

3. 施設の現状と進展

3-1 加速器

1. 運転・軌道解析

1-1 加速器の運転

SPring-8蓄積リングへのビーム蓄積に成功したのは1997年3月25日であり、2006年度はその10年目の年度に当たる。その年の1997年10月からユーザー利用運転が開始されている。図1にユーザー運転開始以来の運転時間の推移を示す（脚注）。2006年のSPring-8加速器総運転時間は5026.2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の先行運転、その他の入射器系のみの運転も含まれている。2006年の蓄積リングの運転時間は5008.5時間、ユーザータイムは3790.1時間であった。これらは、2004年を除いたここ数年の平均より若干少なめであった。2004年は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月にかけて、蓄積リングの運転を停止して行う必要があったため、2004年後半は長期連続運転により集中的にユーザー利用運転を行ったので、蓄積リング運転時間およびユーザータイムが例年より増加している。

2006年のユーザータイムは蓄積リング運転時間の75.7%であり、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1.1%に当たる42.5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は98.7%という高い数値となった。また、トラブルとして、31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3.6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。特に際だって多い原因はなく、加速器の機器異常の1つであるRF空洞の反射などによるものが例年と同程度の7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5回あった。ユーザータイム中断には至らないが、トップアップ入射の中断が31回発生した。入射系のトラブルに起因するものがほとんどであるが、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。一方、加速器およびビームラインの調整は1193.6時間であり、これも2004年を除いた例年と同程度である。

2006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8.7%（2005年は15.9%、2004年は36.6%）と益々減少した。少数バンチモードでの運転の割合は56.3%（2005年は44.7%、2004年は43.8%）となり、多バンチモードの運転が減少した分このモードでの運転が増加したものと考えられる。特に203バンチモードでの運転はユーザータイムの36.3%と際だって多く、主要な運転モードとなっている。多バンチモードと少数バンチモードが共存す

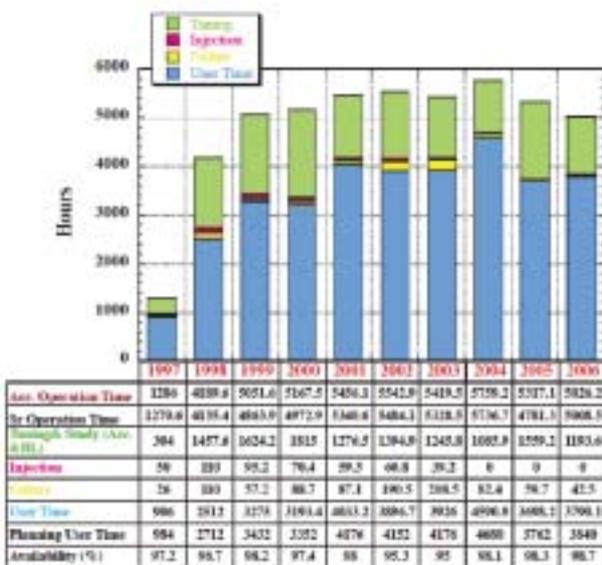


図1 1997年の供用開始以来の運転時間の推移

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

Table 1. Beam parameters of SPring-8 storage ring

Energy [GeV]	8
Number of buckets	2436
Turns (v _z / v _z)	48.15 / 18.35
Current [mA]:	
single bunch	10
multi bunch	~100
Bunch length (σ) [ps]	13
Horizontal emittance [μm-rad]	3.4 ^①
Vertical emittance [μm-rad]	4.3 ^①
Coupling [%]	0.2
RF Voltage [kV]	16
Momentum acceptance [%]	±5.5 (at 200 MeV)
Beam size [μm]: (σ _x / σ _y) ^② [μm]	
Long ID section	294 / 18
ID section	301 / 6
BM section	107 / 1.3
Beam divergence [μrad]: (σ _x / σ _y) ^② [μrad]	
Long ID section	13 / 6.7
ID section	17 / 1.1
BM section	56 / 0.6
Operational chromaticities: (ξ _x / ξ _y)	+2.4 / -2 ^②
Lifetime [hr]:	
100nA (multi bunch)	~200
1nA (single bunch)	~15
Horizontal dispersion [μm]:	
Long ID section	0.183
ID section	0.107
BM section	0.032
Fast orbit stability (0.1 ~ 200Hz) [μm]:	
horizontal (rms)	~4
vertical (rms)	~1

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

^② With bunch-by-bunch feedback

るハイブリッドモードは34.9%（2005年は39.4%、2004年は19.6%）と前年とほぼ同様であった。多バンチモードの運転時間が減少した原因は、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。この傾向は今後も続くと思われる。2006年からは、8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} ：電流換算0.5mA）、2004年は実施されなかった（2004年以前に実績あり）4バンチトレインを全周に均等に84配置したモード（1つのバンチには 9×10^9 ：電流換算0.3mA）等が実施された。

表1に、蓄積リングの主要なパラメーターを示す。

（大熊）

1-2 オプティクス対称性回復

電子蓄積リングの動力的安定性において、オプティクス対称性は最も重要な因子の一つである。オプティクスの歪みは非構造共鳴を励起し、運動量偏差の大きい粒子の安定性を悪化させるからである。特に、タウシェック効果がビーム寿命に対して支配的な少数バンチモードでの運転では、オプティクスの歪みによりビーム寿命が減少するなど影響が顕著である。また、入射ビームなど大振幅を持つ粒子の安定性に対しても、オプティクスの歪みは大きな影響を及ぼし、高い入射効率が要求されるトップアップ運転ではオプティクスの補正は必須である。このような要請からSPring-8蓄積リングでは、2002年より全周で13ヶ所の四極電磁石に補助電源（QA電源）を追加し、リングのオプティクスの歪みを補正し、動力的安定性を改善してきた。ところが、定期的に行っているリングオプティクスの観測によると、補正後のベータatron関数の偏差が時間の経過とともに拡大してきたことが確認されていた。また、2005年秋より利用運転で低エミッタンスオプティクスが本格運用されるようになり、オプティクスの歪み補正も再調整の必要に迫られることとなった。そこで、この機会に補正性能を改善するためQA電源を48台に増設し（図2）、オプティクスの歪み補正を行うこととした。2006年



図2 増設されたQA電源

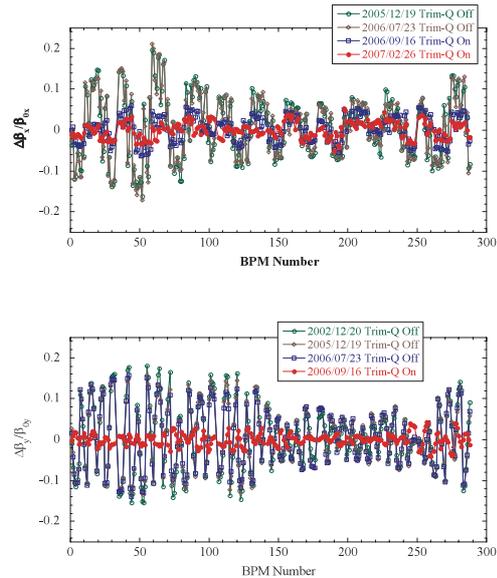


図3 ベータatron関数偏差。
上段：水平、下段：垂直

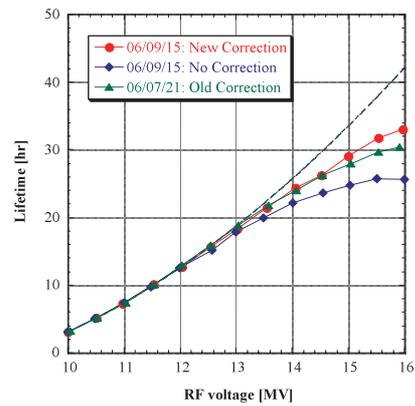


図4 ビーム寿命

夏の設置完了後、これを用いた補正結果は図3のとおり、ベータatron関数のデザインからの歪みは2%以下に抑えられている。この結果、入射時のビーム損失は低く抑えられ、タウシェックビーム寿命など安定性の改善（図4）が見られた。

（高雄）

1-3 線形共鳴結合補正

電子蓄積リングでは、水平方向に放射光を出すため広がりを持つ水平ビーム広がりに対して、誤差磁場などによる水平運動との結合（X-Y結合）で生じる垂直ビーム広がりには本来小さいものである。ところが、誤差磁場である捻れ四極磁場が大きくなり結合が強くなると、垂直ビーム広がりには大きくなり輝度の低下につながる。SPring-8蓄積リングでは、設計段階からX-Y結合の原因となる誤差磁場が発生しないよう工夫を凝らし、これが小さくなるよう努めてきた。電磁石の2段階アラインメントを徹底することにより、極力誤差磁場の影響が現れないようにしたり、軌道補正に対しても正しくこ

れが行えるようにビーム位置モニターオフセット評価手法などを開発して、CODによる誤差磁場が発生しないよう努めた。これらの結果、SPRing-8蓄積リングのX-Y結合はコミッション段階から極めて小さな値が実現された。

このようにX-Y結合は重要なパラメーターであるので、SPRing-8蓄積リングではその元となる線形共鳴について定期的に観測してきたが、それによると最近徐々に結合が大きくなってきたことが確認されている。通常運転点は、線形共鳴から遠くて共鳴結合の直接的な影響はほとんどないが、この共鳴結合が高次共鳴を励起し電子ビームの動力的安定性に影響することもあるので、線形共鳴結合補正を実施することとした。

垂直ビームサイズは、運転点を線形共鳴に近づけていくと共鳴線からの距離に応じて拡大することが知られている。そこで、運転点を線形共鳴近傍に移動したところで、垂直ビームサイズの応答を見ながらSkew四極電磁石の最適化を行い、線形共鳴補正を実施した。その結果を図5に示す。共鳴励起強度はその幅で測ることができるが、Skew四極電磁石調整によってよく補正されていることがわかる。また、線形共鳴励起強度は水平垂直ベータロン振動数差の最小値に対応しているが、図6にある通り共鳴近傍のベータロン振動の振

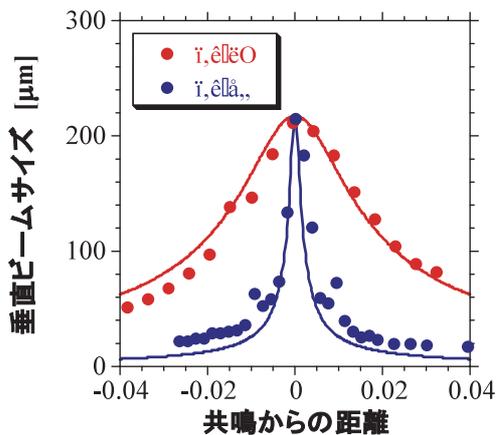


図5 線形共鳴近傍での垂直ビームサイズの振る舞い

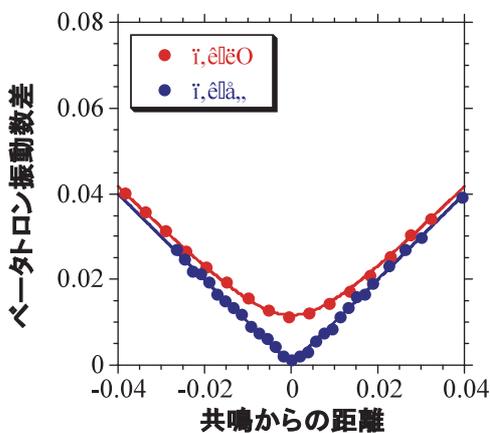


図6 線形共鳴近傍でのベータロン振動数の振る舞い

る舞いを見ても、共鳴結合がよく補正されていることが確認できる。

(高雄)

1-4 カウンター六極電磁石の設置とビーム調整

蓄積リング A, B, C, D 各ゾーンの長直線部に2台ずつ、合計8台の六極電磁石(カウンター六極電磁石)を追加設置した。その役割は、長直線マッチング部内で励磁している局所クロマティシテティ補正用六極電磁石の影響を打ち消し、電子ビームの動的安定領域を拡げることである^[1]。これによりビーム寿命と入射効率が向上し、さらには長直線部オプティクス(の)独立調整が容易となる。

図7は、シングルバンチ 1mA 蓄積時のビーム寿命を、カウンター六極電磁石を使ったオプティクス("with SCT")と使わないオプティクス("w/o SCT")とで比較したものである。全ての挿入光源のギャップが全開の場合と長尺アンジュレータ ID19のギャップが12mmまで閉じられた場合のそれぞれについて、測定値を比較してある。シングルバンチ 1mA 蓄積時のビーム寿命は、バンチ内電子-電子散乱によるタウシェック効果が支配的であり、RF 加速電圧(横軸)の高い側でビーム寿命が長いほど、運動量アクセプタンスが大きい。図より、カウンター六極電磁石の導入によって運動量アクセプタンスが確かに広がったことがわかる。

カウンター六極電磁石の導入によって動的安定領域が拡大したことは、入射効率にも現れている。図8は、積上げ入射の条件のもとでの入射効率を、カウンター六極電磁石を使ったオプティクスと使わないオプティクスで比較したものである。横軸は入射ビーム位置(水平方向)で、通常位置からのずれを表す。横軸の値が大きいほど入射ビームが遠ざかる方向である。図より、カウンター六極電磁石の導入によって入射効率が向上し、入射ビームの軌道変動に対しても、より安定化したことがわかる。ビーム調整後の蓄積リングの運転は、カウンター六極電磁石を使ったオプティクスで行われている。

(早乙女)

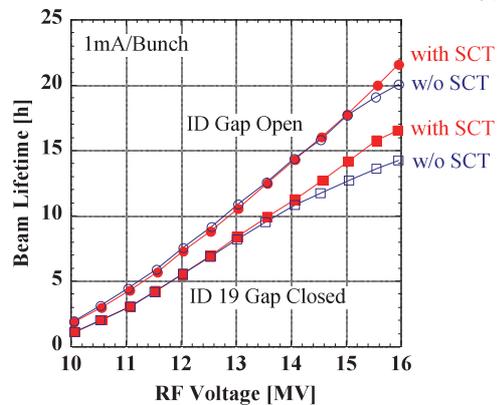


図7 カウンター六極電磁石(SCT)導入によるTouschekビーム寿命の向上。カウンター六極電磁石を使ったオプティクス("with SCT")と使わないオプティクス("w/o SCT")でのTouschekビーム寿命をRF加速電圧の関数として示す。

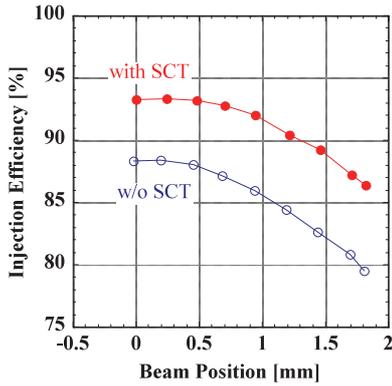


図8 積上げ入射の条件のもとでの入射効率の比較。横軸は入射ビーム位置（水平方向）で、通常位置からのずれ

1-5 蓄積リング入射用バンパ電磁石の遠隔Tilt調整機構の開発

蓄積リングにトップアップモードで入射を行う際、蓄積ビームの振動を極力抑制することが重要である。バンパ電磁石4台をパルス励磁してビーム入射時にはバンパ軌道を作るが、バンパ電磁石4台の励磁波形が厳密に相似でない場合、バンパ軌道が閉じずにリング全体に水平方向の振動を与える。また、バンパ電磁石にs軸（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。

