

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)。図1の棒グラフの各々の上を示した数値(2004年は5759.2時間)は、立ち上げ調整時に先行して運転が開始される入射器も含めた加速器の年間総運転時間である。2004年のSPring-8蓄積リングの運転時間は、ここ数年の平均に比べて200時間以上増加の5736.7時間となった。更に、ユーザータイムは、ここ数年の平均を600時間以上上回る4590.9時間となった。これは、蓄積リング運転時間の80%に当たる。また、計画ユーザータイムに対しては98.1%という高い達成率となった。2004年の運転では、トップアップ運転の導入により入射時間が0となったことも特徴の一つである。蓄積電流値を0.1%の偏差で一定に保つ連続的なトップアップ入射は2004年5月からであるが、既に2003年秋から、トップアップ入射の試験を兼ねてユーザー利用実験を継続したままでの定時入射を行っている。一方、加速器およびビームラインの調整は、年間総運転時間の18.9%に当たる1085.9時間と、ユーザー利用が年の途中から始まった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1.8%に当たる82.4時間あり、51回のビームアポートあるいは計画外のビーム廃棄が発生している。回数は例年より多いが、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。放射光ビームラインでの機器異常動作などによるものが32回(挿入光源を含む)と際だって多かった。加速器の機器異常はRF空洞の反射などによるものが10回あったが、その他には目立ったものはなかった。最も長時間ユーザータイムが停止したのは、台風23号の接近により暴風警報が発令されたため運転を停止した28時間36分であった。ユーザータイムではないスタディ時間であったので、図1のDown Timeには含まれないが、同様に台風21号の接近による暴風警報発令による運転停止が18時間13分発生している。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30回発生した(2004年7月まで行われていたNewSUBARU蓄積リングへの入射のためのトップアップ入射中断を除く)。最も回数が多かったのはLinac Modulatorに係るものであった。これに限らず、トップアップ入射では、高周波装置、パルス動作機器などの連続安定動作をいかに確保していくかが重要である。

2004年では、多バンチモードの運転の割合はユーザータイムの36.6%(2003年は37.2%)、少数バンチモードでの運転の割合は43.8%(2003年は50.8%)、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19.6%(2003年は12%)であり、ハイブリッドモードが若干増加の傾向にあった。従来、多バンチモードのフィリングとしては、イオン補獲による不安定性を逃れるために全周を12等分した内の11箇所約160のバンチ群を配置していたが、Bunch-by-bunch feedbackの導入により不安定性の問題がないことが確認され、2004年の途中からは、12箇所全てにバンチ群を配置した運転を行っている。同様に、203バンチ均等配置のフィリングも不安定性を逃れるために全周の4箇所の一部を間引いていたが、完全な形で行えるようになった。2004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。上述した多バンチモード、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。最近では、孤立バンチの電流増加を望む声が出始め、これによるペローズ部の発熱、バンチの短ビーム寿命によるトップアップ入射回数

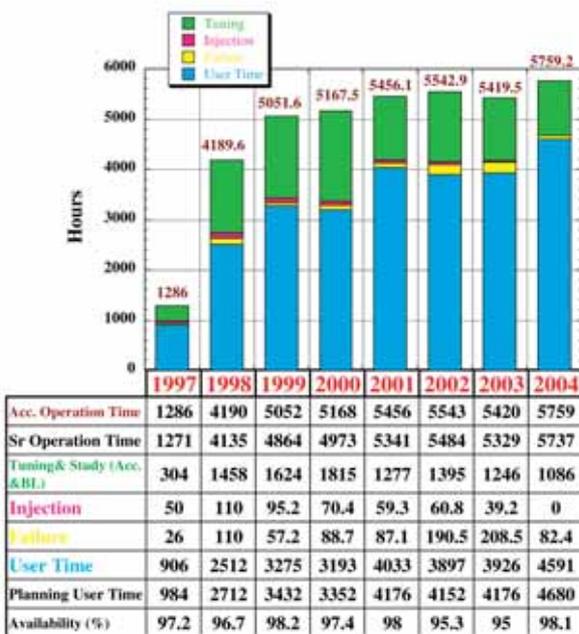


図1 1997年の供用開始以来の運転時間の推移

脚注：SPring-8年報は年度毎のまとめであるが、運転統計は従来通り1月～12月までで集計する。

Table I. Beam parameters of SPring-8 storage ring

	HHLV Optics	Low Emittance Optics
Tunes (ν_x / ν_y)	40.15 / 18.35	40.15 / 18.35
Current[mA]: single bunch	13	10
multi bunch	100 (120 ⁵¹)	100
Bunch length (FWHM)[psec]	32	34
Horizontal emittance[nm-rad]	6.3 ⁵² / 6.6 ⁵³	3.1 ⁵²
Vertical emittance[μ m-rad]	16.9 ⁵³	8.7 ⁵³ / 3.9 ⁵⁴
Coupling[%]	0.26 ⁵⁵	0.28 ⁵³ / 0.13 ⁵⁴
Beam size[μ m]: (σ_x / σ_y) ⁵⁵		
Long ID section	381 / 13.4	283 / 11.4
ID section	397 / 8.5	289 / 7.2
BM section	149 / 21.0	103 / 15.2
Beam Divergence[μ rad]: (σ_x / σ_y) ⁵⁵		
Long ID section	16.1 / 1.2	11.9 / 0.81
ID section	15.9 / 1.9	11.7 / 1.3
BM section	57.4 / 0.78	53.8 / 0.68
Operational Chromaticities:(ξ_x / ξ_y)	+7 / +6 (+2 / +2) ⁵⁶	+8/+8
Lifetime[hr]:100mA (multi bunch)	-150	-97
1mA (single bunch)	-24	-9
Dispersion distortion[mm]:horizontal (rms)	4	9.3
vertical (rms)	1.1 ⁵⁷	1.1 ⁵⁷
Orbit stability (tune harmonics)[μ m]:		
horizontal (rms)	-	1.3
vertical (rms)	-	0.35

⁵¹ Maximum stored beam current at machine study
 Measured by a pulse bump and scraper⁵², two dimensional interferometer⁵³,
 and two photon correlation⁵⁴
⁵⁵ Assuming that 0.26% coupling for "HHLV Optics" and 0.2% coupling for "Low Emittance Optics"
⁵⁶ With bunch-by-bunch feedback ⁵⁷With correction by 24 skew Q's

表1 蓄積リングの主要パラメーター

増加（運転許可条件からトップアップ入射で使用できる電荷量、入射時のロス積算などに制限がある）などの対策を考えていく必要がある。

2004年の運転時間、特にユーザータイムが例年より大きく増加した原因は、8月末から9月始めに相次いで上陸した台風16号、18号により、蓄積リング棟の屋根が多大な被害を受けたために、それ以後の運転計画を大幅に見直さざるを得なかったためである。8月31日に台風16号により屋根が損傷して実験ホールに雨水が流れ込んだのは、夏期運転停止期間の終了、加速器の立上げ調整を6日後に予定している時であった。運転開始を1週間延期して、ユーザータイム開始前に予定していた5日間の停止をなくすことで、ユーザータイムは予定通り9月23日（木）に開始することに決定して、屋根の応急処置を開始した。その直後の9月7日に再び、台風18号により異なる場所の屋根の破損が起こった。ユーザータイムは予定通り、9月23日に開始したが、屋根は応急処置のため、本格的な修理工事、更に今後は同様な被害を受けないための対策を、直接の被害を受けていない部分を含めて行わなくてはならない。このため、2005年1月～3月に予定されていたユーザー利用実験を2004年12月末までに消化して、1月～3月を破損区域の本格修理に当てることにした。そのために、停止期間をなくす、あるいは短縮し、スタディ期間を必要最小限にすることによりユーザータイムを確保する事となった。幸い、大きなトラブルもなく、年間4590.8時間のユーザータイムを達成する事が出来た。台風被害による連続運転の実施とは関係なく、長期連続運転について検討がされて来た。これは、長期連

続運転を行った方がむしろ加速器の安定度が増し、停止期間を集中して長く確保する事によるメンテナンス、アップグレード作業のやりやすさが増すとのお考え方に基づいたものである。

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ブティックスは、電子ビームによる溶解を受けにくいチェンバへの交換、低エミッタンスオブティックスでのトップアップ入射の検討などを経て、2005年9月から再び使用される予定である。表1に、HHLVオブティックスと低エミッタンスオブティックスによる蓄積リングの主要なパラメーターを示す。

（大熊）

1-2 トップアップ運転

最近の第三世代放射光源では、高輝度化の宿命であるビーム寿命の低下を救済する方策として、トップアップ運転の導入が標準化しつつある。トップアップ運転では、利用実験中も随時ビーム入射を行い蓄積電流値が最大に保持され、積分輝度あるいは平均輝度は大幅に改善されることになる。SPring-8でも2004年5月よりユーザータイムでのトップアップ運転が開始され、多バンチ運転では5分、セパラルバンチ運転では1分の間隔でビーム入射を行い蓄積電流値が一定に保たれるようになった。図2に1週間の蓄積電流値の記録例を示す。同じフィリングパターン（203バンチ均等配置）で、トップアップ運転（2004年）と定時入射運転（2003年）を比較したものである。このフィリングで

のビーム寿命は約20時間なので12時間毎の定時入射では、蓄積電流は半分近くにまで減少していたが、トップアップ運転中の蓄積電流値はトラブルによる中断を除いて0.1%以下の範囲で一定に保たれている。蓄積電流値が一定化すると放射光による熱負荷も一定になることからビームライン機器も安定化されることになり、トップアップ運転は利用実験の可用性向上にも貢献している。機器の安定化もさることながら、光源強度の安定化が利用実験の測定精度向上にも予想以上の効果があったことは特筆すべきである。

SPring-8の入射器はニュースバルにも電子ビームを供給しており、5月のトップアップ運転開始当初はニュースバルへの定時入射のためほぼ一日二回30分程度トップアップ運転の中断があった。電子ビーム輸送ルートを切り替える早い立ち上がり立ち下がり動作が可能な電磁石の導入など入射器の高度化や放射線安全上のインターロックの整備の結果、9月以降SPring-8とニュースバルの二つの蓄積リングのトップアップ運転が並立できるようになった。現状、入射器の切り替え時間を含めてSPring-8蓄積リングへの積み上げビーム入射に要する時間を除いて、ニュースバルは自由にビーム入射を行うことができるという形態で運用しており、SPring-8蓄積リングに関してはトラブルによる中断以外、定常的なトップアップ運転が継続している。SPring-8の特徴の一つにフィリングパターンが自由に選べるがあり、利用者の要望に応じて多彩なセベラルバンチモードで運転されている。セベラルバンチモードでは、実験上の制約からバンチ毎の電流値の偏差を10%以下に抑えることが求められている。SPring-8ではバンチ電流値を一定化するアルゴリズムでトップアップ運転を行い、この要求に添えている。このために、ポタンピックアップとオシロスコープを用いて高速で精度良くバンチ電流値を測定するシステムを開発し、現状2436個全てのバンチの電流値を30秒以内に数 μA 以下の高精度で計測することを実現している。図3にセベラルバンチモード（全周の2/21に連続

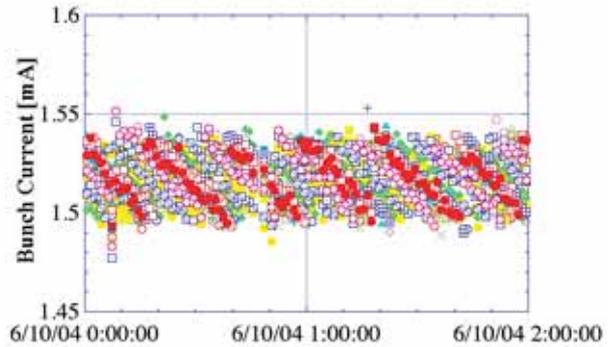


図3 セベラルバンチモード「2/21filling + 18bunches」における18個の孤立バンチの電流値変化。それぞれのシンボルは各測定でのバンチ電流値を表している

バンチ、残りの部分に均等に18の孤立バンチ)における18個の孤立バンチの電流値変化を示す。目標バンチ電流値1.5mAに対し約50 μA で安定化していることが分かる。

(高雄)

1-3 軌道安定化

トップアップ運転導入前の定時入射時には、入射後のユーザー実験再開前に、前回の定時入射以後に積み重なってきた軌道ドリフトを手動で補正する事を行っていた。トップアップ運転ではユーザー実験を継続したままで連続的に入射が行われるため、手動による補正は軌道の非連続的な変化を発生させ、実験に影響を与えるので実施できない。このため、軌道のドリフトを長期間に渡り抑制することが急務となった。ゆっくりしたドリフトの原因は、約30秒毎に働く自動軌道補正で使用する鉄心ヨークのない空芯型高精度ステアリングの台数が十分でないため、軌道補正の位相自由度が不足しているためである。これを解決する目的で、鉄心ヨークを有する約260台のステアリング電磁石のうち、水平、垂直各24台の電源制御システムを改造し、電流値設定精度を21ビット（電流設定分解で通常のステアリングの $\sim 1/30$ ）に向上させた。この改造により自動軌道補正に使用できる水平、垂直高精度ステアリングは、今までの2倍の各48台（セル当たり1台）に増加した。このシステムは2004年秋からユーザー運転に導入され、長期間の運転サイクルに渡ってビーム軌道を安定に維持することが可能になった。図4に入射が定期的に行われていた従来の運転での軌道ドリフトとシステム改造後のトップアップ運転での軌道ドリフトを比較して示す。高精度ステアリングの数を増加したことで軌道ドリフトが小さく抑えられていることが分かる。

トップアップ運転の導入で、蓄積電流が一定に維持されるようになり、熱変形等に伴う軌道変動要因が小さくなった。このため、今まで観測が難しかった小さな軌道の日変

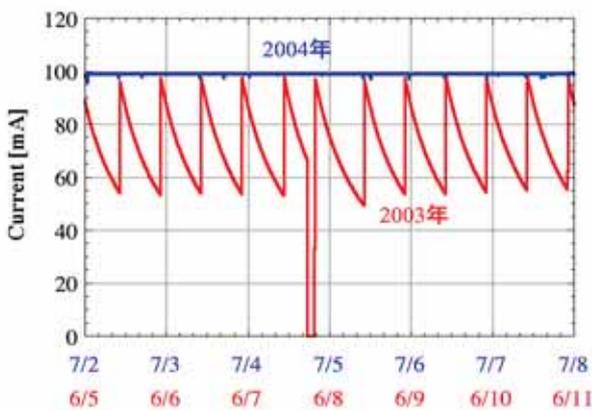


図2 トップアップ運転（2004年）と定時入射運転（2003年）における6日間の蓄積電流値の推移の比較

動、季節変動が明確に測定できるようになった。軌道変動を反映した高精度ステアリングの電流値と他の運転パラメータとの相関を調べたところ、図5に示すような6.6kVの施設受電ラインの変動とステアリング電流値の日変動に強い相関が確認された。受電変動によって建屋の温度分布が微妙に変化し、軌道変動を何らかのメカニズムで引き起こしているようである。詳細なメカニズムを解明し、要因を除去するため、蓄積リング収納部の内外の温度、風速、傾斜等を実時間で精度良く計測できるシステムを構築し、詳細なデータの解析を実施している。

