

3. 施設の現状と進展

3-1 加速器開発

1. 運転・軌道解析グループ

1-1 加速器の運転

図1に1997年10月のユーザー利用運転開始以来の運転時間の推移を示す(脚注)。2005年の加速器総運転時間は5317.1時間である。この時間には、入射器系の加速器立ち上げ調整時の先行運転、その他の入射器系のみのものである。2005年のSPring-8蓄積リングの運転時間は4781.3時間、ユーザータイムは3698.2時間であった。これらは、ここ数年の平均(2001年~2003年の平均)と比べると、加速器総運転時間は約100時間程度の減少であるのに対して、蓄積リング運転時間は600時間以上、ユーザータイムは200時間以上の減少となった。これは、2004年夏期に起こった台風の接近による蓄積リング棟の屋根の損傷による本格修理を2005年1月から3月に掛けて、蓄積リングの運転を停止して行ったためである。そのために、できる限りのユーザータイムを消化するために、2004年12月までの後半は長期連続運転による運転時間増加を行った。2004年の加速器総運転時間、蓄積リング運転時間、ユーザータイムが大きく増加しているのはそのためである。2005年1月から3月は蓄積リングの運転は行われなかったが、その間、

線型加速器、シンクロトロン性能向上のための運転調整は継続された。加速器総運転時間があまり減少していないのはそのためである。

2005年のユーザータイムは蓄積リング運転時間の77.3%であり、計画ユーザータイムに対しては98.3%という高い達成率となった。一方、加速器およびビームラインの調整は1559.2時間であるが、前述した2005年1月から3月の蓄積リング運転停止中の入射器系のみのものである調整運転時間522.4時間を除いた1036.8時間は、ユーザー利用が年の途中(10月)から始まった1997年を除いて、最も少ない結果となった。また、トラブルによるユーザータイムの中断時間は、計画ユーザータイムの1.6%に当たる59.7時間あり、33回のビームアボートあるいは計画外のビーム廃棄が発生している。最も長い中断時間で5.3時間、ほとんどのものが1時間程度でユーザータイム再開を果たしている。2004年に際だって多かった放射光ビームラインでの機器異常動作などによるものは5回に激減した。加速器の機器異常はRF空洞の反射などによるものが例年と同程度の9回あったが、その他には目立ったものはなかった。落雷の影響による運転中断が6回あった。ユーザータイム中断には至らないが、トップアップ射撃の中断が22回発生した。2004年に際だって多かったLinac Modulatorに関するものは関係者の対策が功を奏し激減した。他の機器にも地道な対策を施しており、トップアップ中断は減少していくものと思われる。

2005年では、以前より減少傾向にある多バンチモードの運転の割合はユーザータイムの15.9%(2004年は36.6%)となり、少数バンチモードでの運転の割合は44.7%(2004年は43.8%)とあまり変化は無いが、多バンチモードと少数バンチモードが共存するハイブリッドモードは39.4%(2004年は19.6%)と大幅に増加した。これは、本格的なトップアップ運転の導入により、高電流バンチの短いビーム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ようになったためと思われる。この傾向はますます進むと思われる。2005年は、7つのフィリングモードでの運転が実施されている。多バンチモード、均等203バンチ(1バンチ当たりの電子数 1.5×10^{10} :電流換算0.5mA)、全周の1/12に203連続バンチ群、残りの部分に均等に10の孤立バンチを配置したモード(1つの孤立バンチには 4.5×10^{10} :電流換算1.5mA)等がある。

2003年10月に発生した入射部真空チェンバの0.7mm厚の薄肉部の電子ビームによる溶解、リーク発生以来中断していた低エミッタンスオプティックスは、電子ビームによる



図1 1997年の供用開始以来の運転時間の推移

脚注：SPring-8年報は年度ごとのまとめであるが、運転統計は従来通り1月~12月で集計する。

表1 蓄積リングの主要パラメータ

Beam parameters of SPring-8 storage ring	
Energy [GeV]	8
Number of buckets	2436
Tunes (ν_x / ν_y)	40.15 / 18.35
Current [mA]:	
single bunch	10
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 [%]	± 2.5 ($\approx \pm 200$ MeV)
Beam size [μ m]: (σ_x / σ_y) ²⁾ [μ m]	
Long ID section	294 / 10
ID section	301 / 6
BM section	107 / 13
Beam divergence [μ rad]: (σ_x / σ_y) ³⁾ [μ rad]	
Long ID section	13 / 0.7
ID section	12 / 1.1
BM section	56 / 0.6
Operational chromaticities: (ξ_x / ξ_y)	+2/+2 ³⁾
Lifetime [hr]:	
100mA (multi bunch)	~200
1mA (single bunch)	~15
Horizontal dispersion [m]:	
Long ID section	0.103
ID section	0.107
BM section	0.032
Fast orbit stability (0.1 ~ 200Hz) [μ m]:	
horizontal (rms)	~4
vertical (rms)	~1

¹⁾ Assuming that 0.2% coupling for "Low Emittance Optics"

²⁾ With bunch-by-bunch feedback

溶解を受けにくいチェンバへの交換、低エミッタンスオプティックスでのトップアップ入射の検討・調整を経て、2005年9月からエミッタンス3nm·radでの低エミッタンストップアップ運転が開始されている。表1に、低エミッタンスオプティックスによる蓄積リングの主要なパラメータを示す。

(大熊)

1-2 トップアップ運転

SPring-8蓄積リングのラティスは、偏向電磁石2台を含むセル単位でアクロマットとなる構造を基本に設計されているが、このアクロマット条件を崩すことによって電子ビームエミッタンスを低減することができる^[1,2,3]。SPring-8では、2002年11月にこれを実現した低エミッタンスオプティックスでの利用運転を開始した。この結果、従来のアクロマットオプティックスでは6nm·radであったエミッタンスを3nm·radまで低減することができた。低エミッタンスオプティックスは、高輝度X線をユーザーに供給することができたが、その極端に短いビーム寿命は急激な強度変動を意味するので、精密実験にとって必ずしも好ましいものではなかった。加えて2003年10月、低エミッタンスオプティックスに起因する入射部真空リーク事故が起こったので、低エミッタンスオプティックスでのユーザー運転は中断されることになった。真空リーク事故対策を施した入射部真空チェンバを設置した2005年9月、低エミッタンスオプティックスでのユーザー運転を再開した。以来、低エミッタンス運転は、中断中に導入されたトップアップ運転と相俟つ

て安定な高輝度X線をユーザーに供給している。

アクロマット条件を崩した時、挿入光源の設置されている直線部には有限の分散関数があるので、電子ビームエミッタンスはユーザーに供給される光子束密度とは直接関係しなくなる。この場合、分散関数を介した電子のエネルギー広がりによる電子ビームサイズへの寄与を含んだ実効エミッタンスが重要になってくる。これに対して元の電子ビームエミッタンスは自然エミッタンスと呼ばれる。図2に直線部の分散関数の大きさに対するエミッタンスを示す。図2に示されるとおり、挿入光源ユーザーにとって必要な実効エミッタンスは極小値を持っている^[1]。電子ビームオプティックスなどの最適化検討の結果、現在の低エミッタンス運転は直線部の分散関数値約0.1mでユーザー運転を行っている。

低エミッタンスオプティックスに起因する入射部真空チェンバの損傷、リーク発生については2004年度の年報に記述した。この対策として、廃棄された電子ビームの軌道を詳細に解析し、この結果に基づいて新しい真空チェンバが設計された。そこでは、入射部上流にアルミブロックのダンパーが設けられ、廃棄された電子ビームは先ずここに衝突するよう設計されている。ダンパーに衝突した電子ビームはシャワーとなって拡散するため、真空チェンバに到達した電子ビームが発生する熱密度は大幅に軽減される。さらに、入射部の配置を工夫し、真空チェンバの壁圧を0.7mmから最も厚いところで5mmに変更した。2005年夏長期停止期間にこの真空チェンバを設置し、低エミッタンスオプティックスでのユーザー運転を再開した。

バンチ電流密度が上がると、バンチ内電子電子散乱がビーム寿命に対して支配的となってくる(タウシェック効果)。即ち、光源の輝度が向上するに従って、必然的にビーム寿命は短くなり、平均輝度は低下するという皮肉な結果となる。このため、低エミッタンス運転の利益を真に享受するためには、その短寿命を克服する必要がある。

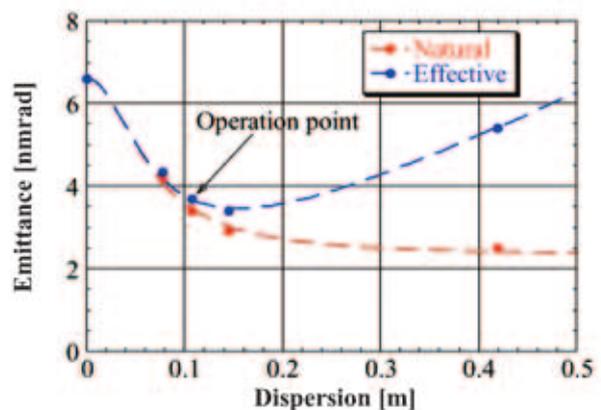


図2 直線部の分散関数に対するエミッタンス

表2 トップアップ運転のまとめ

総蓄積電流値安定度	0.1 %
バンチ電流値安定度	10 %以下
入射による蓄積ビーム振動 (水平)	ビームサイズの1/3
同上 (垂直)	同上1/2
入射ビーム不純度	5×10^{-11}

SPring-8でトップアップ運転を導入した最も大きな理由は、低エミッタンスあるいは高電流バンチなどによる短寿命の克服である。トップアップ運転は、ユーザー実験中も随時ビーム入射を行うことによって、実効的にビーム寿命を無限大にするものである。このようにして、高輝度かつ安定な光源がSPring-8では実現されている [3,4]。ただし、安定な光源と言うためには、蓄積電流値だけでなくビーム軌道も安定にしなければならない。ビームを入射するためにバンプを作って蓄積ビーム軌道を入射ビーム軌道に寄せる必要があるが、バンプ軌道に誤差があると蓄積ビームはキックを受けて振動することになる。この入射バンプによる蓄積ビーム振動を抑制することが、トップアップ運転導入に際して克服すべき最も困難な課題であった。バンプ軌道が閉じない主な原因は、バンプ軌道を作る区域内にある六極電磁石による非線形場によるものである。この問題は、六極電磁石非線形場による振動を抑制するオプティクスを開発することによって解消した [5,6]。低エミッタンスオプティクスの場合には全周に亘って分散があるので、入射バンプによる蓄積ビーム振動を抑制しつつ広いダイナミックアパーチャーおよびモーメンタムアクセプタンスを確保することはより困難になる。これを最適化する計算コードを開発し、蓄積ビーム振動抑制と高いビーム入射効率、長いビーム寿命を両立させることに成功した。低エミッタンスオプティクスでも、アクロマットオプティクスと変わらない性能でトップアップ運転を行っている [7]。図3に

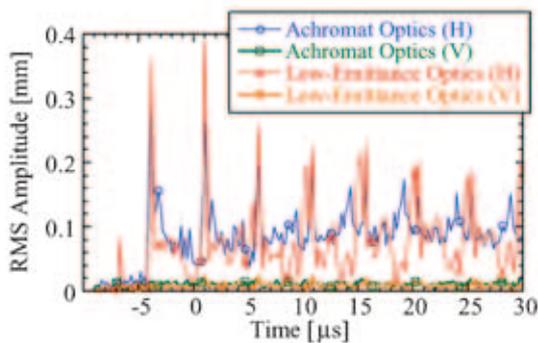


図3 ビーム入射時の蓄積ビームの振動

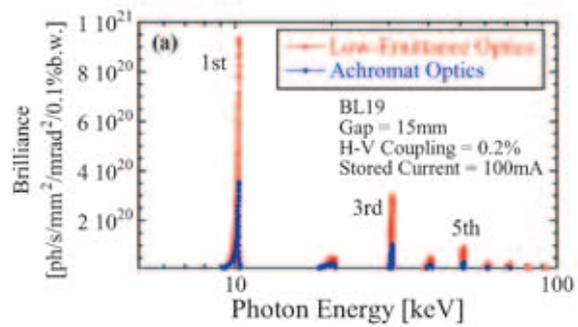


図4 BL19LXU挿入光源からの放射光輝度のアクロマットオプティクスと低エミッタンスオプティクスの比較

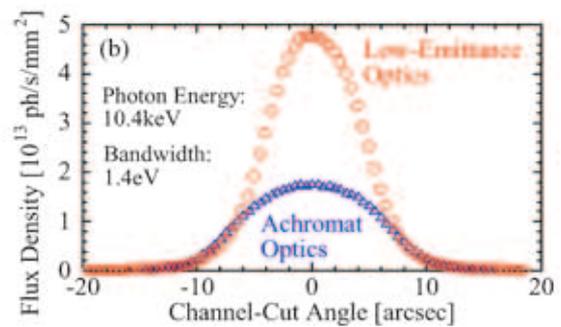


図5 BL19LXU単色光子束の測定比較

ビーム入射時の蓄積ビーム振動を示す。オプティクスによらず、ビームサイズに比べて小さいことが分かる。表2に現在のトップアップ運転状況をまとめた。図4はビームラインBL19LXUの長尺挿入光源の従来のアクロマットオプティクスと低エミッタンスオプティクスの輝度の比較したものである。これによると約3倍の輝度の向上が期待される。実際にBL19LXUでの単色化された光子束の測定結果を図5に示す。計算通り輝度が約3倍になっていることが確認できる。

(高雄)

1-3 軌道安定化

2005年度の利用運転は全てトップアップモード [3,4] で行われた。トップアップモードでは蓄積電流値が一定になり、各機器に対する熱負荷も安定化する。その結果、蓄積リングの軌道安定度も以前の蓄積モードでの運転に比べて格段に向上した。一例として、トップアップおよび蓄積両モードにおける31セル1のビーム位置モニターの一週間にわたる垂直位置読み出し (上図) を蓄積電流値 (下図) と共に図6に示す。この間、蓄積リングはセベラルバンチモードでの運転が行われており、蓄積モードでは12時間に1回の入射があった。蓄積モードでは、蓄積電流値減衰に伴う10μm程度のビーム位置の変動が見られる。この軌道変動は軌道が実際に動いたというよりは、ビーム位置モニタ