バンパ電磁石は幅8msecの正弦半波でパルス励磁する。水平方向に関しては、4台の電磁石のパルス波高のバランスをとったうえで、波形の詳細な相似形からのずれなどに起因する残留振動を別の場所に設置した補正器により抑制した。垂直方向に関しては、バンパ電磁石の設置誤差をできるだけ小さくする必要があるので精密アライメント用基準座を新規設置し、基準座の傾きと磁場との関係を測定した。この結果をもとに再アライメントを行った。

これまではアライメント終了後ビーム運転を行って垂直方向振動振幅を測定し、再び現場にてTiltの調整を行っていた。この工程を2~3回繰り返していたので、調整に少なくとも3~4時間を要していた。

以上の調整を短時間でスムーズに行うため、遠隔にてTiltを調整できる調整機構を開発した。図9に調整機構の駆動部を示す。ビーム進行方向に向かって左側に取り付けたステッピングモータを遠隔により制御する。モータの回転はギア比1/30のウォームギア、真鍮製のギアを通してステンレス製の調整台のうち左側のみ上下させることでTiltを調整する。バンパ電磁石のうちBP4について試験的にこの調整台を設置した。遠隔調整範囲は±4mrad、遠隔調整精度は0.1mrad以内（分解能8.74mrad/1000pulse）とした。BP4について、Tiltの設定値に対する応答を測定するため、上で示した基準座の上に水準器を乗せてTilt、及びx軸周りの回転（Pitch）を測定した（図10）。この結果、Tiltの設定値と実測値は5%以内で一致した。また、Pitchへの影響は3%以下であること



図9 遠隔Tilt調整機構駆動部。中央部がステッピングモータ、上部が調整台でありこの上にバンパ電磁石を乗せる。ビーム進行方向は向かって右から左である。実機では、ステッピングモータの後ろに回転測定用エンコーダを取り付けた。

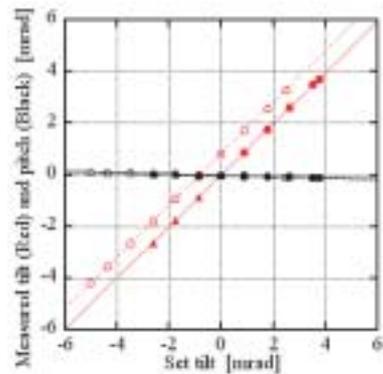


図10 Tiltの設定値に対する基準座上で測定した傾きの実測値。赤丸、及び白抜き赤丸はそれぞれ上昇方向、下降方向に設定した場合のTiltであり、赤三角は再度上昇させたときのTiltである。黒はそれぞれの場合のPitchについて示す。

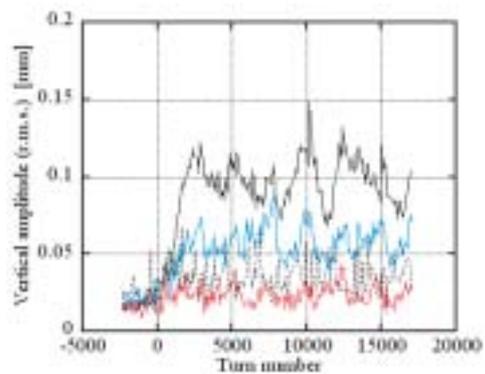


図11 ビーム入射時の蓄積ビームの垂直方向振動振幅。黒実線は遠隔調整前、青実線はBP4の遠隔調整後、赤実線はさらに現場にてBP1のTiltの微調整後の振動振幅を示す。比較のため、従来方式での抑制結果を黒点線を示す。

がわかった。

遠隔調整台を使った垂直振動抑制結果を図11に示す。蓄積リングにシングルバンチビームを蓄積した状態でビーム入射

なしでバンク電磁石をパルス励磁し、シングルパスBPMにてターンごとのビーム位置を測定した。このデータからバンク電磁石の最適なTilt調整量を計算して、BP4を遠隔で、またBP1は現場にて調整した。これにより、調整前のビーム振動振幅（図11の黒実線）を振動測定系の分解能以下に抑制することができた（図11の赤実線）。なお、垂直方向の残留振幅をさらに抑制するための補正器も設置されているが、今回の調整では、この補正器なしで従来のレベル以下に抑制することができた。調整時間も2時間程度に短縮できた。今後、バンク電磁石BP1～3についても同様の調整台を組み込むことにより、オンビームでの完全遠隔調整を目指す予定である。（深見）

1-6 不安定性抑制

(1) ハイブリッドバンチモードへの対応

ハイブリッドバンチモードにおいて、孤立バンチのバンチ電流が、利用者からの要求により増加しつつあるが、そのため、バンチトレイン部のバンチ電流と、孤立バンチ部のバンチ電流の比が10倍以上にまで広がっている。ビーム不安定性

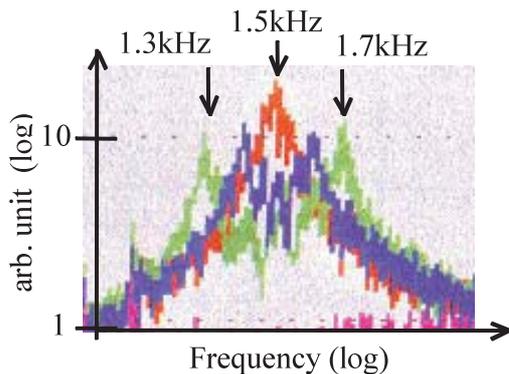


図12 シンクロトロン周波数の測定結果。2つピークのあることが、シンクロトロン振動が広がっていることを示している。加速電圧は4MV、変調幅は、0MV（1.5kHz）、0.5MVおよび1MV（1.3kHz、1.7kHz）である。

を抑制しているbunch-by-bunchフィードバックでは、その入力信号ならびにフィードバックの強度はバンチ電流に比例しているため、フィードバックのダイナミックレンジもやはり10倍以上が必要となるが、従来の装置ではこれは困難であり、大電流のバンチに対して安定性の悪化が観測された。そこでこれを実現するため、バンチ電流がある設定値より大きなバンチについては、そのバンチの信号のみを自動的に減衰させるバンチ電流感応型自動減衰器を開発した。本装置では位置モニタ電極からの信号強度を用いてバンチ電流を測定しており、また、一周回前のバンチ電流の値を用いて減衰させるかどうかを判定している。この一周回の遅延量は4.7 μ sと大きいので、遅延器に旧型のフィードバックにおいて使用していたADC-FPGA-DACモジュールおよびそのプログラムを用いて一度デジタル化することにより対応している。この装置により、現在、大電流のバンチおよびトレイン部のバンチの両方を安定に蓄積することが可能となっている。

(2) 低エネルギー運転時の縦方向不安定性抑制

蓄積リングの4GeV低エネルギー運転において、蓄積電流が40mAを超えた際に、蓄積されているバンチ同士が相関をもってコヒーレントにシンクロトロン振動を行う縦方向ビーム不安定性が観測された。不安定性の周波数から、加速空洞の持つ高次共振モードが引き起こしていると考えられる。さて、それぞれのバンチがもつシンクロトロン周波数に広がりを持たせることができれば、バンチ同士の振動の位相は時間とともに互いにずれていくため、バンチ間のコヒーレント振動を減衰させることができ、不安定性の成長に打ち勝つことができる。このような広がりをビームに持たせるには、個々のバンチに対して異なる加速電圧の時間勾配を与えればよい。今回、リング加速器グループとともに、蓄積リングにこの手法を適用した。SPring-8には、AからDまで4つの加速ステーションに計32台の加速空洞があるが、Aステーションにおいて、2つあるクライストロンの1台およびそれにつながる4台の加速空洞をその加速周波数から209KHzの周回周波数だけ高い周波数で駆動した。これにより、加速勾配に対して、リ

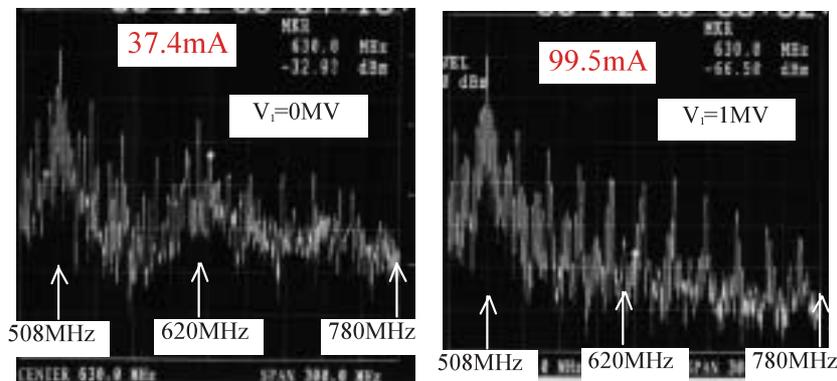


図13 縦方向のビーム不安定性のスペクトル。加速電圧は4MVである。加速電圧の変調幅が0MVのときのデータが左図、1MVのときが右図である。左図では、37.4mAですでにTM011モードによるものと思われる620MHz近辺での不安定性によるピークがみられているが、右図では、100mA近くでも不安定性のピークが発生していない。

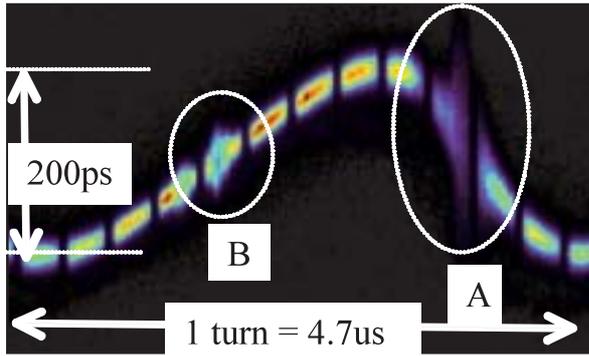


図14 ストリークカメラによる加速電圧5.4 MV, 変調幅2MVでのバンチのタイミング測定。全体としては安定しているが、AおよびBの領域にわずかにシンクロトロン振動が生じている。

ングの一周にわたる変調をつけることができ、図12に示すようなシンクロトロン周波数のずれを作り出すことができる。このとき、試験を行った100mAまでの電流では、不安定性は抑制されて安定なビームが得られた(図13)。ここでは示していないが、図14のAおよびBにみられるシンクロトロン振動は、フィリングを最適化することにより除去することができた。最適化には、SPring-8で開発した不安定性のシミュレーションコードが有効であった(図15)。

(3) ハドロンコースティングビームでの対不安定性フィードバック

J-PARCでの対不安定性フィードバックの開発を念頭においた高エネ研との共同研究を行い、J-PARCのような長いバンチをもつビームへの適用が可能な非同期型デジタルフィードバックを開発し、試験的に高エネ研の陽子シンクロトロンに適用してhead-tail不安定性の抑制に成功した。さらにこの方式を、京都大学、高エネ研、放医研、加速器エンジニアリング(株)との共同研究により、京都大学のイオン蓄積リングS-LSRに適用し、コースティングビームのための非同期型デジタルフィードバックを開発した。これによりS-LSRの

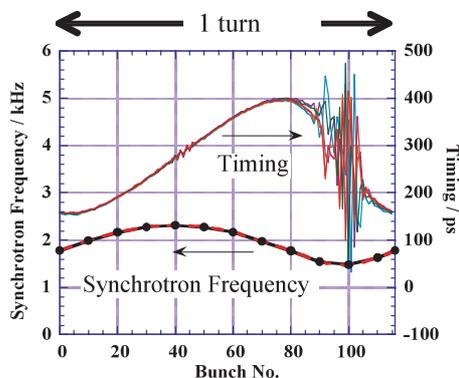


図15 シミュレーションによるバンチのタイミングおよびシンクロトロン周波数の一周にわたる分布。加速電圧、変調幅は図14と同じ。AおよびBの領域にシンクロトロン振動が生じているところを含めてほぼ図14の測定結果を再現している。

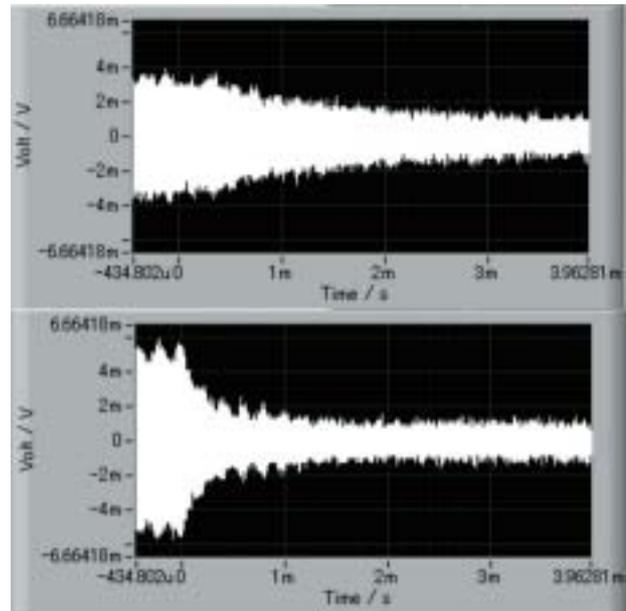


図16 クロマティシティ変調によるバンチの垂直方向の重心振動の減衰の測定。時間0のときに励起している外力を0とし、その後の減衰を測定。上図は磁石電流が0A、下図は磁石電流が100Apeakのときの減衰を示している

不安定性が抑制され、蓄積電流の増強が可能となった。

(中村)

1-7 クロマティシティ変調による横方向不安定性抑制

クロマティシティをシンクロトロン周波数で変調することにより、バンチの内部にベータトロン周波数の広がりを作り出し、これによりバンチの重心振動を減衰させ横方向不安定性を抑制するという不安定性の抑制の新たな手法がSPring-8において考案されていたが、兵庫県立大学および理化学研究所との共同研究により、兵庫県立大学のNewSUBARU蓄積リングにこの手法を適用し、横方向不安定性が抑制されることを実証した。クロマティシティ変調のために、新たに交流六極電磁石を設置し、その場所にディスパージョンを導入して磁石をシンクロトロン周波数の5kHzで駆動した。これによりクロマティシティは変調を受け、バンチの重心振動が1ms以内の減衰時間で減衰することが確認された(図16)。さらに、加速空洞の高次モードを調整してそれによる水平方向のマルチバンチ不安定性を意図的に引き起こし、変調の強度を大きくすることによりこの不安定性が抑制されることを確認した(図17)。また、シングルバンチ不安定性であるモード結合不安定性に対しても本手法による抑制が可能であることを実証した。

(中村)