挿入光源の光軸は、挿入光源の上下流に設置されたビーム位置モニタ (BPM) で計測し、制御することが望ましい。正確な光軸の制御には、機械的に安定なBPMが不可欠であるが、現状では、特にビームアポート前後で、10~

20 μ mの機械的ドリフトが発生している。これを改善するため、BPM部を挟んだ両側に軸直角方向に十分柔らかい (小さなバネ定数の) ペローズを設けたBPMチェンバを設置し、ビームテストを実施した。しかし、BPM位置のドリフトは抑制できなかった。ペローズのバネ定数が実際には設計通りになっていない可能性が考えられるため、軸直角方向のペローズ変位特性を評価するためにバネ定数測定を行った。結果として、ペローズのバネ定数は一定ではなく、ペローズ伸縮の大きな範囲ではほぼ設計値どおりになっているが、初期変位において設計評価より格段に強く、実効的にペローズ軸と直角方向へのバネ定数が小さくなっていないことが分かった。これを踏まえ、軸直角方向のバネ定数の要求値を満足するペローズ形状の設計検討を開始した。また、ペローズの力に負けない強固なBPMの固定も考える必要がある。これと並行し、今以上の光軸安定度を必要とするユーザーの要求に応えるべく、高精度BPMを用いた局所的な光軸補正を目的とした新たな補正アルゴリズムの開発もスタートさせた。

(田中/大熊)

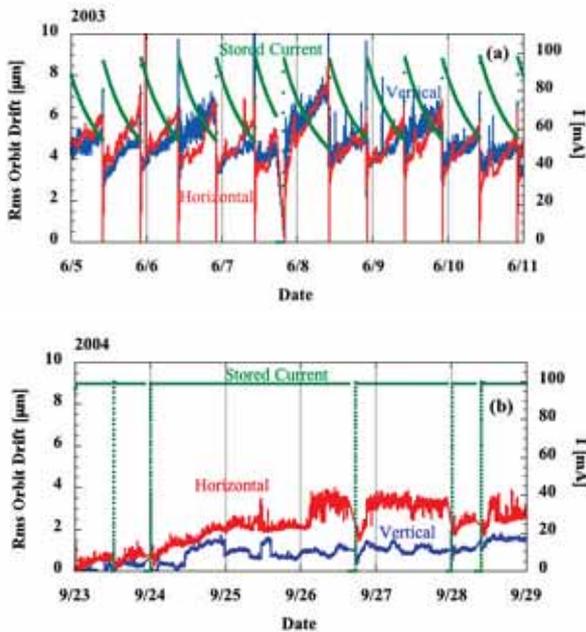


図4 従来の運転での軌道ドリフト (a) とトップアップ運転での軌道ドリフト (b)

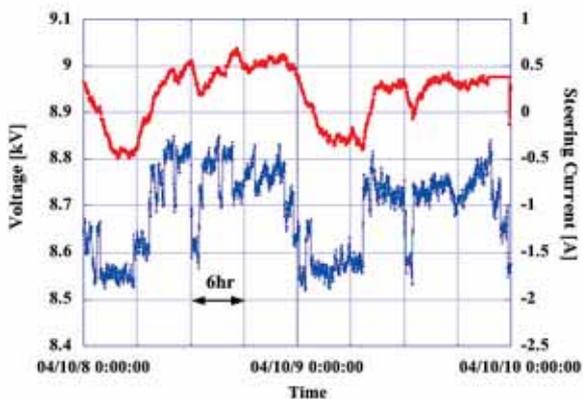


図5 6.6kVの施設受電ラインの変動と46セル水平高分解能ステアリング電流値の日変動の相関

1-4 蓄積リングの動力的精密解析に向けたコード開発

よりパンチ電流値の高い、ビーム寿命の短いフィリングパターンをトップアップ運転で実現していくためには、入射ビーム損失の低減、リングのモーメントムアクセプタンスの拡大が重要である。これに向けて2つの解析コードの開発を進めている。

(1) Frequency Map Analysis Code

蓄積リングの入射効率、真空封止型挿入光源のギャップに依存することが確認されている。また、リングのモーメントムアクセプタンスも同様の依存性を有する。どちらも、水平面内の電子の初期振動が垂直方向へ分配されることで、垂直方向の振動が増大し、最終的に挿入光源の垂直狭ギャップで電子が失われる事に関係している。入射時のビーム損失とエネルギー偏差を持つ電子の振動安定性は、水平、垂直、エネルギーの3つの振動が結合した複雑な現象である。このような複雑な現象の解析には、3次元での共鳴励起状態の評価が重要であり、従来のAction - Angleに基づく正準摂動計算ではなく、Action - Eigen frequencyに基づく数値的解析手法、Frequency Map Analysis (FMA) が有効である。このため、これまで開発してきた6次元位相空間粒子追跡・解析コードに、新たに高精度の周波数解析、グラム-シュミット直交化法を用いた多次元系での固有モードハンドリングからなるFMAパッケージを開発し、追加した。この粒子追跡・解析コードを用いれば、蓄積リング内での垂直振動励起メカニズムを詳細に解析することができ、今後その情報を基にリング性能の改善を行っていく。図6(a)には、得られたSPRing-8蓄積リング

の振動安定性の振幅依存性（青色が安定）を、図6(b)に Frequency Mapを示す。

(2) 3次元磁場に基づく挿入光源の非線形マップの抽出

もう一つの重要な課題は、蓄積リングに設置されている多種多様な挿入光源のモデル化である。SPRing-8蓄積リングには8の字アンジュレータ、偏光可変アンジュレータ、永久磁石と電磁石を組み合わせた挿入光源等があり、それらの複雑な3次元磁場は、従来用いられてきたLoyd-Smith型Hamiltonianでは記述できない。さらに、入射ビームへの影響評価では、大振幅での挿入光源磁場が重要になることから、Loyd-Smith型Hamiltonianを適用できない。そこで3次元磁場計算コードで計算された3次元磁場を直接用いて粒子追跡を行い、挿入光源磁場のビーム振動への影響を挿入光源の入り口から出口に渡る非線形写像として抽出する計算コードを開発した。このコードによる挿入光源モデルを6次元位相空間粒子追跡・解析コードやFMAと組み合わせることで、挿入光源の入射ビーム損失、並びにモーメントアクセプタンスへの影響の精密な評価とその対策が可能になる。現在、特に、永久磁石と電磁石を組み合わせた挿入光源 ID17 のビームへの影響の解析が進められている。

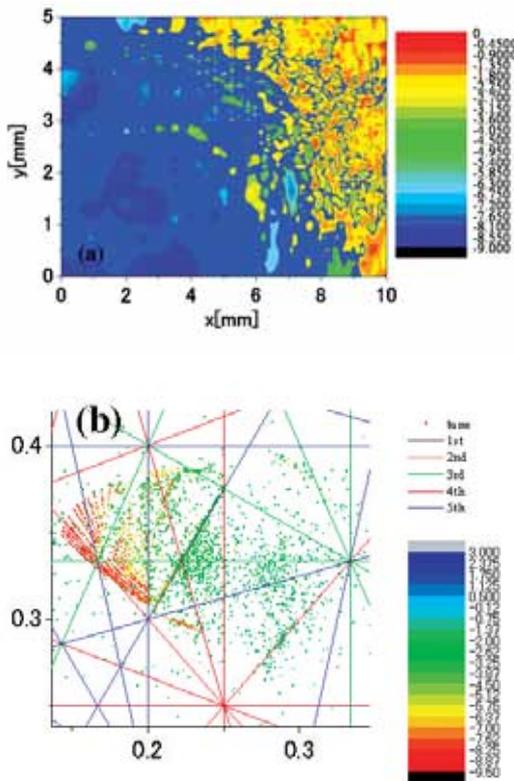


図6 FMA解析された誤差磁場がない場合でクロマチシティが大きい場合のSPRing-8蓄積リングの振動安定性の振幅依存性（青色が安定）(a)と同じ条件でのFrequency Map (b)

(田中)

1-5 加速器診断

(1) 加速器診断

加速器診断 は偏向電磁石を光源としており、可視光からX線までの広い波長範囲の放射光を利用する事が可能である。可視光やX線を用いた光源電子ビームの診断や、X線を用いた加速器構成機器の試験・開発等を行っている。また、遠赤外レーザー光を外部から蓄積リングに入射し、光源点付近で電子ビームと逆コンプトン散乱させることにより、10MeV領域のガンマ線を生成する試験を行っている。図7に加速器診断 の主要機器の配置を示す。

加速器診断 のX線ビームプロファイルモニター、単バンチ純度モニター等を用いて、2004年5月に開始されたトップアップ運転でのビーム性能を評価した。トップアップ入射がユーザー利用実験に影響を及ぼさないためには、入射バンチ軌道形成によって生じる蓄積ビームの振動を出来るだけ抑制する事が重要であり、そのために4台のバンチ電磁石の励磁パターンの制御、磁石設置の傾き、補正磁石の適用などを検討、実施してきた。ビーム振動の影響は、ミリ秒オーダーの積分時間で観測すると、ビームの実効サイズの増大として現れる。X線ビームプロファイルモニターを用いて、トップアップ入射後の実効ビームサイズの変動を時間分解能1msで測定した（図8）。縦軸は、入射の影響の無い時の蓄積ビームのサイズで規格化した値である。ユーザー利用実験の支障となる程の大きさではないが、ビーム入射直後に実効ビームサイズが増大し減衰してゆく様子が観測された。

単バンチ純度モニターを用いて、一週間の連続トップアップ運転でのバンチ純度の時間的変化を測定した結果の一例を図9に示す。縦軸のバンチ不純度は、主バンチの一つ後ろのRFバケットに対応する不純バンチ内の電子数と主バンチ内の電子数の比を表す。一週間の連続トップアップ運転でのバンチ不純度の増加分は、 1×10^{-9} 程度であった。この程度の増加であれば、直ちにユーザー実験に影響を与えるものではないと思われるが、改善の必要性は認識されており、それに対する入射器系の改良などが行われている。蓄積リング真空系のフォトンアブソーバーを、リングへの設置前に放射光を照射していわゆる“焼きだし”を行うことにより、リング設置後にビーム運転中の放射光照射によるガス放出を低減出来ると期待される。このための予備実験として、新しく開発された蓄積リング用フォトンアブソーバーに対して、設置前に加速器診断 を用いて試験的に白色X線を照射し、リング設置後の真空特性等を調べることを始めた。将来的には、加速器診断 の挿入光源からの放射光照射などにより、より効果が顕著になることが期待される。

遠赤外レーザー光と電子ビームの逆コンプトン散乱による10MeV領域のガンマ線生成試験は本年度も引き続き行われている。基幹チャンネルに導入後のレーザー光の拡が

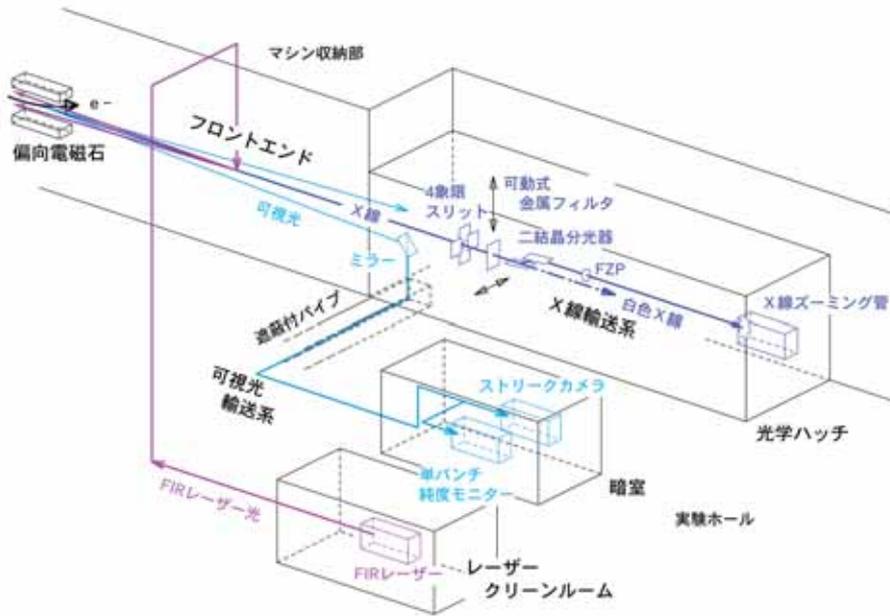


図7 加速器診断 の主要機器の配置

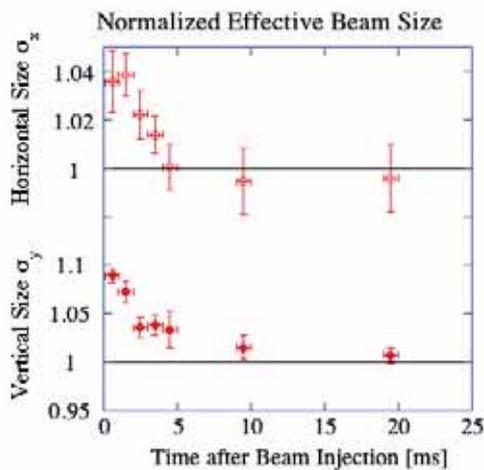


図8 トップアップ運転時に観測されたビーム入射直後の実効ビームサイズの変動

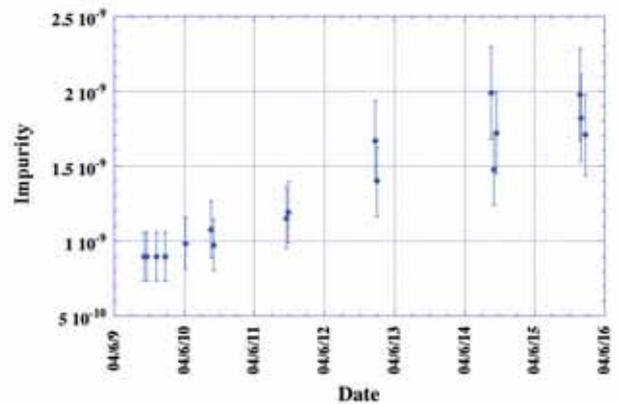


図9 1週間の連続トップアップ運転中のバンチ純度の時間変化

りと位置を測定するために、遠隔駆動が出来るXZステージに焦電センサーを取り付けたプロファイルモニターを製作し、基幹チャンネルの真空チェンバ中に設置した。今後、調整を続け2005年度は本格的なガンマ線生成試験を行う。