ーが取り付けられている真空チェンバへの放射照射量が変化することによる見かけ上のものと考えられるが、軌道補正はこのデータを元に行うため、逆にビーム軌道を変動させてしまう恐れがある。実際の軌道補正では、このような非物理的な軌道変動は排除するアルゴリズムを用いているので、このことが直ちに大きな光源点の変動とはならない。しかし、誤ったビーム位置測定の影響を完全に除くことはできず、軌道補正用ステアリング電磁石の設定電流値に反映される。SPring-8蓄積リングでは、軌道変動を抑えるため約30秒周期で軌道補正を行っている。図6と同じ測定期間の周期的軌道補正に用いられた高精度補正ステアリング電磁石の1つ（31セル1、垂直）の設定電流値を図7に示す。蓄積モードでは、補正ステアリング電磁石の設定電流値に明らかな蓄積電流値依存性が見られる。

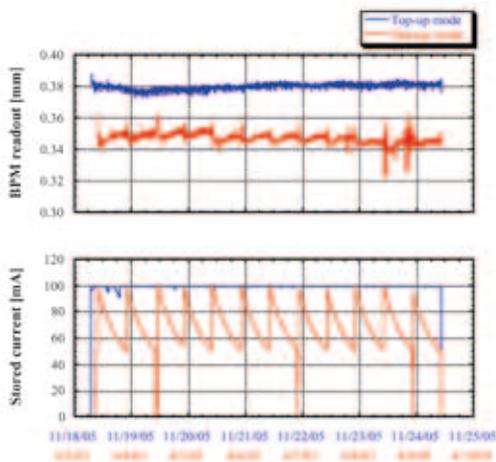


図6 31セル1のビーム位置モニターの垂直位置読み出し値（上図）と蓄積電流値の変化（下図）

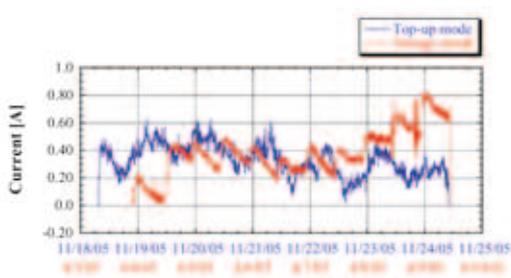


図7 31セル1の高精度軌道補正ステアリング電磁石の設定値の図6と同じ測定期間の変化

トップアップ運転によって蓄積電流値変動に起因する軌道変動が解消されると、長周期の軌道変動が目立ってくる。軌道変動要因を調べるため高精度補正ステアリング電磁石の設定電流値を解析すると、特徴的な日変化を示すものがあった。そのような例の一つを図8に示す^[8]。当該高精度補正ステアリング電磁石が設置されているセルは、SSBTトンネル直近に位置している。このような軌道変動が起こる機構を解明するため、様々な環境変数の測定を系統的に

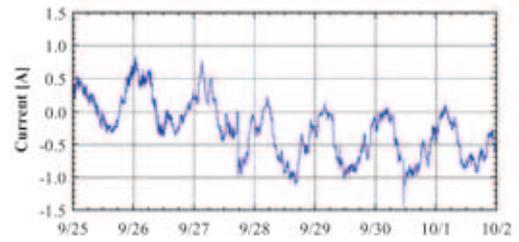


図8 SSBTトンネル直近に設置されている高精度ステアリング電磁石の設定値の変化。1日周期の特徴的な変化が見られる

行った。その結果を図9に示す。上からそれぞれ四極電磁石水平変位、電磁石共通架台中央部ベースプレート傾き、直近壁面温度、空調排風風速、商用電源電圧の変化である。これら全てが図8の高精度補正ステアリング電磁石設定電流値と明瞭な相関を示している。これらの事から、次のよ

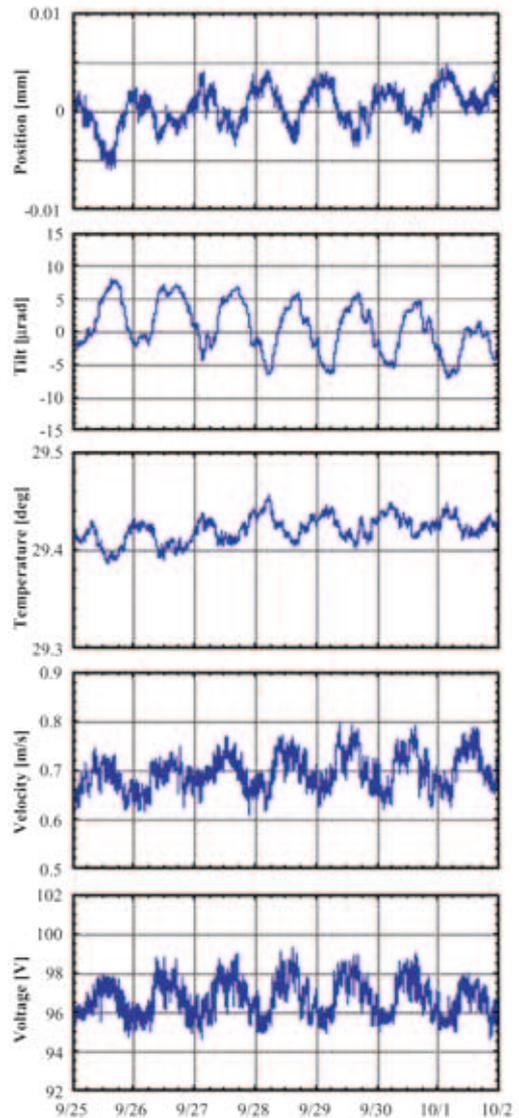


図9 様々な環境変数の変化を図8と同じ期間に付いて調べた結果

うな軌道変動の誘起機構が推察された [8]。商用電源電圧変動が空調排風風速の変化を起こす。これがマシン収納トンネルの変形を招き、直下がSSBTトンネルで中空になっている電磁石共通架台の変形を通して四極電磁石変位を誘起する。四極電磁石変位はビームにキックを与えるので、最終的にビーム軌道が変動することになる。この軌道変動を抑制するため、空調排風器の電源電圧を安定化することを計画中である。

さて、トップアップ運転により蓄積電流値に依存するビーム軌道変動は解消されたが、利用運転開始時には、各機器が熱平衡に達するまでの時間、ビーム位置が変動してしまう。この原因を詳しく調査するため、変位計を用いてビーム位置モニター自身の位置安定性を測定した。トップアップ運転中は測定誤差も含めて $2\mu\text{m}$ 以下であった変位が、運転開始時には水平と垂直それぞれ最大 $12\mu\text{m}$ と $7\mu\text{m}$ に達していた。この量はアルミ製真空チェンバの熱膨張係数で十分に説明される。この熱膨張を抑制するため真空チェンバの冷却水流量を4倍にした。その結果、現在のビーム位置モニターの変位は水平約 $4\mu\text{m}$ 、垂直約 $2\mu\text{m}$ に低減され、ビーム軌道安定化に貢献している。

(高雄)

1-4 不安定性抑制

2004年当初より稼働中のbunch-by-bunchフィードバック [9] について、核となるフィードバック用デジタル信号処理装置を2004年度に開発した装置 [10] へ更新した。従来のものは、複数個のモジュール、FPGAを組み合わせて機能させていたため、モジュール間のタイミングやレベルの調整が容易ではなく、故障時の早急な対応が困難であったので、新たに1台のFPGAを搭載した1台のボードに従来の装置のすべての機能を集約かつ高性能化し、さらにUSBでの制御、ビーム位置情報の保持などの新機能を加えた。これにより調整がはるかに容易となり、かつ、将来の運転の高度化に対応することが可能となった。

また、新たに考案したデジタル信号処理の手法により、水平、垂直の2次元の不安定性抑制を一つのループにより行う手法 [11,12] を開発した。この手法は、今回行ったフィードバック用デジタル信号処理装置の高機能化により初めて実用化が可能となった。この2次元フィードバックはKEKのPhoton Factory (PF) [12,13] および台湾のTLS (NSRRC) [14] において、われわれのフィードバック用デジタル信号処理装置とともに2005年度に採用され、現在稼働中である。図10に1ループ2次元フィードバックのプロ

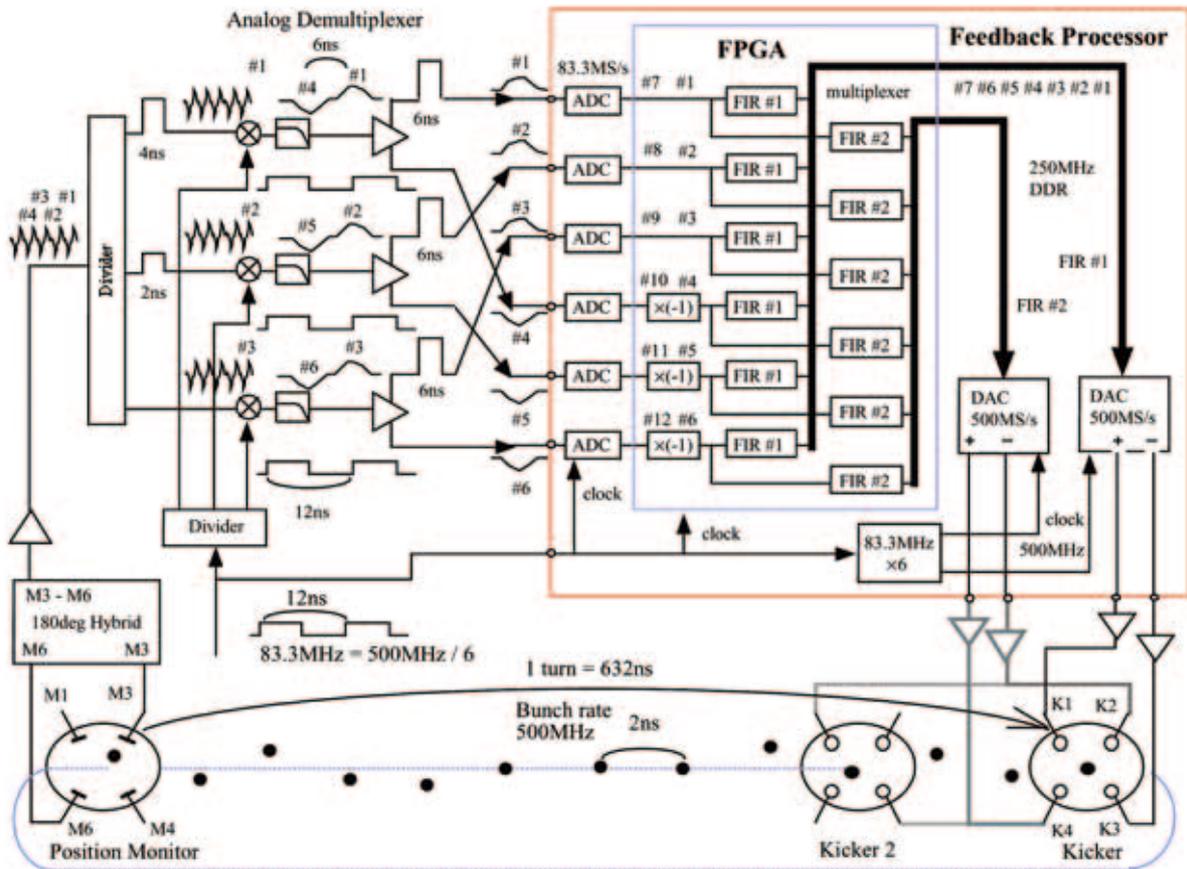


図10 1ループ2次元フィードバックシステムのブロック図。フィードバック用デジタル信号処理装置 (Feedback Processor) は FIR #1とFIR #2と2系統のFIRフィルタを持つので、ベータatron位相が異なる場所にあるkicker 2を駆動することが可能である。また、kickerの対角以外の場所にあるストリップラインを駆動することもできる。

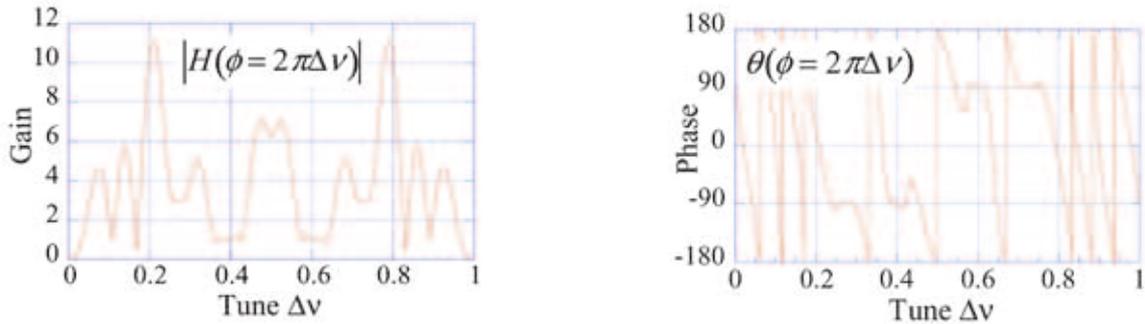


図11 1ループ2次元フィードバック用の20-tap FIRフィルタのチューン応答。Photon Factoryに適用しているものであり、水平チューン0.6、垂直チューン0.28に対応している。2つのチューンでゲインが異なるのは、位置モニターの感度特性の違いを補正しているためである。位相はどちらのチューンについても必要な-90度が得られている。

ック図、図11にPhoton FactoryでもちいているFIRフィルタのチューンに対する応答、図12にPhoton Factoryでの実験結果を示す。これらの図はいずれも参考文献 [12] からの抜粋である。

(中村)

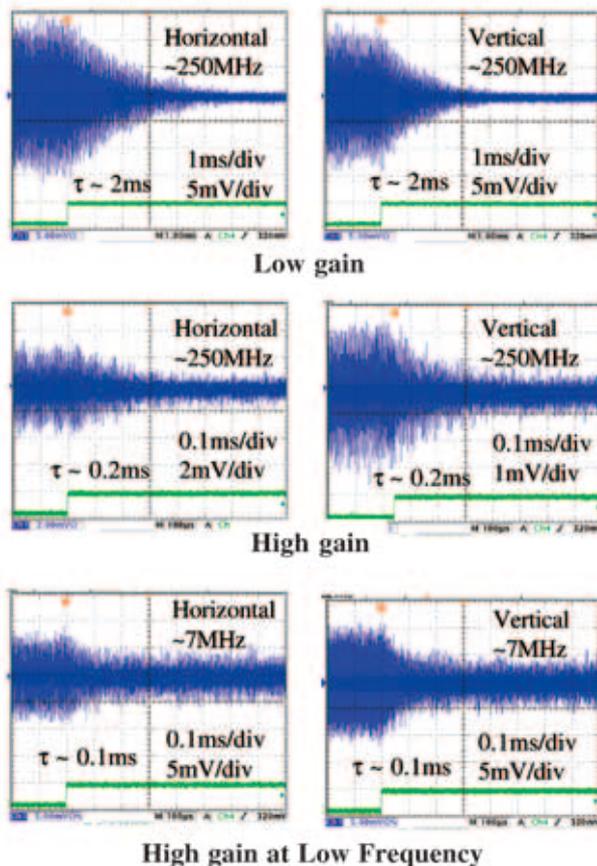


図12 Photon Factoryでの1ループ2次元フィードバックの実験結果。外力によりベータトロン振動を励起し、外力が0となったあとの減衰を示す。外力の周波数およびゲインを変えたときの結果を示す。