1-8 加速器診断

(1) 加速器診断I

加速器診断Iは偏向電磁石を光源としており、X線から可視光にいたる広い波長範囲の放射光を利用することが可能である。電子ビームのエミッタンス診断のための放射光X線を用いたビームプロファイル測定や、可視光放射光を用いたバンチ純度やバンチ長の測定等を行っている。

今年度は、X線ビームプロファイルモニターとバンチ純度モニターの測定を自動化してビームの状態を常時監視する常時モニターとして運用するための整備を進めた。X線ビームプロファイルモニターについては、自動測定に必要な機器制御や画像データの取得・解析等のためのソフトウェアを作成し、常時モニターの試験運用を行った。試験中に検出器に用いているX線ズーム管の光電面が徐々に劣化し検出感度が低下する現象が見られ、光電面の改良等の対策が必要であることがわかった。バンチ純度モニターについては、中央制御室からの遠隔操作によるバンチ純度の定期測定を行ってきた。自動測定に用いる機器制御、データ収集用ソフトウェアを整備し^[2]、11月の第5サイクルよりバンチ純度の常時監視を開始した。図18に、常時測定によって得られたバンチ純度の履歴の一例を示す。

昨年度に引き続き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領域のガンマ線生成試験を進めた(1-9参照)。

(2) 加速器診断II

加速器診断IIは、直線部に設置した挿入型光源装置からの放射光や直線部上下流の偏向電磁石端部からの放射光(エッジ放射光)を利用した、光源電子ビームの診断、蓄積リング機器の放射線損傷対策、フォトンアブソーバ等高熱負荷機器の開発などを目的として、整備を進めている^[3]。また、蓄積リング直線部を相互作用領域として利用できる利点を生かして、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

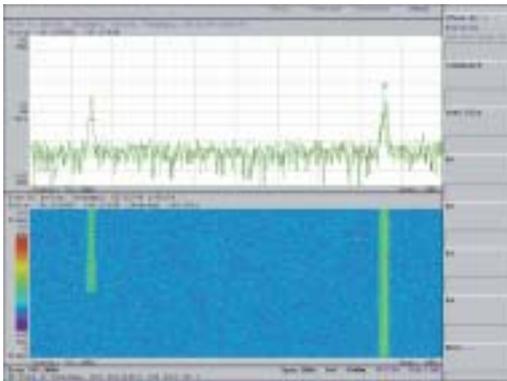


図17 クロマティシティ変調による、加速空洞の高次モードが引き起こしているマルチバンチ不安定性の抑制。上図：左側のピークが不安定性の信号である。下図：ピーク高さの時間変化。上が過去である。時間とともに磁石電流を増加させているが、ある値のところで不安定性が抑制され不安定性のピークが消失している。

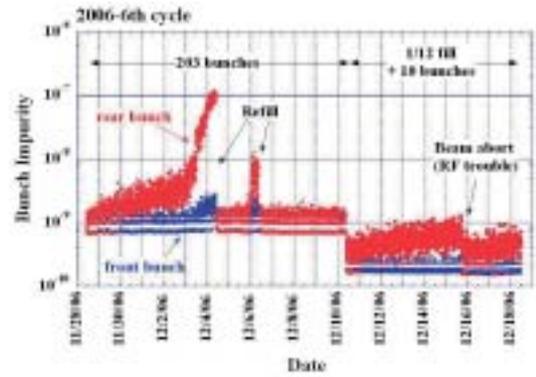


図18 バンチ純度モニターで測定したバンチ純度の履歴。前半は203個の孤立バンチを蓄積した運転モードで、後半は10個の孤立バンチとリング12分の1周分のマルチバンチを蓄積したモードである。赤は各孤立バンチのひとつ後ろのRFバケットの不純バンチを、青はひとつ前の不純バンチを示す。孤立バンチの電荷量に対する不純バンチの電荷量の比を、不純度として示した。12月4日と6日には、バンチ純度が悪化したため蓄積していたビームを一度廃棄して再入射を実施した

による大強度の10MeV領域ガンマ線の生成を計画している(1-9参照)。今年度は、エッジ放射光を利用した照射試験やビーム診断を行うとともに、挿入型光源装置からの放射光を実験ホールのハッチに導入し利用するために、光学ハッチ1並びに2に設置する輸送チャンネル真空機器等の整備を進めた。

エッジ放射光の利用では、X線成分をBe窓を通して大気中に取出しロウソクの芯に照射して発火させることにより、のじぎく兵庫国体の炬火の採火を行った。同じく大気中に取出したX線を用いて、蓄積リング収納部内で散乱X線や光電子等の影響下で生じる電離真空計の誤動作の原因を調査するために、電離真空計のX線照射実験を行った^[4]。また、単バンチ運転の下でエッジ放射光の100GHz付近のマイクロ波成分の強度を測定し、大電流時のビーム不安定性に伴ってパースト的に発生すると期待されるコヒーレント放射光の検出を試みた。

輸送チャンネル真空機器の整備では、昨年度に引き続き、放射光の光軸を確認するための蛍光板モニター、光学ハッチ1と光学ハッチ2を切替えて使用するための真空封止型の可動式ガンマストッパー、マスク等の機器による散乱放射線を遮蔽する鉛コリメータを製作し、光学ハッチ1用の機器製作を終えた。これらの輸送チャンネル機器は、光学ハッチ1内に据付けて、光軸とのアラインメントや真空立ち上げを行った。図19に、光学ハッチ1内の機器配置を示す。可動式ミラーは、エッジ放射光を下向きに反射して可視光線よりも長波長の成分を大気中に取り出すためのものである。挿入光源装置を使用する時にはミラーを光軸から退避するために可動式とした。グラフィットフィルターとメタルフィルターは、利用条件に応じて放射光の強度やエネルギースペクトルを調整するために用いる。アブソーバは、可動式ガンマストッパーの遮蔽体

等を放射光の熱負荷より保護するためのものである。差動排気装置は、上流側の超高真空領域と下流側の可動式ガンマストッパー等の低真空機器とを接続するために設けた。

光学ハッチ2の機器では、挿入型光源装置からの白色光から単色X線を得るための二結晶分光器を製作した。二結晶分光器はSPring-8標準型に準拠した構造のもので、分光結晶の冷却には液体窒素を用いる間接冷却を採用した。また、基幹チャンネルに設置する機器として、分光器使用時の不要な軸外光を遮断するために用いるXスリット並びにYスリットを製作した。

前年度に直線部に設置した挿入型光源装置については、装置の誤差磁場の影響を相殺する補正電磁石の調整、光源装置部の電子ビーム軌道を測定するビーム位置モニターの調整など、ビーム運転中に磁極ギャップを駆動するための立ち上げ調整を行った。

(高野)

1-9 遠赤外レーザーを用いた10MeV領域ガンマ線の生成

SPring-8 の8 GeV 電子と波長118 μ mの遠赤外レーザー光(CO₂レーザー励起CH₃OHレーザー)による逆コンプトン散乱により発生する10MeV 領域の γ 線の生成が確認されている^{[5][6]}。生成実験は加速器診断I(BL38B2)で行われた。加速器診断Iは偏向電磁石を光源とする加速器ビーム診断等の目的のために建設されたものである。蓄積電子とレーザー光の逆コンプトン散乱は偏向電磁石内の電子ビーム円軌道上に限られた領域で行われる。そのため、ガンマ線の生成効率はあまり高いものではないが、遠赤外レーザーを用いた逆コンプトン散乱は行われた例がなく、原理実証とあらかじめ予想されるガンマ線生成量と実際の生成量との比較を

行うために既存の加速器診断Iを利用した。原理検証には、逆コンプトン散乱過程で失うエネルギーが蓄積電子のビームエネルギー(8GeV)の高々0.1%程度であるため、蓄積電子は軌道上から失われることがないことを確かめることも含まれている。

加速器診断I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10mm ϕ と12mm ϕ のPbコリメータを置いた。ディテクターは ϕ 50 \times 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。

ガンマ線の生成確認は2005年に行われているが、2006年は、その後の実験系の整備など最適化を行って取得したデータの解析を行った。図20に測定されたスペクトルとEGS4によるシミュレーション結果を示した。EGS4シミュレーションは入力スペクトルにKlein-Nishinaの公式から得られる理論スペクトルを用い、Pb、Cのアブソーバ、Pbコリメータ、シンチレータLYSO:Ceの物質との相互作用の結果得られるスペクトルが実験結果と合うように入力スペクトルの強度をパラメータとした。その結果得られた逆コンプトン散乱の光源点でのガンマ線生成量は 1.3×10^3 photons/secであった。一方、伝送系の輸送効率、入射窓の透過効率、相互作用領域の長さ、そこでのビームプロファイルなどを考慮したガンマ線生成量は 1.8×10^3 photons/secという結果をあらかじめ見積もっている。実験結果から得られた量はこれより30%程少ないが、伝送系での回折効果などから計算したビームプロファイルと実際のプロファイルとの違いなど原因があると思われる。

実用光源を目指した高強度の逆コンプトンガンマ線の生成のために、加速器診断II(BL05SS)でのガンマ線生成計画が進めている。加速器診断II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

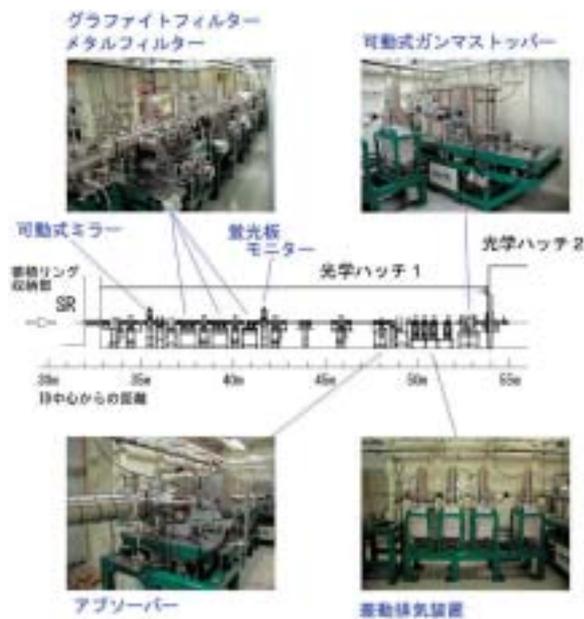


図19 加速器診断II光学ハッチ1の輸送チャンネル真空機器

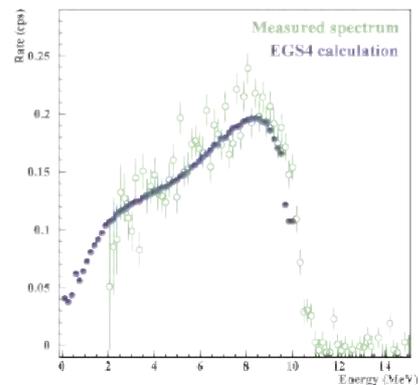


図20 逆コンプトン散乱ガンマ線スペクトル(測定結果)とEGS4シミュレーション結果の比較。

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。さらに、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、真空中に導入する真空チェンバの設置などを終えている。また、その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、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] SPring-8 年報 2005年度、p.23.
- [2] 梶 他、第4回加速器学会年会・第32回リニアック技術研究会報告集掲載予定、和光.
- [3] 正木 他、第4回加速器学会年会・第32回リニアック技術研究会報告集掲載予定、和光.
- [4] 大石 他、"放射線による圧力測定異常の実験的研究"、「真空」、投稿中.
- [5] SPring-8年報2005年度、p.27.
- [6] H. Ohkuma, et al., Proc. of EPAC'06, Edinburgh, June 2006, p.961.

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

2-1 運転状況

1996年8月8日、SPring-8線型加速器のファーストビームを見て以来、10年が経過した。1997年10月から開始した線型加速器の営業運転は、大きなトラブルもなく今に至っている。

蓄積リングのビーム電流を0.1%の安定度で維持するトップアップ運転が2004年5月より開始され、同年9月には、SPring-8とNewSUBARUの両方同時のトップアップ運転が始まり、現在も継続されている。トップアップ運転のビーム入射間隔は、SPring-8では1分または5分間隔であり、NewSUBARUでは蓄積電流によるが6、7秒に1度の入射を行っている。

表1: リニアック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%

このように頻繁に入射を行うトップアップ運転中は、機器のフォールトやビーム調整によるビーム入射の中断を最小限にせねばならず、リニアックには高度の安定度と信頼性が求められる。SPring-8リニアックでは、1998年よりビーム安定化のための改良およびフィードバック制御導入を進めてきており、2004年度末までにはほぼその作業を終えた^[1]。また、ビーム入射中断を最小限にとどめるため、信頼性の向上にも精力的に取り組んでおり、2007年度には第二電子銃の設置を終える予定である。

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。

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、マルチバンチの時は5分、セベラルバンチの時は1分間隔で行っている。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。1.5 GeV運転は現在日中のみ行われており、必要に応じて、1日1ないし2回の入射を行っている。

2006年におけるリニアック総運転時間は、約5,026時間であった。図1上に2006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。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2日に1回程度まで下がっている。なお、前半のサイクルでも約1回/日を超える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中断された「ダウンタイム」の比率については、第6サイクルでは

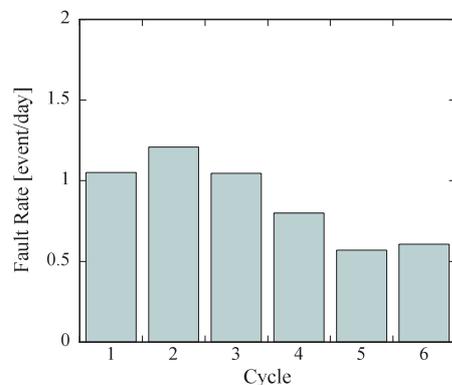


図1 インターロックフォールトの頻度

クライストロン内真空悪化によるダウンで、再投入まで少し時間がかかったことから1.1%と顕著に目立つが、その後は0.3%ほどである。

2-2 加速器の改良

2-2-1 電子銃

いままで、リニアックの電子銃システムは、電子銃本体、高電圧デッキ、電源などが一系統しか無く、これらに不具合が発生した場合は、修理あるいは交換が完了するまでリニアックの運転を停止させていた。特に、電子銃カソードを交換する場合は、カソードを交換し、真空排気、そしてカソードの活性化が終了して再び電子ビームを加速するまでに約3日を要していた。従って、電子銃システムの高信頼化だけでなく、運転再開までの時間を短縮させることが、重要な課題であった。

我々が取り組んできた電子銃系の改良は以下の通りである。

- ・ 新型高電圧電源の開発（高信頼化）
- ・ カソード交換作業の確実性向上
- ・ 電子銃システムの二重化

(1) 新型電子銃電源の設置 [2, 3]

従来の電子銃用電源は、当初から変調器の直流高電圧電源出力部での放電を起こしやすく、またリニアック開発当初から使用されている古い機器であるため、入手困難な保守部品も出始めていた。そこで新規に変調器および高電圧デッキを開発し、2006年のほぼ1年間試運転を続けて異常のないことを確認した。そして同年暮れからの停止期間に、従来から使用していた高電圧電源と新型を完全に入れ替えた。

