電源の故障により交換を伴ったためダウンタイムとしては大きめであるが、この中断時間はほぼ例年並であった。

(鈴木)

2-2 加速器の改良

2-2-1 電子銃システムの二重化の完成

電子銃カソードの交換には、真空排気作業、カソード活性化などを含め、約3日運転を停止しなければならなかった。この時間を大幅に短縮するために行ってきた電子銃システムの二重化が終了した。

第2電子銃は本体の設置を2007年に行い、2008年度に専用の電源や高圧デッキを製作し、2009年度に設置、調整を行った。2010年度にインターロック信号の自動切り替えシ

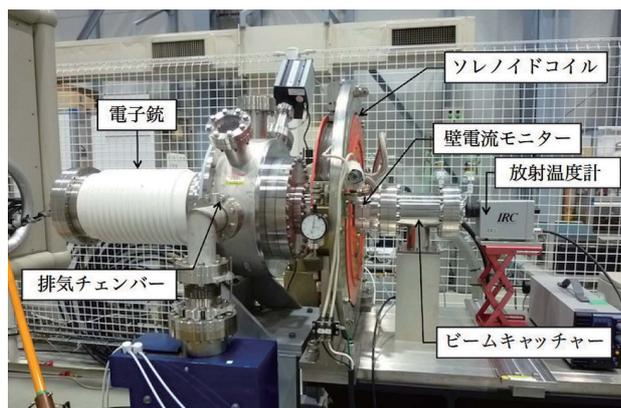


図2 カソード温度測定・エミッション試験システムの外観

システムが完成し、電子銃の二重化が終了した。通常の運転時にはほぼ第1電子銃を用いて運転しているが、第2電子銃の健全性は中、長期の点検調整期間の前後で確認し、さらにカソードヒータには原則として常時通電しており、何時でも電子ビームを出せるよう待機している。

2-2-2 電子銃カソード試験システム^[2]

近年、線型加速器の電子銃では、ヒーター・グリッド間の接触により意図せぬビームが出射される問題が幾度か発生している。この不具合の一因として、カソードが高温すぎてバリウムの昇華が過剰に起こっているといった事も考えられるが、これまで実際にカソード温度がどの程度になっているかは確認されてこなかった。

そこで、電子銃テストスタンドを整備し、放射温度計を用いたカソード温度の測定及びエミッション試験を行える、図2のようなシステムを構築した。

運転に使用している電子銃では、 -180 kVの高圧パルスを電子銃に印加しているのに対し、テストスタンドはDC電源で、さらに絶縁の関係もあり -70 kV程度までしか印加する事ができない。このような状況下のテストスタンドにおいてライナック電子銃と同形状の電子銃を使用した場合、空間電荷効果により十分なエミッション電流が得られず、ビームの発散も問題となってくる。テストスタンドで確実に3 Aのビーム電流を得る為には、最大加速電圧である -70 kVよりも低い電圧で空間電荷制限状態に達し、かつ3 Aの電流が確保できていなければならない。そこで、電子銃シミュレーションソフトE-GUNを用いてウェネルト電極及びアノード電極の最適化を行った。

また、空間電荷効果によるビームの拡散を補正して全てのビームがビームキャッチャーで補足できるよう、ビーム輸送部をCST MICROWAVE STUDIOによるシミュレーション結果に基づいて設計した。このビームキャッチャーは可動式で、カソード温度を測定する場合はビーム軸から外れて、光学窓からカソード表面が見えるようになる。

この電子銃カソード温度・エミッション試験システムを

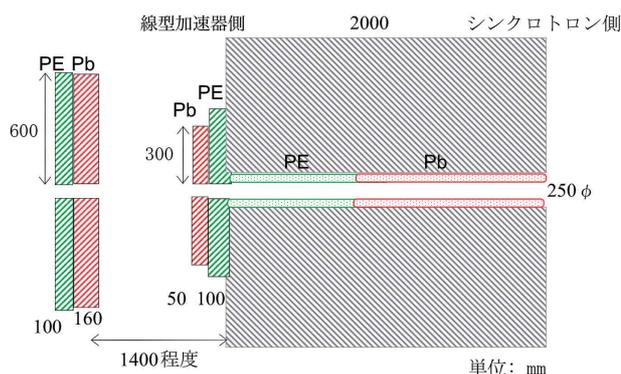


図3 線型加速器とシンクロトロン間の追加遮蔽。PEはポリエチレン、Pbは鉛ブロックまたは顆粒

使用して、カソードのエージングを行い、線型加速器通常運転時のヒーター電力8 Wにおいて、測定されたカソード表面温度は 813°C （光学窓による吸収の補正後）を示した。一方、リチャードソン・ダッシュマンの式より予想される、3 Aの電流が得られるカソード温度は 854°C であった。これらの結果については現在評価中である。

2-2-3 加速器エリア管理方式導入に伴う遮蔽増強

2010年夏、加速器の運転管理方式として、エリア管理方式が導入され、安全系インターロックの大幅改造が実施された^[3]。その際、各エリアの独立性を確保し、線型加速器運転中に停止中のシンクロトロン室に入室できるよう、線型加速器のビーム出力を1.2 GeV、 $6 \mu\text{A}$ から1/40に減少させる変更申請を行った。それに伴い、局所遮蔽、放射線シャッターを設置した。

遮蔽の増強は以下の部分に施された。

- ・線型加速器－シンクロトロン間（図3参照）
- ・線型加速器－L3BTトンネル間
- ・L3BTトンネル－L4BTトンネル間
- ・シケイン電磁石周辺

必要遮蔽厚は計算及び事前測定より求め、2010年夏に設置された。ビームパイプの通る貫通孔はパイプの回りに5 kgの鉛顆粒入り布袋とポリエチレンビーズを入れたポリエチレン袋が押し込まれている。

また、ビームダクト内での放射線の伝搬を停止するために、図4に示す位置に鉄60 cm厚の放射線シャッターを設置した。

2-2-4 全クライストロンモジュレータPFNコンデンサの交換

10年以上運転して絶縁油漏れを起こすコンデンサが目立ってきたのでPFNコンデンサの劣化を知るため、ケースの温度をモニタするラベルを貼るなどしたが、絶縁油漏れを起こす前に劣化を知ることはできなかった。そこで、2010年度に、PFNコンデンサ全数（約300個）を交換した。

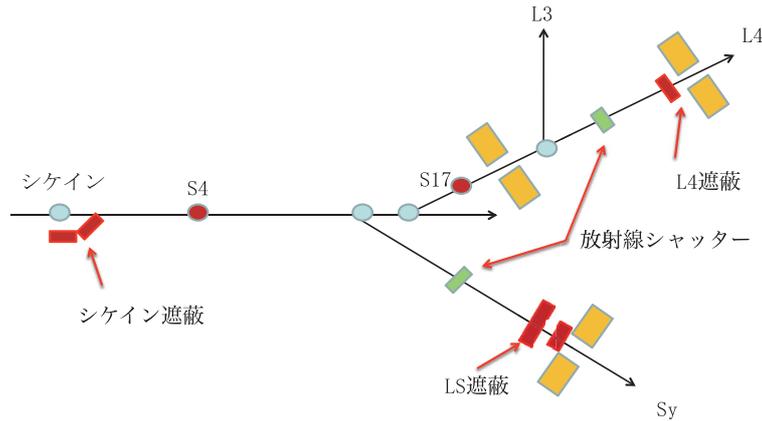


図4 追加遮蔽及びシャッターの配置

新品交換初期にコンデンサの碍子部分の半田封止部からの油漏れが生じたものが2個あったが、これはメーカー側からのトルク指示値がなく、取り付け時のナットを締めすぎた可能性もある事が分かった。その後大きな問題もなく、順調に稼働している。