1-5 カウンター6極による長直線部局所クロマティシティ補正によるビームロス低減化対策

SPring-8蓄積リングの特徴の一つに長直線部の存在があげられる。長直線部は、およそ30mにわたる自由空間であり、長尺アンジュレータや他の先進的な光源装置を設置するための場所である。長直線部導入のための蓄積リングの改造は2000年夏期停止期間中に行われたが、改造に際して、ビーム性能の劣化を招かないように、特にセル構造（基本電磁石配列）の対称性の維持に重点を置いた設計・検討がなされた。その結果、長直線部を含む3セル分、およそ90mをマッチング部とし、この間のベータトロン位相を 2π の整数倍とする基本方針が採用された。この位相条件により、ある位置と角度でマッチング部に入った周回電子は、同じ位置と角度でマッチング部を出ていくため、この区間を「透明」なものとして扱うことができる。この結果、マッチング部外のセル構造をそのままにしてリング全体の対称性を高い状態に保持しながら、長直線部を導入することが可能となる。

しかし実際には、上記の位相条件は設計エネルギーの電子に対してのみ成り立つのであって、エネルギーのずれた電子に対しては成立しない。特にSPring-8のような低エミッタンス・リングでは4極電磁石が強く励磁されており、エネルギーのずれに伴うベータトロン位相のずれが大きい。およそ90mにわたるマッチング部のベータトロン位相について、このずれ（局所クロマティシティ）は無視できず、エネルギーのずれた電子に対して位相条件が崩れ、安定性が失われる。その結果、ビーム寿命が極端に短くなり、電子を長時間安定に周回させることができなくなる。

現状では、この問題を解決するために、マッチング部内の6極電磁石を弱く励磁してクロマティシティを局所的に補正している。しかしこの方法では、ビーム寿命は改善するものの、6極電磁石で発生する非線形キックによって設計エネルギーの電子に対する安定領域が狭まり、入射効率が低下してしまう。入射効率とビーム寿命のどちらが悪化

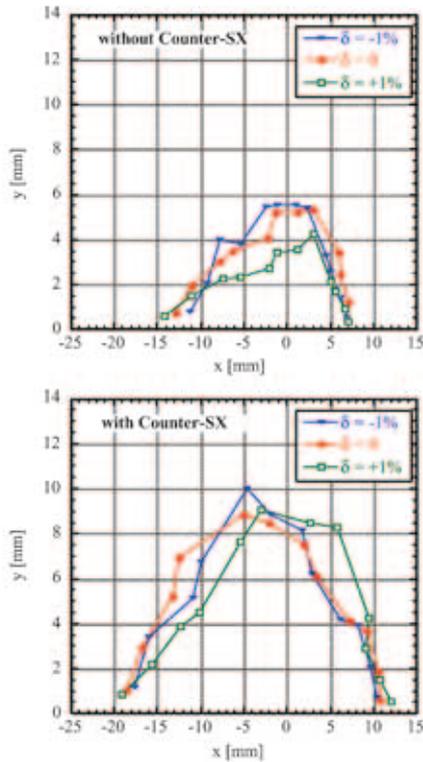


図13 蓄積リング入射点におけるビーム安定領域の計算値。x とy は水平および垂直座標。設計エネルギーの電子 ($\delta = 0$) と1%ずれた電子 ($\delta = \pm 1\%$) について、現状を上図に、カウンター6極設置後を下図に示す。

してもトップアップ運転を安定に継続することができない。そのため、局所クロマティシティの補正量を調整し、適当なところでバランスをとって両者を許容範囲におさめている。

しかし例えば、バンチ当たりの電流値を今よりも増やしたい場合、ビーム寿命が短くなって入射頻度が上昇するため、トップアップ運転時のビームロス量が許容値に近づく。また、長直線部に特殊な光源を設置したい場合、装置によっては長直線部のオプティックスを独立に変更することが必要となる。

このような要求に応えるためには、現在の局所クロマティシティ補正の方法をさらに発展させ、局所クロマティシティ補正用6極電磁石も含めて、マッチング部を「透明」にする必要がある。これができれば、設計エネルギーの電子に対する安定領域を狭めることなしに局所クロマティシティが補正され、入射効率とビーム寿命の両方を改善させることができる。このために我々は、局所クロマティシティ補正用6極電磁石で発生する非線形キックを、同じマッチング部内の別の6極電磁石（カウンター6極）で打ち消す方法を考案した。キックが非線形でビームの振動振幅に依存するため、この打ち消し合いは近似的なものだが、計算機シミュレーションの結果、6極電磁石位置でのベータatron位相関係を適当に選べば、影響をかなり低減できることがわかった。さらに、この方法によれば、6極電磁石に

よるキックのマッチング部外への影響が低減されるため、長直線部のオプティックスをA、B、C、D各ゾーンごとに、独立に（位相条件を保ちながら）変更することが容易になる。カウンター6極設置によってビームの安定領域が拡大する様子を図13に示す。現在、設置に向けた真空チェンバ改造と電磁石架台製作について検討を進めている。

（早乙女）

1-6 低エネルギー運転

SPring-8加速器施設の潜在的な能力を最大限に活用するという方針のもと、蓄積リングの低エネルギー運転が試験的に続けられてきた。バンチ内電子電子散乱（IBS）の影響が無視できれば、ビームのエネルギーを通常の8GeVから下げることで、自然エミッタンスを $1\text{nm}\cdot\text{rad}$ 以下に低減させることができる。また相対エネルギー拡がりもビームエネルギーに比例して小さくなり、RF電圧によってはバンチ長も短くできる。このように位相空間体積の小さなビームを実現することで、従来の放射光実験に課せられていた枠をさらに拡大できる可能性がある。現状では、低エミッタンスオプティックスに対し、エネルギー4GeVの時、マルチバンチモードで100mA、シングルバンチモードで1.5mAのビーム蓄積が達成できている。

蓄積リングを4GeVで運転した場合のアンジュレータ放射光の輝度の計算値を、8GeVの場合と比較して図14に示す。例として、標準型真空封止アンジュレータID47と軟X線ビームライン用Figure-8アンジュレータID27、および長尺アンジュレータID19の場合を示した。4GeV時に、ID47とID19からの放射光は、エネルギーが数keV程度の軟X線領域をカバーしており、輝度も高い。SPring-8のビームラインは、現状、挿入光源や分光器などがすべて8GeV用に設計されている。従って、リングのエネルギーを下げたからといって、直ちにこのような放射光が利用できるわけではないが、潜在的にこのような利用方法も可能であることを示す例である。目的とする波長領域の輝度を向上させるためには、低エネルギー運転用に最適化されたアンジュレータを設計する必要がある。また現在、通常の8GeV運転

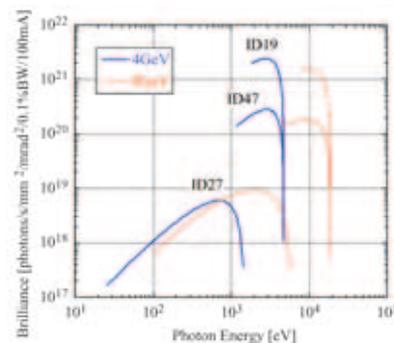


図14 蓄積リングのエネルギーを4GeVとしたときのアンジュレータの輝度（8GeVとの比較）

時には100mAまでの放射光利用が許可されているが、エネルギーを下げることで、より高い電流値で利用できる可能性が出てくる。

エネルギーが8GeVの場合、IBSの影響は無視できる。しかしエネルギーを下げるに従って、この効果が効き始め、エミッタンスやエネルギー拡がりなどのビームパラメータに影響がでる。この例として、エミッタンスの計算値を、ビームエネルギーの関数として図15に示す。図中、 I_b はバンチ電流値であり、水平・垂直エミッタンス結合比として0.2% (8GeV時の実績値)を仮定した。ただし、potential-well distortionによるバンチ長の伸びの効果は含まれていないため、実際には、図15に示すよりも影響が緩和されると考えられる。バンチ電流値にもよるが、概ね4GeV以下でIBSの影響が顕著になることがわかる。

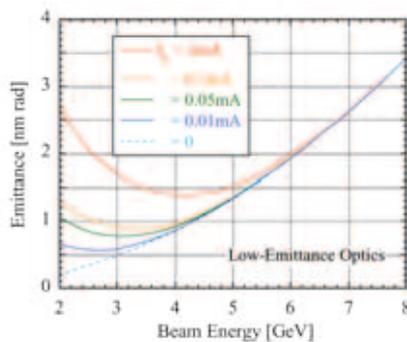


図15 ビームエネルギーを下げた場合のエミッタンスの変化

エネルギー4GeVにおけるIBSの影響を実験的に確かめるため、シングルバンチモードでビームを蓄積し、バンチ電流値を変えながら、ビームサイズなどを測定した。ビームサイズは、加速器診断ラインBL38B2のX線ビームプロファイルモニター^[15]を用いて測定した。水平ビームサイズの測定結果を、計算値と合わせて図16に示す。実線はIBSの効果を含んだ計算で、破線はこれを無視した計算である。4GeV時の測定値が実線の計算値よりも小さいのは、前述のように、potential-well distortionによるバンチ長の伸びの効果によるものと思われる。4GeVにおけるエミ

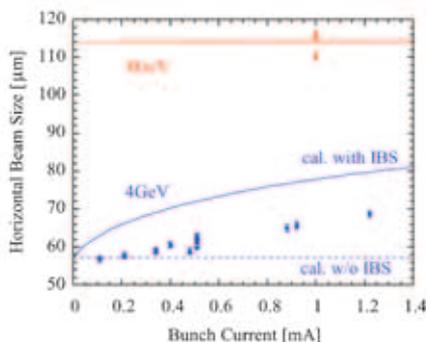


図16 4GeV運転時の加速器診断BL38B2での水平ビームサイズ測定値と計算値の比較

ッタンスは、計算上0.85nm・radであり、ビームサイズ測定の結果などから、低バンチ電流においては、このエミッタンス値にほぼ達したと考えている。

低エネルギーでの入射・蓄積を行う際の主な問題点は、入射効率低下、短ビーム寿命、ビーム不安定性である。これらに対し、現在、以下のような対策をとっている。

入射効率：低エネルギー入射時の入射効率低下については、入射セプトム電磁石ヘリウムガス置換部を通過する際の、入射ビームの角度拡がり増大の影響が大きいことがわかった。当面の対策として、トリム4極補助電源の増設によるオプティックスの歪み補正、および6極電磁石追加による動的安定領域の拡大を予定しており、これらによってリングのアクセプタンスを上げ、入射効率の改善をはかる。

ビーム寿命：低エネルギー運転時にはバンチの位相空間体積が減少するために、タウチェックビーム寿命が支配的となる。100mAをマルチバンチモードで蓄積した場合、8GeV時には200時間以上あったビーム寿命が、リングの状態にもよるが、4GeV時には10時間前後にまで減少する。これを補償するには、トップアップ入射の導入が有効であり、今後調整を進める予定である。

ビーム不安定性：エネルギーを下げると、ダンピング時間の増大などによりビーム不安定性発生の閾値が下がる。これに伴い、8GeVでは起きていなかった縦方向のビーム不安定性が発生する。現在、RF 加速電圧に周回周波数の変調をかけ、シンクロトロン振動数がバンチ毎に異なるようにすることで対処している。

今後の課題としては、これまでに述べた問題点の解決のほか、具体的利用の検討、蓄積電流値の増強、などがあげられる。

(早乙女)

1-7 加速器診断

(1) 加速器診断 I

偏向電磁石を光源とする加速器診断 I では、X線を用いた電子ビームのエミッタンス診断や加速器構成機器の試験・開発、可視光線を用いたバンチ純度やバンチ長の診断等を行っている。また、遠赤外線レーザー光を蓄積リング内に入射し電子ビームと逆コンプトン散乱させることにより10MeV領域のガンマ線生成試験を行っている。

2005年9月に開始した低エミッタンスオプティックスによるトップアップ運転では、高性能な放射光ビームをユーザーに安定して供給するために、電子ビームのエミッタンスやバンチ純度等を常時監視していくことが重要である。X線ビームプロファイルモニター^[15]を常時モニターとして整備するために、中央制御室からの遠隔測定の試験と自動測定に必要なプログラムの開発をすすめた。また、バンチ純度モニターについても、常時モニター化に向けた機器の遠隔制御の試験等を行った。

放射光利用実験技術を高度化する上でも重要な放射光の

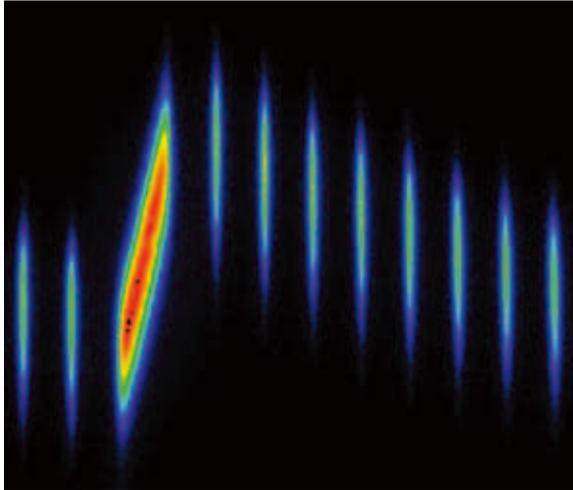


図17 ストリークカメラで測定したバンチ間隔の例。10個の孤立バンチと蓄積リング1周の12分の1のマルチバンチ部分とが共存する運転モードの場合を示す。RF信号を基準とした各バンチのタイミングを縦軸にとり、リング1周分のバンチを横軸に並べたものである。オレンジ色の部分がマルチバンチ部分に対応する。