(2) 加速器診断

加速器診断 は直線部に挿入型光源装置を設置することの出来るもう一つのビーム診断設備である。設置した光源装置からの放射光を利用して光源電子ビームの診断や、蓄積リング等で使用する高耐熱機器・高耐放射線機器等の開発を行うための装置として整備を進めている。また、直線

部上下流に位置する偏向電磁石の端部磁場からのエッジ放射光を利用したビーム診断や、直線部に導入した遠赤外レーザー光と電子ビームとの逆コンプトン散乱により、現在、加速器診断 で進めている10MeV領域のガンマ線生成と比較してより強度の高い、核物理実験などに実用的なガンマ線生成を行うことなどが計画されている。

直線部に挿入光源を設置した概念図を図10に示す。2004年度は汎用型の挿入型光源装置を製作した。本年度の製作時に光源装置に取り付けられた磁石列は、高耐熱機器・高耐放射線機器等の開発に必要な高パワーの放射光を発生させるためのマルチポールウィグラー型磁石列であるが、目

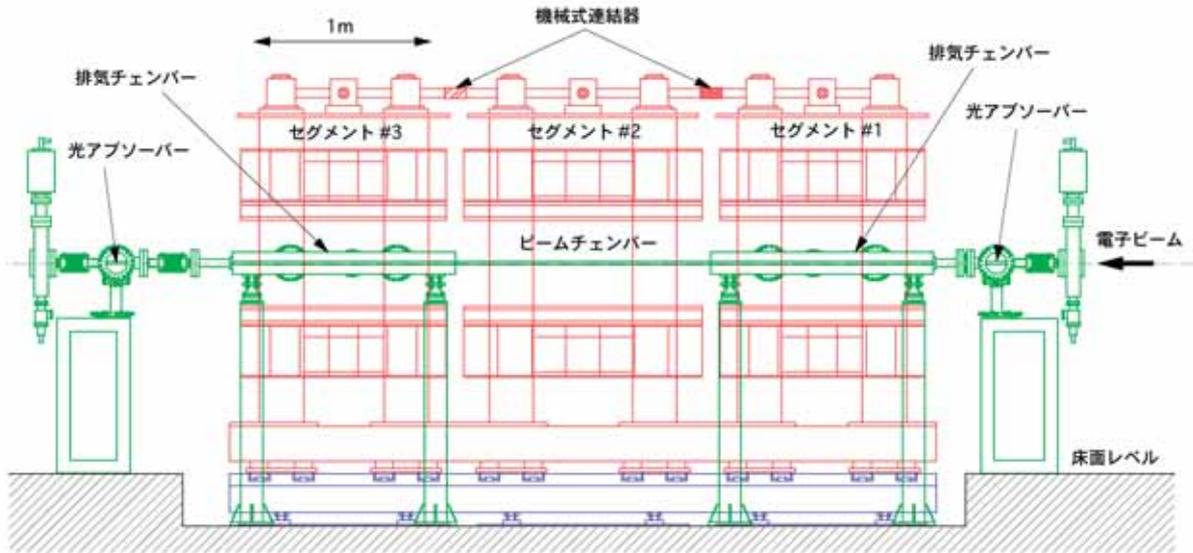


図10 加速器診断 の挿入光源を設置する蓄積リング直線部の概念図

的に応じて蓄積リング収納部内で比較的容易に他の磁石列に交換できる構造となっている。磁石列を取り付けるベースプレートのギャップ開閉駆動は3つのセグメントに分かれて行うことが出来、各々独立に、あるいは同期しての駆動が可能となっている。これらの工夫は、様々なエネルギー領域や放射特性を持った放射光を発生させ、多様なビーム診断を行うことを可能にするために施したものである。磁石列を交換する際には、光源本体を電子ビーム軸から回避させることが出来るように、光源本体をスライドレール付きの架台に取り付けた構造となっている。光源装置は2005年度の夏期運転停止期間に蓄積リング直線部に設置する予定であるが、これに先立ち2004年度夏期運転停止期間に、スライドレール付き架台を設置するピットを設けるために床面の穴開け工事を行った。また、挿入型光源装置の上下流に挿入光源用チェンバと共に同時期に設置する光アブソーバー（図10参照）等も製作した。

光学ハッチ内に設置する輸送チャンネル機器についても検討を進め、 10^{-8} Pa台の超高真空部と 10^{-4} Pa台の低真空部とを、Be窓などの真空隔壁なしに直接接続するために必要な差動排気システムを設計、製作した。その他の機器についても検討、設計を進めた。

(高野 / 大熊)

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

前述のように、2004年5月よりSPring-8蓄積リングのトップアップ運転が始まり、同年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を開始した。

シンクロトロンとNewSUBARUに入射されているビームの種類とその質は、表1の通りである。トップアップ運転のため、トップアップ入射専用の1nsビームを用意している。NewSUBARU入射時は、加速器パラメータの変更を最小限にするため、トップアップ入射用1nsビームをそのまま出射し、入射路途中のスリットでビーム電流を約1/3に削減している。

後述するように、ビームエネルギーおよびビーム入射軌道のフィードバック制御を導入しており、入射効率は長期的にも十分安定である。

2004年における総運転時間は、約5,760時間であった。大電力クライストロン変調器の2004年末までの累計運転時間は、ヒーターオン時間で約54,900時間、高圧オン時間で約46,300時間に達した。

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%

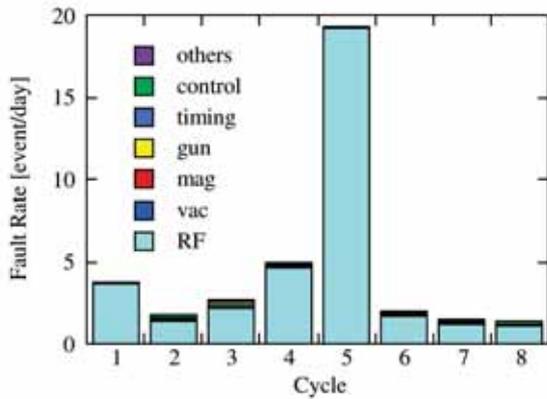


図1 インターロックフォールの原因別頻度

図1は、2004年中の運転サイクル毎のインターロックフォールト頻度であり、一日当たりのフォールト回数を原因別に示している。トップアップ運転は、第4サイクルに開始され、その後継続している。特に頻度の高い第5サイクルRFフォールトのほとんどは、変調器DC高圧電源の過電流であった。調査の結果、実際にはノイズによる誤動作やメタリレー故障の多いことが判明。対策を施した第6サイクル以降は、以前のフォールト頻度に落ち着いた。

2004年中に起こった大きな故障は、トップアップ入射用に設置したパターン励磁電磁石用真空チャンバの真空漏れである。真空チャンバの固定が不十分であったため、電磁石に励磁電流を流す度に、チャンバが電磁誘導により強い力を受けて動き、真空ペローズを損傷してしまったのである。

サイクロトロンについては、ビーム入射中断を最小限にすべきトップアップ運転に備えて、リザーバ電圧の高くなった5本を新品と交換した。

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出来ない。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2856 MHz RFとの完全同期化など、種々の安定化を1998年より続けており^[1]、安定なビーム供給に努めてきた。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、特に電子ビームの長期安定性とリニアックの信頼性向上をめざして、2004年度に行われた改良のうち主立ったものを紹介する。

(1) 温度安定化^[2,3]

SPring-8リニアックの空調は、冷房+除湿のみであり、空調循環気に外気を混合するため、冬期は循環気の温度は

必ず下がる。2002年に、RF系の繰り返し周波数を60ppsから10ppsに下げる節電を行い、リニアックの発熱量が大きく低下した。このため、冬期にクライストロンギャリ気温の維持が難しくなり、著しく下がるようになった。その結果、クライストロンのドライラインの位相変動が再び現れ、ビームエネルギーが変動するようになったのである。

そこで、まず以下の対策を行った。

- 1) 外気取り込み口を完全に閉鎖した。これにより冬期の気温低下、雨期の湿度上昇を緩和できる。
- 2) 90m導波管を断熱材で被い、内部に冷却水(27±1)を循環させた。

その後、厳冬期に熱交換器が凍結するのを防止するため、外気温が5以下になると、5の冷却水を強制的に熱交換器に注入していることが判明。これでは熱交換器を流れる循環気の温度は一気に低下し、ギャリ内の気温も大きく変動する。その様子が、図2左に示したドライラインの温度変化によく現れている。そこで、

- 3) 熱交換器内気温を測定して凍結防止制御を行うよう改良した。

その結果、図2右のように、外気温-7でもドライラインの温度は27に保たれていることが分かる。

(2) フィードバックによるビーム安定化

前述したドライラインの位相変動などもあり、リニアックの長期的な安定度はまだ十分とは言えず、NewSUBARUの入射効率には長期変動が見られた。そこで、設置を完了したBPM^[4]を利用して、以下のフィードバック自動制御を導入した^[3,5]。

- ・3カ所のビーム輸送路でビーム位置の安定化
- ・ECSのRF位相を調節しビームエネルギーの安定化

ビーム位置自動制御は、原則として2台のステアリング電磁石とその下流に2台のBPMを有するビーム輸送路で行った。このような輸送路では、BPMにおけるビーム位置だけでなく、ビームの傾きも制御が可能だからである。実際には以下の3カ所、すなわち、初段加速管下流、ECS用シケイン電磁石直後、およびNewSUBARUへの輸送路を選んだ。

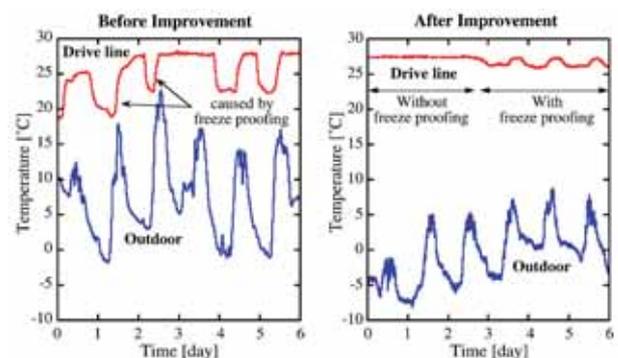


図2 改良前後のドライライン温度変化^[3]

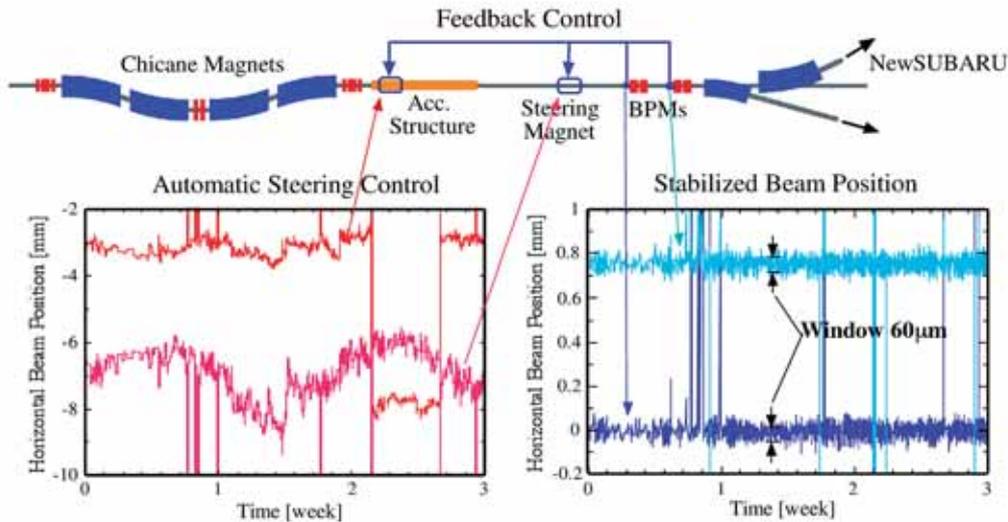


図3 ECS直後におけるビーム位置フィードバック制御

ビーム位置制御のプログラムは、ビームが下流の2台のBPMの中心を通るように、ステアリング電磁石を調節する。その際、許容されるビーム位置変化の幅、即ち窓の大きさは、 $\pm 30\mu\text{m}$ であり、この範囲を超えるとフィードバック制御が動作する。この窓の値は、BPMの分解能(十数 μm rms)を考慮して設定した。図3はECS直後におけるビーム位置フィードバック制御の様子である。BPM2台のデータを参照し、すぐ上流の2台のステアリング電磁石が制御され、これら2台のBPMでの水平方向ビーム位置が3週間にわたり安定化されていることがよく分かる。一方、ビームエネルギーは、ブースタシンクロトロンあるいはNewSUBARUへの輸送路途中の分散部に設置されたBPMにより測定される。プログラムは、測定されたエネルギー値を参照しながらECSのRF位相を調節し、エネルギーを安定化する。その際許容するエネルギー変動の幅は $\pm 0.03\%$ である。この窓の値は、短期的エネルギー変動量(0.01~0.02%rms)を考慮して設定した。図4は、自動

エネルギー制御を行っている時のビームエネルギー変動の一例である。この間、位相制御が行えなかった半日を除くと、ビームエネルギー変動は約0.02%rmsであった。

(3) 運転自動化

リニアック上流のクライストロンあるいは変調器の不調が発生した際、待機しているクライストロンを加速に使用すると、位相調整やビーム軌道調整の必要になることがある。このような場合に速やかに調整が完了するよう、自動化を推進している。

自動位相調整^[3, 5]は、すでに位相の粗調は完了しているとして、短時間にRFクレストを探し出すプログラムである。分散部のBPMデータを参照しながら、クライストロンの位相を変化させ、エネルギーの極大値を与える位相を見つける。図5は、自動位相調整の結果の一例であり、測定値の微係数を一次関数でフィットし、その値がゼロになる位相を求めている。

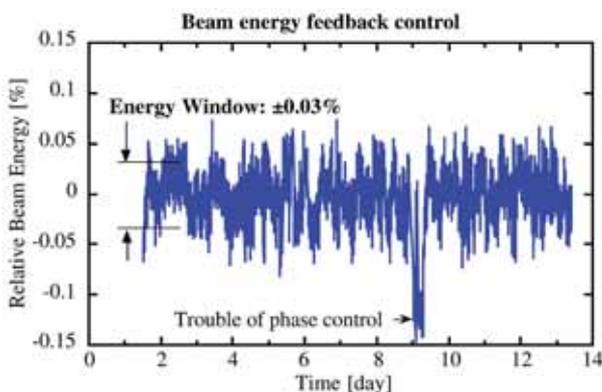


図4 フィードバック制御によるエネルギー安定化^[3]