新しい変調器の特徴は以下の通りである。

- 1) パルストランス昇圧比 1:30とし、一次電圧を下げた。
- 2) PLC制御ネットワークにFL-netを採用した。
- 3) 高電圧デッキを大きくして、機能拡張性、保守性を向上させた。

パルストランス昇圧比が大きいためパルストランスの浮遊容量はその分大きく見え、高電圧パルスの立ち上がり時間は



図2 加速管室に設置されたパルストランスタンク

約3msとかなり長く、その分フラットトップが短い。しかし、電子ビームパルスは幅40 ns以下であるため、実用上の不具合はない。また、パルス電圧の安定度（すなわちインバータ電源の安定度）は0.05% rmsであるが、電子銃高電圧の安定度としては十分な値である。

通常の加速電圧180 kVを得るには、直流電源は12 kVしか必要としないため、試験運転も含めて、放電などの問題は皆無である。

(2) カソード交換作業の確実化 [4]

カソード交換作業を確実かつ短時間に行うための交換治具の製作、および取り付けカソードに簡単確実に接続できる同軸伝送路を開発した。

これまでのカソード交換作業は電子銃設置場所の空間的制限から、電子銃の高圧絶縁碍子ごと取り外し、他の作業性の良い場所までチェーンブロックで移動させ交換を行っていた。しかし、狭所での吊り上げ、および移動させる作業には高圧絶縁碍子の破損等の危険を伴う。そこで高圧絶縁碍子を電子銃から取り外すことなく、安全かつ迅速にカソードのみの交換が行える治具を開発した。

治具の特徴は以下の通りである。

- 1) 治具は、カソードを保持して電子銃の中へ挿入するためのカソード交換治具、挿入する際に電子銃本体内の取り付け部への位置合わせに使用するサポート治具、カソードフランジを固定しているボルトを回すための締め付け治具の3つ（図3参照）。
- 2) フランジを取り付けた治具の挿入時におけるガスケットの落下を防止する専用クリップ。
- 3) 可能な限りコンパクトで軽量にするため材質は極力アルミ材を使用する。

カソード交換治具の先端は、図3のように三つ股になっており、カソードを安定して保持できる。この治具を使用すると、誰でも10分程でカソードの交換作業を確実に行うことが出来、交換作業の信頼性はかなり向上した。

従来の同軸伝送路は、電子銃カソードと接続した直後は正常に接触していても、半日ほど経過すると加速器運転開始後に接触不良を起こすなどの不具合が発生していた。この主な原因は、伝送路が長く重量のある構造体のため取り扱いが難しいことにあった。このため、電子銃カソードに衝撃を与え



図3 カソード交換用治具一式

ず伝送路を高精度で接続することは困難であり、取り付け方によっては僅かな角度のずれが生じて接触不良の原因となっていた。また、装着の際にカソード側のコネクタを損傷したこともあった。

新たに開発した同軸伝送路の特徴は以下の通りである。

- 1) 銅材でできた一部を除き、ほとんどアルミ材を使用して軽量化を図った。その結果、全長353mm、重量0.6kgと従来に比べて大幅に小型軽量化を実現した。
- 2) 電子銃内面との接触部には挿入を容易にするためにボールプランジャーを取り付け、カソードへの装着も簡易、かつ正確に行える構造にした。
- 3) 導電性を増すために信号伝達部には金メッキを施した。

新型同軸伝送路の構造を図4に示す。伝送路の脇から出ている2本の電線は電子銃カソードとヒーターに接続され、ヒーター線には高速パルサーからのパルス電圧を通過させないように、フェライトコアを取り付けている。

伝送路の中心導体を絶縁保持する部分には、穴あきテフロン円板を支持体として用い、この部分は特性インピーダンスをできるだけ50オームにマッチングさせるよう構造を工夫して早い応答を得ている。

本同軸伝送路の透過特性試験を行った結果は図5の通りである。新型同軸伝送路を通過後の出力波形を、パルサー出力波形と比べると、僅かな乱れはあるものの立ち上がり、立ちが下りの劣化は生じていないことが確認された。

(3) 電子銃システムの二重化^[5]

前述のように、電子銃カソードのトラブルについては、電子銃部を大気開放しカソードを交換するしか対処方法はなかった。この交換には、真空排気作業、カソード活性化など

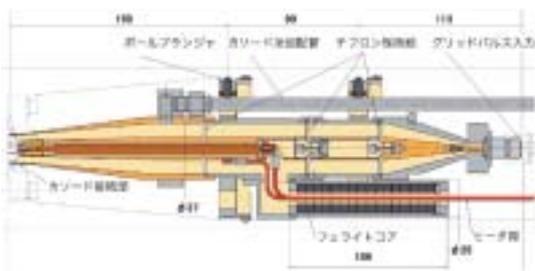


図4 新型同軸伝送路の構造

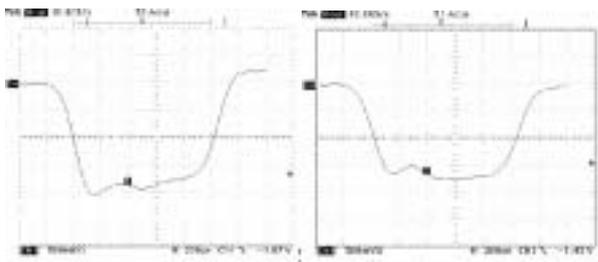


図5 新型同軸伝送路通過後のグリッドパルス波形
(500mV/div. 200ps/div.)

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、以前より電子銃システムの二重化を検討してきた。電子銃については、電子銃のみ二重化する、あるいは電子銃からバンチャまでを二重化するなど種々の案を検討したが、結局コストが安くして短期に設置作業が完了する、電子銃のみの二重化を行うことになった。

新しい予備電子銃は、加速器のビーム軸に対して90度方向から入射することとし、図6にあるように既存の電子銃を約1.4 m後方に下げ、その部分に電子ビームを合流させる偏向電磁石を設置することにした。

図7に詳細配置を示す。第二電子銃からのビームは90度偏向磁石を経由して、線型加速器に送られる。この偏向電磁石のポールピースは、集束効果をもたせるよう設計してある。また第一電子銃を運転時にもビームの確認ができるように、第二電子銃直線部には各種モニターが配置されている。

2007年春には機器の製作を完了しており、2008年春に試運転を行う予定である。第一電子銃のトラブル時は、現有電子銃電源及び高圧デッキを第二電子銃につなぎ替えて使うことになるが、2008年度以降に専用の電源や高圧デッキを設置することにより、完全な二重化を行う準備を進めている。

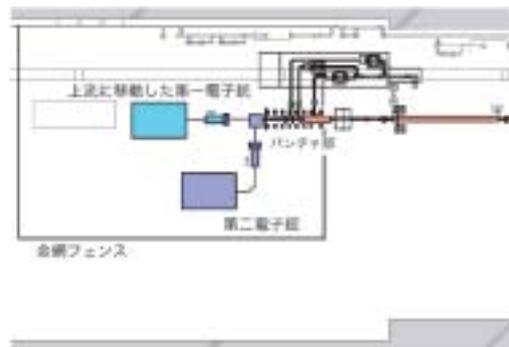


図6 第二電子銃の配置

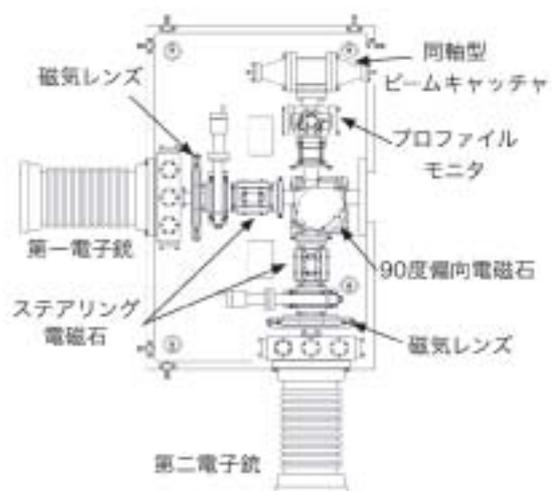


図7 電子銃輸送系の詳細

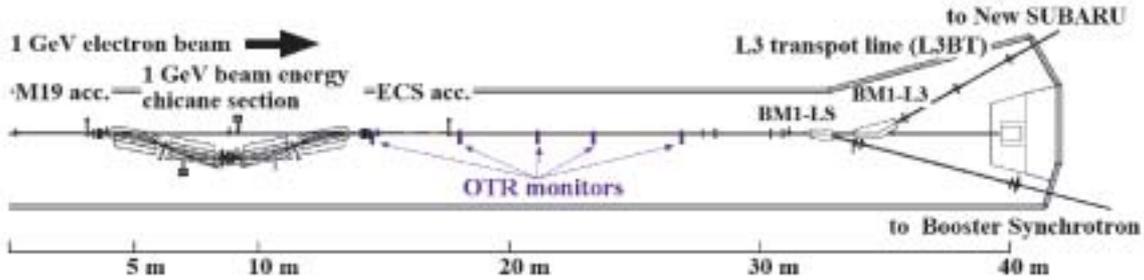


図8 遷移放射光 (OTR)モニタ設置場所

2-2-2 エミッタンスモニタシステム^[6]

SPring-8におけるユーザー運転では、24時間の連続トップアップ運転が数週間にわたって行われるため、線型加速器には長期間ビーム品質を維持することが要求されている。このため、エミッタンスを定期的に測定し、時系列データを取得することはビーム品質管理の上で重要である。しかし、現在設置されている蛍光板を用いたビームプロファイルモニターやワイヤースキャナーモニターでは、画像分解能に起因する不十分な測定精度、及び測定に時間がかかることから、定期的なエミッタンス測定は行われていなかった。本システムは、入射ビームのエミッタンス、およびTwiss Parameterを迅速かつ高精度で測定することを目的として開発され、新たに5台の遷移放射光 (OTR) モニターを線型加速器1GeVドリフト空間に設置した。各モニターで撮像されたビーム形状からビームサイズを求め、そのドリフト空間におけるビームエンベロープを算出することにより、上記のパラメーターを求めることができる。

本モニタシステムは、OTRスクリーンモニタ、CCDカメラ、および画像解析装置で構成される。

5台のOTRモニターは、図8のように1GeVシケイン部四極電磁石直後から、マッチング部四極電磁石直前までの10mのドリフト空間に約2.5m間隔で設置した。この間のビーム位置調整は、2台の軌道補正電磁石とBPMにより行われ、本スクリーンモニター中心付近でのビーム観測が可能である。

OTRスクリーンモニタは、図9のような構造をしている。本モニターには2枚のスクリーンが直列に搭載されており、2つのシリンダーによる圧搾駆動の組み合わせにより、任意のスクリーンをビームダクトの中心まで挿入できるしくみに

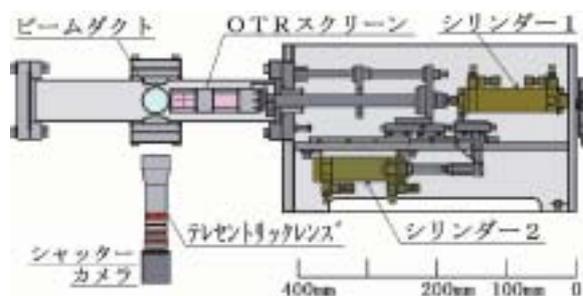


図9 遷移放射光モニタチャンバ

なっている。1枚目のスクリーンは、目盛が施された厚さ0.2mmのSUS304で製作した金属板である。このスクリーンは、画像処理ユニットより出力される独自の単位に対して、寸法校正に用いられる。2枚目のスクリーンは実際にビーム形状を測定するための鏡面仕上げを施した金属板で、表面粗度は $1\mu\text{m}$ 以下である。サイズは、縦30mm、横35mm、厚さ0.5mmで、素材はアルミである。

45° 傾けた金属板から下方に発生した遷移放射光は、テレセントリックレンズを装着した外部トリガ入力機能を搭載したランダムシャッターカメラ (TAKEX社製FC300M) で撮像し、映像信号切替器によってNTSC信号に変換され、画像処理ユニットへ入力される。テレセントリックレンズは、既に線型加速器シケイン部に導入されているエネルギー分布測定用のビーム透過型薄膜スクリーンモニターでその有効性が確認されており、特に被写体の寸法測定を行う際には、歪曲収差が非常に小さく被写界深度が十分深いので、撮像画像に補正をかけることなく正確な計測が可能である。

画像処理ユニットは、ビーム画像から、水平、垂直方向のビームサイズを、それぞれ統計的な標準偏差 (Std) と、ガウス分布のフィッティングにより算出される標準偏差 (σ) とし、両方を瞬時に求めることができる。これにより、両データを比較することで、ビーム分布に対して正規分布が適用可能か否かを判断できる。

このシステムは2006年度末にほぼ完成しており、今後自動測定のためのソフトウェア製作および機器の調整を完了させ、2007年度中の運用を目指している。このシステムによって1分以内のビーム測定を予定しており、運転状況次第では、トップアップ運転中でもビーム入射の合間をぬってビーム測定が可能である。さらにビーム入射時の測定を実現するために、スクリーンを薄膜化し、ビーム透過型へ変更することを考えている。

2-3 フォトカソードRF電子銃開発^[7]

均一な電荷分布を有する円筒状の電子ビームは、非線形空間電荷効果によるエミッタンス増加が少ない。そこでそのような電子ビームを生成できるように、レーザパルスのトランスバースプロファイルは均一な分布の円形を、時間プロファイルは矩形パルス状を目標として、レーザパルス形状制御の

開発を行ってきた。

トランスバースプロファイルの整形については、技術開発をほぼ完了している。可変形補償ミラーによってカソード面でのレーザー強度分布を均一な円形分布に整形するが、遺伝的アルゴリズムに基づいた制御ソフトウェアの完成により、ミラー形状を実用的な時間内で決定できるようになった。

一方、時間プロファイルの整形では、紫外レーザーパルスを実用的な時間内で複数個つないで矩形パルスを作る方法を研究し、今回我々が目標としてきた幅20psの矩形パルスの整形に成功した。その結果、上記の可変形補償ミラーによる成形技術と合わせて、ほぼ均一で対称な円筒形状レーザービームを世界で初めて実現した。

パルススタッカとは、幅の狭いレーザーパルス複数個にそれぞれ適当な遅延時間を与えて合成し、幅の長いパルスを作り出す光学系である。実際には図11のように波長回転板と偏光ビーム・スプリッターで構成され、波長板で45°直線偏光にされたパルスレーザー光を偏光スプリッターキューブにより各偏光成分(S偏光とP偏光パルス)に分岐し、再びスプリッター(この場合は合成用)にて光路差をつけて再合成する光学系である。このことを段数分だけ繰り返す構成になっている。例えば3段の場合は8個のパルスに分岐して重ねることになる。このとき合成パルスに干渉が起きないように、図10に示すようにSとP偏光のパルスを交互に並べている。