パルス光としての特性を詳細に調べるために、ストリークカメラを用いてセベラルバンチ運転モードでのバンチ間隔を測定した。図17に測定結果の一例を示す。Dモードと呼ばれる、10個の孤立バンチと蓄積リング1周の12分の1のマルチバンチ部分とが共存する運転モードで測定したデータである。図中での各バンチの上下方向のずれが、バンチ間隔とRF基準信号の周期とのズレに対応し、各バンチが発生する放射光パルスのタイミングとRF信号の周期を基準とするタイミングとのズレを示す。この例ではマルチバンチ部分の前後を比較すると孤立バンチからの放射光パルスのタイミングが最大でバンチ長と同程度異なっており、パルス特性を生かした放射光利用実験技術を今後高度化していく上でバンチ間隔の情報が重要であることを示すものである。

(2) 加速器診断Ⅱ

挿入型光源装置からの放射光を利用した光源電子ビームの診断や蓄積リングで必要な高耐熱機器・高耐放射線機器の試験・開発等を目指して加速器診断Ⅱの整備を進めている。また、直線部を利用した遠赤外線レーザー光と電子ビームとの逆コンプトン散乱による10MeV領域の大強度ガンマ線の生成などを計画している。

前年度に製作した挿入型光源装置^[16]を蓄積リング直線部に設置した。光源を設置するために、光源上流及び下流への光アプソーバの設置等、直線部の真空チェンバの改造を行った。この光源装置は、耐熱機器・耐放射線機器等の試験や開発に必要な高パワー放射光を発生するためのマルチポールウィグラー型磁石列が取付けてあるが、他の目的に応じて多様な放射光を発生するための各種の磁石列への交換を効率的に行うために、光源本体をスライドレール付



図18 加速器診断Ⅱ挿入型光源装置。電子ビーム軸に挿入された状態（上）と、電子ビーム軸から退避させた状態（下）を示す。

きの架台に取付けてあり、電子ビーム軸から退避させて現場で磁石列の交換作業ができる構造としている（図18）。また、この光源装置の設置にあわせて、マルチポールウィグラー型磁石列からの高パワー放射光に対応できる新型の光アプソーバ^[17]を加速器診断Ⅱの基幹部に設置した。

光学ハッチに設置する輸送チャンネルで用いる真空装置の整備をすすめ、超高真空を得るための排気用チェンバ、不要な軸外光を遮断するためのマスク、低エネルギー光を吸収し放射光パワーを調整するためのグラフィイトフィルタとメタルフィルタ、エッジ放射光を大気中に出出すための可動式ミラーチェンバ、放射光を遮断するためのアプソーバを製作した。

挿入型光源を設置した直線部の上流と下流の偏向電磁石の端部からは、エッジ放射光と呼ばれる放射光が発生する。エッジ放射光をビーム診断に利用するための予備実験として、エッジ放射光のマイクロ波成分の強度とバンチ長やバンチ電流との関係を測定し、コヒーレント放射光成分の探索を行った。

(高野)

1-8 遠赤外レーザーを用いた10MeV領域ガンマ線の生成 [18]

SPRING-8の8GeV電子と遠赤外レーザーによる逆コンプトン散乱により発生するMeV領域のガンマ線は、電子のエネルギーが高いために、低エネルギーリングで発生する逆コンプトン散乱ガンマ線に比べて、前方方向の狭い角度範囲に集中した高輝度のガンマ線となる。また、レーザーの波長が長いために光子数が短波長レーザーなどに比べて桁違いに多く、得られる逆コンプトン散乱ガンマ線も大強度が期待できる。さらに、8GeVの電子にとって、逆コンプトン散乱過程で失うエネルギーは高々0.1%程度であるので、電子は高周波加速空洞からエネルギーを受け取ることにより周回を続けることができ、蓄積電子は軌道上から失われることがない。このことは、レーザーを高出力化すればするほど、大強度のMeV領域ガンマ線を得ることができることを意味している。この目的のために、CO₂レーザー励起のCH₃OHレーザー（発振波長118.8μm）の開発を行ってきた。現在までに測定された最大出力は、CH₃OHとHeの全圧66.2Pa、レーザー管の温度3.4℃で得られた最大1.407W（パワーメータ直読値）である。水蒸気による吸収、パワーメータの補正値を考慮すると、118.8μm線は1.6W以上の出力と見積られた。また、約24時間の連続発振に対して、±1%の出力変動という長時間安定性が達成された。

レーザー光は実験ホールに設置されたレーザークリーンルームから蓄積リング収納部の天井貫通口を通して伝送され、ビームライン基幹チャンネルの途中に設置したレーザー導入チェンバの手前に設置されたミラーシステム部へ輸送される。クリーンルームからミラーシステム部までは約20mの距離があり、アクリル中空導波管（外径55mm、内径49mm）を用いた伝送が行われる。

加速器診断 I（BL38B2）の基幹チャンネルに設置されたレーザー導入チェンバ内に導かれた遠赤外レーザー光は、チェンバ内の銅製金コートミラー（放射光および生成ガンマ線が通過するスリットを設けている）で反射され、基幹チャンネルのダクト内を進み、電子との衝突点に到達する。ミラーから電子との衝突点までの距離は20mであり、この間にはレーザー光に対して多数のアパーチャー制限となるコンポーネントが設置されており、これらのアパーチャーに当たった光は回折を引き起こし強度減衰の原因となる。この回折の効果を含めて行った計算によると、ガンマ線の発生量は波長118.8μm、出力2Wのレーザーを入射した場合、 $N_{\gamma} = 1.1 \times 10^4$ photons/secである。

加速器診断 I（BL38B2）の偏向電磁石部で生成されるガンマ線ビームには、偏向電磁石内で発生する放射光が同じ軸上に放射される。放射光による測定系のパイルアップを避けるために、ディテクターの前方にPb 20mm、C 200mmのアブソーバと、各々長さ50mmの10mmφと12mmφのPbコリメータを置いた。ディテクターはφ50×90mmの

LYSO：Ce単結晶シンチレータとPMT（浜松ホトニクスH7195アセンブリー）を用いた。ディテクターはバックグラウンドを避けるために10mm厚の鉛の箱の中に設置した。これらの概念図を図19に示す。

測定されたスペクトルを図20に示す。エネルギーの校正は⁸⁸Y線源を用いて行った。測定系のDiscriminatorを約2MeVに設定しているため、これより低エネルギー側のデータは取得できない。2～10MeVの領域でも低エネルギー側のRateが、低くなっているのは、Pb 20mm、C 200mmのアブソーバの吸収が大きいためと考えている。スペクトル測定の過程において、蓄積電子が逆コンプトン散乱により失われていないことは確認した。

このときの遠赤外レーザーのパワーは、レーザー出力鏡近傍での測定で890mWであった。導波管での伝送効率を考慮すると、レーザー導入チェンバのところでは670mW程度であると考えられる。この時の正味のガンマ線Rate 7.60 ± 0.11 cpsからアブソーバの吸収、上流部の4象限スリット、レーザー光の伝送効率などの影響を考慮して求めたガンマ線の生成レートは、レーザー2Wあたりに換算して 6×10^3 photons/sec程度となった。これは、先に計算で求めた値と2倍程度の違いがあるが、レーザー光の拡がりや計画通りになっていないなどの原因が考えられる。

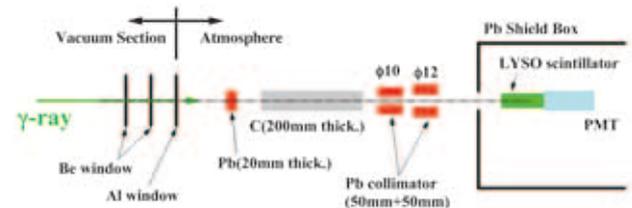


図19 ガンマ線測定系の構成概念図

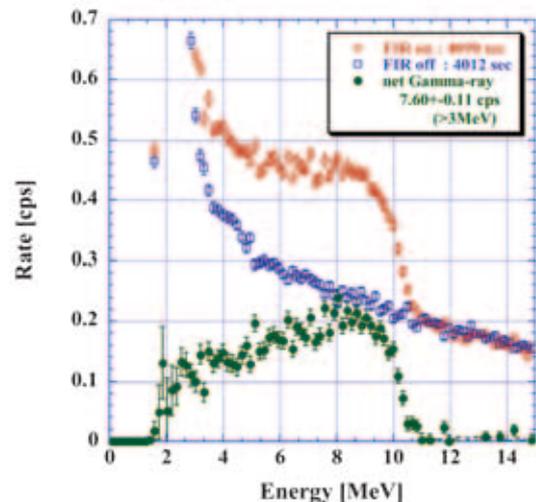


図20 逆コンプトンガンマ線の測定スペクトル

より高強度の逆コンプトンガンマ線の生成を目指して、加速器診断II (BL05SS) でのガンマ線生成計画が進行中である。このビームラインは、挿入光源設置のための約5mのフリー直線部を有している。フリー直線部の前後の4極、6極電磁石部の直線部を加えると、電子ビームと遠赤外レーザー光の相互作用領域として、約16mの直線部が利用できる。更に、遠赤外レーザー光の大きな角度拡がりによる実効的な逆コンプトン断面積の減少を緩和するために、相互作用領域に近いところまで遠赤外レーザー光を導波管により伝送して、真空中に導入することを計画している。そのためのミラーを格納した真空チェンバを製作して、SPring-8蓄積リングに設置を完了している。また、このビームライン近傍に、新たなレーザークリーンルームを建設して、そこから前述のミラーチェンバ近傍までのアクリル中空導波管の設置も完了している。今後は、ミラーチェンバに導入する前のレーザー光調整用のミラーシステムの設計・製作を進め、なるべく近い将来でのガンマ線の生成を行う予定である。ここでのガンマ線強度としては 10^5 photons/sec以上が見込まれている。

(大熊)

参考文献

[1] H. Tanaka and A. Ando, N.I.M. **A369** (1996), 312.
 [2] M. Takao, et al., Proc. of APAC04, Gyeongju, Korea, 49.
 [3] H. Tanaka, et al., to appear in Proc. of EPAC06, Edinburgh, June 2006.
 [4] H. Tanaka, et al., Proc. of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, 222.
 [5] H. Tanaka, et al., Proc. of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, 1330.
 [6] H. Tanaka, et al., N.I.M. **A539** (2005), 547.
 [7] 高雄、他、第3回日本加速器学会年回、第31回リニアック技術研究会報告集掲載予定、仙台。
 [8] 松井、田中、第3回日本加速器学会年回、第31回リニアック技術研究会報告集掲載予定、仙台。
 [9] T. Nakamura, et al. Proc. of EPAC' 04, Lucerne, July 2004, p. 2646.
 [10] T. Nakamura and K. Kobayashi, ICALEPCS' 05, Geneva, Oct. 2005, PO2.022-2.
 [11] T. Nakamura, 日本加速器学会誌「加速器」、第1巻第3号、2004年、pp.199-210.
 [12] T. Nakamura, et al., to appear in Proc. of EPAC' 06, Edinburgh, June 2006.
 [13] W.X. Cheng, et al., to appear in Proc. of EPAC' 06, Edinburgh, June 2006.
 [14] K.H. Hu, et al., to appear in Proc. of EPAC' 06, Edinburgh, June 2006.
 [15] S. Takano, M. Masaki, H. Ohkuma, N.I.M. **A 556** (2006) 357.

[16] 正木、他、第2回日本加速器学会年回、第30回リニアック技術研究会報告集、2005、鳥栖、p. 657.
 [17] 田村、他、日本真空協会「真空」、第48巻第3号、2005、p.148.
 [18] H. Ohkuma, et al., to appear in Proc. of EPAC' 06, Edinburgh, June 2006.

加速器部門
 運転・軌道解析グループ
 大熊 春夫

2. 線型加速器グループ

2-1 運転状況

2004年5月より開始した蓄積リングのトップアップ運転は、途中、台風被害をうけた蓄積リング棟修理による中断があったものの、順調に維持されている。また、2004年9月には、SPring-8とNewSUBARUに常時ビームを振り分ける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。SPring-8およびNewSUBARUそれぞれについて、トップアップ運転の最短ビーム入射間隔は、1分および5秒、ビーム電流安定度は、0.1%および0.2%以下であった。

両蓄積リングに入射するビームの種類とその質は、昨年と同じく表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1ns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。

表1 リニアックのビームパラメータ(ECS動作)様

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

SPring-8蓄積リングへのトップアップ入射間隔はフィリングパターンにより異なり、1分または5分固定である。

NewSUBARUでは、入射間隔は固定せず、蓄積電流が一定になるよう入射を行っており、最短で5秒間隔である。1.5GeV運転は現在日中のみ行われており、朝に一回、約25分の入射を行っている。

2005年におけるリニアック総運転時間は、約5,320時間であった。大電力クライストロン変調器の2005年末までの累計運転時間は、ヒーターオン時間で約62,000時間、高圧オン時間で約51,500時間に達した。ただし、第1および2

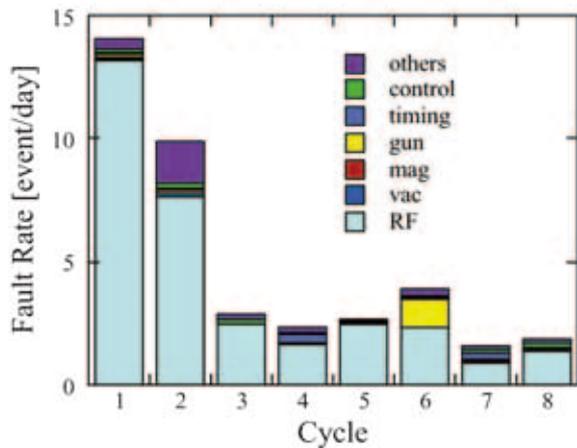


図1 インターロックフォールトの原因別頻度

サイクルの522時間は、蓄積リング棟修理のため蓄積リングの運転は無く、リニアックおよびブースターシンクロトロンのマシンスタディ、およびNewSUBARUへのビーム入射が行われた。

図1上に2005年中のサイクル毎のインターロックフォールト統計を示す。第1および第2サイクルではRFフォールトが他のサイクルの数倍の頻度で発生しているが、これらのほとんどは、いくつかのサイクロンの動作不良を原因としており、該当するサイクロンのリザーバ電圧調整などによりフォールトは治まった。また第6サイクルでは電子銃のフォールトが目立つが、これは電子銃から不意のバースト電流が放出されるという重大な問題が発生したためである。原因は不明であったが、電子銃のグリッドバイアス電圧およびグリッドパルス電圧を下げると発生しなくなることが分かり、その後2006年第1サイクル前の停止期間中にカソードを交換した。新しいカソードでは、バーストは今のところ全く記録されていない。尚、後半のサイクルでも約1.6回/日のフォールトが見られるが、これは、クライストロンに関するフォールト発生後十分に間をおかずに変調器の高圧を投入して再び同じフォールトを起こしてしまうような、操作に起因する事例や、ノイズなどによる誤動作も多く含んでいる。後者については順次対策を施している。