(鈴木)

2-3 低暗電流加速管の開発

蓄積リングの単バンチ運転で要求されるバンチ不純度は 10^{-10} 程度と極めて小さいため、ブースター・シンクロトロンにおけるRFノックアウトによりこれを実現しているが、線型加速器からシンクロトロンに入射される暗電流もできる限り小さくしておく必要がある。

線型加速器の主な暗電流発生源の一つに加速管内における電界放出がある。そこで、現在の加速管よりも電界放出電流が少ない加速管の開発を目指し研究を行っている。加速管内の暗電流発生源としてはディスク部アイリス付近の表面電界集中領域やカプラー部の表面電流集中領域であると考えられているので、表面電界集中についてはアイリス断面の楕円化、表面電流集中については導波管カプラーを採用した加速管を製作^[4]し、暗電流を評価するための大電力試験を行った^[5]。

図5に示すように、暗電流測定系として、加速管上流部にファラデーカップ (FC)、下流部にエネルギー分析用電磁石とFCを設置した。真空排気は排気速度45 L/sのスパッタイオンポンプ1台及び100 L/sのNEGポンプ1台で行った。

RFコンディショニングは当初パルス幅700 ns、繰り返し10 ppsで開始し、320時間 (1.1×10^7 shots) でクライストロン最大出力に到達した。その後、パルス幅2 μ sにてトータル648時間 (2.3×10^7 shots) のコンディショニングを行い、最大加速電界強度は最上流加速セルで27.6 MV/mに達した。

コンディショニングの各段階で上流部FCにて測定され

た暗電流量の加速電界強度依存性をFowler-Nordheim (F-N) プロットにしたものが図6である。19 MV/m以上の領域では電界強度に対して指数関数的に暗電流が増えているがコンディショニングが進むにつれて電流量、 β 値 (電界増倍係数) とともに減少する。これは通常の加速管で観測される暗電流の傾向と一致しているが、19 MV/m以下の領域では、コンディショニングの進行とともに16 MV/m付近にピークが現れ、このピーク付近の電流量は、19 MV/m以上の領域と比較してコンディショニング効果 (暗電流の

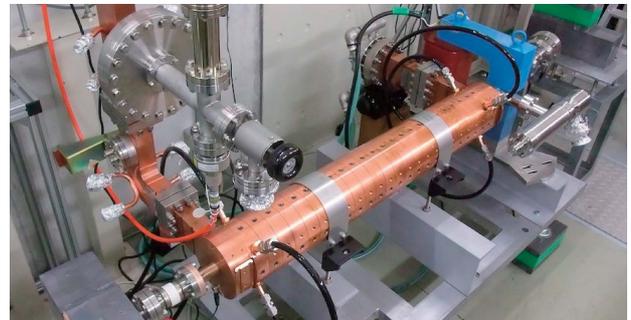


図5 低暗電流加速管大電力試験

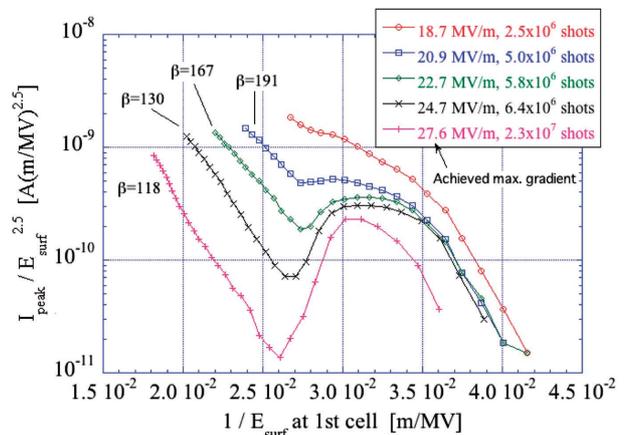


図6 上流側暗電流F-Nプロット

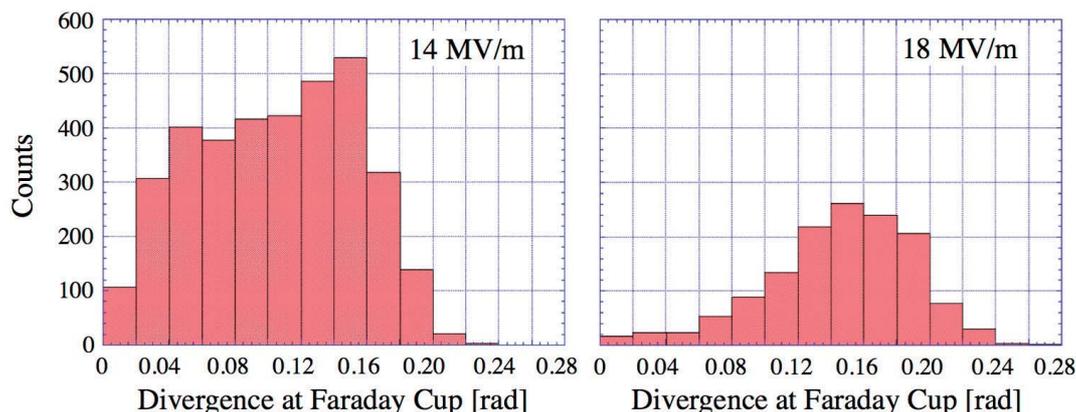


図7 暗電流電子のFC入射角分布

減少割合)が小さい。一方、下流側エネルギー分析器のFCではこのようなピークは観測されず、最終 β 値は122であった。

上流側の暗電流ピークは、上流部アイリス先端付近から発生した電子がある電界強度でうまくFCに収束されるためと仮説を立て、シミュレーションコードによるトラッキングを行った。その結果、実験と同様に14 MV/m付近をピークとする暗電流増大傾向が確認された。到達電子数が多い14 MV/mの場合と到達電子数が少ない18 MV/mで電子軌道にどのような違いがあるか見るため、それぞれの場合についてFCへの入射角をヒストグラムにしたものが図7で、18 MV/mに比べ14 MV/mの場合は導波管内電磁場による収束効果で、到達電子数が多くなっている。加速管下流側カプラーから発生した電子も同じメカニズムで収束されはざであるが、このような電子のエネルギーは20 keV以下と非常に小さいので、下流へ輸送される割合は小さく実用上問題ないと考えられる。

本加速管の暗電流量の大小を評価するには現行3 m加速管の暗電流量との比較が必要であるので、今後は3 m加速管の暗電流測定や、RF電子銃空洞で有効性が確認された化学エッチング表面処理^[6]による暗電流低減を図るとともに、引き続きシミュレーションによる暗電流輸送機構の解明を行っていく予定である。