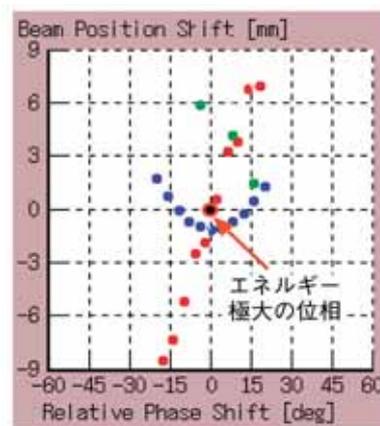


図5 自動位相調整中に測定されたビームエネルギー(実は分散部におけるビーム位置)

通常、クライストロン1本辺りの実行時間は、最短で2分ほどである。最適位相値の誤差は、ビームエネルギー測定を5回繰り返すことで小さくでき、その場合の標準偏差は、例えば約0.3度であった。尚、自動位相調整による位相の微調は、ECSによりエネルギーが安定化されておりため、ビーム入射中でも可能である。

2-3 フォトカソードRF電子銃開発

RF電子銃のフォトカソードに照射するレーザーパルスの空間および時間プロファイルは、電子ビームの低エミッタンス化を達成するためにとても重要である^[6]。現在は、より自由度の高いアクティブな方法を開発中であり、空間プロファイルは、鏡面形状を電氣的に制御できる補償ミラーを用いて整形し、時間プロファイルは、石英板空間位相変調器により光波長分布を調整して矩形パルスを得る。

従来の液晶を用いた空間位相変調器は、その破壊強度が低いことからハイパワーレーザーに使用できないこと、またその使用可能な波長領域が可視光領域に限定されるため、本研究の用途に最適なものではなかった。そこで、赤外域基本波でのハイパワー領域(Ti:Saレーザーのコンプレッサー直後)で整形が可能な、石英板を使用した空間位相変調器システムの導入を行った^[7]。レーザーの時間プロファイルは、このシステムの導入により歪みの少ない矩形形状が得られることを、ストリークカメラで観測した。その結果、レーザーパルスの立ち上がりは1psを下回り800fsととても速く、パルス幅は2~12psまで可変であることを確認した。図6に示したストリーク画像は、パルス幅が最短の2psの場合である。

しかし、この方法では、最終的に得られる紫外レーザーのパワーが従来のシステムに比べて、一桁落ちてしまう。そこで、この矩形化されたピコ秒パルスレーザーを高効率で紫外域へ高調波変換が出来る光学系を、THG効率重視とFHG効率重視でそれぞれ開発を進めている。THG効率重視の場合は、THGの変換効率が26%、FHGの変換効率が

0.8%で、FHG効率重視の場合はTHGの変換効率が17%、FHGの変換効率が5.1%である。

この光学系により、従来のシステムと同程度の紫外レーザーのパワーを保ったままで、パルス幅可変の矩形パルスが、基本波(790nm)、第二高調波(395nm)、第三高調波(263nm)、そして第四高調波(197nm)で可能となる。尚、第四高調波は、ダイヤモンドなどの高効率カソード実験用として用意している。

2-4 高電界試験

(1) RF空洞内表面処理

実用的なRF電子銃用RF空洞には、100MV/m以上の高加速電界を安定して生成し、かつ低暗電流であることが求められる。従って、高電界生成の研究はとても重要である。我々は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同でSバンド加速管の高電界試験を行ってきた。これまでの高電界試験により得られた知見から、加速空洞壁面の汚れおよび酸化銅に静電的に付着する埃が加速管内放電の原因と考えられ、従来から行われてきた高圧純水洗浄では不十分であることが明らかになった^[8]。そこで空洞内壁の酸化銅を除去し清浄にするため、化学エッチングを試みた^[9]。表面粗度をほとんど悪化させないエッチング量による調査の結果、0.3 μ m以下であった。

実際にRF電子銃空洞をこの最適条件でエッチング処理し、RFコンディショニングを行った。その結果は、以下の図7に示す通りである。無処理の空洞は、 3.3×10^7 発RFパルスを投入しても、76MV/mのカソード面電界強度にしか達しなかった。一方エッチング処理した空洞は、無処理の空洞に比べてコンディショニングの進行ははるかに速く、無処理空洞よりも短時間の 1.9×10^7 発後に、電界強度は183MV/mに達し、その後最大電界強度187MV/mを記録した。また、暗電流はコンディショニングとともに減少し、無処理空洞のそれを大幅に下回る。尚、量子効率、155MV/mにて $8.6 \times 10^{-3}\%$ と、過去最高の値であった。

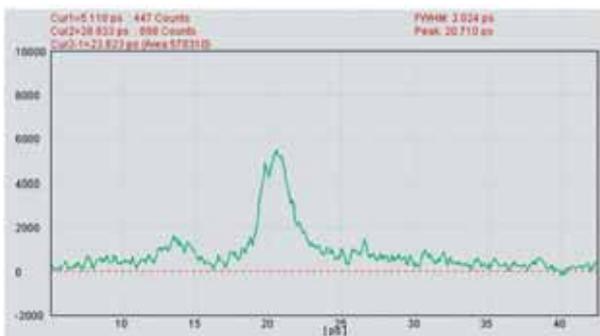


図6 ストリークカメラによる、矩形整形後のレーザーパルス波形測定例(立ち上がり: 800fs; 矩形パルス幅は2ps)

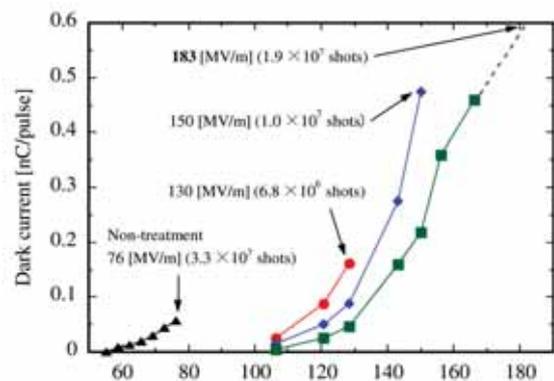


図7 化学エッチング処理したRF電子銃空洞のコンディショニング過程。電界強度183MV/m時の暗電流は不安定であったため、プロットされていない。



図8 加速管用電界結合型RFカップラのモデル

(2) 加速管RFカップラ

我々は放電が起こりにくく単純な構造のカップラとして、ビーム軸が導波管E面を貫通し、その貫通孔を加速管第一空洞と共有する、電界結合型カップラの設計を行っている^[10]。

図8は、MAFIAによるシミュレーションに用いたSバンド5空洞モデルである。図でも明らかなように、導波管と第1または第5空洞のカップリング孔はとても大きい。このため、第1または第5空洞の電界強度は低くなり、加速の点では不利になる。そこで、この例ではこれらの空洞を薄くし、かつ導波管をテーパ型にして、結合部の導波管厚さもなるべく薄くしており、導波管と第一空洞それぞれの厚さの合計は、第2あるいは第3空洞の厚さと同じである。中央の第2～4空洞は、2856MHzにて2/3の位相シフトとなるように設計されている。

この構造の利点は、計算によれば次の通り。

- ・カップラの電界強度は、加速セル最大電界の約1割と小さく、放電を起こしにくいことが期待される。
- ・シングルフィードでも電磁場非対称性によるビームへの影響が小さい。
- ・寸法許容誤差が比較的大きい

その他、構造が簡単なため製作しやすいことも長所である。しかし、このままでは、導波管と第一空洞部での加速ゲインが小さすぎてこの部分が空間的に無駄になる、という欠点がある。

今後も設計を進め、低電力モデルを製作する予定である。

参考文献

- [1] H. Hanaki et al.: “Beam Stabilization in The SPring-8 Linac”, APAC2004, Gyeongju, Korea.
- [2] S. Suzuki, et al.: “SPring-8 Top-Up運転に向けた線型加速器の対応”, 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2005, Tosu.

- [3] H. Hanaki, et al.: “Enhancements of Machine Reliability and Beam Quality in SPring-8 Linac for Top-Up Injection into Two Strange Rings”, PAC2005, Knoxville, USA.
- [4] K. Yanagida, et al.: “Beam Instrumentation Using BPM System of The SPring-8 Linac”, LINAC2004, Lubeck, Germany.
- [5] K. Yanagida, et al.: “SPring-8線型加速器の自動ビーム位置補正及び自動位相調整”, 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2005, Tosu.
- [6] H. Tomizawa et al.: “Reduction of Electron-Beam Emittance with Shaping Both Spatial and Temporal Profiles of UV-Laser Light Source for Photo-Cathode RF gun”, EPAC2002, Paris, France.
- [7] H. Tomizawa, et al.: “レーザーパルス3次元形状制御によるフォトカソードRF電子銃の最適化”, 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2005, Tosu.
- [8] H. Hanaki, SPring-8年報, 2003年度 (2004) 29.
- [9] H. Tomizawa et al.: “化学エッチングの無酸素銅製RF空洞の表面に対する効果”, 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2004, Funabashi.
- [10] T. Taniuchi, et al.: “進行波管における導波管電界結合型カップラのRF特性”, 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2004, Funabashi.

3. リンググループ

3-1 ブースターシンクロトロンでのビーム蓄積運転

ブースターシンクロトロンでのトップアップ対応運転性能向上のためにブースターシンクロトロンの特性を詳細に理解することは重要である。一つの手法として、ブースターシンクロトロンにおいて、ある一定のエネルギーでビームを蓄積した運転を行うことにより、以下のような従来のパターン運転では測定できない様々な特性を調査できると考えられる。

1GeVでのHOMに関する調査

高周波加速空洞内に誘起される高次モード (HOM) の影響によりビームエネルギーが1GeVの段階でビーム電流の減少が発生することがある。

パターン運転では1GeVの期間が250ms程度と短く、スペクトラムアナライザでHOM周波数の同定を行うことは困難である。1GeVでの蓄積運転を行うことでHOMに関する情報を得ることができる。

COD測定、応答関数の測定

各エネルギーでの閉軌道のずれ (COD) の測定の精度向上が期待できる。

エミッタンス測定

各エネルギーでビームがダンプした状態でのエミッタンスの測定を行うことができる。

そこで平成17年1月から3月の蓄積リング運転停止期間に、ブースターシンクロトロンでビーム蓄積運転を行うためのシステムの調整を行った。ビーム運転は以下の条件及び運転方法にて行った。

(1) 入射ビームの条件

パルス幅：1nsまたは40ns、エネルギー：1GeV、電流値：1mA程度、繰り返し：1pps以下。

(2) 蓄積ビームのエネルギーの上限

パターン電磁石電源の出力電力の上限と電磁石の冷却能力を考慮すると4.8GeVがDC運転可能な上限のエネルギーとなる。よって偏向電磁石電源の蓄積パターン波形の作成ではビームエネルギーが4.8GeV以上にならないようにした。もし偏向電磁石電源にて4.8GeV相当の励磁電流を超えた場合には非常停止するような安全系ハードインターロックを組み込んだ。

(3) 蓄積電流の上限

蓄積電流の上限は4.8GeVのエネルギーで19.35mAである。線型加速器(Li)からの一回の入射当たりのビーム電流値は、シンクロトロン(Sy)換算で2mA以下(パルス長：1ns)、5mA以下(パルス長：40ns)である。当初、シンクロトロンは8発入射ができるように設計されていたが、現状は1発入射しか行えないようにハードウェアが変更されている。また、オン軸入射方式を採用しているので、追加入射はできない。以上の点から、Sy蓄積電流は19.35mAを超えることは無いので特にインターロックは準備していない。

(4) ビーム入射・蓄積の制御

通常シンクロトロンの運転では、電子銃や入射パルス磁石を動作させて電子ビームを入射し、5種類の主電磁石とRF加速電圧を同期したパターンで動作させてビームのエネルギーを上げ、出射パルス磁石を動作させて出射する、という動作を1Hzで繰り返している(図1)。これらの動作はタイミングシステムが司っているが、我々はこの一連の動作を途中で停止することができるようにシステムを変更した(図2)。

計算機からシンクロトロンの運転形態を蓄積モードに変更した後、ビーム入射指令を送るとビームを1発だけ入射

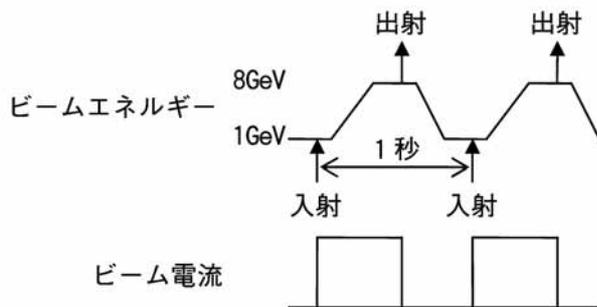


図1 シンクロトロンの通常の運転パターン

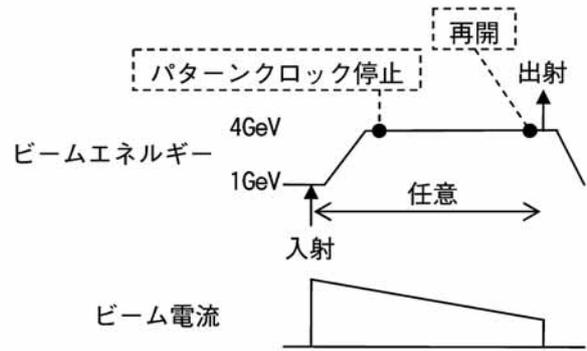


図2 シンクロトロンの蓄積モードでの運転パターン

し、設定したエネルギーまで加速した後、その時点で電磁石励磁電流とRF加速電圧を保持する。これは各パターンを作成しているVMEパターンメモリボードへの10kHzクロックを一時停止することにより行われる。

(5) ビームの廃棄

あらかじめ各種蓄積エネルギーにおいてビームをダンプに出射する出射パルス電磁石のパラメータを調査しておき、蓄積するエネルギーに合わせてセットしておく。ビーム廃棄時には計算機からタイミングシステムにビーム廃棄指令を送信することで、一時停止していたパターンメモリへの残りのクロックの送信を再開し、出射パルス電磁石を一度だけ動作させてビームを出射する。

ただし、パルス電磁石(バンパ、セプタム)の充電電圧が蓄積運転中に設定値以下に徐々に低下するため、ビームを出射する時には励磁電流が定格値に満たない事が判明した。よって、ビームをロスすることなくビームダンプに廃棄するにはパルス電磁石電源の改良が必要である。