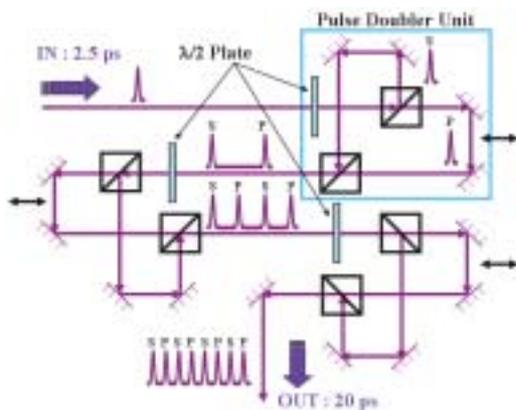


図10 UVレーザーパルススタッカの原理図

我々の場合、約2.5 ps幅の紫外レーザーパルスを8個並べてフラットな20 ps幅の紫外レーザーパルスを作る。この場合の技術的問題点は以下の2点、すなわち、最初にレーザーパルス幅を2.5 ps幅へ伸張する方法、そして紫外レーザーパルスの時間プロファイル測定方法である。

まず、レーザーパルス幅2.5 psというのは、カソード面で実現しなければならない。パルススタッカの光学系だけでなくパルススタッカより下流側の伝送光学系でも分散のためにパルス幅は伸長する。これらのパルス伸長を考慮して、THGを改造しレーザーパルスに最適なチャープ量を与えることにより目的のパルス幅を得ることができた。

紫外レーザーパルスの時間プロファイル測定は、ストリーク

カメラが紫外線に対して十分な特性がないため、意外に難しい。我々の場合は、RF電子銃で生成された電子ビームを使って以下のように測定を行った。

まず、レーザー入射位相を意図的に電子ビームのエネルギー拡がりが大きくなるRF位相にする。こうすると、電子の時間差がそのエネルギー差に変換できる(ただし完全に線形ではない)。ビームエネルギーは、下流の偏向電磁石で曲げるところにあるプロファイラで測定する。ビームエネルギーのRF位相依存性がわかっているため、ビームエネルギーから電子バンチのパルス長やバンチ間隔が計算できる。

整形されたレーザービームを単空洞型RF電子銃に入射して生成した電子ビームの規格化Xエミッタンスについては、目標に迫る測定値が得られている。特に1 nCのビーム生成において、理想に近いレーザーパルス形状が空間電荷効果によるエミッタンス増加を抑制していることがわかる。

実験で得られた規格化エミッタンスは、レーザーパルス長が10 psの時に 1.4π mm mrad (0.38 nC)、15 psの時で 1.8π mm mrad (0.52 nC)、20 psの時は 2.0π mm mrad (1 nC)であった。

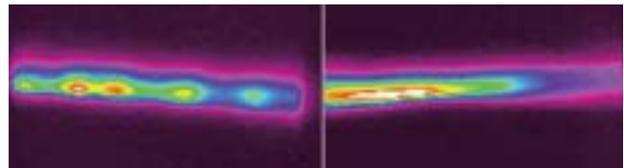


図11 パルススタッカーを調整中に観測された電子ビームのエネルギースペクトル(左の調整中のスペクトルでは個々の電子バンチが不均一な間隔において明瞭に見える、右の最適化後ではバンチが一つに連なった状態に観測される)。

参考文献

- [1] H. Hanaki, et al., "Enhancements of Machine Reliability and Beam Quality in SPring-8 Linac for Top-Up Injection into Two Storage Rings", PAC2005, Knoxville, USA, p. 3585.
- [2] S. Nagasawa, et al., "SPring-8線型加速器新型電子銃電源システムの開発", 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2004, Funabashi, p. 365.
- [3] T. Hasegawa, et al., "FL-netを用いた電子銃電源の制御", 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2005, Tosu, p. 403.
- [4] S. Matono, et al., "SPring-8線型加速器電子銃用カソード交換機構の改良", 32th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2007, Wako.
- [5] T. Kobayashi, et al., "SPring-8線型加速器における電子及びクライストロンモジュレータの改良", 32th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2007, Wako.
- [6] T. Watanabe, et al., "SPring-8線型加速器エミッタ

ス測定用モニターシステムの開発”, 32th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2007, Wako.

- [7] T. Dewa et al., "LASER PULSE LENGTH DEPENDENCE OF BEAM EMITTANCE OF PHOTOCATHODE RFGUN", FEL2006, Berlin, Germany, p. 649.

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

3-1 ブースターシンクロトロンの間欠運転による使用電力削減への取り組み

トップアップ運転時のビーム入射は蓄積リングへのフィリングパターンに応じて1分毎あるいは5分毎に行われている。我々は電力使用量の節約を目的として、ブースターシンクロトロンにおいてビーム入射時以外の電磁石電源のパターン励磁を停止する運転方法（間欠運転）の試験を行った。

ブースターシンクロトロンの偏向・四極・六極の各電磁石電源はタイミングシステムからのパターンスタート信号を受けてビームエネルギー 1GeV~8GeVに相当するパターン励磁を行っている。間欠運転を行うためにTop-up運転のビーム入射時のみビームスイッチに連動して各電源にパターンスタート信号が出力されるようにタイミングシステムを変更した。ビーム運転を行わない間、各電磁石電源は1GeV相当のDC出力にて待機状態となる。1分間隔で2発のビーム運転という条件で試験的に間欠運転を行った結果、偏向電磁石の連続運転時の電力量1200kWhが210kWhに、四極電磁石については300kWh が70kWhに低下した。

蓄積リングでの高いバンチ純度を達成するために、ブースターシンクロトロンでは不要なバンチを除去するRFKOを行っている。RFKOではビームの垂直方向の振動周波数に共鳴するような高周波でビームをキックして除去している。このため垂直方向のベータトロンチューンの変動はRFKOの効

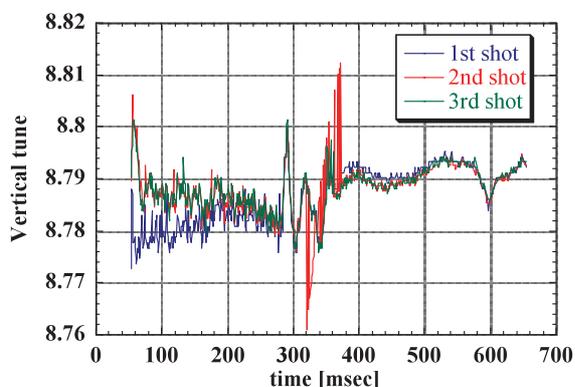


図1 パターン運転開始最初の3ショットにおけるチューン値の違い

率を低下させ、バンチ純度悪化の原因となる。間欠運転におけるビーム特性を測定した結果、ユーザー運転への適用においてチューン値の変動がネックとなることがわかった。

間欠運転において電磁石電源のパターン励磁が停止している状態からパターン運転を開始した直後ではビームのチューン値が通常運転時の値からずれる現象が観測された。原因はパターン励磁の開始直後では電磁石の磁場が定格に達していないためと推測される。そこで、パターン運転開始後の最初の3ショットのチューンを測定し比較した。図1は3ショットまでのビームの垂直方向のチューン値を比較したものである。1ショット目のチューン値だけが大きくずれていて2ショットと3ショットはほぼ同じ値に収まっている。これより、間欠運転ではビーム運転を行う直前に電磁石の磁場を安定させるための空打ち運転が必要であることがわかった。

さらに長期間の間欠運転試験においても、チューン値の変動とそれによる蓄積リングのバンチ純度の悪化が観測された。ブースターは蓄積リングへのビームの積み上げでは連続運転を行い、その後トップアップ運転モードに移行してから間欠運転に切り替わる。この通電時間の変化により電磁石のコイル温度は約7℃ 変化する。温度変化によりコイルの抵抗値は約3%変化し、約 1×10^{-4} の電流偏差が生じるため、これもチューン値を変動させるひとつの要因と考えられる。間欠運転の実用化においてはコイル温度に左右されることなく励磁電流を一定に保つような対策を考慮する必要がある。

(青木)

3-2 SSBT系のビーム軌道安定化

トップアップ運転を行う上で挿入光源におけるビームによる損傷等を防ぐため、蓄積リングへの高いビーム入射効率を安定に保つ必要がある。さらに蓄積する個々のバンチ電流の均一性を保つため、ビーム損失等による入射ビーム電流値の変動をできるだけ少なくする必要がある。入射効率低下やビーム電流値の変動の原因の一つとして、ブースターシンクロトロンからのビーム出射軌道の変動やビーム輸送系（SSBT系）におけるビーム軌道の変動が考えられる。SSBT系の上流部には水平方向のビームサイズを小さくし、蓄積リングへの入射軌道を周回軌道に近づけることで入射効率を高めるためのコリメータが設置してある。ブースターからの出射軌道はその変動がコリメータ入射位置のずれとなり、ビームの通過率に大きく影響するため、蓄積リングへの入射電流値を安定化させるためには非常に重要である。出射軌道の変動はブースターのCODの変動、及びビーム出射用パルス電磁石の励磁電流の変動などが主に影響していると考えられ、これらの安定化を行うことは重要である。

トップアップ運転時の蓄積リングへの入射軌道はセプタム電磁石のセプタム板により近い位置となるため、蓄積リング入射部におけるわずかな軌道の変動も入射ビームの大きな損失となってしまふ。蓄積リングの入射部におけるOTR位置

モニターでの観測結果によると、各運転サイクルの開始から徐々に軌道がドリフトし、これに伴い入射効率の低下が続いている。この軌道変動を抑制するためSSBT系電磁石電源の出力電流の変動を中心に原因の調査を行い、蓄積リングへのビーム入射軌道の安定化を行った。

偏向電磁石電源に外部DCCTを取り付けて観測を行った結果、全ての電源に大きな出力変動が見られた。このため、電源内のシャント抵抗を使用した出力電流検出部に劣化等の問題があると推測し、DCCTを用いた検出部によるフィードバック系へ改造することにより電源出力の安定化を試みた。図2に改造前と改造後の出力電流の変動の様子を示す。全数の偏向電磁石電源についてフィードバック系を改造することにより蓄積リング入射部における軌道の安定化が達成できた。さらに、コリメータ上流にある偏向電磁石の出力変動も抑制されたため、ビーム通過率の変動も改善された。

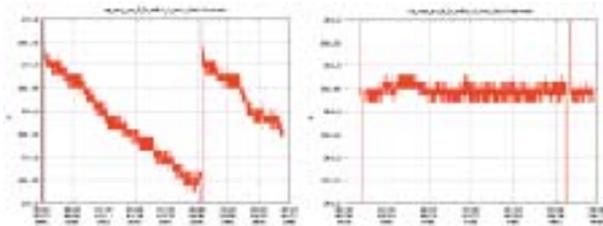


図2 偏向電磁石電源 (PS-BM3ss) の改造前 (左) と改造後 (右) の出力変動の様子。改造前のデータの大きな段差は途中で設定値の変更を行ったためである。また、両者の大きなデータの跳びは電源のON/OFFによるものである。

今後は四極電磁石についても同様に外部DCCTを用いた出力電流の観測を行い、必要に応じてフィードバック系の改造を行う予定である。またブースターの出射セプタム電磁石についても外部DCCTを設置して観測を行っている。短期間での大きな変動は見られていないが、年単位の長期的な変動が観測された場合にはDCCT出力を用いたフィードバック系への改造を検討する。

また、ブースターのCOD変動が出射軌道に与える影響を取り除くためにCODの自動補正を検討中である。ただし、現状のステアリング電磁石が全て双曲型ではないため、フラットボトムとフラットトップの両方を同時に補正することが困難である。このため、フラットトップのみで自動補正を行う場合にはフラットボトムのCODの変動が大きくなる可能性があり、これがチューン値の変動を伴いパンチ純度の悪化につながる可能性が高い。今後、単極型ステアリング電磁石を双曲型へ変更し、フラットボトム・トップ両方でのCOD自動補正を行うことを検討する。

(青木)

3-3 六極電磁石架台の設計製作と電磁石の据え付けアラインメント

入射効率向上のため、ダイナミックアパーチャを改善する

ことが計画され、新たに4カ所の長直線部の両端に六極電磁石を設置する必要が生じた (1-4参照)。この六極電磁石を設置するための架台を設計製作し、長直線部に計8台の六極電磁石を設置し、精度よくアラインメントした。

SPring-8の多極電磁石用の共通架台は、架台全体の位置調整と架台上の個々の電磁石を調整する構造となっている。また電磁石は調整板の上に乗っており、この調整板の位置を押しボルトにより調整する構造となっている。これは、電磁石を直接押しボルトで力を加えると、電磁石が歪むためこのような方式をとることにしたものである。新たに作る架台も、基本的な設計思想は同じとした。しかしながら従来の架台では、電磁石を取り外す場合、電磁石のみを取り外すことはできず、真空チェンバも取り外す必要があった。そこで今回は電磁石のみを取り外すことができる構造とした。

図3に今回製作した架台を示す。架台は、架台本体と電磁石の調整機構からなる。電磁石は図に示す調整板の上に搭載され、架台と調整板の間には磁石がわずかの力で滑らかに動くように、摩擦係数が0.1以下の低摩擦の滑り支承を用いている。水平方向の調整は、この調整板を押しボルトで押すことによりなされる。垂直方向の調整は、ボルトを上下させることにより行う。ボルトと電磁石の接触面には球面状の座金を用いており、電磁石と座金は面で接触するようにしている。また、この球面座金により、ボルトを回転させた時、電磁石に直接力が加わらないようになっている。またチェンバの高さが50mmであるため上下方向の調整範囲を30mmに取り、半割後電磁石を25mm以上上げて、チェンバを外さずに、電磁石のみを取り外せる構造になっている。

据え付けアラインメントは、アンカーの設置、架台の設置、架台のアラインメント、電磁石の設置、電磁石のアラインメントの順序で行った。

電磁石のアラインメントは、レーザートラッカー SMART310を用いて、電磁石の磁場中心を、上流、または下流の既設の四極電磁石を基準にしてアラインメントした。位置調整時はレーザートラッカーで位置を測定しながら、電磁石に取り付けられたダイヤルゲージを見て所定の量だけ電磁石を動かすようにした。

図4にレーザートラッカーで測定したアラインメント結果を示す。ただし測定は、直近の架台の両端の四極電磁石および壁に設置された基準点を基準にしている。アラインメント



(a) 架空本体

(b) 調整機構

図3 六極電磁石用架台

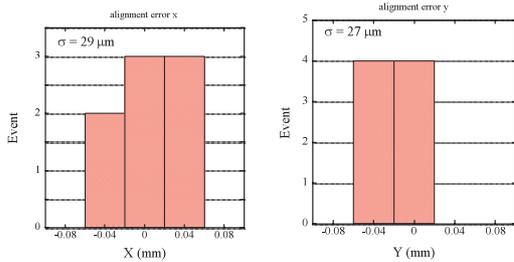


図4 アラインメント結果

誤差は、水平方向（X方向）が $29\mu\text{m}$ 、垂直方向（Y方向）が $27\mu\text{m}$ 、ビーム進行方向（S方向）が 0.46mm である。また回転誤差は、 $52\mu\text{rad}$ であった。