(谷内 努)

2-4 Z偏光新型電子銃の研究開発

2-4-1 研究の背景

本研究は、レーザー光源のコヒーレンス性を積極的に利用する事により、フォトカソード電子銃が抱える課題の一つである「カソードの実効的な仕事関数の低減(カソード励起光源の長波長化)と長寿命化」を同時に解決する世界初の試みである。

レーザー光源のコヒーレンス性を積極的に利用するために、レーザー偏光を制御し軸対称偏光ビーム(ラジアル偏光やアジマス偏光など)を検討した。図8に示すようにラ

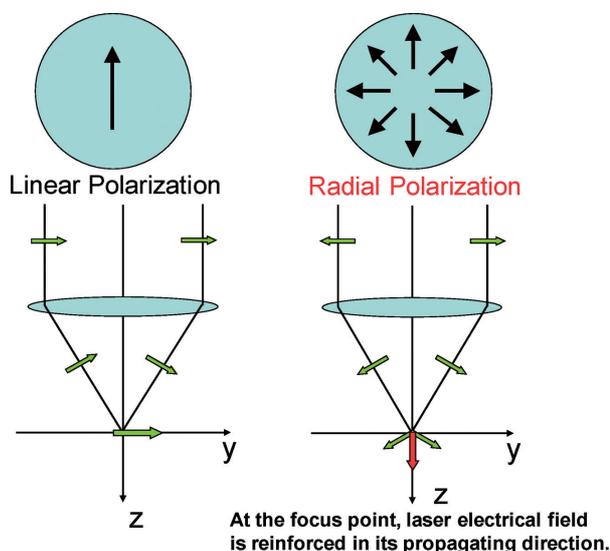


図8 ラジアル偏光をカソード面上に集光した場合に生ずるカソード面に垂直な(Z偏極)電場

ジアル偏光にして集光すれば、カソード面に垂直な高強度電場(Z偏光)を発生できる。小型のフェムト秒レーザー・オシレータでも得られる1~2 GV/mのZ偏極電場でカソードの仕事関数がショットキー効果により約1~2 eV下がるため、赤外レーザーを使用する場合でも長寿命の金属カソードが使用可能になる。また、Z偏極電場強度を任意に制御し、カソードの実効的な仕事関数をレーザー光子エネルギーに合わせ込み、熱エミッタンスを極小化できる可能性がある。以上のことを鑑みると、コンパクトな光源で、GHzのCW運転可能な超高輝度電子源の実現が期待される。この新しい電子ビームの生成方式は、Z偏光電子銃^[7]として2006年に提案した。

2-4-2 実験

カソード面に垂直なZ偏光レーザー電場を実現するため、直線偏光の深紫外レーザーをラジアル偏光からアジマス偏光へ自由に連続的に変換できる円環ビーム対応の軸対称偏光変換素子^[8]を、分割波長板方式の採用により世界

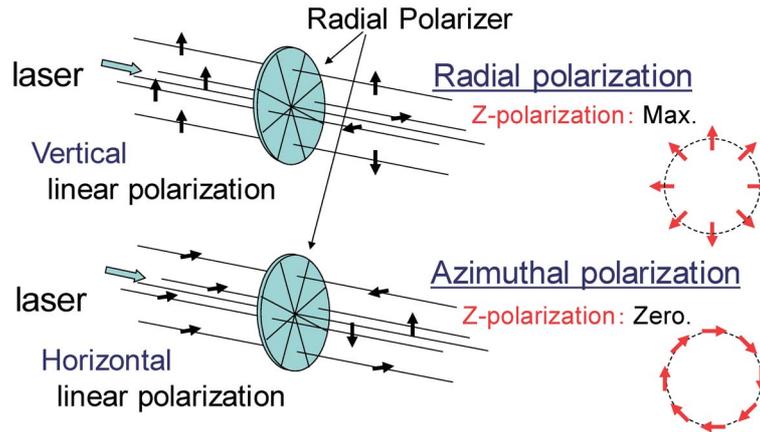


図9 軸対称偏光変換素子によるラジアル偏光とアジマス偏光の切替え原理

で初めて実現した（図9に概念的に示す）。

ラジアル偏光をカソード面に集光するとZ偏光強度が最大になり、逆にアジマス偏光を集光するとゼロにする事ができる。上記の軸対称偏光変換素子を使用して、銅カソード面上に誘起されるZ偏光レーザー電場強度を連続的に変化させ、Z偏光強度変調と相関した光電子発生の量子効率（QE）の増減をカソード電流の変化として測定した^[9]。この実験には、カートリッジ型カソード交換方式（浜松ホトニクスと共同開発^[10]）を採用したRF電子銃を使用し、波長264 nmのフェムト秒レーザーパルスで銅カソードに照射した。

図10に示すように、直線偏光である入射レーザーの偏光面の回転に伴うZ偏向強度変調に依存して、カソード電流が増減し、しかも偏光面回転角がほぼ90度毎に最大最小を

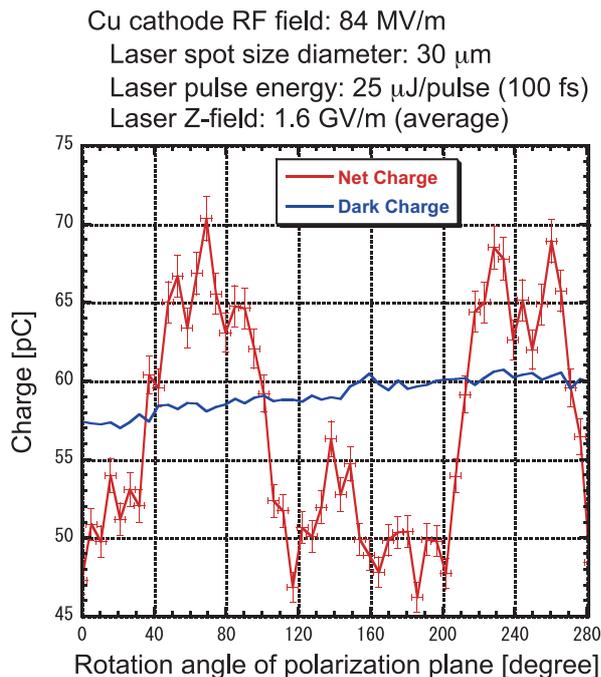


図10 Z偏光強度変調で増減するカソード電流

繰り返している事が明らかである。

本実験結果から考察した光電子放出の諸過程を図11に示す。この実験でアジマス偏光をカソードに集光した時に得られるQEは、一般的なフォトカソードの垂直入射の場合に得られるQEと同等とみなせるので、光電子放出は過程Aのみに依る。ラジアル偏光の場合にはショットキー効果によりポテンシャル障壁が下がるため、さらに過程A、Bが含まれる。トンネル効果に依る過程C、Dについては、WKB近似で計算した結果、トンネル確率は 10^{-9} 程度で無視できることが分かった。尚、トンネル確率が0.1になる条件は、銅カソードの場合でZ偏極電場が5.0 GV/mと計算された。