図3に蓄積運転を行った時のビーム電流の一例を示す。

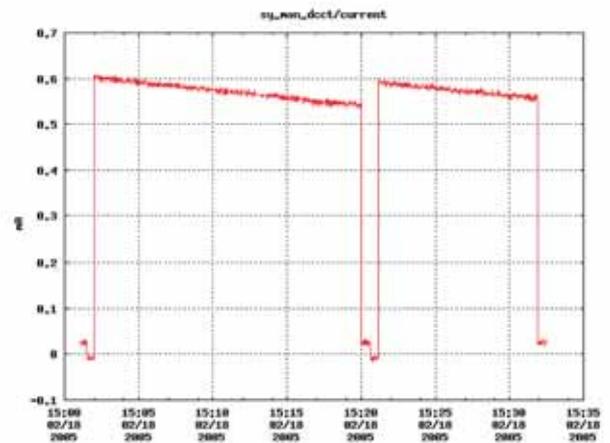


図3 4GeVのエネルギーでビームを蓄積したときのビーム電流値の変化

4GeVのエネルギーで0.6mAのビームを蓄積した場合、ビーム寿命は2時間弱であった。今後は1GeVの低エネルギーにおいてもビーム寿命をできるだけ延ばすようにパラメータの調整を行い、ビーム蓄積状態でブースターシンクロトロンの特長調査を行う予定である。

(青木)

3-2 シンクロトロンビームダンプにおける挿入光源用永久磁石への電子ビーム照射試験対応

蓄積リングに設置されている挿入光源では永久磁石が用いられている。この永久磁石が高放射線下に置かれることにより減磁してしまうことが問題になっている。そこで、平成17年1月から3月の間の蓄積リング運転停止期間に、ブースターシンクロトロンにおいて挿入光源用永久磁石の減磁の程度を測定するための試験を行った。試験の内容は磁石へ電子ビームを照射することにより減磁の様子を確認するものであり、ブースターシンクロトロンから電子ビームが射出された後のビームダンプ部にて照射を行った。

試験を行う前の1月のマシン停止期間中にビームダンプ直前のビームダクトを一部取り除き、ビームダンプ部で試料をセットするためのビーム照射用ステージを設置する改造を行った。ビーム照射は放射線遮蔽の条件を考慮するとビームダンプの遮蔽体内部で行う必要があるため、ビーム照射用ステージはビーム照射時にはビームダンプ内部に挿入し、ビーム照射後は試料の磁石をダンプの外に取り出して磁石の磁場測定が行える構造とした。図1にビーム照射用ステージを示す。ビーム照射用のステージにはターゲットの銅ブロックとその後ろに挿入光源用永久磁石が配置され、ターゲット前にビーム位置調整のためのスクリーンモニターが配置される。ビームダクト末端から照射用試料までの約800mmの間は大気中を電子ビームが通過するため、ビームダンプからの放射化した空気の拡散防止用カーテンの設置を行った。



図1 ビーム照射用ステージ ビームダンプ外へ取り出した状態(左)とビームダンプ内に挿入した状態(右)

この照射試験のための改造により、電子ビームがビームダンプ内部のグラファイト直前に置かれる試料で損失を受けることになるため、試料へのビーム照射時はブースターシンクロトロンから射出可能な1週間当たりの総電子数の上限が 1.9×10^{15} 個/週とこれまでの半分に制限されることとなった。これにより照射試験を行う週は射出可能な電子数が容易に上限値に達してしまうことが予想されるため、暫定的な処置としてシンクロトロン内で測定される電流値を元にして1週間の射出電子数積算値を表示するGUIを作成し、射出電子数の管理を行うこととした。

実験にて照射する電子ビームのエネルギーは4GeV、6GeV、8GeVの3種類とし、ビームの照射量は試料1ピース当たり最大 1.4×10^{15} 個の電子数とした。ブースターシンクロトロン換算で4mAの電流値(電子数 3.3×10^{10} 個/秒)でビーム運転を行うと必要な照射時間は約12時間となる。この間に何度か照射を中断して磁石の磁場測定を行い、照射電子数と磁場の変化の関係を求めた。試験の結果、磁石の減磁にエネルギー依存性があることが確認された。現在、挿入光源グループにてデータを解析中である。

(青木)

3-3 低エネルギー射出試験

ブースターシンクロトロンの射出ビームのエネルギーは従来8GeVである。射出パルス電磁石の磁場等をスケールダウンさせることにより、8GeVより低いエネルギーのビームを取り出すことは可能である。しかしながら、これらの機器は8GeV相当の定格で設計されているため、単にスケールダウンにより取り出せるのは3GeV以上のビームである。例えばバンチ内の電子-電子散乱によるエミッタンスの増大のような現象をビームダンプラインで観測する場合には、射出ビームのエネルギーをさらに低下させる必要がある。

今回の射出試験では、射出用パルス電源のタイミングを意図的にずらす等の工夫により1GeVのビームを取り出すことができた。入射直後のビームはビームサイズが大きく不安定であったが、例えば1.4GeVパターンでダンピングさせた後1GeVに戻して射出させると安定に取り出せることがわかった。そこで、1GeVビームについてビームサイズと電子密度の関係を調べるため、バンチあたりのビーム強度を変えてビームダンプラインでビームプロファイルを観測した。

電子密度が異なる場合のプロファイル画像を図1に示す。図から電子密度が大きいビームの方が垂直方向の広がりが大きいことが明確である。バンチあたりの電子密度と垂直方向ビームサイズとの関係を図2に示す。電子密度が高い場合に垂直方向のビームサイズが増大する原因の一つとしてバンチ内での電子電子散乱が考えられるが、今後詳細なスタディを行い解明する予定である。

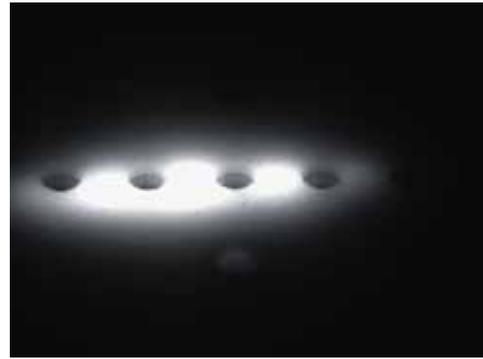
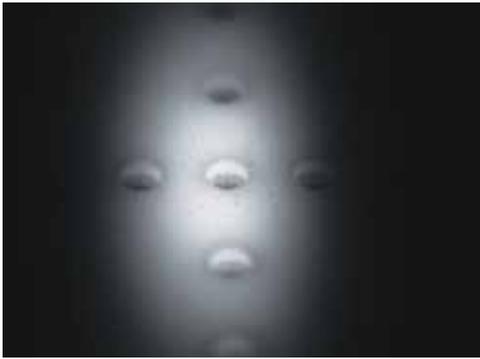


図1 電子密度の違いによるビームプロファイルの差。電子密度は 7.43×10^9 electron/bunch (左図)と 2.89×10^8 electron/bunch (右図)である。画像内の孔は目盛り用のものである。

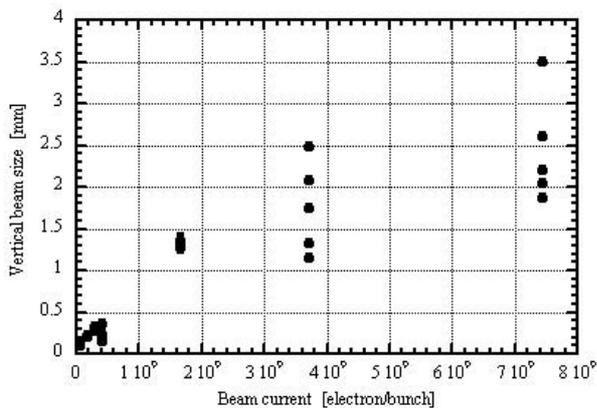


図2 電子密度に対する垂直方向ビームサイズ。

(深見)

3-4 Steering電磁石電源の高分解化

蓄積リングステアリング電磁石 (NST; 水平用=240台 + 垂直用=240台) は鉄心を利用しておりその電源の電流は現在 $\pm 5A$ を16bitで設定している。また空芯であるステアリング電磁石 (HRST) の磁場はNSTの1/100の出力であり同じ電源を利用して水平用24台、垂直用24台がSlow Drift補正用の高分解能補正として使用されて来た(表1、2)。しかしその個数とDynamic Rangeが不足していたために、1日に1~2度の入射時を利用してHRSTの電流をResetしてNSTで補正してきた(2004年7月以前)。その後Topup運転が始まり数日間の連続運転が行われることもあり、Slow Drift軌道補正用にH,V方向それぞれ更に24台ずつのHRSTが必要になってきた。設置場所の問題から空芯のHRSTを増やすとNST台数が減らされることになるため、NSTの電源を高分解能化させて補正を行うことにした。高分解化の方法として4つの方法について検討し、2つの案(A案、B案)で改造実験を行い、結果として1つの方法(B案)で実用化を行った(2004.8)。なおこれに先だって鉄心のNSTの微細なヒステリシスや磁場/電流の分解能、精度を検証している^[1]。

鉄心入りのNSTの磁場対電流の精度、再現性、安定度

表1 ステアリング電磁石の種類と台数(X,Y各々)

COD correction	Normal steering magnet (NST) 240sets (1996)
HR correction	Air Core steering magnet (HRST) 24sets (2001)
HR new correction	Normal steering magnet 24sets (New, 2004)

表2 ステアリング電磁石と電源の諸元

PS name Magnet	Max. Current, Resolution	Min. Field (v), Min. Kick Angle
St-PS Iron Core	$\pm 5A$, 16bit, (0.15mA)	0.8G · cm, 30nRad
St-PS Air Core	$\pm 5A$, 16bit, (0.15mA)	9mG · cm, 0.3nRad
St-HD-PS Iron Core	$\pm 0.156A$, 16bit, (4.7 μA)	25mG · cm, 0.95nRad

のバランスから新高分解電源 (HD-PS) は1/32の微量を制御するものとして設計した。

高分解化の方式

現状のRIOユニットとは別に、更にもう一枚のRIOユニットを電源UNIT内に装着しそのアナログ出力信号を微細化して電流設定に加算する。(図1)

RIOカード2枚のうち従来の1枚をMainとして動作させ、2枚目のRIOをSub (High definition用)として、DAC出力を32分の1に減衰させて従来の電流に重畳させるので21bit相当の分解能になる。この改造は既存の電源にスペースの余裕があったために可能であった。

改造は安価でソフトウェアもほぼ既存のものが使え、HRSTの制御と同じ使用方法が採れた。試験機は2004年4月23日に製作納入され、各種試験と長時間運転を行った後2004年9月から48台をSRに組み込んで実用運転を行い、大きな成果が出ている^[2]。

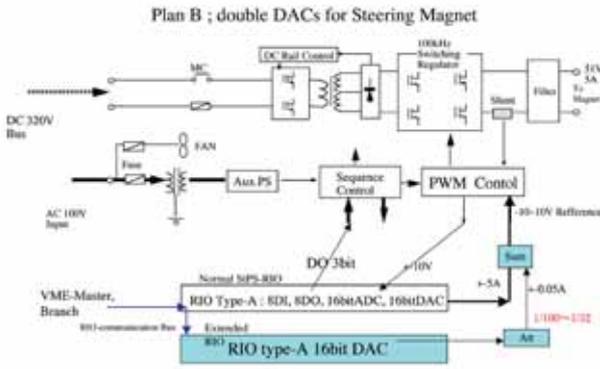


図1 高分解能ST電源ブロック図



図2 背面（RIOが2ヶ挿入）

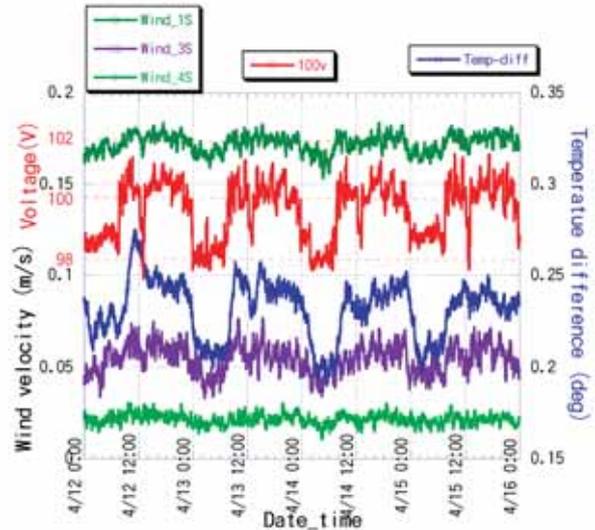


図1 収納部ファンコイルからの風速3箇所（緑、紫、黄緑）、100V電圧（赤）、BPMサポートのリング外側温度と内側温度の差（青）

バランスを変え4極6極電磁石の載っている架台の傾きを不均等に变化させることにより架台上の電磁石の直線性が变化し一日の軌道変動が発生しているものと推測される。

（松井）

参考文献

- [1] Acc-memo：高精度軌道補正のためのステアリング電磁石のヒステリシスの測定、平成15年8月4日 妻木孝治、武部英樹、張超。http://acc-web.spring8.or.jp/~takebe/mag/STHD/STM-hysteresis.htm
- [2] The 3rd International Workshop on Beam Orbit Stabilization 2004December 6-10, 2004, Hotel Kirchbul, Grindelwald, SWITZERLAND, http://iwbs2004.web.psi.ch/documents/program/Tanaka.Hitoshi/1.pdf

（武部）

3-5

(1) 軌道安定化 日変動原因調査

一日の軌道変動をキャンセルするための高分解能のステアリング電磁石の電流パターンから受電電圧に関係していることがわかり、実際に収納部のファンを停止させ近くのステアリングの電流が変化することを確かめた。図1には受電電圧と収納部空調のファンコイルの直近からリング外に向け3箇所（緑、紫、黄緑）の風速を示した。また43セルB架台上流側BPMのサポートのリング外側の温度から内側のを引いた値も青で示しており、風速の変化がリング内外の温度バランスを崩していることがわかる。このように収納部の温度

(2) 収納部亀裂調査

蓄積リング棟の保守通路や組み立て搬入室の床には多くの亀裂が発生し段差のあるものも見られ、幅の変化など施設管理部で調査された。その結果亀裂の幅は膨張と収縮の季節変化をしていることがわかった。さらに加速器部門では収納部の亀裂について調査した。亀裂の多くはリングの半径方向に入っており床下に数多くあるセルダクト（信号線などのための直径20cmパイプ）やベースプレートのための箱抜き、床下15cm付近のL型チャンネルなどの構造が亀裂の誘因になっていることがわかった。またその深さを調べるために亀裂部分を含めて直径15cm深さ約1mのボーリングを全周で6箇所行った。亀裂の多くは岩との境まで達しており表面だけではないことが認められた。また床断面の構造は海拔290.2mの岩の上に10cm捨てコン、50cmスラブコン、40cm打増コンという設計になっているが工区により違いがあることもわかった。6箇所中2箇所についてはボーリング中に捨てコンとの境界面からはがれこの面では十分密着しているわけではないこともわかったが、他の4箇所についてははっきりした境界面を認めることができなかった（図2）。