トップアップ入射がリニアックのフォールトにより延長された時間をトップアップ運転時間で割った、「ダウンタイム」については、第6サイクルでは前述の電子銃バーストによるダウンタイムが1.8%と顕著に目立つが、その後は0.25%ほどである。

2-2 加速器の改良および安定化

リニアックでは、トップアップ運転中は、クライストロン変調器のフォールト等による加速中断は入射間隔すなわち1分以下におさえねばならず、途中で軌道やエネルギー

の変化を補う調整をすることはほとんどできない。そのためリニアックは、安定度と信頼性の向上に努めている。

SPring-8リニアックでは、冷却水の温度安定化、エネルギー補償システム (ECS) の導入、ビームパルスと2856MHz RFとの完全同期化、フィードバック制御導入など、種々の安定化を1998年より続けており^[1]、2004年度末までにほぼその作業を終えた。これらのビーム安定化は、安定なトップアップ運転の維持に大きく貢献している。

以下では、特にリニアックの信頼性向上をめざして、2005年度に行われた改良のうち主立ったものを紹介する。

(1) 初段クライストロンの二重化^[23]

SPring-8リニアックは、計13本の80MWクライストロンを有する。その内2本はスタンバイモード、すなわち他のクライストロンと同様に大電力RFを出力するものの、ビーム加速に寄与しないよう、ビームが射出されるタイミングの時のみ、変調器へのトリガパルス出力を停止してクライストロンに高電圧パルスを印加しない状態にしている。これにより、いずれかのクライストロンがフォールトしてすぐに復帰できない場合、スタンバイ・クライストロンを加速モードに切り替えて、簡単な調整後直ちにビーム加速を再開できる。

しかし、初段 (H0) すなわち最上流にある80MWクライストロンだけは、事情が異なる。このクライストロンはバンチャおよび初段の加速管にRFを供給し、さらに下流の11本のクライストロンを励振している。したがって、このクライストロンが停止すると、電子ビームを全く加速できなくなる。そのような事態を避けるため、必要なときに初段クライストロンを第二段目に入れ替えられるシステムを製作した。このシステムの構成を図2に示す。

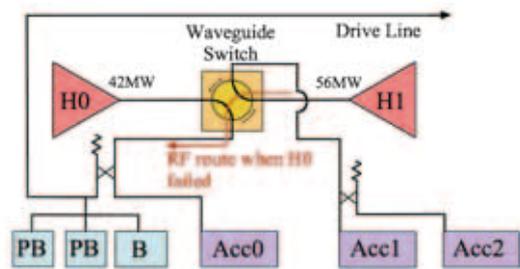


図2 入射部大電力RF系バックアップシステム

通常、H0クライストロンは入射部の加速管に、H1クライストロンはH1およびH2加速管に大電力RFを供給する。もしH0クライストロンあるいは変調器がフォールトし、短時間に復帰できない場合は、中央の導波管切替器を回転させて、H1クライストロンから入射部にRF電力を供給する。H1およびH2加速管は休止させることになるが、それでも下流にビームを問題なく輸送して1GeV加速が可能であることは過去に確認済みである。

最も重要なコンポーネントである大電力導波管切替器に

表2 導波管切替器に求められる仕様

	Nominal	Maximum
Peak RF power	60MW	80MW
Pulse length	2.5 μ s	2.5 μ s
Repetition rate	10pps	60pps

要求される仕様は表2の通りである。

すでに商品化されている大電力用導波管切替器は内部にSF₆ガスを充填して使用するのが一般的である。しかし、SF₆ガスは万が一放電が起こると硫黄を析出し、また地球温暖化の原因となるなど、できれば使用を避けたい。そこで、真空型導波管切替器を日本高周波株式会社と共同で開発することにした。

この導波管切替器は、以下の特徴を有している。

- 1) ロータリーEベンド採用
- 2) 真空型
- 3) ロータ表面の電界研磨による放電対策
- 4) ロータ部放熱機構

放電対策としては、上記3)の電界研磨以外にも、二分割して切削したロータの接合を拡散接合してボイドが残るのを防ぐ、真空排気ポートを設ける、などを行った。

図3は、拡散接合前および完成したロータの写真である。ロータの拡散接合は、半割のロータを重ねて、加熱しながら圧接する。接合したロータは、右の写真のようにRFチャックの溝を切り、電解研磨をして仕上げる。

特に真空仕様ではロータ部分の放熱が不十分になりやす



図3 接合前のロータ半割および完成したロータ

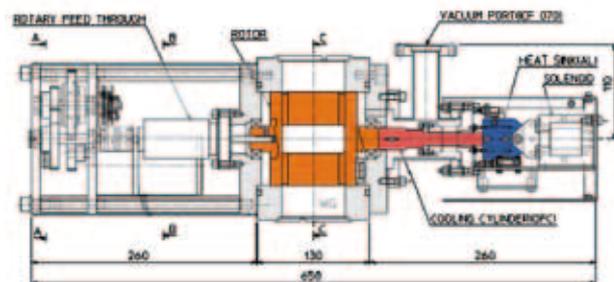


図4 ロータ(橙)に伝熱ロッド(赤)が接触し、ヒートシンク(青)で熱を空気に放散させる。

表3 完成した導波管切替器のRF特性

	Port 1 to 2	Port 3 to 4
VSWR	1.03	1.04
Insertion loss	0.040dB	0.048dB
Isolation	< -87dB	

く、高温になる恐れがあるため、図4のように、ロータに銅の伝熱ロッドを面接触させ、ヒートシンクで空冷している。

完成した導波管切替器のRF特性は、表3に示す通りで、反射も他方のポートへの漏洩も十分に小さいことが分かる。

テストスタンドにて導波管スイッチをRFコンディショニングした後、図2のバックアップシステムを構築した。その際のRFコンディショニング到達点は、H0/H1クライストロン出力：50MW/74MW、パルス幅：2.5 μ s、繰り返し：60ppsであり、ヒートシンク温度は42℃であった。また加速器運転期間中にH0/H1切替試験が行われ、切替後もビームは再現されることが確認された。

(2) 暗電流の低減 [4,5]

現在、電子銃から放出される暗電流、すなわちグリッド放射電流は、電子銃直後のビームデフレクタによって、ほぼ完全に除去している [4]。初段加速管から放出される暗電流については、初段加速管にソレノイドコイルを巻くことで暗電流を低減できないか、試験を行っている。

図5は、バンチャ部のソレノイドをON/OFFして暗電流のエネルギー分布を測定した結果である。初段加速管直後の偏向電磁石によりビームエネルギーを弁別し、チタン窓やビームダンプからのガンマ線をプラスチックシンチレータと光電子増倍管で測定した。この図から分かるように、ソレノイドに通電すると、暗電流は明らかに減少する。

我々は、ソレノイド磁場の効果を次のように期待した：

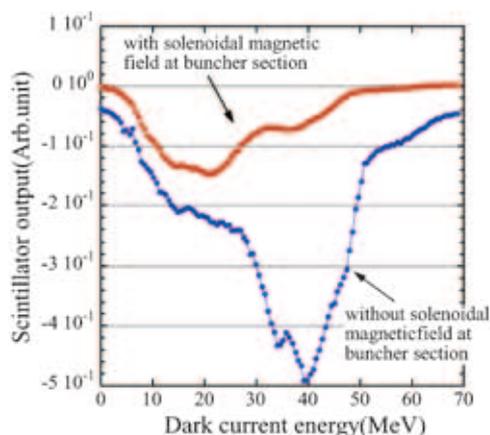


図5 バンチャ部ソレノイド磁場による暗電流減少の効果

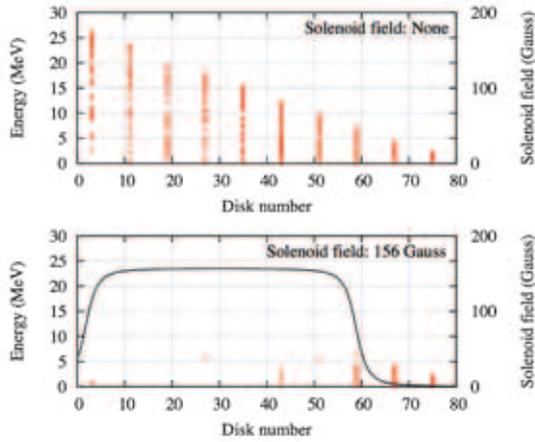


図6 加速管を通り抜けた電子のエネルギー

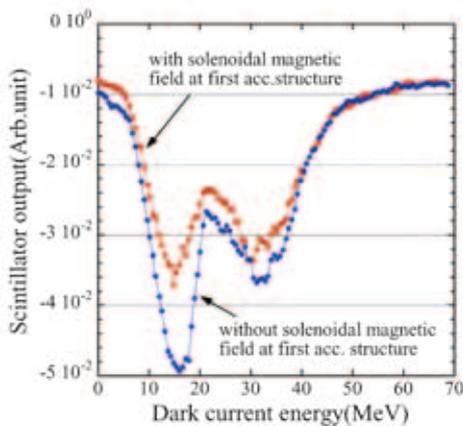


図7 H0加速管に巻いたソレノイドコイルによる暗電流減少の効果

加速管ディスク孔付近から放出された電子は、ソレノイド磁場により下流のディスクに衝突して高いエネルギーにまで加速されることはない。従って、加速管を通り抜けた暗電流は、主ビームとはエネルギー差が大きく、選別可能である。

図6は、加速管のディスク孔付近から放出され（8枚毎に計算）、加速管を通り抜けた電子のエネルギーをシミュレーションした結果である。図の横軸は通り抜けた電子が発生したディスク番号、縦軸は到達エネルギーである。この計算結果に依れば、160Gauss程度の磁場をかける場合には、10MeV以上のエネルギーにまで加速される電子は皆無である。

実際にH0加速管の約7割を覆うように三分割したソレノイドコイルを設置し、150gauss前後の中心磁場強度が得られる電流を流して測定した暗電流のエネルギー分布が、図7である。このとき加速管に供給したRF電力は15MWで、通常の65%ほどであった。図のように若干の暗電流低減効果はあるものの、ソレノイド磁場によって暗電流のエネルギー分布が低エネルギー側に著しく偏るということは確認できなかった。

一方、初段加速管のRF電力を下げると、図8に示すように、暗電流は目立って減少する。しかし、ビーム輸送はH0での加速利得が小さいと困難になるという不利益がある。従って、ソレノイド磁場を併用し、RF電力はなるべく下げることなく暗電流を十分に抑制できる解がないか、今後も調査を続ける。

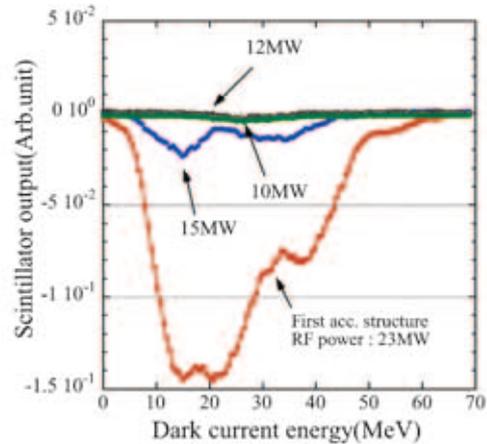


図8 暗電流のH0加速管に供給するRF電力への依存性

2-3 フォトカソードRF電子銃開発

フォトカソードRF電子銃で極低エミッタンス電子ビームを生成するには、光源となるレーザーパルスの3次元強度分布を、空間電荷効果を低減するのに理想的な円筒形状にしなければならない。空間方向分布については、すでに可変形ミラーによる整形システムを完成させた [6]。今回、パルススタッカ方式により、時間、倍の長さのパルスを生成する方向分布も理想的な矩形形状に整えた [7]。

パルススタッカとは、図9のように、レーザーパルスをまずスプリッターで二分し、一方のパルスをパルス幅分遅延させてからこれらのパルスを再合成して倍のパルス長を得る技術である。ただし、それぞれの光パルスはP偏向およびS偏向しているため、合成の際に干渉することはない。図中の半波長板は、板を回転してP偏向/S偏向の分岐比を変えるためのものである。

このスタックをn回行うことにより、2のn乗倍のパルス

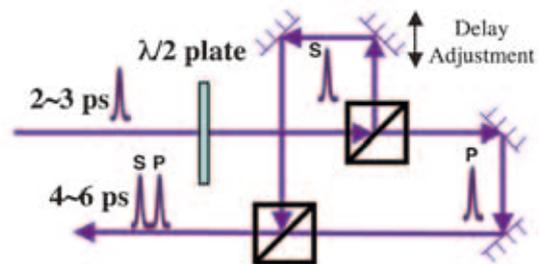


図9 パルススタッカの原理図

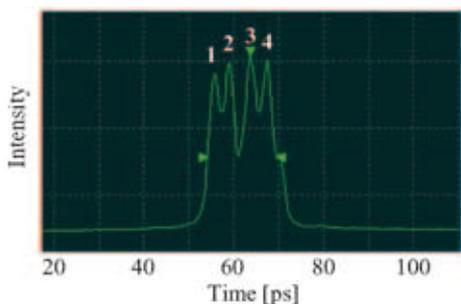


図10 パルススタッカ調整途中の4倍長レーザーパルス波形（ストリークカメラで測定）

長が得られる。図10は、調整途中のパルス波形をストリークカメラで測定した例である。この場合、2回スタックして、4倍のパルス長を得ようとしているところである。図中の1と3、あるいは2と4が、一段目でスタックされたレーザーパルスであり、あえてSとPの間隔を空けてある。二段目で1と3および2と4の二群に分割し、2のパルスが、1と3の間に入るように遅延時間を調整している。

参考文献

- [1] H. Hanaki, et al., Proc. of PAC2005, Knoxville, USA, p. 3585.
- [2] 谷内、他、第2回日本加速器学会年回、第30回リニアック技術研究会報告集、2005、鳥栖、p. 299.
- [3] T. Tanuchi, et al., to appear in Proc. of EPAC2006, Edinburgh, UK.
- [4] T. Kobayashi et. al., Proc. of EPAC2004, Lucerne, Switzerland, p. 1326.
- [5] T. Kobayashi, et al., to appear in Proc. of EPAC2006, Edinburgh, UK.
- [6] H. Tomizawa et al., N.I.M. A **557** (2006) 117.
- [7] 富澤、他、第3回日本加速器学会年回、第31回リニアック技術研究会報告集掲載予定、仙台.