以上のことから、表面（鏡像）ポテンシャルをもつ金属カソードでは、Z偏光レーザー電場によるショットキー効果が起こりうることを実証した。しかし、この新型電子銃が高輝度電子源になるかは、今後の研究課題である。実用上は、異なる波長のレーザーで励起用光源とZ偏光用光源とに分けることや、背面照射方式で表面プラズモン共鳴を利用する方式^[11]の再検討も必要である。

（富澤）

2-5 フェムト秒パルスX線の生成

フェムト秒パルスX線生成^[12]のためには超伝導クラブ空洞を使用し、電子ビームを偏向する高周波電磁場の位相を高精度で制御する必要がある。これまでその実現に向けた要素技術の開発を続けてきたが、その中でも高精度移相器と高剛性チューナが重要なテーマであり継続して取り組んだ。2010年度はこれに加えて超伝導空洞には不可欠なヘリウム冷凍機の導入の検討とCバンド空洞の減圧冷却系の設計製作を行った。

(1) 高精度移相器

高精度移相器を駆動する電源の稼働試験を行った結果、階調制御をしているスイッチング素子が破壊される事例が見つかり、この原因究明を進めた。その結果、駆動電源に

Z偏光電子銃の電子放出過程(金属+UV)

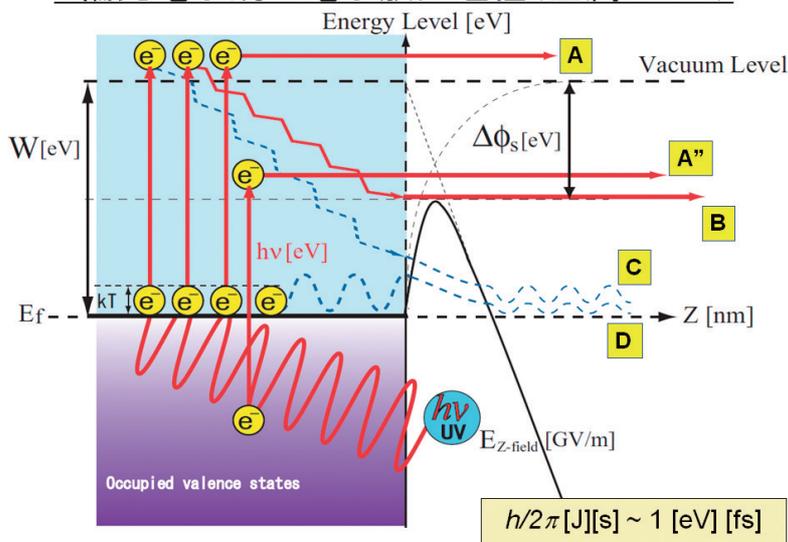


図11 Z偏光レーザー照射による光電子放出過程

階調電圧を供給している直流電源が異常な動作を示していることが判明し、これらを整流形式の異なる電源に交換したところ異常動作が発生しなくなった。しかし、素子が破壊される事例が引き続き発生した。シミュレーションによる回路解析と動作試験を進めたところ、ある動作条件で素子に異常なサージ電圧が発生する可能性があることが判明した。素子が破壊されると修理に時間を要するため、遅滞なく試験が進められるように予備基板を製作して試験と改良を進めている。

(2) 高剛性チューナ

超伝導空洞の共振周波数を精密に調整する高剛性チューナ (SPring-8型チューナ) の動作試験 (図12) を実施し、微小なヒステリシスや温度特性などのデータを取得した。



図12 高剛性チューナ (青色の架台に取付) の動作試験

その過程でピエゾ素子に異常な応力が発生して破壊される事例が発生した。このため、異常な応力がピエゾ素子に加わりにくい構造に改良した。

(3) ヘリウム冷凍機

超伝導空洞の研究を進めるためにはヘリウム液化機が不可欠であるが、SPring-8にはその設備がない。ヘリウム液化機をSPring-8に導入すれば、現在SPring-8内で年間15 kLを越える量が使われている液体ヘリウムのガス回収により資源の有効利用が図れる。また、その設備費と維持費は10数年の液体ヘリウムの購入費用とほぼ同額と見積もられる。しかも製造される余剰の液体ヘリウムを使って超伝導関連の研究開発を進めることが十分可能になる。SPring-8における液体ヘリウムの需要とヘリウム冷凍機設置の調査を行い、以上の結果をまとめた。

(4) Cバンド空洞の減圧冷却系

Cバンド空洞の高周波損失を減少させるために、稼働温度を1.5 K程度に下げる必要がある。この温度は液体ヘリウムの飽和蒸気圧480 Paまで減圧して実現する。空洞損失及びクライオスタットへの入熱を考慮して必要な排気速度を決め、それに基づいて減圧冷却系の設計と製作を行った。

(中里)

参考文献

- [1] 鈴木、他：第8回加速器学会年会 (つくば市)、2011年8月、掲載予定。
- [2] 住友、他：第8回加速器学会年会 (つくば市)、2011年8月、掲載予定。
- [3] 佐治、他：第8回加速器学会年会 (つくば市)、2011年8月、掲載予定。
- [4] 谷内努、他：第6回加速器学会年会 (東海村)、2009

- 年8月、p.1087.
- [5] 谷内努、他：第8回加速器学会年会（つくば市）、2011年8月、掲載予定。
 - [6] H. Tomizawa et al.: Proc. of LINAC08, Victoria, Canada (2008) 889.
 - [7] H. Tomizawa et al.: Proc. of FEL07, Novosibirsk, Russia (2007) 382.
 - [8] H. Tomizawa et al.: Application Date: October 29 2010; Japan Patent Application No: 2010-243071.
 - [9] H. Tomizawa et al.: Proc. of FEL'10, Malmo, Sweden (2011) 640.
 - [10] J. Sasabe, et al.: Nucl. Ins. And Meth, **A528** (2004)382.
 - [11] H. Tomizawa et al.: Application Date: May 18 2007; Japan Patent Application No: 2007-133183.
 - [12] T. Fujita et al.: Proc. of IPAC10, Kyoto, Japan (2010) 39.

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 蓄積リング入射用バンパ電磁石のビームベースドアライメント

蓄積リングにトップアップ入射を行う際、蓄積ビームの振動を極力抑制することが重要である。ビーム入射時にはバンパ電磁石4台 (BP1~4) をパルス励磁してバンパ軌道を作るが、バンパ電磁石にビーム軸周りの設置誤差 (Tilt) があると、ビームは水平方向磁場を受けるため垂直方向に振動する。更にTiltが無視できるほど小さくても、ビームが設計軌道に対し垂直方向に変位すると同様に垂直方向にキックを受けるので、ビーム軌道の長期ドリフトも垂直方向振幅の増大の要因となる。このため、ビーム軌道に合わせて、ビームが水平方向磁場を受けないようバンパ電磁石のTiltの再アライメントを定期的に行う必要がある。