また、亀裂幅の連続測定を6箇所で行っているが降雨時の変化や年周期の変化が認められる。

（松井）



図2 亀裂部を含んでボーリングした。



コアの一部

30セルの孔は大雨の時、床下1.1mまで水位が上昇した。

(3) ビーム振動と床振動の同時測定

エネルギー分散のあるところとないところのBPMの信号水平垂直方向計5chと4セルの保守通路にセットした広帯域地震計(0.01~70Hz)STS2による上下、南北、東西方向3chの地盤の振動を同時に計測し、24ビット8chデータを51.2Hzサンプルで記録をしている。また、同じSTS2を19セル、36セル付近の保守通路に設置し20Hzサンプルで床の振動を記録している。これらはGPSを用いて10 μ s程度で時刻を合わせている。

地震時の分散のあるところのBPM水平方向成分と床振動の上下方向成分の時間波形をくらべると位相が90度ずれるが非常に良く一致していることがわかる。これは表面波により地面が回転運動し周長が変化する描像でよく理解できる。地盤は通常時でも波浪のために周期数秒の振動が見られ、海が荒れている時には分散部のビーム水平方向位置とのコヒーレンシがはっきり見られる。(分散のないところではコヒーレンシは見られない。)また、上下方向でこのようにはっきりみられるが東西や南北方向の床振動とのコヒーレンシは低い。これは水平方向の振動の周長への寄与は円を半径を変えずに横に歪ませる形になるので2次の効果となり円を縦方向に歪ませる(楕円に近い)のに比べ影響は小さいためと考えられる。波浪による地盤の振動は小さく、海が荒れたときでも表面の円運動は直径1~2 μ mで、周長への寄与は0.6 μ m程度でこのときの歪み率はと $\pm 4 \times 10^{-10}$ とずいぶん小さく、SPring-8が大きなスケールの精密な歪計になっていることがわかる。

(松井)

(4) スマトラ地震

SPring-8記録上最大の地震であり、2004年12月26日午前10時10分頃最初に到達した後12時40分頃には地球を逆に回ってきた波が到達しBPMで捕らえられ、さらに最初の波が地球を一周してきた表面波が13時30分頃周期200秒程度の波として捕らえられた。一周以上の波が電子ビームで観測されたのはSPring-8では初めてである。直径450mのリ

ングに比べ波長700kmという長い表面波なので周長1436mに対しその変化はわずか ± 0.01 mmであったが捕らえることができた。ちょうどマシスタディの最中で地盤の振動とビームの関係は4時間程度しかデータをとることができなかったが、160m地下に埋設している傾斜計データをフーリエ解析するとその後3~4日にわたり地球の自由振動の多くのモードが記録されていた。

(松井)

(5) 実験ホール温度測定

台風のため屋根の断熱材が一部はがれたことによる実験ホールへの影響を調べるため100個の温度センサー、20個の湿度センサーを実験ホールのリング外側の壁際に設置し約1ヶ月10分おきのデータをとった。かなりの部分は大体1度の幅に入っていたが図3、4の「横から送風」と示す部分は中尺、長尺のビームラインで実験のステーションがないところで天井の板がなくそのため送風は横からになっており、この領域の温度変動は大きい。屋根の損傷領域と温度変動は必ずしも相関があるとは言えない結果である。

湿度については場所による違いよりその時の天候に左右される部分が大きかった。

(松井)

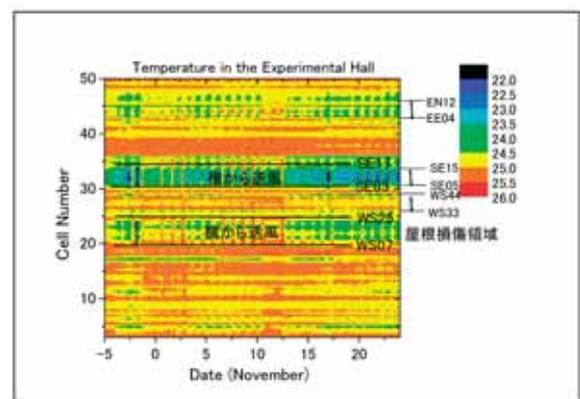


図3 2004年10月~11月の実験ホール全周の温度

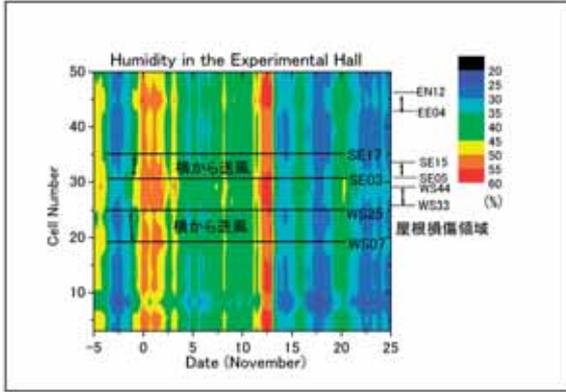


図4 2004年10月～11月の実験ホール全周の湿度 場所による違いよりその時の外気の湿度に大きく影響されている。

(6) アンダーパス部の年周期変化

蓄積リング床面の高さは気候により変動している。2003年11月に水レベルシステム(HLS)を蓄積リングのアンダーパス部、セル8からセル10の間50メートルわたって6個センサーを収納部床に固定し連続測定をしている。図5は昨年1月以来の結果である。トンネルフロアは約0.3mmの高さ変動があり5月から7月には1日約2μm上昇している。リングの内周にアクセスのためのアンダーパスの構造は形であり高さ6メートル、幅8メートルある。そのトップのスラブは収納部のフロアで両サイトは擁壁である。この構造のため外部と収納部および外部と地中の温度勾配によって擁壁の伸縮、また擁壁とスラブの曲がりが発生しアンダーパス部の上下変動を引き起こすと思われる。

(張)

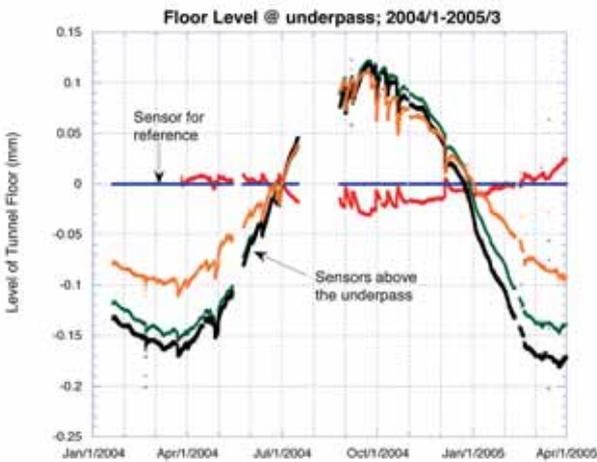


図5 アンダーパス部の上流(青)を基準に、さらに上流部(赤)アンダーパス部(オレンジ、黒)下流側(緑)の床レベルの変化

3-6 2004年度版RF年次報告

(1) 蓄積リングに4ヶ所あるA、B、C、Dと名付けられたRF stationにおいて、過去何年かに渡ってRFに起因した蓄積中のビームが落ちる原因の一つに冷却水の流量低下がある。この冷却水流量低下が引きがねになってインターロック信号が発生しRFスイッチを切ったり、クライストロン電源が停止したりする。流量低下の主な原因は、ダミーロード冷却装置やクライストロンコレクター冷却装置に設置している熱交換器の二次側(施設側)の冷却水流量低下によるもの、及びクライストロン電源各部を冷却している冷却水流量の低下によるものである。冷却水流量低下の原因は施設側が供給する市水を千種川から取水しており、この水自体が硬水で冷却水配管の水溜まりのような場所において水に含まれているカルシウム等の鉱物が付着する。熱交換器を開放してみると熱交換器のフィン全面に多量の粘土状物質が付着しているのが目視される。さらにクライストロン電源部においても同様にバルブを外して中を開けて見ると多量の粘土状物質が付着していることが判明した。熱交換器の冷却水の入口及び出口には温度計が設置されているので、これらの温度を一月以上にわたり連続して観測すると徐々に熱交換の効率が低下し入出口側とも温度が時間と共に上昇してゆくことが明白になった。現段階では市水が流れる側の熱交換器を一年に2度以上塩酸で洗浄することによりこの問題に対処している。しかし市水の流れるクライストロン電源部に対して同じ処方を施すことはできないので高圧電源部を含むクライストロン電源の冷却水に関しては、施設側と電源側の間に熱交換器を挿入し電源側

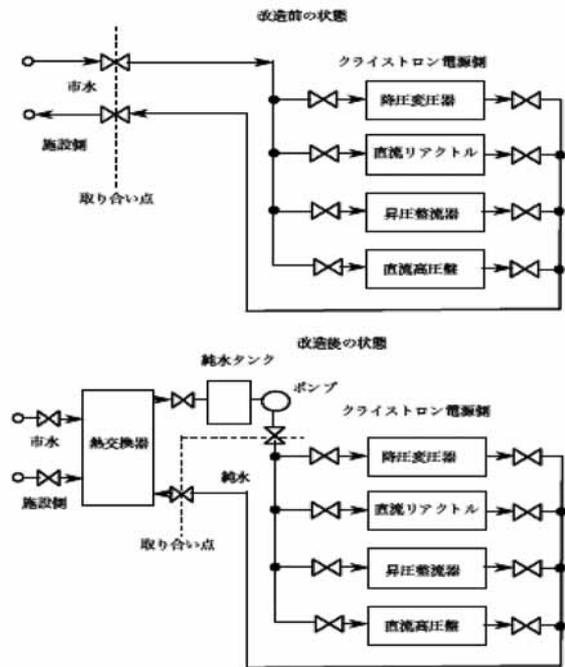


図1 熱交換器挿入前後のブロック図

には軟水を供給する方法を採用することにした。手始めとして2003年夏期停止期間中にB-stationにおいて図1に示すような熱交換器を設置した。一年間の観察期間中なんら問題が発生しなかったので2004年夏の停止期間中に残りA、C、D各stationに対しても同様の熱交換器を設置した。これによりクライストロン電源部の冷却水流量低下が原因で蓄積中のビームを落とすことはなくなった。しかしダミーロード冷却装置やクライストロンコレクター冷却装置に関しては、最近では粘土状物質が付着する時間が短縮してくる傾向にあり、冷却水温度がある値以上になると加速器運転停止日を利用して、直ちに洗浄するようにして対処している。しかし施設側が供給する市水を全面的に純水に交換しない限り根本的解決にはならない。

(2) タイミングシステム用16ビットカウンター製作

SPring-8のビーム制御、モニターそして放射光利用者に広く利用できるようSPring-8で開発した508MHz SUC (508MHz Synchronous Universal Counter) [1] はブースターシンクロトロンの1Hz運転を考慮して内部カウンターを30ビットに設定し、508.58MHzに同期して数えることができるよう市販の高速ECL-ICを使用している。一台の508MHz SUCで最も使う -6V電源は一つのNIMモジュールにつき約3A近くある。そのため回路自体の温度上昇が原因でICが故障する率が高いモジュールとなった。故障の確率を低くする目的で、16ビットに減らした508MHz SUCを新たに開発した。最初の16ビット508MHz SUCのプロトタイプは2002年頃ででき上がり信頼性を試験する目的で、あるビームラインで1年以上試験してもらった。その結果全く故障は無く現在も使われている。

新たに開発した16ビットの508MHz SUCは30ビットの508MHz SUCで使用上少し問題があった点に改造を施した。図2に示したように最も重要な改造点は、例えば蓄積リングのRFバケット番号を指定する数字Mを入力した時と、別のRFバケット番号の数字Nを入力した時の遅延時間は508.58MHzの一周期の時間約1.97nsのM倍であり、かつN倍であるべきである。しかし使用するICの出力ビットのわずかな特性差に応じて設定する数字(RFバケット番号)によって数psから数十psの時間差が発生していた。この時間差を無くするため、16ビット508MHz SUCの信号出力段に基本周波数に同期する回路を追加し、内部カウンターとして使っているICの特性に依存せず基本周波数に完全に同期するようにした。これによりどのRFバケットの番号Mに対しても全体の遅延は1.97nsのM倍になるようになった。最初プロトタイプを製作した時、入力の基本周波数に対して16ビット508MHz SUCの出力信号は必ず約10psのタイムジッターが観測された。原因究明のためほぼ2年間費やした。結局解ったことは、内部に使っていた508.58MHzを分配するICそのものの特性であることが判

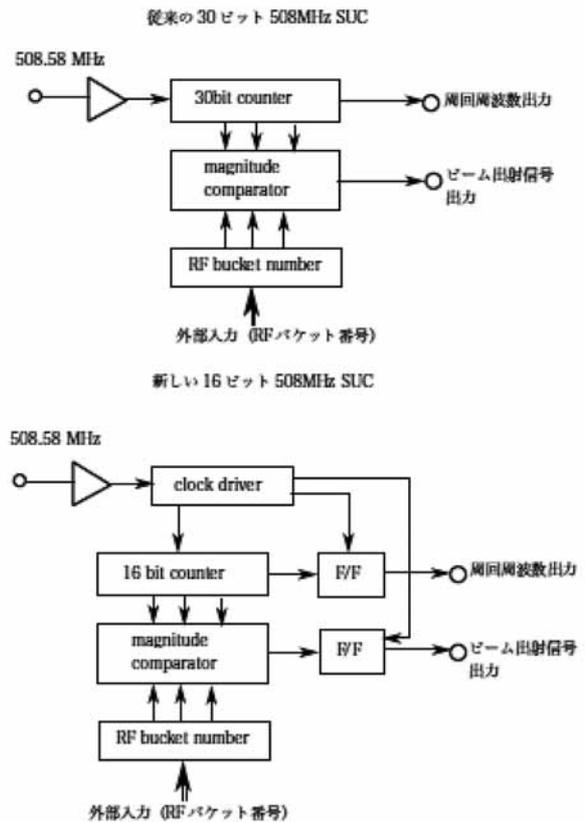


図2 従来の30ビットと新しい16ビット508MHz SUCの比較

明した。タイムジッターの原因となったICの製造メーカーとは別の会社の製品を使うとタイムジッターは完全に無くなった。現在蓄積リングのある実験グループは既に16ビット508MHz SUCを使用しており故障したという報告は現在のところ無い。加速器側については、長い遅延時間が必要な場所では従来の30ビット508MHz SUCを使い、それ以外の場所では順次16ビット508MHz SUCに置き換えている。

参考文献

[1] H. Suzuki, H. Ego, M. Hara, T. Hori, Y. Kawashima, Y. Ohashi, T. Ohshima, N. Tani, H. Yonehara : Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **431** (1999)294-305.