加速器部門
線型加速器グループ
花木 博文

3. リング加速器グループ

3-1 SSBT系軌道安定化

SPring-8のトップアップ運転では、放射光の利用実験中にビーム入射が行われる。蓄積リング挿入光源のギャップを閉じたまま入射するので、ビームの一部が磁極に当たり、挿入光源の永久磁石を減磁してしまう可能性がある。このため、トップアップ運転を安定に継続させるためには、入射時のビーム損失をできるだけ小さく保つ必要がある。シミュレーションの結果、ブースタからの出射ビームのエミッタンスをさらに小さくする必要のあることがわかった。

入射部での水平方向ビームサイズを実効的に小さくするため、ブースタから蓄積リングまでのビームトランスポート(SSBT)にスリットシステムが設置してある。しかしながら、ブースタからの出射軌道やSSBT系での軌道が時間的に変化すると、ビーム損失も変動する。また、スリット上流区間でビームの水平方向位置が変動すると、スリット前後のビーム通過率が変化し、1ショット当りの入射電流値が変わる。このため、SSBT系の軌道安定化が重要な課題となる。これまでの観測で、蓄積リング入射部にて軌道変動が観測されている。

軌道変動の原因調査のため、SSBT系偏向電磁石電源全台数に出力変動監視用の外部DCCTを設置した。観測の結果、スリット下流区間の偏向電磁石電源についてドリフトが観測され、このドリフトと入射部での軌道変動の間に明確な相関が見られた。ドリフトの原因として、電源内部のフィードバック制御用電流検出器であるシャントの劣化が考えられる。そこで、これらの電源のフィードバック制御用電流検出器をDCCTに変更した。改造後、ドリフトは測定誤差以下となり、入射軌道の変動も抑制できた(図1)。また、取り外したシャントの劣化状況について調査中である。

その他の原因として、ブースタのCODと機器収納部の室温との相関が見られたので、収納部内のファンコイルユニットの運転形態を変更した。現在、CODの自動測定、及び自動補正プロセスについての検討を進めている。スリット部でのビームの水平方向位置が季節的に変動している。出射パルス電磁石のうち偏向角の大きいセプタム3、4について電磁石電源の出力監視用外部DCCTを設置した。また、建屋の変形について調査するため、建屋の水平区間に床面の変形を観測するためのレーザー干渉計、ひび割れセンサを設置した。建屋の傾斜区間に傾斜計を設置した。これまでのところ、軌道変動との明確な相関は見られていない。

(深見)

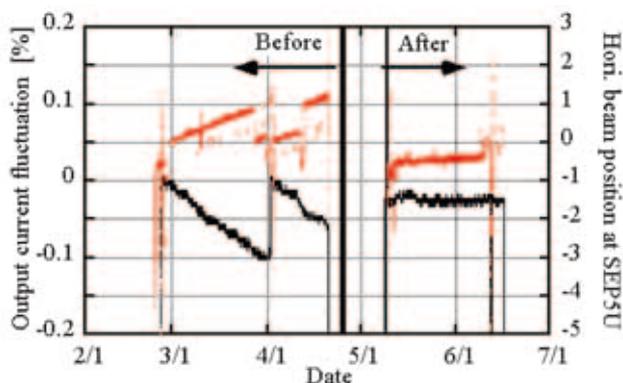


図1 SSBT系偏向電磁石電源改造前後での出力電流ドリフト(黒)と入射部付近のプロファイルモニターSEP5Uで観測された水平方向軌道変動(赤)。双方とも2006年の第1サイクル立ち上げ時からの変化を示す。軌道の符号はビーム進行方向に対し右側が正である。

3-2 真空チェンバ残置多極電磁石交換方法

SPring-8蓄積リングでは電磁石の設置精度向上のため4～5m長の共通架台上に4極6極電磁石5～7台を設置している。これらの多極電磁石は上下半割り構造をしており、半断面は真空チェンバの最低面より4cm高い。従って電磁石の下半分を交換するためには真空チェンバをいったん外さねばならず、そのため交換する磁石だけでなく共通架台上の全ての磁石の上半分も外さねばならなかった。当然、必要な磁石の交換後再び、真空チェンバと全ての磁石の上半分の復旧も必要となった。さらに真空チェンバの取り外し、取り付けを行う事により、チェンバが大気開放されるためにベーキングも必要であった。

しかし、電磁石の底と共通架台の間隔は6cmあり真空チェンバを外さずに電磁石の下半分を出し入れすることは可能ではなかった。そこで今回横からの挿入が可能ないように底板など一部加工し実際に挿入を試みた。図2のように共通架台の横に別の重い台を置き、鉄板（厚さ15mm）を渡しその上に厚さ5mmのテフロン板を敷き電磁石の両方のへりを乗せ2本のレバーホイスで引き正規の位置付近に移動した。下半分だけで重量500kgあったが、軽く引くことができた。その後チェーンブロックでつり上げながら底板を挿入し、共通架台の下から低摩擦係数のサポートも通してボルトを入れ従来と近い仕様で4極電磁石8台、6極電磁石2台を設置アライメントできた。電磁石の下半分を吊り上げる際、真空チェンバとの余裕がない場合もあったがチェーンブロックを2個使い傾けることで揚げる事ができた。真空度は作業中に溶接されている金物を除くためのドリルやハンマーの振動が加わる時にごく短時間（1分以内）わずかに悪化したが、問題になる程度ではなかった。

現在設置されている電磁石の下半分は4本のボルトを切断すれば取り外すことができる。そして今回の方法で設置できるので復旧に必要な時間は大幅に短縮できると考えら

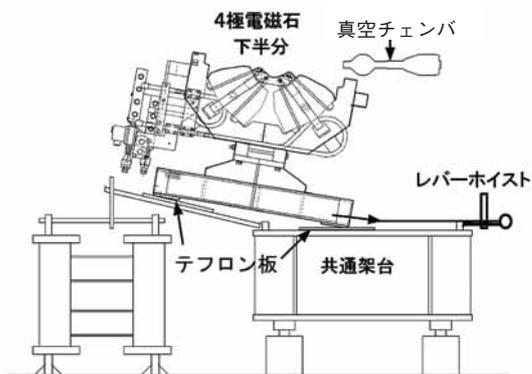


図2 真空チェンバを取り外さずに行う4極電磁石の下半分の取付作業の概念図

れ、コイルの層間不良等で下半分の交換の時ユーザー運転時であれば大きなメリットとなる。設計の段階で考慮しておけばボルトの切断なしに交換することが可能であったと考えられる。

(松井)

3-3 降雨による蓄積リング床レベル変動への防災工事の影響

降雨時に蓄積リング収納部の床が上昇し、ビーム軌道のずれを起こしている。これは地下水位の上昇によりトンネルが浮くためと考えられる。2005年の夏から秋にかけて防災工事の一部として蓄積リングと三原栗山の間の内周側の平地に配水管を埋設したり、表面をコンクリートで覆ったりして降水が蓄積リングトンネルの基礎に入らないようにした。

2003年から地盤変動の測定のため、HLS（流体静力学水レベルシステム）を、アンダーパス部を含む蓄積リング床50mにわたり6箇所（センサ1～6）に設置している。雨の時アンダーパス部を含む約40m（センサ1～5）に渡って、収納部の床はビームラインの方向にほぼ直線状に傾き、レベル差が変化する。図3は最近二年間の主な降水とその時のセンサ1と5のレベル差の変動量を示すものである。2005年8月以後、変動がだんだん小さくなっているのが分かる。図4は図3の降水量と床レベル差の変動との相関を示したものである。昨年8月の防災工事実施の前（図4の上の部分）は、床レベル差の変動は雨量と一次の相関が見られ、50mm以上の降水が0.03～0.06mmの変動を起こしていた。これに対し防災工事を実施後（図4の下の部分）、レベル差の変動は工事前と比べて3分の1程度に減少している。HLSで測っているもう1箇所35セル付近の測定値も同じ傾向を示している。これらの結果から防災工事は降雨による地盤の変動を抑制する効果があると推測できる。

(張)

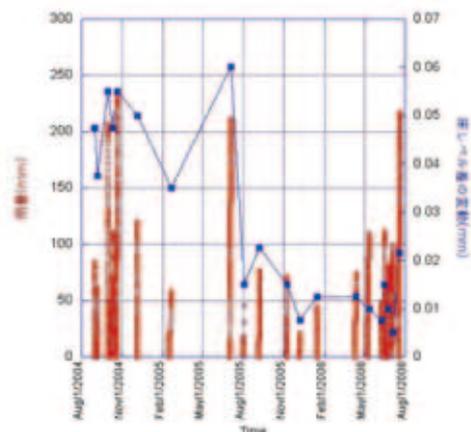


図3 降雨量とHLSによる床レベル差の変動

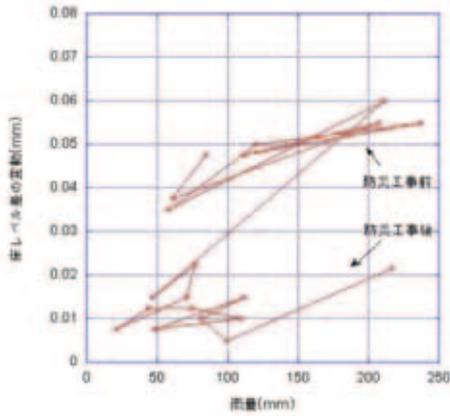


図4 防災工事前後の降雨量と床レベル差

3-4 蓄積リング高周波加速設備

蓄積リング・高周波加速設備Dステーションの高電圧用ケーブルの端末処理部において陰極の高電圧部とグラウンド線の間で放電が発生した。クライストロン高圧電源は、クライストロンの電子銃用ヒータ電源、アノード電源、カソード電源から構成されている。アノードとカソードの電位は抵抗分割により決められおり、破損した高圧ケーブルは昇圧整流器から高電位を与えるケーブルであった（図5参照）。破損部のケーブルと放電した被覆部を、各々図6、7に示す。

蓄積電子ビームの偏向電磁石による放射光エネルギー損失は、9.2MeVであり、挿入光源（主にアンジュレータを考慮する）によるエネルギー損失がこれに加わる。2005年現在、設置されている挿入光源は26台であるが、長直線部に設置されている挿入光源は通常型の5倍の長さを持つため、挿入光源は30台分あることになる。挿入光源1台当たりの放射光による最大エネルギー損失を0.1MeVとすると、全台数による最大エネルギー損失を3MeVと見積もることができる。従って、全エネルギー損失は12.2MeVとなる。現在、蓄積リング4ヶ所に設置している高周波加速空洞で、各々4MVの加速電圧を供給し、リング全体では、加速電圧16MVを供給している。電子ビームを蓄積していない状

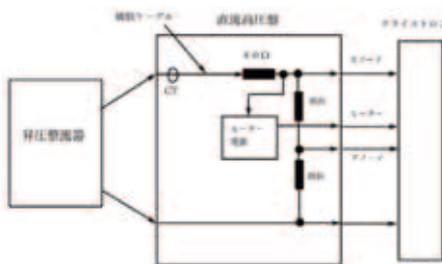


図5 直流高圧盤ブロック図

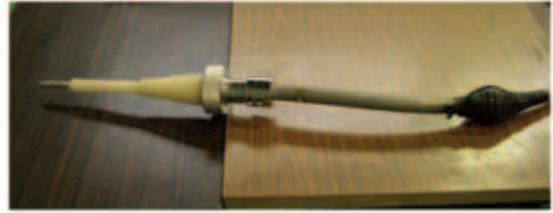


図6 クライストロン高圧電源部において使用中の高圧電源ケーブル放電。放電場所は右側の黒い部分極の高電圧部とこのアース線の間で放電が発生した。



図7 放電した部分の拡大写真。銅線の部分はアース線部で陰極の高電圧部とこのアース線の間で放電が発生した。

態で1ヶ所当たり加速電圧4MVを発生させるために、高周波電力は400kW必要としている。蓄積電子ビームの電流値が100mAの場合、リング全体としてビームのエネルギー損失による電力は、1.2MWとなるため、1ヶ所当たり300kWとなるので、1ヶ所あたりの総高周波電力は、700kWとなる。

今回のような故障時には、3ヶ所による運転を行わなくてはならないため、1ヶ所当たりのビームのエネルギー損失による電力は400kWとなるため、合計800kW/1ヶ所となる。使用中のクライストロンは、最大出力電力は1MWであるので電力的には可能であるが、電源の最大カソード電圧が85kV前後であり、この値にカソード電圧を設定すると安定運転ができない。このため、蓄積電子ビーム電流値を80mAとして運転した。

(川島)

3-5 蓄積リングイオンポンプ高圧ケーブルの放射線劣化調査と交換

蓄積リングで発生する放射光の内、実験に用いない放射光は放射光受光体（アブソーバ）により吸収され、そこから強い散乱X線が発生する。この散乱X線が蓄積リング内の機器、特にケーブルの絶縁体に対し損傷を与えている。その1つとして、2004年末頃から過電流による異常を発生するイオンポンプが出始め、絶縁体がエチレンテトラフルオロエチレン（ETFE）の高圧用ケーブルの絶縁不良が原因であることがわかった。放射線（散乱X線）による損傷を疑い、線量分布測定とケーブルの損傷調査を実施した。

その結果、線量とケーブル絶縁体の機械的強度等の劣化の程度によい一致があることが確認できた。

アブソーバで発生する散乱X線は真空チェンバの材質、厚さ、あるいは周辺機器の配置により、局部的に高線量となる。従って、ケーブルに照射される散乱X線の線量も一様ではなく、場所により大きく異なる。そのため、絶縁劣化を発生したイオンポンプケーブルのルートに沿って、放射線の線量分布測定を実施した。測定にはフィルムシート状の線量計GafChromic HD-810 (ISP Technologies INC.)を短冊状に切断して用いた。