再アライメントをスムーズに行うため、2007年度までに遠隔Tilt調整機構を全てのバンパ電磁石に設置した^[1]。バンパの Tilt による垂直方向振動を観測するため、ビームを特定の1バンチにのみ蓄積した状態でバンパ電磁石を空打ち (入射なしでの励磁) した。このとき、蓄積リングのモニタのうち最高分解能を誇る bunch-by-bunch feedback system用ストリップライン型ビーム位置モニタ^[2]によりターン毎にビーム位置を測定した。各バンパ電磁石のTiltに対するビーム振動の応答を求めるため、あらかじめ電磁石1台ずつ意図的にTiltを設定した時の振動を測定した。この応答をもとに、最小二乗法で各電磁石のTiltを評価し、ビーム振動が最小となるように補正した。

補正前のビーム振動の測定例を図1に破線で示す。補正後、振幅は1/25に抑制された (図1、実線参照)。しかしな

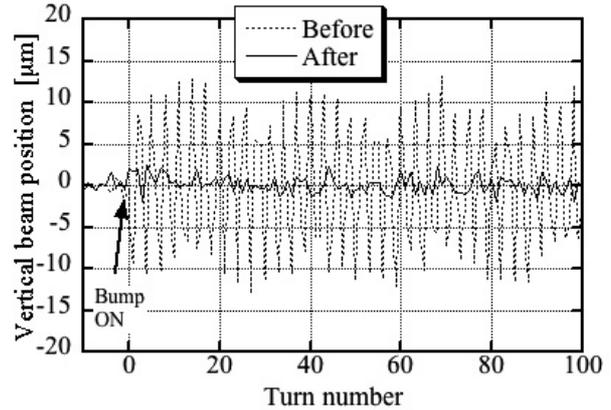


図1 バンパ電磁石空打ち開始からのターン数に対する垂直方向ビーム位置。破線、実線はそれぞれ Tilt 補正前後のビーム位置を示す

がら、補正後の振幅も測定のノイズレベルよりも小さくすることはできなかった。原因として、ビーム位置モニタのミスアライメントが考えられる。バンパを励磁したときのビームの水平方向振幅は垂直方向に比べて2桁以上大きいので、ビームが形成する座標軸とモニタの座標軸が完全に一致していない場合、測定値に水平方向振動成分が重畳する可能性がある。

そこで、1~128ターン分の振動データを用いてFFT解析により周波数分析を行い、残留振動の起源について調査した。各周波数に対する振幅のピーク値の分布を図2に示す。測定された振動のうち水平方向振動を起源とする成分 (水平振動成分) と、垂直方向振動を起源とする成分 (垂直振動成分) の周波数は、それぞれ水平、垂直チューン値の端数と一致するため、両成分を分離することができた。補正前のデータ (図2、破線参照) をみると、垂直振動成分の振幅は水平振動成分の20倍以上大きかった。これに対し、補正後のデータ (図2、実線参照) では、垂直振動成分の振幅は0.41 μmまで抑制され、水平振動成分よりも小さくなった。従って、図1で見られる残留振動の主成分は

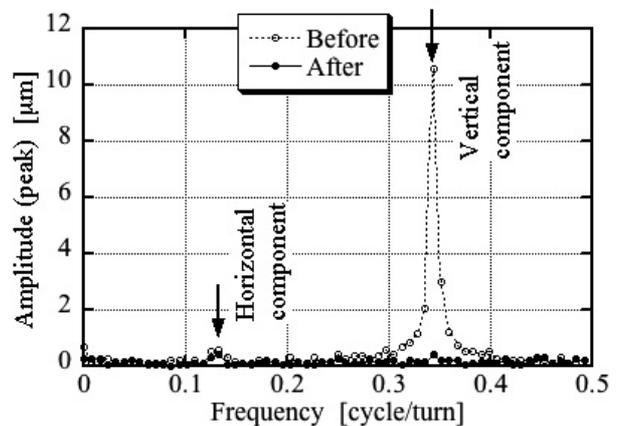


図2 周波数に対する振幅のピーク値。破線、実線はそれぞれ Tilt 補正前後の振動のピーク値を示す



図4 ハーモニックコイル磁場測定器に電磁石を据え付けた様子

表1 Dゾーン長直線用4極電磁石製作仕様値と実測値

項目	仕様	実測：電磁石#1 平均/バラツキ	実測：電磁石#2 平均/バラツキ
ボア径	√85 (mm)	85.029/0.005	85.018/0.015
磁極長	930 (mm)	930.4	930.4
磁場勾配	17.5 (T/m)	17.9	17.9
AT/磁極	24 (T) × 552 (A)	-	-
冷却法	Water cooling	-	-
冷却水流量	16 L/min/mag (0.5 MPa)	16.1	16.4
重量(含架台)	2500kg		

老朽化した磁場測定用電源の保守・更新を行った。この結果、再現性の高い精密磁場測定が行えるようになった。新たに構築されたハーモニックコイル磁場測定器システムでの測定の様子を図4に示す。

精密磁場測定では以下の項目の測定を実施している：

1. 磁石暖機必要時間、2. 長期安定度測定、3. 初期化条件、4. GL積励磁特性、5. 磁場多極成分測定、6. 磁場中心測定、7. 磁場中心電流値依存性。これらの測定項目について、ステージに電磁石を乗せ換え再測定を行うことで再現性を確認した。その結果、高い再現性が得られることを確認している。

これらの測定項目のうち運転に重要なGL積について述べる。電流値552 AにおけるGL積は電磁石#1と#2の平均値が17.78 Tで、#1と#2との差異は 4.5×10^{-4} となっており、電源の出力精度とほぼ同程度である。磁場出力のバラツキは十分小さいので一台の電源で同時励磁が可能である。GL積より有効磁極長を算出すると、993.3 mmとなり、実際の製作磁極長よりも6.7%の伸びがある。励磁特性を図5に示す。5次関数によりフィッティングした結果はよく合っており、運転電流値はこのGL値と電流値の関係性から算出される。500 Aを超える領域にて飽和が見られているが、通常の運転電流値は500 A以下であるため、線型性のある領域での励磁となる。必要な4極成分に対する高次成分の含有率は6極成分： $b_3/b_2 = 0.9 \times 10^{-4}$ 、8極成分：

$b_4/b_2 = 0.4 \times 10^{-4}$ となっており十分に低く抑えられている。

蓄積リングのビームを周回させる上で重要となるのは、ビームを極力4極磁場の中心に近いところを通過させダイポール成分を感じないようにすることである。このため、電磁石の据え付けの際、磁極の機械的中心ではなく磁場中心座標によってアラインメントすることが必要である。ハーモニックコイル磁場測定器はこの磁場中心測定に関してステージ駆動ステップである1 μmの測定感度がある。ただし最終的な磁場中心測定精度は、磁場中心座標をハーモニックコイルで磁場測定し、ステージを磁場中心位置に移動させたのち、レーザーとCCDカメラを使って、その位置を磁石基準座に焼きなおす際の、レーザーアライメントの再現性で決まり、 $\pm 3 \mu\text{m}$ となっている。この値は、現在のビーム運転においては十分な精度である。図6にCCDカメラとレーザーを使った磁場中心位置の測定の様子を示す。測定された磁場中心位置は機械中心位置からのずれとし