恵郷 博文、大島 隆、大橋 裕二、川島 祥孝

3-7 蓄積リング入射部チェンバー損傷調査

2003年10月に、蓄積リング電子入射部の真空チェンバーが、ビームアポート時に廃棄された電子により溶融し、真空リークを起こすという事故があった。この入射部チェンバーは、図1に示すとおり、入射電子と蓄積電子の軌道を出るだけ近づけられるよう、一部がSUS製で、壁の厚さが0.7mmと薄く、またチェンバー内壁の開口が電子軌道に対し18.6mmと狭くなっている。このため低エミッタンス

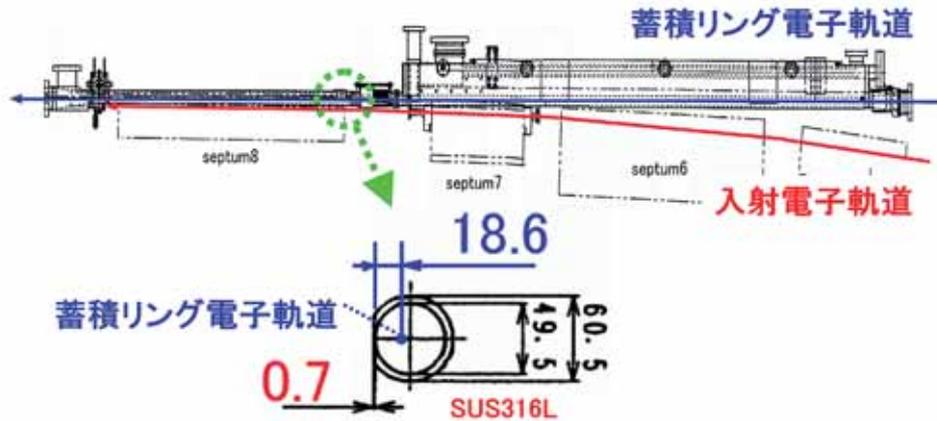


図1 蓄積リング入射部の真空チャンパーを上方から見た図、及び破損部分の断面をビーム軸上流から見た図

のオプティックスではビームアポート時に廃棄される電子はこのチャンパー壁に集中的に衝突する。そして衝突した電子がSUSの壁の中を通過する際発生する熱によりチャンパーが溶融し、その結果真空リークに至った。このため、暫定的な真空保全措置として、可能な限り壁の厚いチャンパーの製作・設置をした。また、恒久的なチャンパー保護対策を立てるため、詳細なチャンパー溶融のメカニズムの調査をした。

この調査では、破損したチャンパー壁の内外面の観察、及び切断のうえエッチング処理をした断面の観察を行った。図2に観察結果を示す。外面写真を見ると、廃棄された電子の通過時の熱による変色の筋が壁の薄い部分のほぼ

中央をまっすぐに走っているのがわかる。一方、断面写真を見ると、廃棄された電子がチャンパー壁のテーパ部分から壁内部に侵入し、壁面にほぼ平行に走って壁を溶融させる様子がわかる。また、この溶融の度合いについては、電子の進入直後よりも30mm程度進んだ位置（図2、21mm）で最大となり、その後更に40mm程度進んだ位置（図2、60mm）では溶融痕が見られないという観察結果が得られた。この現象は、チャンパー壁に侵入した電子が、物質との相互作用による制動放射、及び電子・陽電子対生成を繰り返し電磁シャワーを形成するのに伴い、発熱に寄与する電子・陽電子の個数が電子が進行するほど増加すること、また、その電子・陽電子がある程度進行すると多重散乱の

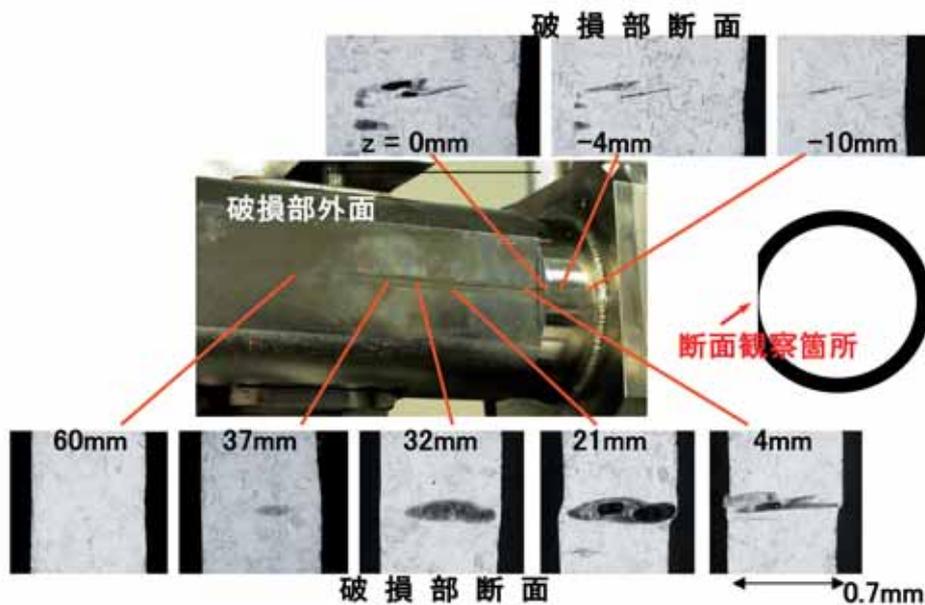


図2 蓄積リングの内周側から見たチャンパー破損部外面の様子、及び各位置での断面観察の様子。断面図はビーム軸に対し垂直な面をビーム軸上流側から見ており右側が真空側となる。各々の数値は0.7mm厚のチャンパー壁端部を原点とした場合のビーム軸方向の位置（図3参照）を示す。断面写真に於いて、白い部分はSUSが健全な部分、黒く抜けているのは溶融の結果空洞となった部分、それ以外の灰色の部分は溶融後再凝固するなどした熱影響部分である。

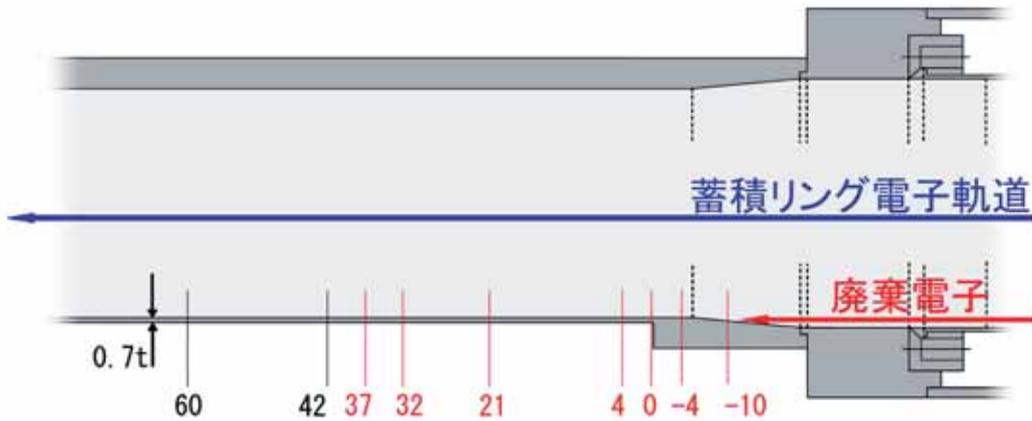


図3 上方から見たチェンバー断面図：図の左右がビーム軸方向、上がリング外周側、下が内周側に対応する。電子ビームは図の右から左に走る。図中の数値は図2の断面写真の位置に対応する。ビームアポート時、電子は徐々に軌道を外れリング内周側に移動、最終的には赤線で示したラインに沿ってチェンバー壁に衝突する。

影響で拡散し、単位体積辺りの通過個数が減少することでよく説明できる。

物質内での電磁シャワーの形成の密度や電子・陽電子の物質中通過によるエネルギー付与、即ち発熱の度合いは、物質の原子番号が大きくなるほど大きくなる。よって、チェンバー保護対策として、SUS即ち鉄より原子番号が小さいアルミニウム素材の電子ダンパーを追加設置した新型入射部チェンバーを製作した。

(依田)

3-8 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の信号処理回路の更新のため、処理回路を試作し、特性の測定を行ってきた。

分解能、直線性などの検証を終え、加速器制御システムへのデータ取り込み部であるDSPボードとの組み合わせ試験の段階で、RF信号を切り替えるスイッチの切替速度が十分でないために、見かけ上のビーム位置が $30\ \mu\text{m}$ 程度ずれていく現象が現れることがわかった。サブミクロンの測定精度が必要なBPMにとっては大きな誤差である。

通常RF信号の切替スイッチの切替時間の評価では振幅の10%から90%に達する時間を切り替え時間として扱う。10% - 90%切替時間でみる限り、使用しているRFスイッチは100ns以下と十分速く切替わっている。蓄積リングBPM信号処理回路で $1\ \mu\text{m}$ 程度以下の位置測定精度を得るにはスイッチ切替後その電極のデータを測定するまでの間に、振幅の 10^{-4} (0.001dB)以内に達する必要がある。今回の回路に使用するスイッチに関しては、10%-90%切替時間による切替速度の評価のみでは不十分で、振幅に対し 10^{-4} (0.001dB)以内の誤差になるのに要する時間で切替時間を評価する必要がある。上記の現象が見られたRF信号切替スイッチはGaAs FETによって信号を切り替えるタイプの

ものであった。数種類のRF信号の切替スイッチ素子について調査したところ、程度の差はあれ調査したすべてのGaAs製FET素子に見られる一般的な現象であることがわかった。切替時間が実用上問題がない程度まで短くなる条件を調べたところ、切替のための制御電圧を標準値よりも下げることで切替時間が実用上問題とならない程度に短くなることがわかった。図1にGaAs FET (M/Acom製 SW-239) 切替制御電圧を変えて、OFF ONの時の振幅変化を測定したものを例示する。制御電圧を標準値の5Vとした場合最終値の0.001dB以内となるのに200ms以上を有しているのに対し、制御電圧を3.5Vに下げた場合このようなゆっくりした立ち上がりの現象は認められない。

GaAs FETの素子の調査と並行して、CMOS FETの試

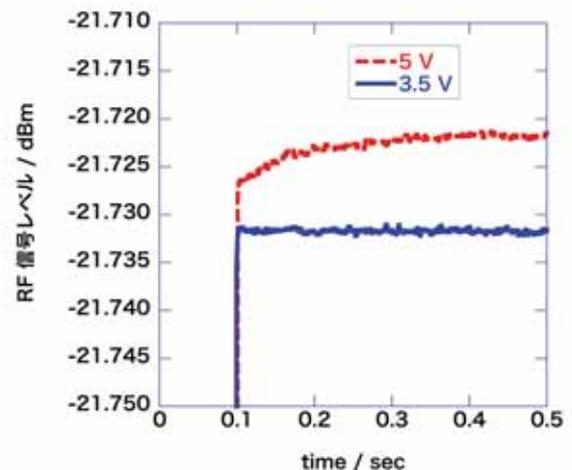


図1 GaAs FET素子の信号切替の様子
縦軸：RF信号レベル (dBm)、横軸：時間 (秒)
赤破線：制御電圧5Vでのデータ、青実線：制御電圧3.5Vでのデータ
横軸0.1秒のところでスイッチをOFF ONとした

験を行った。その結果、試験したCMOS FET素子の場合には標準の制御電圧で十分短時間で切り替わることがわかった。図2にCMOS FET素子（Analog Devices製ADG918）の切替の様子を示す。1ms程度以下で最終値の0.001dB以内に達していることがわかる。

必要な切替速度を得るためにGaAs FETの素子では標準の制御電圧から外れた電圧で制御する必要があるのに対し、CMOS FETの素子では標準の制御電圧で使用することで必要な切替速度を確保できることから、最終的にこのCMOS FETの素子を用いて量産品を製作することに決定した。

（佐々木 茂樹）

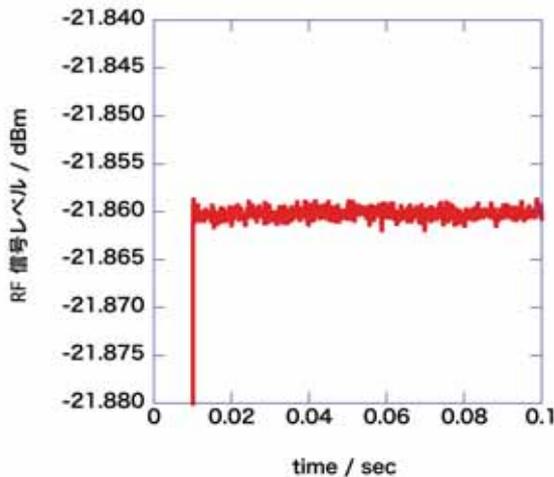


図2 CMOS FET素子の信号切替の様子
縦軸：RF信号レベル（dBm）、横軸：時間（秒）
横軸0.01秒のところでスイッチをOFF ONとした

3-9 超伝導ウィグラーによる高エネルギー放射光の発生

加速器部門では、MeV領域の高エネルギー放射光の発生とその応用について、検討を進めている。高エネルギー放射光の発生には、最大ピーク磁場10Tの超伝導ウィグラー（以下SCWと略記）を蓄積リングに設置して利用する。SCW本体は、既にBudker原子核研究所との共同研究により製作されており、2002年には蓄積リングに一時的に設置され、低電流値でのビーム試験が行われた。しかし、SCWをユーザー運転と共存させながら継続的に活用するためには、電子ビームへの影響の抑制、高熱負荷の処理、放射線遮蔽など、いくつかの問題を解決しなければならない。

(1) SCW磁場測定装置の設計・製作

電子ビームへの影響については、事前の磁場測定と低電流値でのビーム試験によってある程度評価できたが、より精密な評価を行うためには、SCWを励磁した際の詳細な磁場分布が必要となる。このための磁場測定装置を設計・製作した。装置の外観を図1に示す。