（妻木）

3-4 リング棟傾斜測定

(1) 床下排水管と降雨

蓄積リング収納部の床下1mの深さに直径90cmの排水管が全部で5本通っており、内周側の雨水を外周に排出している。この排水管付近の上の電磁石の高さが夏と冬で0.1mm程度上下している箇所もある。そこで床の傾斜を連続測定し降雨の影響を調査した。2004年11月～2005年9月に35セルの排水管の上の保守通路内周側の壁から30cmの位置に二次元の傾斜センサー（AGI社5220）を2台設置し、9ヶ月の連続測定を行った。図5に2台の各方向（X：リング半径方向、Y：リング円周方向）の傾斜、保守通路、屋外の気温、1日の降水量を示す。傾斜はセンサーの温度による補正後の値である。センサー1の位置から考え、管内の雨水による温度の降下で排水管の上部が縮み下降するなら電圧は上昇する向きになるが、実際には逆である。降雨と同時に気温も降下しており、またY方向の傾斜変化の3～4倍あるX方向の影響も考えられ、単純に排水管の影響とは判断できないように見える（図ではY方向傾斜の値を3倍して示している）。傾斜1Y、2Yは外気温度とよく連動しており、降雨による排水管からの影響というより外気温など周囲の温度の寄与が大きいように見える。

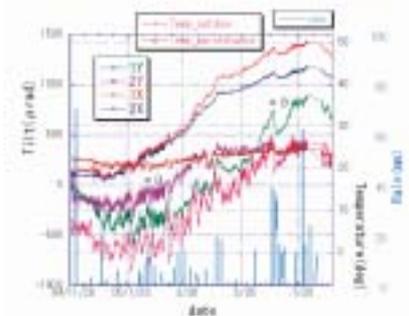


図5 保守通路床面の傾斜変化と通路、屋外温度、一日の降雨量の関係。X方向はリング外側下降側、Y方向は円周方向（3倍に拡大）下流側下降側。温度は平均化の処理をしている。

(2) 半径方向の傾斜と周長変化

センサーの位置が建屋のリング内側壁と近かったため保守通路の半径方向の傾斜（1X、2X）の変化は大きく、図5のように冬から夏にかけてリング内側が $1200\mu\text{rad}$ も上昇した。通常のところのリング棟は内側から3mの保守通路部、6～8mの収納部、23m程度の実験ホールとなっており、日照による温度変化の収納部への影響は近いほうの内周側からが大きいと推定される。SSBTラインが床下を通る44セル付近でベースプレート（図内の記号BP）、架台（G）、電磁石上（RP）にリング半径方向に一次元の傾斜センサーを設置し、日周期のビーム変動を調査したがこの設定で長期間測定した結果を図6に示す。停止時は電磁石の通電がないため温度の条件が異なり、傾斜がシフトするが運転が始まると元に戻るため、図では運転時のみを示した。図を見るとこの場所では年間約 $20\mu\text{rad}$ 変化しており、ビームラインの高さ1.2mでは0.03mm程度半径が変化する。傾きの変曲時期として4～5月と10～11月頃のように見える。これはリングの周長の変化する時期に近い。この測定は44セル付近の傾斜変化だけなので全体での影響は明確ではないが、リング周長の年間1mmの変化の一定の部分は傾斜によると推測される。

季節により軌道がドリフトしていくような長期にわたる変動が観測される時があるが、傾斜センサーは設置の容易さなど床の変動をモニターするのに便利なのがあった。

実際2005年秋の防災工事後の昨年から今年にかけて、排水管付近の架台を支えているベースプレート上にビームの長手方向に一次元の電解液を使った傾斜センサー（Spectron社製）を3箇所に各4～5個設置し測定を始めた。4ヶ月の連続測定で35セル付近では気圧と相関のあるものが見られ、また41セル付近では電磁石への通電開始後3日程度かかって傾斜が落ち着いてきているのが認められた。また47～48セル付近では蓄積電流との関係が見られ、真空チャンバーの発熱が架台の変形につながり、架台のサポートであるベースプレートを

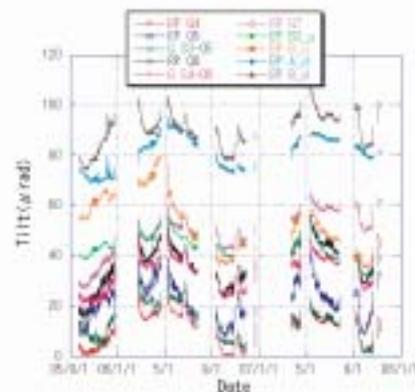


図6 ベースプレート、架台、電磁石のリング半径方向の傾斜変化 RP：電磁石の基準面上、G：架台上、BP：ベースプレート上

傾斜させていた。このように、測定した3箇所については降雨による急な変動で排水管に起因するものは認められなかった。

(松井)

3-5 カップラーエージング空胴の開発

(1) 開発の動機

カップラーのエージング試験に使用していた5連空胴が真空洩れを起こし、エージング試験に使用できなくなった。通常、カップラーのエージングは最大電力300kWで行う。5連空胴の他に蓄積リング用の単セル空胴もあるが、この空胴の最大入力電力は150kWであるため、カップラーのエージング試験には使用できない。この真空洩れした5連空胴の修理や空胴の新規製作はコストが高い。そこで、高エネルギー加速器研究機構（KEK）で開発されたエージング専用空胴 [1] の導入を検討し、KEKより、その空胴を借用してその性能試験を行った。

(2) カップラーエージング専用空胴の特徴

このエージング専用空胴は直径110mm、長さ340mmの円筒にロッドを取付けたシンプルな構造で、2台のカップラーを直結して大電力試験を行う（図7）。小型・軽量のため取り扱いや真空排気が容易なこと、空胴内の高周波ロスが少ないため、冷却水が少量で済むこと、5連空胴と比較すると放射線の発生が少ないこと、製作コストが5連空胴の10分の1以下であること等、この空胴は5連空胴と比較して多くの利点を持つ。

(3) 大電力高周波試験

KEKから借用したエージング専用空胴を用いて、SPRING-8カップラーのエージング試験を試みた。この空胴の共振周波数は、空胴内のロッドと空胴に挿入したカップラー先端との距離に大きく依存する。そこで、高周波シミュレーションや実機の測定を行って、ロッド・ロッド間距離の最適値を求めた。しかし、ロッド形状の異なるカップラーが存在することや製作時の誤差等で共振周波数のずれが必ず生じるため、実機の運転には厚さの異なるガスケットを用意して共振周波数を微調整する必要がある。

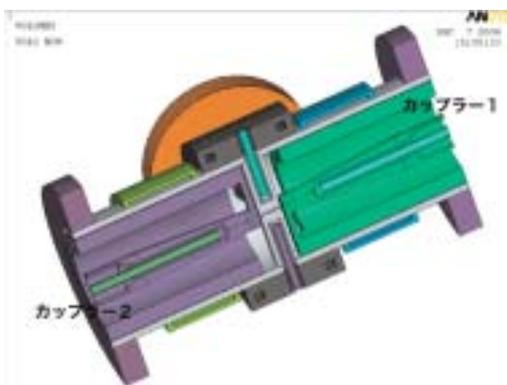


図7 カップラーエージング専用空胴の構造

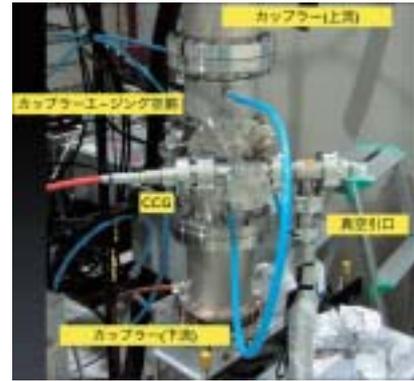


図8 大電力試験のセットアップ

図8は大電力試験用に空胴とカップラーを組み立てた写真である。試験当初、数kWの入力電力で空胴のロッド中央部で放電を起こしていたが、約30時間のエージング運転後には目標の300kW大電力投入に成功した。また、エージング試験の運転条件の最適化や繰り返し運転により小電力時の放電もなくなり、300kWまで安定した大電力運転が可能となった。

今回の試験により、このエージング専用空胴はSPRING-8カップラーのエージング試験にも有用であることがわかった。（恵郷）

3-6 放射線による圧力測定異常の調査

蓄積リングは1997年の運転開始当初は蓄積ビームの積分電流の増加とともに圧力の低減とビーム寿命の伸び、いわゆる"枯れ"が観測されたが、一部の電離真空計は、一年も経たないうちに正しい値を示さず、この"枯れ"を正しく反映した圧力減少が見られなくなった。

図9に運転開始以来の蓄積リングの圧力推移の一例とビーム寿命を示す。左側縦軸は、ビーム無しの圧力に対する電子ビーム蓄積による圧力増加分を蓄積電流値で規格化したもの $\Delta P / I$ 、右側縦軸は、蓄積電流値とビーム寿命の積 $I \times t$ 、横軸は蓄積リングの積分電流である。ビーム寿命は、マルチバン

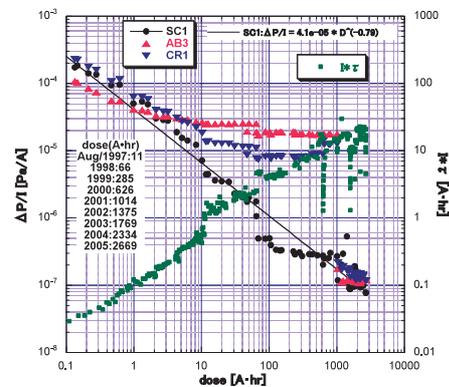


図9 蓄積リングの圧力およびビーム寿命と積分電流の相関例。AB3とCR1の圧力は、圧力測定異常対策（1014Ahrに実施）以降はSC1の圧力と同等になった。

チ運転時で、全ての挿入光源のギャップが全開の時のデータを示している。SC1 (●) は直線部の圧力で、放射光吸収体であるアブソーバより離れており放射線がほとんど照射しない場所である。AB3 (▲)、CR1 (▼) はアブソーバのすぐ近傍にあり、強い放射線 (散乱X線) が照射される場所である。SC1のDP/Iは運転開始以来、積分電流の増加とともに減少している。I×t (■) も、積分電流に対してほぼ一定の勾配での伸びが観測されている。一方、AB3のDP/Iは運転開始から3A・hrぐらいいまで、CR1は10A・hrぐらいいまで減少が見られたが、それ以降はほとんど減少しておらず、これらの箇所では"枯れ"が進行していないように見えた。アブソーバ近傍では正しく圧力計測できていないのではないかと考え、原因を調査した。

調査の結果、①測定子への放射線照射、②測定子への光電子流入、③ケーブルへの放射線照射の3種類の原因の圧力測定異常が観測された。②の異常は加速器ではよく指摘される問題であり、③はRadiation Induced Current (放射線誘導電流) によるもので、いずれも見かけの圧力値を低くする異常である。①は見かけの圧力値を高くする異常であるが、異常発生メカニズムがわからなかったため、SPRING-8の加速器診断II (BL38B2) において真空計への放射光 (X線) 照射実験を行った。

なお、蓄積リングの真空計は、①と③の対策に鉛遮蔽を行い、②に対しては永久磁石やU字型のパイプの挿入で電子流入を防ぐ対策を行った。その結果、図9の1000Ahr以降に見られるように、AB3 (▲)、CR1 (▼) の値がSC1 (●) と同等のレベルにまで減少した。蓄積リング全周への対策は2004年に終了している [2]。

照射実験は、加速器診断II ビームラインの末端に図10に示すように真空容器に真空計を入れて設置し、放射光 (X線) を照射した。電離真空計は、エミッション電流を流さなければコレクタに電流は流れず、真空容器の圧力に関係なく0Paの圧力を示す。実験では、エミッション電流を流さずに真空計に放射光を照射した。この状態で計測されたコレクタ電流値は0A以外であればそれは圧力測定異常 (誤差) である。真空容器の圧力を大気圧から高真空領域まで変化させ、圧力測定異常 (誤差) としてのコレクタ電流を測定した。

図11に結果を示す。横軸は真空計周囲の圧力、縦軸はコレクタ電流である。コレクタを含んだ真空計半分は放射光を照射した場合を▼で示す。真空計を水平方向に動かし、コレクタを水平コリメータの影に隠して遮蔽した場合を▲で示す。コレクタに放射光が照射されている▼は、 10^{-1} Pa以下の圧力では、コレクタ電流はほぼ一定値 (約 7×10^{-10} A) を示している。これは、コレクタに放射光が照射され、光電効果とコンプトン散乱により電子が放出され、イオン電流が流れているように見えるためと考える。そのため真空容器の圧力に対する依存性がない。一方、放射光がコレクタに照射されないように遮蔽した場合の▲は、圧力1Pa以下でも圧力とともに

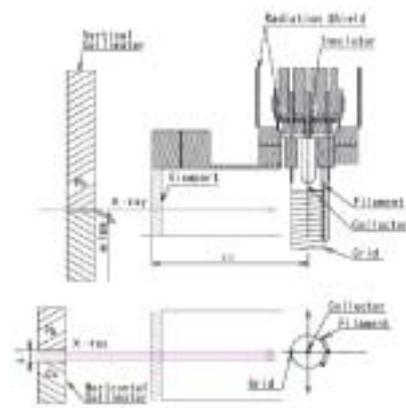


図10 真空計照射実験装置。真空容器の中に入れられた真空計に図面の左側から来た放射光 (X線) が照射する。真空容器は精密ステージに取り付けられているため、真空計に対する放射光照射位置を変えることができる。実験では下図に示すコレクタを水平コリメータの陰から出し入れすることにより放射光の照射/非照射の区別を行った。

コレクタ電流は減少している。コレクタに放射光が照射されないため、コレクタでの光電効果やコンプトン散乱は発生せず、放射光が残留ガスを電離することによって発生するイオンがコレクタに入りコレクタ電流として測定されていると考える。そのため、真空容器の圧力に対する依存性がある。コレクタに放射光が照射する▼の場合でも圧力が1Pa以上では、残留ガスの電離による影響が光電効果やコンプトン散乱よりも支配的となり、真空容器の圧力に対する依存性が見えると考える。比較のために、実験に使用した真空計の通常時の測定圧力とコレクタ電流の相関を破線で示す。コレクタ電流が 7×10^{-10} Aでは、圧力は 9.2×10^{-7} Paに相当する。

電離真空計による実際の圧力測定は、通常 10^{-5} Pa以下の圧力領域で行われ、コレクタへの散乱X線の照射による影響は光電効果とコンプトン散乱によるコレクタ電流の誘起が支配的であり、残留ガスの電離による影響はほとんど無視できる。一方、図11の大気圧領域では、放射光により大気が電離