一方、絶縁劣化を起こしたケーブルについて、外観・断面観察、絶縁抵抗測定、引張試験、曲げ試験、硬度測定、

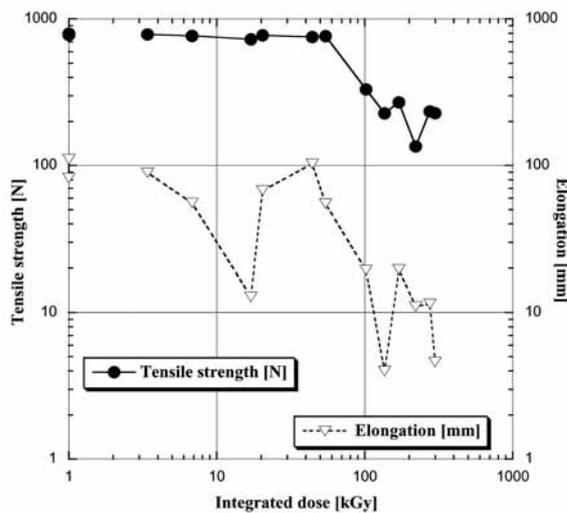


図8 絶縁体の引張強度と伸び。積分電流が100kGyを超すと引張強度、伸びともに低減する。

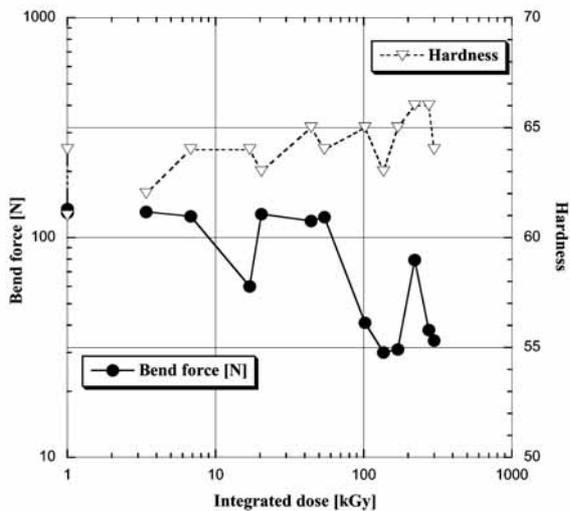


図9 絶縁材の曲げ強さと硬さ。積分電流が100kGyを超すと曲げ強さは低下するケーブル放電。放電場所は右側の黒い部分極の高電圧部とこのアース線の間で放電が発生した。

示差走査熱量分析 (DSC) などの調査を行い、ケーブルに照射された積算線量と比較した。

外観と絶縁抵抗測定の結果、ケーブルの絶縁不良は、絶縁体が折れることによる芯線とシールド線間の放電の発生によるものとわかった。積算線量が100kGyを超えるケーブルは、比較的容易に手で折ることができた。また、断面観察の結果、積算線量で100kGyを超える試料は白色のETFE絶縁体が透明になる傾向が観察された。

引張試験の結果を図8に、曲げ試験と硬度測定の結果を図9に示す。積算線量が多い試料ほど引張強さと伸び、曲げ荷重が低下した。特に積算線量が100kGyを超えると顕著に低下している。積算線量17kGyでの曲げ荷重と伸びが特異的に低下している結果となった。ここは、試料位置が3cmずれるだけで積算線量が約70kGyになる線量の変化の激しい位置であった。そのため、線量計のケーブルに対する設置(相対位置)誤差、劣化調査試料の採取位置の精度により結果が大きく変わり、実際に照射されていた線量は曲げ荷重と伸びが低下していることから17kGyより大きかったと考えられる。積算線量221kGyのデータも曲げ荷重と引張強さに相反する傾向が見られるが、ここも線量が場所により大きく変わる場所であるため、試料採取位置のズレによる劣化の差の影響と思われる。積算線量が50kGyまでは機械的強度はほとんどバラツキの範囲内で劣化は見られない。積算線量が100kGyを超えると、顕著に劣化が進行すると言える。積算線量が100kGyを超えた試料は曲げ試験後に割れが生じており、これは、取り扱いによっては絶縁体に割れを発生させ、絶縁不良を起こすことを示している。

なお、電線要覧でETFEの使用可能線量を $1 \times 10^7 R$ (空気の吸収線量で88kGy)としている。今回の結果も100kGyあたりで急激に上記の機械強度が低下していることから同等の結果と言える。

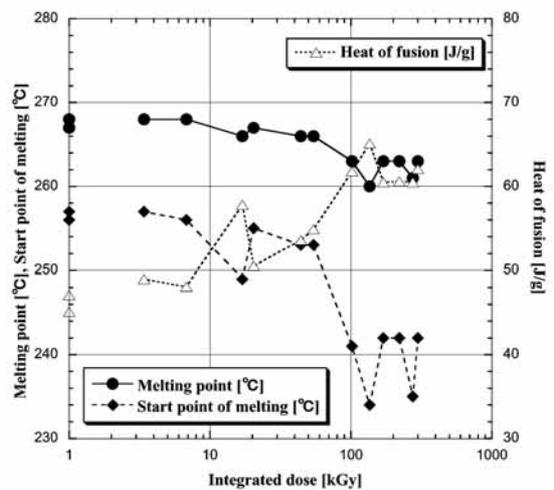


図10 融解開始温度と融点、融解熱量。積算線量が高いほど融解開始温度と融点が低下、融解熱量が増加する。

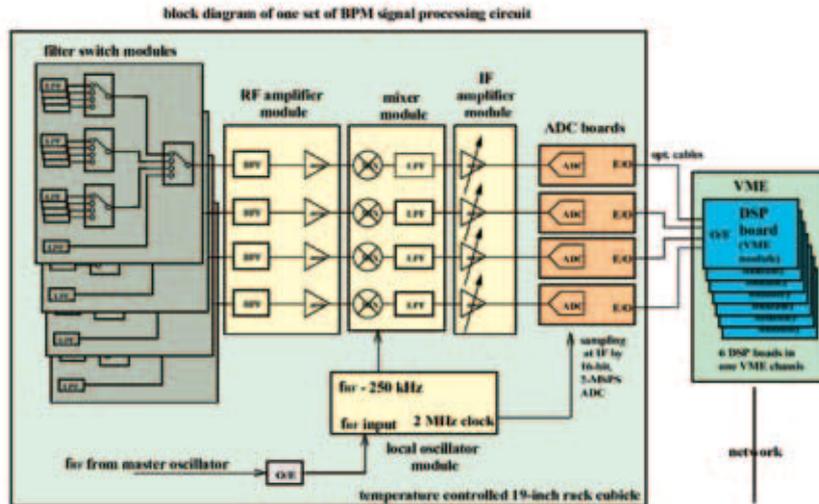


図11 蓄積リングBPMのCOD測定用新規信号処理回路1組の構成

図9に示す硬度測定の結果は、積算線量の増加に対し、わずかに硬度が増しているようにも見えるが、他の機械強度特性に比べるとその変化（相関）は顕著ではなく、放射線劣化との関係は明確でない。

示差走査熱量分析（DSC）の結果を、図10の融解開始温度、融点、融解熱量として示す。積算線量の高い試料ほど融解開始温度と融点が低下し、融解熱量が増加した。積算線量の高い部分では、低融点の成分が増加していると考えられ、絶縁体の分子結合が切れて低分子化合物が増加したと推察される。

現在、SPring-8蓄積リングの1年間の積分電流増加は500A・hr程度であり、今回の調査結果によれば、イオンポンプのケーブルは年間60kGyに達する線量を被曝する部位があることになる。ケーブルを新しくしても2年で再交換の必要性があることを示している。全配置のイオンポンプケーブルの線量を測定し、ケーブル交換の必要部位を把握し、2005年冬期停止期間に劣化部位を全数交換した。また、放射線の強い場所には遮蔽を施した。

（大石）

3-5 蓄積リングBPM新規信号処理回路の進捗状況

蓄積リングBPMのCOD測定用信号処理回路の更新作業を行っている。新規信号処理回路1組分の構成を図11に示す。1組で12個のBPM（48個の電極）を受け持つ。1組に4回路が内蔵されており並行処理ができる構成とした。3BPM（12電極）をスイッチで切り替えて1回路で処理する。初段がフィルタとスイッチの入ったfilter switch moduleである。信号は以下順次RF amplifier、mixer、IF amplifierの各moduleを通り、ADC board上のADCでデジタル信号に変換され、VMEボードとして構成されているDSP board上のDSPで位置情報に変換される。IF amplifierまでをアナログ部、ADC board以下をデジタル

処理部としている。

この回路24組で蓄積リング全周のBPMの信号を処理する。すべてを並行して処理することにより12電極を順次切り替えて処理する時間で全周のCODのデータを取得可能である。

シングル・パス（SP：ビームの周回ごとのビーム位置データを取得可能な機能）ビーム位置測定機能には現状の信号処理回路を使用する。新規回路と同様24組の回路があるので、特定の24個のBPMを固定して接続することになっている。得られる周回ごとのビーム位置分解能は標準偏差で約30 μ m程度である。

新規回路について試作機で特性測定を行い、目標性能である、1kHz帯域幅でサブ μ mのビーム位置分解能・長時間安定性が達成できることを確認した。

位置分解能の測定データは信号源として高周波信号発生

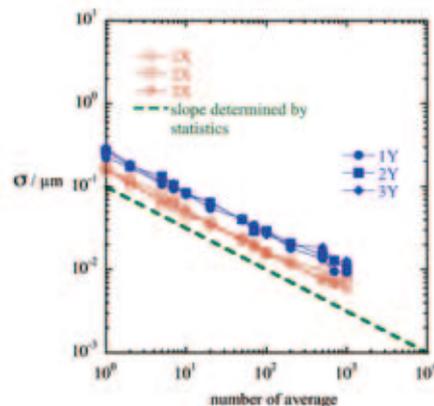


図12 試作回路でのビーム位置分解能の平均化回数依存性測定値
縦軸：ビーム位置分解能；積分時間一定で測定を100回の繰り返し求めた標準偏差(σ)、 μ m単位。横軸：平均化回数。図中1X、2X、3X、1Y、2Y、3Yは3組の位置情報のそれぞれ水平方向鉛直方向のデータを示す。点線は統計精度だけで分解能が決まる平均化回数の平方根の逆数の傾きを示す；平均化1回で0.1 μ mに規格化した。

(佐々木)

器を使用し、信号処理回路試作機に入力して評価した(図12参照)。信号発生器の出力を12分配し、3組の位置情報を得た。1回の測定で1電極当たり1msの積分に相当するデータ取得を行っている；この積分時間はおよそ1kHzの帯域幅に相当する。図より1kHzの帯域幅で0.3 μm 以下の分解能が得られていることがわかる。12電極分のデータ取得に要する時間は約15msである(12電極 \times 1 μs +オーバーヘッド)。たとえば平均化100回とすれば、12電極分の取得時間は約150msとなり、7Hz程度で0.1 μm 以下の分解能でCODを得ることが期待できる。図中の点線は平均化回数の平方根の逆数を表し、統計精度だけで分解能が決まるような状況であればこの傾きで分解能が向上する。データは統計の傾きとよく合っていて、ランダムなノイズが分解能を決定する要因であることが見て取れる。

長期安定性は信号源としてRF信号発生器を使用し、信号処理回路試作機に入力し、2週間に渡り連続測定して評価した(図13参照)。長期の微小変動を見るため1msの積分のデータを120回ずつ平均し、2分毎にプロットしている。2週間での変動は1 μm 以下となっている。

上述のように試作機による評価で、最高で1秒間に数十回までのCODを μm 以下の分解能で得ることができ、数Hz程度の頻度であればさらに高分解能の測定が可能となり、また長期間の安定度もサブ μm 領域に達しており、目標性能を達成していることが確認できた。

この結果をもとに、2006年夏期停止期間中に蓄積リング全周のBPM信号処理回路を置き換えるため、2005および2006年度に量産機の製作を行った。試作機で性能を達成するための個々の回路の仕様は確定し、量産機の仕様ではアナログ処理部とデジタル処理部の擦り合わせ、個々の回路のコネクタ配置、信号伝送用光ケーブル・同軸ケーブル等の付帯設備などの細部の検討を行い、それらを反映して量産機を製作した。

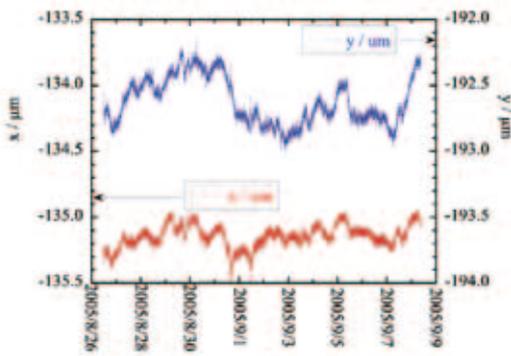


図13 試作回路でのビーム位置測定値の長期安定性
縦軸、左：水平方向ビーム位置、
右：鉛直方向ビーム位置
横軸：日付

3-6 フェムト秒パルスX線の生成

フェムト秒パルスX線の生成原理と期待される性能、生成系の要求仕様と解決すべき問題点に関して2003年度年報の「サブピコ秒パルス光の生成」で報告した。ここではその後の研究で得られた成果を報告する。

(1) 超伝導空洞の位相変動のシミュレーション

外乱として空洞の共振周波数の変動、および高周波電力の位相変動がある場合について、空洞内部の電磁場の変動を与える理論式を導出した。これを使って超伝導空洞に位相帰還制御をした場合の位相変動のシミュレーションを行い、計算の速度と精度を向上させた。

共振周波数変動の値は、KEKで製作中の超伝導空洞の振動特性の測定値と外部から超伝導空洞に与えられる床と真空チェンバの振動の測定値から求めた。振動と位相の関係は有限要素法による振動解析と電磁場解析の結果から求めたが、この解析方法が正しいことはKEKで稼動中の超伝導空洞で確認した。また、高周波電力の位相変動として高速大電力移相器の駆動電源の雑音を用いた。この雑音は同電源の仕様検討用の暫定値であるが過大評価した値である。

超伝導空洞に位相帰還制御を行った場合、個々の外乱について位相振動を求めた結果、真空チェンバの振動によるものが6.0mdeg、床振動によるものが0.13mdegとなり、機械的振動に起因する位相振動は要求仕様(14mdeg未満)を満足することが確認された。しかし真空チェンバの振動に関しては、安全係数を考慮すると振動減衰機構を考える必要がある。一方、移相器駆動電源の雑音による位相振動は高周波成分(主に500kHz)が3.6mdeg、低周波成分(主に10kHz)が750mdegとなった。高周波成分は要求仕様を満足するが低周波成分は電源の最大電流 $\pm 60\text{A}$ に対して $\pm 20\text{mA}$ 未満に低減する必要がある。

(2) 高速大電力移相器の大電力試験

超伝導空洞の位相変動を抑制するために高速動作する大電力移相器を試作し、300kW透過時と全反射時における動作試験を行った。この移相器は導波管内に取り付けたフェライトに外部磁場を与えて移相量を変化させるものである。透過電力が増大するに従って位相の可変範囲が減少する傾向にあるが、300kW全反射時においても $\pm 1\text{deg}$ の設計性能が達成された。周波数特性は遮断周波数1kHz-100(-3dB)の1次遅れの特性を示し、遮断周波数は透過電力によらないことが確認された。300kW透過時の損失の測定値は1.5kW(-23dB)で、導波管外部からフェライトを間接水冷している。フェライトの形状と取り付け方法に問題が見つかり、改良が必要であることが分かった。