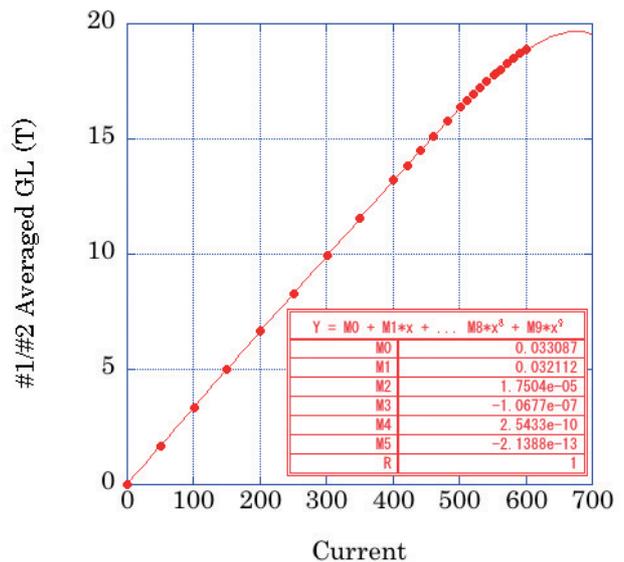


図5 2台の4極電磁石（#1、#2）の平均励磁特性曲線

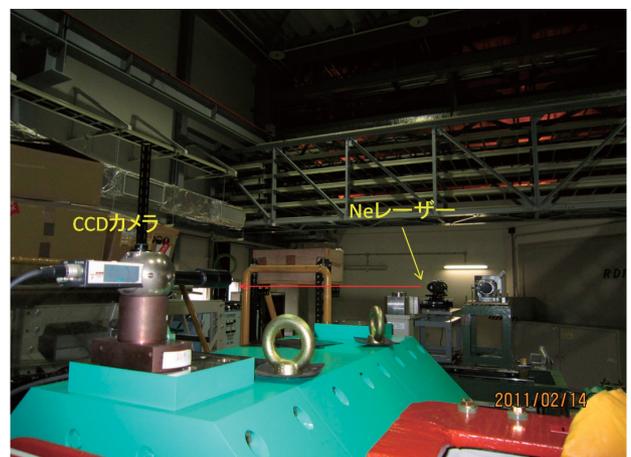


図6 CCDカメラとレーザーを使った磁場中心計測

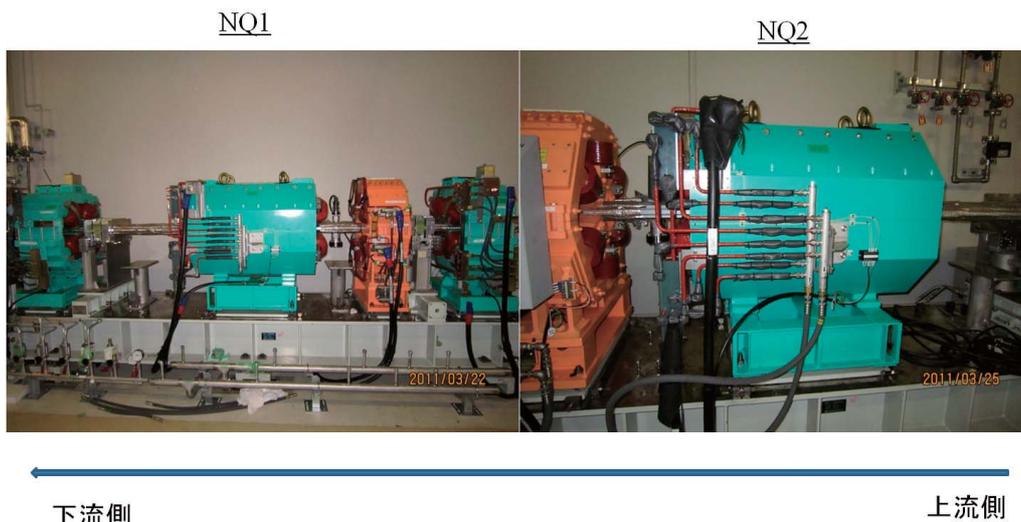


図7 長直線部に電磁石を据え付けた様子

て、4極電磁石#1においては上流・下流点の基準座の平均が(x, y)~(50, 70) μm、同#2において(x, y)~(70, 16) μmであった。

現在、機械中心位置を用いてアライメントし、据え付けであるが、今後磁場中心位置での再アライメントを実施し、エラーキックの低減を図る予定である。

新たに配置したトリプレット4極電磁石に対する電源の製作も行っている。これらの電源の定格電流値は600 Aで電流出力安定度は50 ppmである。製作の済んだ電源は保守通路に据え付けられ、2011年度からの試験運用を開始する予定である。Dゾーン長直線部に据付けた電磁石の様子を図7に示す。

(満田)

3-3 蓄積リング真空チェンバの温度安定化 (BPM位置安定化)

2005年度からビーム軌道安定化対策のひとつとして、電子ビーム位置モニタ (BPM) の位置安定性の調査を行ってきた。運転中に冷却水の温度が上昇することによりBPMの位置変動を発生させていることがわかり、2008年度より冷却水配管システムの改造を実施、2010年度に完成したため報告する。

ビーム軌道安定化対策の一環としてBPMの機械的な位置の変動を測定した。具体的には蓄積リングのセル7で放射線に比較的強い渦電流式変位計 (キーエンス社製EX-501) を用いて真空チェンバに取り付けられているBPMの位置計測を行った。その結果、停止中に比べ運転中は垂直方向に最大7 μmの変位が発生していることがわかった。

BPMの変位の発生原因は真空チェンバの温度変化によりBPM中心位置が変位することが主であることがわかった。真空チェンバのサポート位置とBPM中心位置に水平方向200 mm、垂直方向123 mmズレがある。真空チェン

バサポートが動かない場合でも、真空チェンバの温度変化によりBPM中心位置が変位する。

温度変化による位置変動を軽減するため2005年の夏期停止期間に、真空チェンバに流している冷却水流量を1 L/minから、冷却水によるチェンバ振動が問題にならない4 L/minに増やし、マルチバンチ・フィリングでの真空チェンバの出口温度上昇を約0.6℃に、BPM変位は水平方向4 μm、垂直方向3 μm程度に減少させた (図8、9)。

2006年度には真空チェンバの温度上昇の原因調査を行った。真空チェンバの温度上昇は、①電子ビームに誘起され真空チェンバを流れる壁電流による発熱と、②アブソーバやクロッチアブソーバと呼んでいる放射光受光体から発生する散乱X線や電子がその周辺の真空チェンバに照射することによる発熱がある。この中でも特に②の発熱が大きいことがわかった。