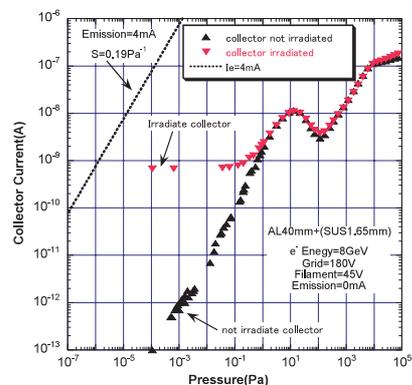


図11 実験結果 (誤差電流と圧力の相関)。▼がコレクタに放射光が照射した場合、▲はコレクタには放射光は照射していない。真空計にエミッション電流を流していないため、コレクタ電流は本来0Aであり、測定される値は測定異常 (誤差) である。

されたイオンがコレクタに飛び込むことによる大きなコレクタ電流が観測されている。実際の真空計の使用圧力は 10^{-5} Pa以下の真空であるが、真空計とコネクタの間に大気があるため、この空間にX線が照射すると、大気の電離により大きなコレクタ電流が流れる。放射線対策として真空計を遮蔽した際、コネクタを遮蔽しなければ効果が小さいことは経験的にわかっていたが、今回の実験により、その理由が解明された。

まとめると、真空計に放射線が照射すると、コレクタからの光電効果とコンプトン散乱による電子放出による圧力測定異常が発生し、また真空計とコネクタ間の大気に放射線が照射すると大気の電離による圧力測定異常が発生することがわかった。

(大石)

3-7 蓄積リングBPM新規信号処理回路への更新

蓄積リングビーム位置モニタ (BPM: Beam Position Monitor) のCOD (Closed Orbit Distortion) 測定用の新規信号処理回路の開発を行い、2005年までに仕様を確定した。2005年後半から開発の結果を反映した実機の製作を開始し、2006年夏期停止期間までに製作・検査を終了した。

製作数は24組で、これで蓄積リング全周をカバーすることができる。2006年の夏期停止期間中に回路の設置、信号ケーブルの新規回路への接続替え、その他必要な機器の設置、ケーブル接続などの更新作業を行い、夏期停止期間終了後の運転期間からこの新規回路でのCOD測定を蓄積リングの運転に供している。このCOD測定回路の更新により測定分解能は約3倍向上し、測定値を基に行っている周期的軌道補正の周期は半減した。

信号処理回路はBPMのピックアップ電極信号中のRF加速周波数 (508.58MHz) の成分を選択して各電極のRF周波数成分の振幅を測定し、1個のBPMを構成する4電極の信号振幅の比から水平および鉛直方向のビーム位置情報を得る構成となっている。

図12に新規信号処理回路1組分の構成を記す。1組で12個の

BPM (48個の電極) を受け持つ。1組に4系統の回路が内蔵されており並行処理ができる構成とした。1系統あたり3箇所のBPM (12電極) をスイッチで切り替えて処理する。

電極からの信号は最初にフィルターとスイッチの入ったフィルター・スイッチ・モジュール (filter switch module) に入力される。信号は以下順次 RF増幅器 (RF amplifier)、ミキサー (mixer)、IF増幅器 (IF amplifier) の各モジュールを通り、ADCボード (ADC board) 上のADCでデジタル信号に変換され、VMEモジュールとして構成されているDSPボード (DSP board) 上のDSPで位置情報に変換される。ADCボードまでは蓄積リングにそって24箇所に分散設置された19インチラック内に収められているが、DSPボードは蓄積リングの4箇所に配置されたVMEシャーシ内に6枚ずつおさめられており、ADCボードとDSPボードの間は光ケーブルで結ばれている。

フィルター・スイッチ・モジュール と RF増幅器モジュールでRF周波数成分を選択・増幅した後ミキサー・モジュールで中間周波数 (IF: Intermediate Frequency, 250 kHz) に変換しIF増幅器モジュールでADCの入力レベルに適應するようにゲインを調節して増幅し、中間周波数の一周期 (4 μ s) あたり8点 (2 MSPS) のデータをADCでサンプルしてデジタル的に振幅復調する。

1回の測定における1電極当たりのサンプル長は2048点で約1ms の積分に相当するデータ取得を行っている。複数回の測定結果の平均を用いることにより等価的に積分時間を増加させることが可能で、これにより位置測定のS/Nを向上することが出来る。

蓄積リング全周のBPMの信号を処理する回路24組の回路の4系統の信号経路の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。この時間は1回の測定あたりDSP上の処理時間で約15msである。平均化を行う場合はこの時間の平均回数倍の測定時間を要する。

2006年夏期停止期間終了後の運転再開後、蓄積ビームを用いて信号レベルの確認、回路ゲインの設定、平均化回数の設

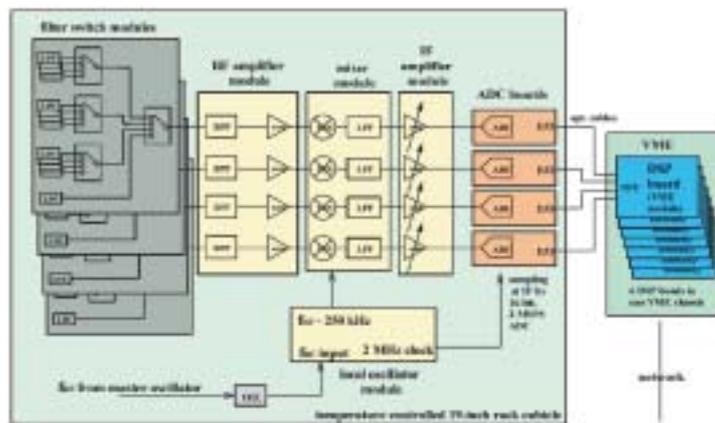


図12 蓄積リングBPMのCOD測定用の新規信号処理回路1組の構成

定など新規回路による測定条件の最適化のための調整を行った。その結果、平均化回数としては得られる測定分解能と測定時間および測定時間中の軌道変動の影響などとのトレードオフから100回程度が最適であると判断し、以降は平均化回数を100回としてその他の調整を行った。

平均回数100回における位置測定分解能は回路の寄与分として $0.1\mu\text{m}$ 程度であるとの評価結果を得た(図13)。同様の評価を更新前の回路についても行ったところ、 $0.3\mu\text{m}$ 程度との評価結果を得たので分解能は約3倍向上したことになる。

100回平均の場合の測定時間はDSP上で15msの百倍の1.5秒とDSPの処理後、制御ネットワーク経由でのデータ転送、データベースへの記録等のオーバーヘッド分を加え全体で3~4秒程度となっている。これに対し回路更新前は合計で20秒以上の時間を要しており、軌道補正用電磁石の設定時間を含めた軌道補正周期も30秒程度となっていた。更新後は補正周期は15秒以下となって半減している。

処理回路のその他の特性としてビーム位置測定値のゲイン設定値依存性、蓄積ビーム電流値依存性、フィリングパタン依存性等についても評価した。これらの特性測定においては、測定条件の変更の間の軌道変動の影響を含んだ測定再現性(数~ $10\mu\text{m}$)との比較で評価した。

ゲイン設定値依存性は20dB程度のゲイン変更に対しビーム位置測定値換算で数 μm 以下、蓄積ビーム電流値依存性は10mAから100mAまでの蓄積電流値において数 μm 以下という結果であった。これらの値は軌道変動の影響を含んだ測定条件再現性の範囲内で一致しており、回路特性としてはゲイン設定値依存性、蓄積ビーム電流値依存性の影響は無視しう

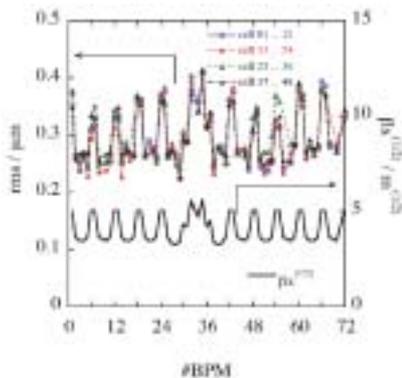


図13 新規信号回路でのビーム位置測定値再現性。約4秒ごとにCOD測定を繰り返し、連続する2回の測定値の差のrms (root mean square)をBPMについて得た。左側の縦軸はこのような得た各BPMのrms。横軸はBPMの通し番号であるが、蓄積リングが4回対称を持つため、全周288個を72個ずつ4グループに分け、72個ずつ平行移動して重ねてある。右縦軸は各BPMの場所でのベータ関数の平方根の計算値である。rms値にはベータ関数の平方根に比例するパターンが認められる。このグラフのrms値はベータ関数の平方根に比例する軌道変動の寄与と回路の寄与によるものからなると仮定して、 $0.1\mu\text{m}$ 程度が回路の寄与分であると評価した。

る程度に小さいと判断できる。

なお、フィリングパタン依存性については、最大で $100\mu\text{m}$ 程度の依存性が観測された。原因は、入力信号の帯域制限が不十分で、信号振幅が初段のフィルター・スイッチ・モジュールの非線形応答領域にかかってしまったためであることがわかった。

対策は、検波周波数近傍のみの信号を通過させる帯域通過フィルタ (BPF: Band Pass Filter) をフィルター・スイッチ・モジュールの上流に追加し、入力信号の振幅は減少させつつ検波周波数における信号の減衰を最小限にし、入力信号振幅に対して回路が全体として線形に応答する条件下で使用できるようにすることである。

一部のBPMに対して帯域幅20MHz程度のBPFを付加して試験したところ、この程度の帯域幅のBPFを追加すればフィリングパタン依存性は測定再現性以内(約 $10\mu\text{m}$)であることを確認した。

これらの結果を元にBPFの全数(1152個)の作成、実装を準備している。このBPF追加の対策後はフィリングパタン依存性も測定再現性の範囲で無視できる程度となることが期待できる。

(佐々木)

3-8 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位相を高精度で制御する必要がある。その実現のために必要な要素技術についてこれまで報告したが、ここでは超伝導空洞の共振周波数の安定化と移相器の研究開発の成果を報告する。

(1) 超伝導空洞の周波数調整機構(チューナ)の設計

超伝導クラブ空洞はKEKで開発され、その共振周波数は同軸型チューナによって調整されている。しかし、この方式はSPRing-8のパルスX線生成には適さないため、新たに超伝導空洞を外部から変形させる方式を検討し、チューナの基本設計を行った。

(2) クライオスタットの基本構造設計

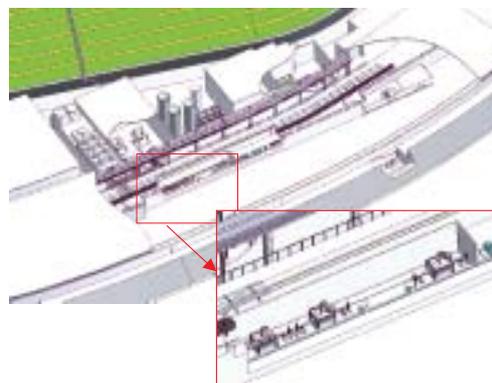


図14 フェムト秒パルスX線生成システムの配置図

クラブ空洞に外部から振動が加わると共振周波数が変動し、その結果、位相変動となって現れる。これを防止するために外部の振動が空洞に伝わりにくく、内部で振動が発生しにくいクライオスタットの構造を考える必要がある。そのため、外部から空洞への振動伝達関数の測定を行い、免振機構設計のための基礎データを集めた。また、クライオスタット内に流れる液体窒素の振動を測定し、内部で発生する振動のメカニズムを解明した。これらをクライオスタットの基本構造に反映させた。

(3) 高速大電力移相器の改良

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全反射時においても $\pm 1\text{deg}$ の設計性能が確認された。しかし、位相を変化させる磁性体と磁場透過窓の取付方法に問題が見つかったため改良を行った。

(4) 移相器用電源の開発

上記の移相器はそれを駆動する電源から見ると誘導性の負荷となり、駆動周波数が10kHzになると通常の電源では駆動できない。そのため階調制御方式の電源の開発を行った。シミュレーションの結果、目標性能が達成可能であることがわかったので実機を製作している。

(5) システムの基本配置図の作成

フェムト秒パルスX線生成システムは収納部に設置される超伝導空洞の他にも、ヘリウム冷凍機、クライストロン、導波管、液体ヘリウムトランスファライン、光を利用する実験装置などの付帯設備が必要になる。これらを実際にSPring-8の建屋と敷地内に設置可能かどうかを、実態配置図を作成して確認した。(図14)

(中里)

3-9 SCWの磁場測定

SPring-8蓄積リングへの導入を検討している超伝導ウイグラー(SCW)の磁場を三次元的に測定するための磁場測定

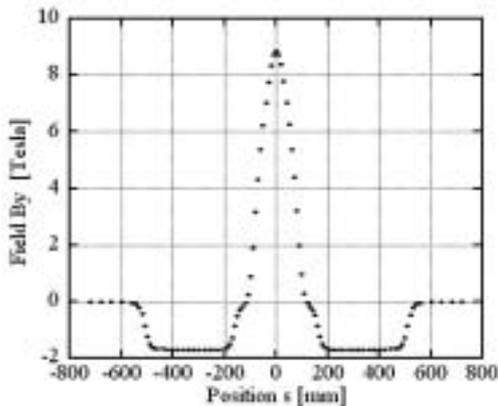


図15 SCWのメインポールの中心磁場を9Teslaに設定した場合の中心軸上 ($x=y=0$) での B_y のs軸方向分布。中心付近の $s=-100\text{mm}\sim+100\text{mm}$ がメインポールで、 $s=-500\text{mm}\sim-150\text{mm}$ 、及び $s=+150\text{mm}\sim+500\text{mm}$ がサイドポールである。誤差棒は10回の測定の標準誤差を示す。

装置の検討を行った。SCWは中心のメインポールと両脇のサイドポールの3対の磁極により構成されている。メインポールにて発生させる最大10Teslaの磁場で最大MeV領域の放射光を発生させ、天体核物理学の研究などに利用する予定である。両脇のサイドポールはメインポールと逆極性の磁場を発生させて、メインポールでのビームへの影響を打ち消す(図15参照)。発生させる磁場が偏向電磁石に比べて一桁以上強いため、 10^{-6} 程度の磁場の安定度が要求され、磁場測定のも同等の精度が要求される。

SCWの磁場のビームへの影響を評価するためには、磁場の主成分である垂直方向磁場 B_y だけでなく、これと直交する B_x (水平方向)、 B_s (長手方向)成分についても上記と同程度の磁場精度で測定する必要がある。また、2極成分だけでなく、4極成分以上の多極成分を求めるために三次元分布を測定する必要がある。ここでは、 B_y 、 B_x 、及び B_s の各成分についてx方向 $\pm 20\text{mm}$ 、y方向 $\pm 5\text{mm}$ 、s方向 $\pm 720\text{mm}$ の範囲でのメッシュ状に磁場測定を行うこととした。しかしながら、SCWのチェンバは開口が狭く(65mmx20mm)、且つ長手方向に長い($\sim 1.5\text{m}$)ため、チェンバの中央部付近には容易にアクセスできない。そこで、チェンバ両端にてテンションをかけたタイミングベルトのうえに三次元ホールプローブを固定し、ベルトをステッピングモータで駆動させてプローブをs軸方向に移動させた。水平、垂直方向については、手動のx-yステージでベルトごと移動させた。