(3) ヘリウム冷凍機システム

超伝導空洞の偏向電圧を2.6MVとすると、空洞1台あた

りの発熱は145W、4台で580Wとなる。これにトランスファライン50mとクライオスタット4台の入熱110Wを考慮すると、約700Wの冷凍能力が必要である。このクラスの冷凍機のエネルギー効率は約0.15%なので、冷凍電力は約450kWになる。ヘリウム冷凍機は圧縮機、熱交換器の他にガス容器などの付帯設備必要であるが、蓄積リング内側の設置空間は制限されている。長直線部Dに本装置を設置した場合についてヘリウム冷凍機システムの概念設計を行い、既存の空間に設置可能であることが確認された。しかし、クライストロンとその電源の設置空間も考慮すると、既存の空調設備の移設を検討する必要がある。

(中里)

加速器部門
リング加速器グループ
米原 博人

4 制御

4-1 計算機制御系

(1) データベース計算機ストレージの更新

データベース計算機は、処理データの増加に対して、昨年までは主にCPU処理能力の向上で対処して来た。その後、ディスクI/Oがボトルネックとなって、システムの負荷を上げるようになった。これまでのディスクストレージは、SCSIインターフェースによるディスクアレイ方式であったため、ディスク故障時のデータ喪失を防ぐために、ソフトウェアによるミラーリングを行っていた。この方式ではデータの喪失は防げるが、故障したディスクを切り離すまでの間、SCSIエラーや応答待ちによるサーバーの大幅な性能低下を生じていた。そこで、ディスクI/O待ちを低減し、スループットを向上させ、ディスク故障の処理をストレージ側のコントローラで行えるように、ディスクシステムをファイバーチャネルによるSAN (Storage Area Network) 方式のRAIDアレイに変更した。従来のSCSI方式に比べると、書き込み速度が向上したため、ディスク処理の間、CPUが有効に使われないという現象が解消した。またサーバー側のインターフェース、SANスイッチおよび、RAIDコントローラの全てを二重化したSAN構成により、冗長性も確保している。

(2) 制御系ファイルサーバストレージの更新

制御系ファイルサーバにNAS (Network Attached Storage) アプライアンスを導入するために、今年度は装置を購入し、テストスタンドにセットアップし、運用のスタディを行っている。ファイルサーバとしては、従来のUNIX計算機とストレージをクラスターソフトウェアで冗長構成したものよりも、NASアプライアンスの方が書き込みのスループットなど基本性能が高く、管理も容易になるため導入する事とした。

(3) 加速器収納部監視システムの改良と拡大

加速器収納部内を映像で監視するため、Webカメラの技術を応用した監視システムを構築し、中央制御室の運用用計算機のWebブラウザで表示できるようにしている。蓄積リング収納部内に既設のカメラ24台に加え、今年度中に線型加速器加速管室およびシンクロトロン加速器シンクロトロントンネルに各6台のカメラを新規追加した。この追加に合わせて画像中継サーバーの改良を行った。市販のWebカメラシステムのhttpサーバーは処理能力が低く、複数のWebクライアント (ブラウザ) から同時にアクセスされると、動画性能 (フレームレート) の低下が著しい。これを補うために強力なCPUを持つ中継用のWebサーバーに交換した。従来、このサーバーは画像データを送る際に、1コマごとに1つのファイルデータとしてキャッシュし毎回再送信を行っていたが、クライアント数が増えて行くとファイルI/Oがボトルネックとなって動画性能の低下が見られた。このため画像伝送方式を見直し、動画データを共有メモリ上でコピーして、クライアントの要求時に再送信するソフトウェアに入れ替えた。これにより20以上のクライアントから同時にアクセスしても動画性能が低下しなくなった。今回のカメラ増設で、監視システムのカメラチャンネル数が24から36に増えたことにより、Webクライアントからのアクセス数の増加が見込まれたが、ソフトウェアの改善によって、システムの処理能力は余裕を保っている。

(4) 基幹系ネットワークスイッチの整備

ギガビットイーサネットの普及に伴い、中央制御室におかれている基幹スイッチの容量不足が予想されるため、最大で192ポートのギガビットイーサネットが収容できる基幹スイッチを導入した。これによって、加速器制御系ネットワークをFDDIから、ギガビットイーサネットへ移行できるインフラが整った。特に能力が増強されたデータベースサーバーと、来年度に導入が予定されているファイルサーバーに対して、ネットワークがボトルネックにならないような構成が実現できた。

(5) データ収集用ネットワーク整備

PoE (Power over Ethernet) モジュールの導入を容易にするため、蓄積リング保守通路の12カ所、シンクロトロンモニター室に4カ所、および線型加速器加速管室の3カ所にPoE対応のイーサネットスイッチを整備した。蓄積リング収納部には、保守通路にあるPoE対応のイーサネットスイッチから、収納部の24カ所に配線を敷設し、収納部でのPoEモジュールの使用ができるようにネットワークを整備した。

4-2 機器制御系

(1) FL-net VMEボードの開発

昨年度に導入された線型加速器インターロックの信号読

み出し系として、PCIボードとLinuxで運用を開始したが、より安定な制御系とするために、SPring-8の制御系で標準に使われているSolarisに対応したVMEボードの開発を理化学研究所と共同で行った。安定したFL-netの制御系への取り込みが実現することで、今後、線型加速器モジュレータ制御及び、トップアップインターロック等の制御に、FL-netを使用することが可能となった。

(2) 線型加速器コネクタボックスの改造

2004年度に試験的に行ったコネクタボックスのアナログ信号ノイズ低減対策は、効果があることが分かったため、今年度、H1～L4BTの各コネクタボックスに対して同様の対策を行った。具体的には、アナログ入力ボードのアナロググランドをコネクタボックスのアースバーへ接続し、アナログ入力ボードを差動入力型に変更した。

(3) Linac BPMデータ収集系改良

ビーム出射信号（イベント）の検知方法を、従来のポーリングによる方法からCPUボードへの割り込みを用いる方法に変更した。これによりBPMデータをビーム出射に同期して、欠損無く収集することができ、データの取得率が99.9%から100%になった。また、CPUボードを従来のPentiumIII 600MHzからPentiumM 1.8GHzに変更して、CPUの処理能力を向上させた。これによって、共有メモリネットワークボード上のリングバッファがオーバーフローしない程度での60Hz運転において、全ショットで、全BPMのデータ取得に成功した。

(4) MCUソフトウェアアップデート

MCU (Motor Control Unit) ソフトウェアは、同時に5つまでのアプリケーションソフトウェアからネットワーク接続する（コネクションを張る）ことができる。アプリケーションソフトウェアがコネクションを張ったまま何らかの原因で停止してしまうと、MCU側にコネクションを残したままになり、線型加速器の運転上問題があった。そこでMCUのソフトウェアを改造し、一定時間アクセスのないコネクションは自動的に切断する機能を追加した。またMCUに対してtelnetログインができるように改造し、コネクション状態のモニターや、コネクションの強制切断、MCUのリポートを行えるように改造した。

(5) ブースターシンクロトロンVMEシャーシ交換

ブースターシンクロトロンのVMEシャーシは、P2バックプレーンが未実装であるため、A32/D32アクセスができなかった。そのため、A32アクセスをする入出力ボードが使用できない、また、メモリアreaにD32アクセスを行うアプリケーションソフトウェアが使用できないなどの制限があった。こうした制限を排除するため、P2バックプレーンを実装したりタル社製のVMEシャーシへ交換した。導入したりタル社製VMEシャーシは、電源や空冷ファンを多重化し、ホットスワップが可能になるなど、極めて高い保守性を提供していることが特徴である。ブース

ターシンクロトロンVMEシャーシの交換にあたって、東芝製パターンメモリボードはP2バックプレーンがあるVMEシャーシには実装できないことが判明した。そこでニチゾウ電子制御製DPOボードを代替ボードとして導入した。導入にあたっては、DPOボード用Solarisデバイスドライバを開発し、VMEコントローラをx86 CPUボード+Solaris9に置換した。

(6) 蓄積リングVMEシャーシ電源交換

蓄積リング制御系で使用しているVMEシャーシは稼働後10年近く経過していたため、電源故障の予防的措置として合計で30台のDC電源を全数交換した。電源交換作業を行うにあたって、最も初期型のVMEシャーシについては、デージーチェーンのジャンパ設定に関する保守性が極めて悪く、またDC電源の交換が著しく困難であることが判明した。そこで、RF系Dステーションの4台とD電磁石電源室の1台を、ブースターシンクロトロンのVMEシャーシ交換に使用したシャーシと同型のリタル社製VMEシャーシに交換した。

(7) PoEモジュール開発

ネットワークケーブル経由で電源を供給する規格であるPoE (Power over Ethernet) 技術を用いて、小型の計測・制御モジュールの開発を行った。開発したのは、GP-IBコントローラ・モジュール (E-059、図1) と、白金抵抗

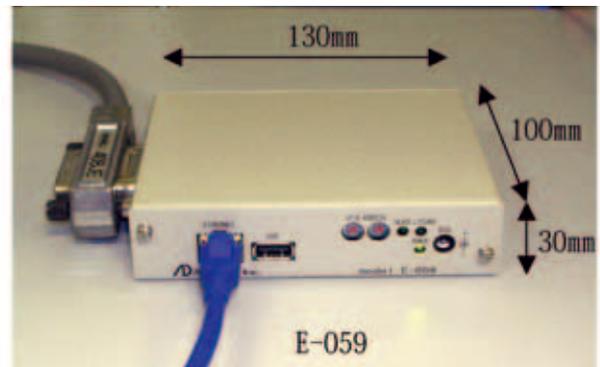


図1 GP-IBコントローラ・モジュール

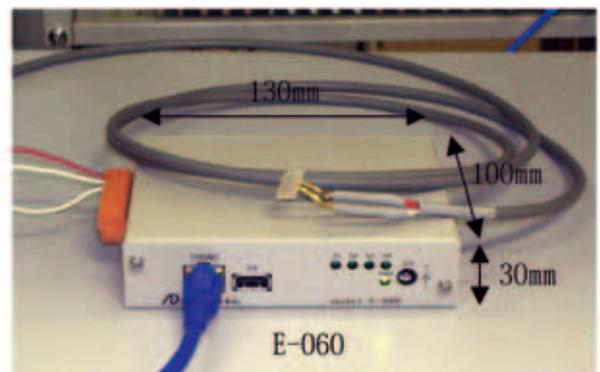


図2 4チャンネル温度測定モジュール

体をセンサに用いる4チャンネル温度測定モジュール (E-060、図2) の2つである。この2つのモジュールは、ルネサステクノロジ社のSH-4を持つCPUボードと、PCIバスで接続されたI/Oボードから構成される。モジュール上でLinuxが動作するので、MADDOCAのフレームワークであるEMや、poller/collector等のアプリケーションを使用することができる。また電力源であるネットワークHUBのWeb等の管理画面を通して、給電状態の確認や給電のON/OFF制御が可能である。従って、モジュールが何らかの原因でハングアップしたとしても、HUBの管理画面を用いて遠隔でリセットを行えるというメリットがある。このモジュールは、1カ所当たりの点数は少ないが、多数分散しているような信号の計測・制御に有効で、電力をネットワークケーブルから供給されるので設置の自由度が格段に向上し、省配線化に大きく寄与する。E-060はSCSS試験加速器のマシントネル内に設置し、実機テストを行う予定である。またE-059は、ナショナルインスツルメンツ社のGPIB-NET100で生じるトラブル対策として導入を検討している。

4-3 データベース

2005年には特に大きなトラブルはなかった。SCSS 試験加速器へのMADDOCA導入にともない、信号の追加がかなりあった。機器は2128個、信号は2217点を追加した。ARCHIVE_DBは124GBの増加があった。

(1) SANの導入

従来のSCSI disk arrayにかわって、SAN Diskを導入したことは既に述べた。導入にあたって、データベース書き込み速度の点でRAID-1と5を比較した。書き込みではRAID1がRAID5より15%高速であることがわかった。このため、PARAMETER、ONLINE、ARCHIVEをRAID1に保存し、古いARCHIVEのデータをRAID5に入れた。SANによって、ONLINEデータベースからARCHIVEデータベースへの10分毎のコピーが、従来のSCSI arrayでは170秒かかっていたが、これが40秒ほどに短縮された。またコントローラ、スイッチ、ハブが二重化されているので、これらが正常動作するかをテストした。

(2) XML-RPCによるデータアクセス

制御LANの外部のアプリケーションからも、データベース内のログデータにアクセスできるようにした。これまでデータベースアクセスは、制御LANとweb serverからのアクセスのみを許していた。BL-USER-LAN等の制御LANの外のアプリケーションからも、データベース内のログデータにアクセスしたいという要望があることから、データアクセスができるようにした。アクセスは読み込み専用である。ネットワークを通じてのプロトコルにはXML-RPCを使用した。XML-RPCは以下のような特長をもつ。

- ・ httpプロトコルを使用しているのでファイアウォール

を通過しやすい。

- ・ multi platformでコンピューターのOSを選ばない。
- ・ multi language などで希望する言語で開発できる。

このため手軽に利用できる。データベース上のログデータと関連情報にアクセスする関数を用意した。

(3) MyDAQ 2.0

現在、MyDAQを改良中である。MyDAQはデータベース機能を有する簡易型データ収集系ソフトウェアシステムである。新リリースとなる2.0では、現バージョンと比較して以下の特徴をもつ。

- ・ array dataの要素に名前をつける。
- ・ 文字データも取り扱うことができ、実験データのコメントも収容できる。
- ・ 長い配列データも取り扱える。

(4) データベースオープン化

MADDOCAでsybase以外のデータベース管理系(RDBMS)を使えるよう開発を始めた。オープンソースのRDBMSであるMySQL、Postgresqlの性能、機能も向上してきており、また管理系の実装ではOracle、DB2などの選択肢もあり得る。そこで、データベースを利用する既存の関数をインターフェースするための関数群を作成し、GNUのlibgdaという汎用のライブラリーを使えば、これらのデータベースが容易に使用できることがわかった。そうすることで、今までのC libraryのソースコードの変更なしで、GUIなどを再リンクするだけで、複数種のRDBMSが選択できる。すでに試作プログラムでは、MySQL、Postgresqlでdb_get equip_inf相当のデータアクセスができることを確認した。来年度の完成をめざしている。

加速器部門 制御グループ

田中 良太郎、他