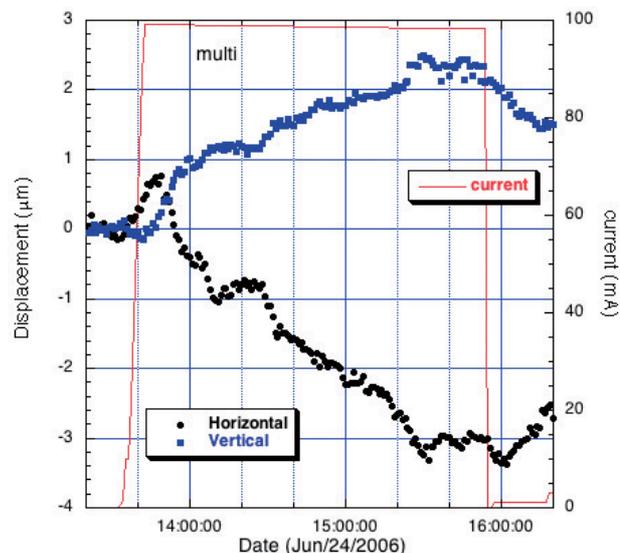


図8 冷却水配管システム改造前、マルチバンチ運転モード、流量4 L/minでのBPMの水平●、垂直■方向の変位。

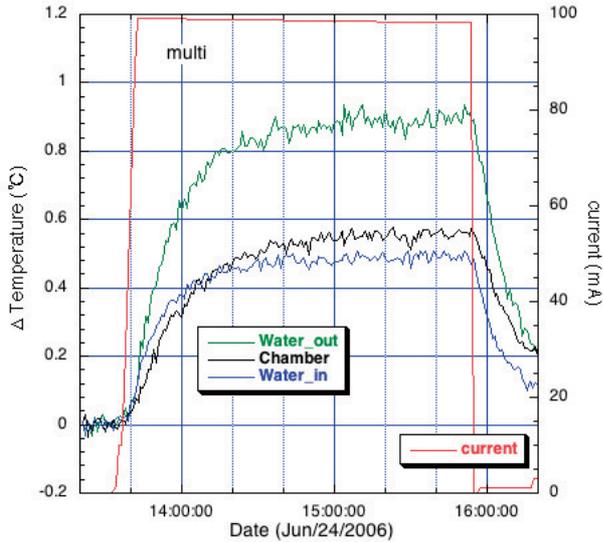


図9 図8と同じ時刻での冷却水のBPMの付いたチェンバの入口温度 (Water_in) とBPM付近の真空チェンバ温度 (Chamber)、冷却水出口温度 (Water_out) を示す。温度はいずれも運転前からの差分を示す。2本の真空チェンバを1系統で直列に冷却していた。図は下流側のチェンバ温度を示す。運転開始と共に系統上流の真空チェンバでの熱を吸収したため、チェンバ入口温度で既に温度が上昇している

冷却水の供給経路はまずアブソーバ部を通過した後でBPMのついている真空チェンバを通過するようになっていた。アブソーバ部の真空チェンバを冷却水が通過するときに冷却水の温度が上げられ、この温度上昇によりBPMのついている真空チェンバの温度上昇を招きBPM変位を大きくしている。このため、BPMのついている真空チェンバに並列に冷却水を流すよう、冷却システムを2系統から3系統に増やした。更に、先にBPMが付いている真空チェンバの冷却を行い、その下流にアブソーバ部の真空チェンバの冷却を行うという冷却水配管系統の変更によりBPM付近の真空チェンバ温度変動を小さくし、BPMの変位の抑制を試みた。2007年度にセル7にて実証試験を行い、マルチバンチ・フィリングではチェンバの温度上昇は0.1℃程度、セベラルバンチ・フィリングでも0.2℃以下となり、BPM変位は水平、垂直方向ともマルチバンチ・フィリングで1 μm以下に低減できた (図10、11)。

2008年度から順次真空チェンバ冷却水配管系統の改造を行い、2010年の夏期点検調整期間に蓄積リング全周の改造工事を完了した。

(大石)

3-4 蓄積リング自動軌道補正高速化

高精度な放射光実験に必要な不可欠なSPring-8蓄積リングの電子ビーム軌道安定化のため、常時周期的軌道補正を行っている。軌道補正はリングの各箇所での軌道測定、補正量の計算、ステアリング電磁石の励磁によって構成される。

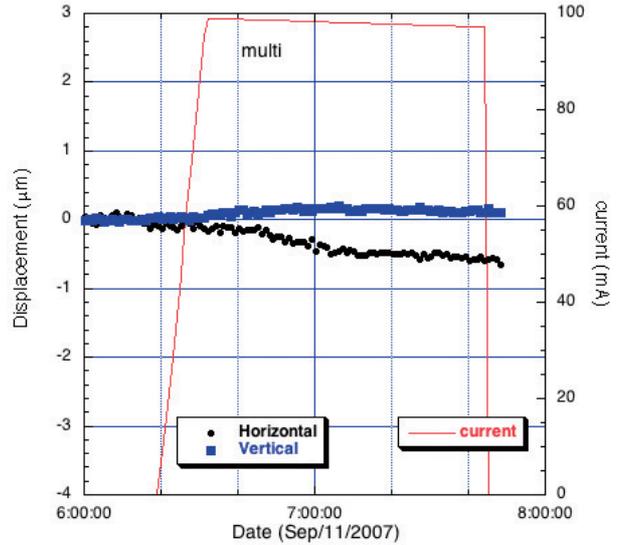


図10 冷却水配管系統改造後、流量4L/minでのBPMの水平●、垂直■方向の変位

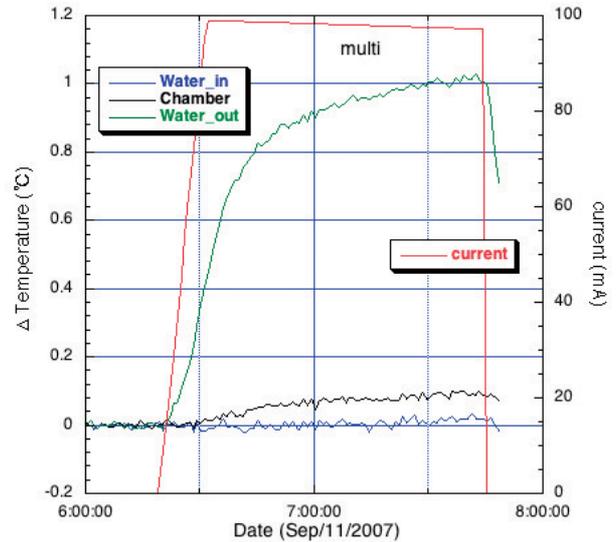


図11 図10と同じ時刻での温度 (運転前からの差分) を示す。BPMのついている真空チェンバにまず冷却水を流すようにシステムを改造し、チェンバの入口温度を安定させた。またBPMのついた真空チェンバを先に冷却し、アブソーバ部のチェンバ冷却を下流にすることにより、BPM部のチェンバ温度上昇を抑えた

周期的補正はSPring-8供用開始の翌年 (1998年) から開始されており、順次分解能や補正精度及び繰り返し周期を向上させてきている。その1つが、2006年に行った軌道測定のための信号処理回路の更新である。この更新によってビーム位置測定分解能は3倍 (0.1 μm)、また測定時間は7倍 (3~4秒) 向上している。これによって、軌道の安定度は電子ビームのサイズ (水平100 μm、垂直10 μmのオーダー) の1/10以下となり、軌道補正周期よりもゆっくりした軌道変動に対しては放射光実験に十分な安定度となっている。