メインポールの中心磁場を9Teslaに設定した場合の結果について以下に示す。磁場の主成分である B_y について、中心軸上 ($x=y=0$) でのs軸方向分布の測定結果を図11に、また、メインポール中央部 ($y=s=0$) でのx軸方向分布の測定結果を図16に示す。図15からs軸方向については設計値と大きく矛盾しなかった。x軸方向分布について多極成分を評価するため、6次関数でフィッティングを行った(図16中実線)。この結果、多極成分は無視できるほど小さくなく、かつ左右非

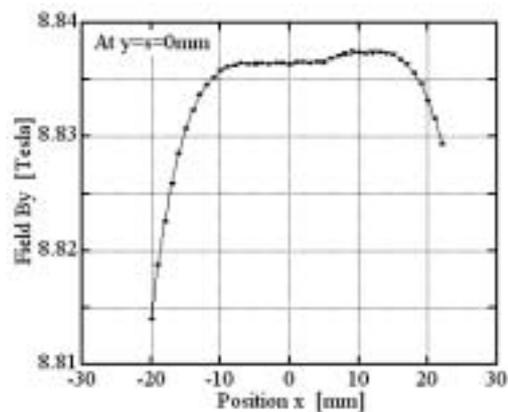


図16 SCWのメインポールの中心磁場を9Teslaに設定した場合のメインポール中央部 ($y=s=0$) での B_y のx軸方向分布。誤差棒は10回の測定の標準誤差を示す。実線は6次関数によるフィッティングの結果を示す。

対称であることがわかった。このほか、y軸方向分布についても非対称性が見られた。これらの測定値はビームへの影響評価と補正電磁石の設計・検討に用いられる。また、磁場を一旦0として再度励磁した場合でも測定値のばらつきによる誤差の範囲内で再現することがわかった。同様な測定を、0～9Teslaまで1Teslaステップで行った。ただし、現状の磁場測定装置では、ベルトの厚みなどの問題でy方向に関して上記範囲を実現していない。今後、x-yステージの自動化も含めて測定装置の改良を行う予定である。

(深見)

参考文献

- [1] F. Naito et al., "The Input Coupler for the KEKB ARES Cavity", Proc. APAC98, p.776, 1998.
- [2] 大石真也、依田哲彦、谷内友希子、小路正純、米原博人、大熊春夫、真空、49 (2006) 302.

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) データベース用計算機の改善

加速器運転制御用のメインのデータベースサーバーの搭載メモリを、8GBから16GBへ増強した。またOSパラメーターについて、実運用に即した最適化チューニングを行い、搭載したメモリが有効に利用されるようにした。これらによって、従来、一時的なメモリ量不足に起因するメモリスワップで、データベースの応答時間が悪化していた現象を改善した。また線型加速器BPM用に高性能なx86 Linuxデータベースサーバーを投入し、同期型データ収集を可能とした。

(2) ファイルサーバーの整備

加速器運転・制御用のプログラムを共有するファイルサーバーについて、従来のUnixサーバー計算機上でファイル共有サーバープロセス(NFS)を実行する方法から、ファイルサービスに特化したNAS(Network Attached Storage)専用機を用いる方法に変更した。これにより多くのファイルI/O要求に対して、常に安定して高速な応答を行うことが可能になった。

このシステムは、従来のUnixサーバー計算機による方法と同様に冗長クラスター方式とし、二重のコントローラー(サーバー計算機本体に相当)の一方の障害、または複数ディスクの同時障害に対しても運用を継続できるようにした。Unix計算機によるクラスターでは運用継続が可能な部分障害時に性能低下を起こしていたが、今回は部分障害時に運用上の性能低下がほとんど生じない方式を選択の上で構成した。

また、システム運用を止めずに設定変更が可能な範囲が大

幅に拡大した。たとえば特殊なアクセス設定を必要とするビームラインワークステーションの追加は、加速器停止中にシステムを止めて行う必要があったが、今回より運転中の追加が可能となった。

引き続き加速器運転・制御プログラム開発用の、プログラムソースを共有するためのファイルサーバーもNAS専用機に切り替えた。開発用ファイルサーバーにおいては特に、ファイルの誤消去・上書きを復元することの出来るsnapshot機能の追加がプログラム開発効率の向上に寄与している。

(3) プログラム開発用端末の整備

MADCOCA用GUIプログラムの開発環境用のX11方式(X-Window)のグラフィック端末を、計算機統合化の一環として「サーバー+シンクライアント」方式の一つ、SunRayシンクライアントに置き換えた。

シンクライアントとは、キーボード・マウス・ディスプレイの入出力を、ネットワークを介してサーバーとやりとりする一種のターミナル延長器である。シンクライアント端末側にはCPU、冷却ファン、メモリ、ディスクなどが搭載されていない。これにより、各所に分散して設置されている端末のメンテナンスが基本的に不要となり、維持管理のための作業はほとんどサーバー上で行えるようになった。

この反面、端末の機能も全てサーバーのCPUに集中することになるので、サーバー計算機の処理能力と冗長性は十分に高いものとした。また、我々の開発環境は元々、表示と操作に特化した端末、プログラムの編集・コンパイルに特化した開発サーバー、プログラムソースを保存するファイルサーバーに機能を分散していたため、サーバー計算機の処理能力向上と合わせて統合化をスムーズに行うことができた。

また、シンクライアント専用サーバーは電源、冷却の多重化などで単体での信頼性を確保したほか、2台1組の冗長フェールオーバー構成とすることによって、十分な耐障害性、運用継続性を確保している。

4-2 機器制御系

(1) 仮想化技術の機器制御系への応用

MADCOCA(Message And Database Oriented Control Architecture)フレームワークの中で機器制御部分を担当するEquipment Manager(EM)は、近年、並列処理への要求が高まってきている。EMは、Remote Procedure Call(RPC)のサーバープロセスとなっているため、マルチスレッド化するかRPCプログラム番号を変更するかしない限り、並列処理動作ができない。デバイスドライバAPI関数を含めEMをマルチスレッド化するのは労力がかかるため、マルチスレッド化によって直ちに並列動作性を提供するのには困難である。また、RPCのプログラム番号を変える場合には、プログラム番号の管理の問題が生じてしまう。そこで、我々はSolaris 10より実装されている「Solaris Containers」という仮想技術に注目した。

Solaris ContainersはOSレベルで仮想環境（ゾーン）を提供するため、通常のマルチユーザ環境で動作するデバイスドライバを用いて、異なるゾーンでもVMEボードなどの実デバイスを共有できる。そして、各ゾーン上で同一プログラム番号のEMを動作させることができるため、1台のVME上で複数のEMを動作させることが可能になる。スレッド化することなく、また異なるプログラム番号を用いることなく、極めて容易にEMの並列動作が可能となる。EMの並列動作を実現する一つの有効なアプローチであると言える。

我々は実際にこのアプローチを用い、別々の機器グループに属する2台のPC（ホスト名mondiagdctとvacdiag6）を1台にまとめることに成功した。まとめた1台のPCの上で2つの仮想ホスト（mondiagdct、vacdiag6）を用意し、各々の仮想ホスト上でEMを動作させることで、2台の別々のPCがあるのと等価な実行環境を提供できた。このアプローチは、このように別々の計算機の統合に使えるだけでなく、1台の計算機を論理的な計算機に分割するのにも使うことができる。例えば、1台のVME計算機が複数の機器グループのデバイスを制御している場合、各々の機器グループ用の仮想ホストを用意しEMを動作させることで、機器グループ間で1つのEMを取り合うことなく制御を行うことが可能となる。

(2) 光伝送ボード 新通信ロジック開発

線型加速器制御系を中心に、加速器制御系で広く使用されている光伝送ボードの新しい通信プロトコルの開発を行った。従来のオンデマンド型の複雑なプロトコルから、50マイクロ秒周期のサイクリック転送型のシンプルなプロトコルに変更することで、障害発生時の解析を容易にし、より高い信頼性を実現することを目的としている。また、転送周期に合わせてスレーブボード側の変化を割り込み情報として送信することで、VMEホストCPUへの割り込みを実現している。そして、マスターボードの全光リンクポートに対して一斉にデータの送信を行える機能を追加した。新しい通信プロトコルの動作は良好で、デバイスドライバの改造後の来年度夏期停止期間中に、全ての光伝送ボードの通信プロトコルを入れ替える予定である。



図1 VMEbus対応ADCボード

(3) 汎用アナログ入力ボード開発

シンクロトロンおよび蓄積リング制御系では、米国Acromag社製のアナログ入力ボードAVME9325を多数使用している。このボードは既に生産中止になっているが、外部ノイズ等の過電圧入力で頻繁に故障を起し、既に予備品もなくなりつつある。ビームライン制御系で使用している米国GE Fanuc社製のアナログ入力ボードVMIVME3122も高い頻度で故障するというので、既存の信号ケーブル等がそのまま使えるよう、両ボードの互換ボードの開発を行った。ADCの分解能は16ビットで、実測で13ビット程度の精度が出ていることを確認している。また64Kサンプルのデータバッファを持ち、スループットは複数チャンネルの場合は最大100Kサンプル/秒、単一チャンネルの場合は最大200Kサンプル/秒である。既にデバイスドライバの開発も終えており、来年度から順次旧ボードとの置き換えを進める予定である。

(4) 加速器安全インターロックシステム調査

従来、加速器安全インターロックシステムは、安全管理室が維持管理を行っていた。「加速器安全インターロックの設計と製作を安全管理室が行っているのは、安全管理室は第三者的な立場であるべき、という観点からするとおかしいのではないか？」という安全性検討委員会での指摘に従い、2007年度を以て、加速器部門で加速器安全インターロックシステムの維持管理を行うこととなった。加速器安全インターロックシステムは、トップアップ運転の導入などの度重なる改造の結果として、現状を正確に反映したドキュメントが残っていないことがわかってきた。そこで今年度は引き続きに必要なシステムの現状調査とドキュメント製作を行った。安全管理室担当者の協力の下、ドキュメントの製作はほぼ終了し、引き継ぎを行うのに必要な資料の核ができた。

また、本来独立であるべきL3BTとSCSS試験加速器の両安全インターロックシステムが、PLCネットワークケーブルで接続されていることがわかったため、(ロジック的には両システムは全く独立であったが)この切り離しを行った。

4-3 データベース

(1) データベース統計

2006年4月から2007年3月末までに、新たに682の信号を追加し、これらのデータ収集と蓄積を始めた。各グループ毎の内訳は、

sr_mag	135
sr_vac	24
sr_mon	18
linac	86
bl_fe	14
bl_plc	68
sr_vactmp	42
sr_monbl	8

bl_cntl	73
synchro	22
litmp	40
scss152	

となっている。

また、旧来のデータもふくめ1年間に148GBのデータをデータベースに蓄積した。

(2) オープンデータベースの研究

SPring-8がリレーショナルデータベースを使用して制御システムを開発を開始した1994年当時、実用になるリレーショナルデータベースは高価な商用システムに限られていた。このため、SPring-8の制御システムは商用システムの中からSybase社の製品を採用し、システムはそれを基に製作された。具体的には、MADCOCAを構成するデータベースアクセス用のプログラムライブラリーはSybase社のct-libraryを使用し開発された。

近年、リレーショナルデータベースが普及するにともなって、商用以外のオープンソースのリレーショナルデータベースシステムが実用段階に達してきた。代表的なオープンソースリレーショナルデータベースには、MySQLやPostgreSQLがある。MADCOCAの普及のためには高価な商用データベースの他に、オープンソースデータベースシステムが利用できるようにすることが望ましい。そこでMADCOCAのデータベースアクセス用関数のオープン化の研究を行った。

方針として、

1. ライブラリーを使用した関数のソースに変更を加えることのないようにライブラリーのインターフェースは変えない。ただし内部呼び出し専用の関数は改変する。
2. 多種のリレーショナルデータベースシステムを使用できること。ただし同時に多種のデータベースを使用することはない。これは現行のシステムがそうになっているため。

以上の条件を満たすため、オープンソースのgnome-dbをミドルウェアに使用して開発を行った。対象となるリレーショナルデータベースシステムはMySQLとPostgreSQLである。gnome-dbに他にもOracle やDB2なども使用できるインターフェースも存在する。

2006年度は内部よびだし用の共通関数と最も関数の数が多い、パラメーターデータベース用関数の製作を行った。改変の数は前者は63関数、後者は376関数におよんだ。テスト用環境として、SybaseのテーブルとデータがMySQL/PostgreSQLに移植され、動作テストを行った。オンライン、アーカイブ用関数は2007年度も引き続き行う予定である。

4-4 ネットワーク

(1) 基幹ネットワークノードおよびエッジスイッチのGigabit Ethernet化

昨年度、Gigabit Ethernet化として強化した基幹ネットワークコアスイッチの導入により、ファイルサーバーおよびデータベースサーバー間のトラフィックについて、十分な帯域確保が実現したが、制御系フロントエンド計算機の多くが100M Ethernet化したことによって、ネットワーク幹線がボトルネックになることが考えられる。また、これまでに使用していたFDDIをサポートする製品が市場からなくなりつつあるため、蓄積リング棟のネットワーク幹線を構築する4台のネットワークノードに、最大で144ポートのGigabit Ethernetを収容できるネットワークスイッチを導入した。これにより、蓄積リング棟のFDDIを全廃することができた。同時に、ビームライン系ネットワークおよび挿入光源系ネットワークの全ての支線、線形加速器系のネットワークをGigabit Ethernetに移行し、高速広帯域のネットワーク環境を構築した。

Gigabit Ethernet化に伴い、線形加速器におけるPLCとの制御インターフェースとしてFL-netを採用し、VLANを用いてネットワーク幹線を共有したPLC制御/データ収集用ネットワーク環境を構築した。

(2) ファイアウォールの高度化

これまで使用していたFirewall-1 NG FP2の保守停止に伴い、最新のシステム (NGX R60) への入替を行った。Firewall-1のベースOSも、Solaris8からSolaris9への移行を行ない、システム全体の安定化、高速化を図った。これにより、複雑化するネットワークセキュリティの脅威に対して強力なトラフィック管理を行い、セキュアかつ高速なネットワークシステムを実現している。

加速器部門
制御グループ

田中 良太郎、他

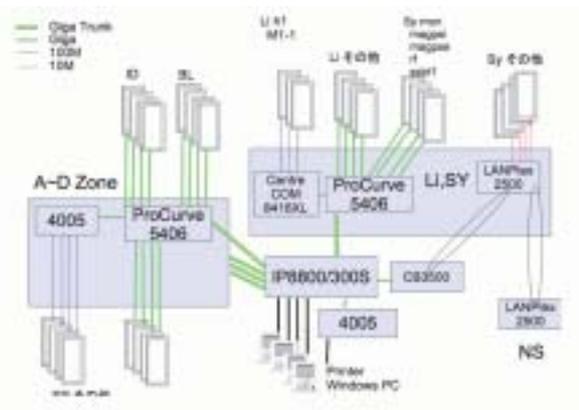


図2 制御系基幹ネットワーク構成図