一方、軌道変動にはドリフトのような定常的におこるゆ

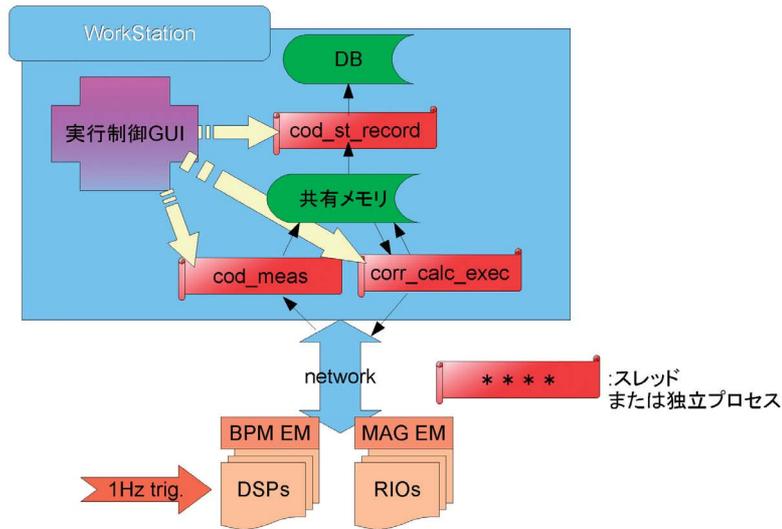


図12 改造した周期的軌道補正の動作ブロック図

つくりしたもの他に、間欠的におこるものもある。たとえば挿入光源のギャップや位相駆動に伴う軌道変動である。この軌道変動は時定数1秒程度の変化であり、現状の周期的軌道補正を高速化することで抑制できる可能性がある。軌道補正で重要なのは測定、補正の全周にそった同期性であり、この性質を保ったまま繰り返し周期を短くするために各処理単位での待ち時間（オーバーヘッド）を少なくすることが求められる。

2009年度までに、これら軌道の補正周期を1秒とするため、各処理の所要時間、個々のハードウェアの動作確認及びソフトウェアの整備を行った。項目としては、分解能を劣化させないビーム位置測定速度、補正の計算速度、ステアリング電磁石や電源を短い時定数で動作させることの確認、また、真空チェンバに誘起される渦電流の影響などの試験があげられる。

これらの確認作業をもとに、2010年度はデバイスドライバを含め、周期的な軌道補正のGUIを大幅に変更した。変更後の周期的軌道補正の動作ブロック図を図12に示す。この補正では軌道測定は1 Hzのハードウェア・トリガを基

準に測定を始める。この1 Hzのトリガは入射後のビーム振動を避けるため、ビーム入射から一定時間ずらしてあり、これによりビーム入射による見かけ上の軌道変動が起きないようにしてある。また、軌道補正はハードウェア・トリガを基準に動作するので、ソフトウェアが動作を指示する必要が無く、待ち時間を大幅に短縮している。さらに、処理時間を短縮するために、複数の処理を並列に行い、どこかで処理が遅れても全体の動作に影響が出にくい構成にしている。

高速化した補正によって間欠的な軌道変動がどの程度抑制されるかマシンスタディ時に確認した。間欠的な軌道変動は最も極端な場合を模擬するため、全ての真空封止アンジュレータのギャップを全開にした状態から閉じた場合、及びその逆の動作（ギャップフルオープン：GFO）で模擬した。軌道変動は蓄積リングの15セルに設置した連続的にビーム位置を測定できるモニターで観測した。図13にこのモニターで観測した水平方向と垂直方向のビーム軌道の時間的な変動を示す。2010年度ユーザー運転に用いている軌道補正（7秒毎）では、水平方向にギャップ駆動に起因する

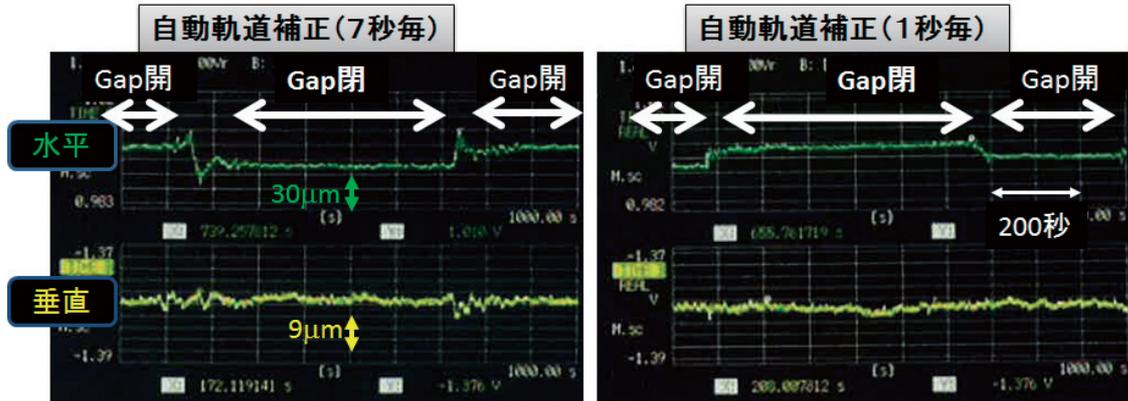


図13 (a) 2010年度ユーザー運転に用いている7秒毎の軌道補正 (b) 高速化した自動軌道補正（1秒毎）

比較的早い軌道変動が観測されたが、高速化した補正では顕著に抑制されている。また、垂直方向についても、これまでの補正で見られた数 μm のステップ的な変動がほぼ抑制されていることが分かった。なお、図13 (b) ではGFO中、水平方向の軌道が一様にずれているように見えるが、これは挿入光源のギャップの開閉により電子の放射損失量が変わり、リング1周でのエネルギー分布が変わるためであり、ステアリング電磁石のみで行う軌道補正では補正すべきでない軌道変動である。

次に、間欠的な軌道変動が無い定常な場合に高速化した周期的軌道補正を適用した場合の軌道変動を評価した。評価はリングの1ヵ所のBPM (Beam Position Monitor) だけの情報では十分なS/N (信号対雑音比: Signal to Noise ratio) が得られないので、リング全周のBPMのデータから軌道がリング一周の間に何回振動するかという空間的振動成分にフーリエ展開し、そのベータトロンチューンの成分の変動をもって評価した。その結果、垂直方向に関しては、今回の補正周期を早めるという変更だけではユーザー運転に供している3~4秒周期の周期的補正よりも、軌道変動が悪くなってしまい、垂直方向の小さなビームサイズを実効的に悪化させる可能性があるため、すぐにはユーザー運転に供することができないことがわかった。パラメータを調整して、垂直方向の軌道変動が悪化しない条件を見つける必要がある。今後、マシンスタディやシミュレーションを行って最適なパラメータを求め、特性を確認してからユーザー運転に供する予定である。

(藤田)

参考文献

- [1] K. Fukami, et. al.: Proc. of EPAC08, Genoa, Italy (2008) 2127.
- [2] T. Nakamura, et. al.: Proc. of EPAC04, Lucerne, Switzerland (2004) 2649.

加速器部門
加速器第IIグループ
佐々木 茂樹