磁場は高精度のホール素子で測定する。磁場の多極成分を求めするため、相対精度の目標値を2～3Gとした。このため、



図1 超伝導ウィグラーの磁場測定装置

温度係数が極力小さな（0.06%/）ホール素子を採用し、これを、ベルチェ素子を用いた恒温槽（精度： ± 0.02 以下）内に設置したものを準備した。渦電流による影響を避けるため、恒温槽のほとんどの部品には非磁性体を採用している。ホール素子は、ガラス繊維で強化された非磁性のベルトに固定され、これをステッピングモーターでビーム軸方向に移動させる。また、ベルトにはおよそ130kgfの張力をかけており、中心でのたわみを0.6mm程度に抑えている。ベルトのたわみ量は、装置設置前に別途測定しており、これによって磁場測定値の更正を行う。またベルトの位置は移動が可能で、水平方向には ± 10 mm程度、垂直方向には ± 5 mm程度まで動かすことができる。位置の微調整はマイクロメータで行う。ホール素子をx、y、z各軸測定用のものに変え、ベルトの位置を変更しながら測定を繰り返すことにより、3次元メッシュ上での3次元磁場の値を求める予定である。

（深見 / 小路 / 早乙女 / 米原）

(2) 1回対称リングのビーム試験

SCW励磁に伴うエミッタンスの増加など、電子ビームへの影響をできるだけ抑えるためには、設置場所のベータ関数の値を下げたオプティクスを実現する必要がある。このようなオプティクスの局部的変更は、長直線部（LSS）に4極電磁石を追加することで、実現可能である。図1に、4極電磁石8台を追加し、水平ベータ関数を2.5mに、垂直ベータ関数を13mとする例を、アクロマット・オプティクスの場合について示す。

またオプティクスの変更前後、およびSCWの10T励磁前後で、電子ビームのエネルギー・拡がりおよびエミッタンスがどう変化するかを、表1に示す。

このようなオプティクスの変更を局部的に行うと、一般には、リング全体の対称性が崩れるため、ビームの安定領域が狭くなり、入射効率やビーム寿命などに悪影響を及ぼす。LSS アーク部では、エネルギーのずれた電子に対

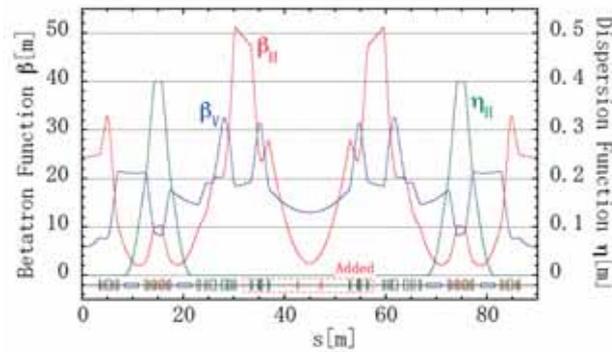


図2 長直線部オプティックスの局部的変更例。水平および垂直ベータ関数 (β_H および β_V) と水平ディスパージョン関数 (η_H) を示す。電磁石配置も下部に示す。青色は偏向電磁石、緑色は4極電磁石、橙色は6極電磁石で、追加した電磁石を点線で囲んである。

表1 ビームパラメータ (アクロマット・オプティックス)

	LSS変更前	変更後 SCW 0T	変更後 SCW 10T
水平ベータ関数 [m]	23.5	2.5	
垂直ベータ関数 [m]	14.4	13.0	
エネルギー拡がり [%]	0.11	0.11	0.15
エミッタンス [nmrad]	6.59	6.97	7.15

する安定領域を確保するために、6極電磁石を用いて局所クロマチシティ補正を行っており、リングの対称性を崩すと、これら6極電磁石の影響で安定領域が狭くなる。この問題を解決するため、局所クロマチシティ補正用の6極電磁石に対して水平のベータトロン位相が180°だけ離れた場所に別の6極電磁石を追加し、カウンターを当ててその影響を軽減させる、という手法が考案された。

計算機シミュレーションを行った結果、6極電磁石の強さを最適化することにより、図2に示したオプティックスの局部的変更の前後で、入射効率やビーム寿命の悪化を抑制できることがわかった。このオプティックスの局部的変更が、実際に可能であることを確認するため、保管中の4極電磁石予備機8台、および6極電磁石予備機2台をCゾーン長直線部に設置し、必要な電源の整備と配線を行った。電磁石設置に際しては、既設の架台を転用した。また、半割した電磁石を、真空チェンバーの大気開放を行わずに設置する手法を開発し、実行した。ビームを使った確認試験は、今後のマシンスタディを通して行う予定である。

(早乙女/米原)

4. 制御

4-1 機器制御系

(1) 線型加速器アナログ読み出し信号のノイズ対策

昨年度に行った線型加速器制御系改造のあと、幾つかのアナログ信号の読み出しにおいて、ノイズレベルが高い信号が存在した。このため、コネクタボックス内のアナロググラウンドの接地方法の改善を図り、ノイズレベルの低減対策を行った。

(2) VME計算機CPUボードおよびOSの入れ替え

昨年度に引き続き、機器制御用VME計算機のCPUボードおよびOSを、従来のHP9000/743rt + HP-RTからIntel系CPU + Intel Solarisへ移行する作業を行った。2004年度は加速器全体で16台の交換を行った。

(3) FL-netの導入

制御上位計算機とPLCとのデータ取り合いは、RS232Cを使ったものを標準としているが、PLCからのデータ量の増加や、入射電荷量の測定等のように、ある程度の時間応答性が必要な場合は、RS232Cでは対応できない。そこで、今後は、イーサネットをベースとする、ファクトリーフロア用の標準通信規格であるFL-netを選定し、PLCとのデータ転送の標準とした。最初の事例として、線型加速器のインターロックの改造にあわせて、データ読み出し用にFL-netの導入を行った。

(4) VXI11プロトコルを使ったオシロスコープのデータの取り込み

遠隔操作されるオシロスコープからのデータの取り込みには、GPIBが採用されてきたが、現在販売されているほとんどのオシロスコープには、イーサネットが装備されている。テクトロニクス製のオシロスコープからデータを取り込むために、オシロスコープに実装されているVXI11プロトコルを使って、ASのフレームを用いたプログラムで、データの取り込みを実現した。すでにイベント駆動型データ収集系で実現されているEMと、MSとを使い、VXI11プロトコル対応のASを組み合わせて、Linacのタイミング系ジッター測定に導入した。

(5) ネットワーク対応DVMの導入

マグネットの冷却水温度等を計測しているSmartlinkが、製造中止から5年以上になっているため、同等の精度を持つネットワーク対応DVMを、Smartlinkの代替として導入した。データの収集系としては、UPD + ComCの組み合わせを用いることで、MADCOCAのフレームワークの標準にあわせることが出来ている。

(6)パンチ電流モニター系の改造

トップアップ運転に欠かせないパンチ電流の測定は、GPIBインターフェース付きの高速のオシロスコープを使って行っている。今までは、データ解析やデータベースへの書きこみは、上位のワークステーション側で行っていた。また、データの受渡しもファイル渡しで行っていたため、

1回の測定に約27秒かかっていた。これを短縮化するため、オシロスコープの機能を最大限に生かした改良を行った。オシロスコープには、オペレーティングシステムとして、Windows2000が組込まれている。それにMADDOCAの一部機能を移植して、制御系に組込むこととした。MADDOCAのフレームワークは、Unix系のオペレーティングシステムで開発されたので、Windowsへの移植は単純ではなかった。まず、上位ワークステーションが発行し、 GPIB 経由で送られていた命令シーケンスを、すべて、Windows2000のプログラムで行うようにした。次に、オシロスコープで取得したパンチ電流を解析するプログラムを、ワークステーションから、オシロスコープの Windows 2000で行うように移植した。さらに、解析の結果をデータベースに直接書き込むプログラムを作成した。最後に、オシロスコープをMADDOCAの下位コンピューターと見なし、EMプログラムを動作させることに成功した。その結果、27秒かかっていた測定時間は7秒と高速化ができた。測定時間の殆どは、オシロスコープ内部でのデータ収集に要する時間であり、解析やデータベース書き込みでは時間を消費していないものとなった。

4-2 データ収集系改造

(1) Poller/collectorシステムの改造

制御系の標準的なデータ収集の枠組みである、poller/collectorシステムのソフトウェアに関して、a) poller/collectorシステムの起動時間の短縮、b) データ収集用計算機毎に最適なパラメータの設定機能、c) 診断機能の強化を目指した改造を行った。

まず、a) について、従来のpoller/collectorシステムでは、Collector clientは、機器データを吸い上げるCollector serverに対して、データ収集用プログラムの起動を依頼し、データ収集が問題なく行えたことを確認するという動作を、シーケンシャルに行っていた。このため、データ収集用計算機の台数が増えると、データ収集の開始に非常に時間が掛かっていた。この起動処理を、今回パラレルに行うよう変更した。これによって、一例として、従来データ収集開始までに12分掛かっていたものを、2分に短縮することに成功した。

poller/collectorシステムでは、各データ収集用計算機上で動作している、データ収集用のプログラムに異常があった時、それを検知し、再度データ収集用プログラムを動作させる。この判断を行うための時間などのパラメータは、従来全ての計算機で同じであったが、b) の改造で計算機毎に設定が出来るようにした。従来画一的なパラメータとしていたことで、最適化できていなかったが、この改造により、入出力ボードの構成が各々異なる機器制御計算機に、それぞれ最適なパラメータを設定できるようになって、柔軟な運用が実現できた。

また、c) の改造では、各データ収集用計算機上で動作しているデータ収集用プログラムの動作状況を記録し、必要ならばファイルにその記録を出力させる機能を追加した。これにより、データ収集用プログラムの動作不良の原因究明が可能になった。

(2) OTR画像処理高速化

トリガーに同期したデータを、データ収集用のLinux計算機から直接データベースに書き込むという、新しいイベント駆動型ソフトウェアを作成し、SSBT下流のOTRモニターのデータ収集に応用した。これにより、従来の周期的なデータ収集とは異なり、ビームの入射時のみ、OTRモニターから得られるデータを、データベースに残すことが出来るようになった。

4-3 計算機

(1) データベース計算機の強化

制御用のデータベースサーバーは、実運用1台と、実運用機の障害時にただちに切り替わる待機用1台で構成された、高可用クラスターシステムで運用している。データベースの負荷が増大したことで、トラブル時に待機用を使用する場合、待機系サーバーの処理能力が限界に近付いた。このため、待機用計算機を新型の高性能計算機に置き換えることとし、これを新たな主サーバー機として配置することで、当面の負荷増大に対処できるようにした。この置き換えにより、新規投入の実運用計算機は、CPU処理能力において約3.5倍、負荷が限界に近かった待機用計算機の約5倍の処理能力となった（SPECint_rate2000他、参考）。

(2) WARCS端末の整備

広域遠隔制御システム（WARCS）の稼働に伴い、加速器運転中の出張者が同システムを利用できる、セキュアなノートPC端末を整備した。無線、有線によるインターネット接続、WARCSシステムのクライアントソフトウェアの他、学会研究会でのプレゼンテーションを行うためのアプリケーションを備えたものとした。加速器遠隔制御は実運用に入り、出張者は実際に携帯している。用意したパソコンは全てウィンドウズパソコンだが、希望者にはマッキントッシュ用のソフトウェアをインストールした。2004年のEPAC会場からのテストに成功している。

(3) セキュリティ

所外使用でのウイルス感染を防止するため、部門で導入済みの統合セキュリティソフトクライアントを用い、セキュリティサーバーによる一括管理と、返却時の検疫チェックを行っている。

(4) プログラム開発環境用ファイルサーバーの整備

運転制御用プログラムのソース、ライブラリーなどは、制御系で用いる主要なOSである、HP-UX OS用の開発環境ワークステーションに、ディスクを接続し、これをサーバー兼用で使用していた。近年開発されるプログラムの数や対象OSが増加し、ワークステーションに接続したストレージでは容量も、処理能力でも限界が近付いてきた。また、開発計算機がサーバーを兼ねていることは、メンテナンスをするためにも、運用上の多大な制約を生じていた。そこで、これらの問題を解消するために、開発用ワークステーションから独立したファイルサーバーの構築を行った。これにより、運用の柔軟性、総データ領域が512MBから1TBになり、SCSIバス速度が80MB/Sから160MB/Sに高速化し、NFSサーバー性能に重要なバッファサイズを、256MBから2GBへと拡張できた。さらに、ストレージシステムは、制御用計算機と同様に、24時間365日常時稼働前提の行われているSCSIディスクをベースとした、高信頼RAID機器により構成した。

(5) 仮想計算機テスト環境の整備

所内においてWebサーバーを利用した、様々なデータアクセスが行われるようになり、サーバーの台数が増加傾向に有る。これらのサーバーは、必ずしも、常時一定のリソース（CPU、メモリ）を必要とするものではなく、アクセスに応じて負荷が変動するものも多い。また、目的毎に計算機を増加させていくと、ハードウェアの管理・保守コストの増大も招く。そこで、CPUやメモリを有効活用するためのミドルウェアシステムを用いて、1台の計算機ハード上に、複数の仮想ホスト計算機をインストールすることの出来る、「仮想計算機（バーチャルマシン＝VM）」は有効な手段と言える。VMを用いると、常に高い負荷が有るわけでは無いサーバーを、1台のハードウェアに集約することができる。そこで、データ収集用フィールドワークステーションや、データアクセス用Webサーバーに導入することを想定して、VMシステムR&D用のテストベンチを構築した。これを用いて、VM運用ノウハウの蓄積、一定のハードウェアリソース上で運用可能なVMのホスト数の見極め、ソフトウェアで仮想化された、VM特有のシステムタイマー遅延など、問題点の洗い出しと対策などの試験を始めた。

4-4 データベース

(1) データベース運用

加速器運転中に、運転用データベースサーバーのダウンがあった。復帰には、手動による作業が必要だった。運転制御用データベースサーバーは、高可用性クラスター構成で運用されており、本来、1つのサーバーがダウンしても、もう一つのサーバーが自動的に運転を継続する設定になっ

ているが、今回はそうならなかった。調査の結果、クラスターの設定パラメータの不備であることが判明したので、対策を講じた。今年度、データベースに追加された信号は1495点、蓄積されたデータは120GBだった。

(2) MyDAQの開発

簡易なデータ収集/蓄積/表示システム「MyDAQ」を開発した^[1]。MADOCAの特徴として、ログデータのリレショナルデータベースへの永久保存と、その全データがwebを通じて容易に確認できるというものがある。主にビームラインユーザーから、この機能を実験装置のログ取得にも使用したいという要望があったことから、簡易なデータ収集、蓄積、表示システムを新規に製作し、これを「MyDAQ」と命名し、公開した。

MyDAQの特徴は、

- ・データ収集用パソコンから、MADOCAのSVOC命令体系に類似したメッセージを、socket経由でサーバーに送る。データはそのメッセージに埋め込まれている。
- ・サーバーは、そのメッセージを解釈して、データベースに書き込む。
- ・データベース管理システムは、フリーで入手できる高速のMySQLを使用している。MyDAQの名前もここからきている。
- ・データ収集用パソコンのオペレーティングシステムは、Windows、Macintosh、Linux など広い範囲のものが混在して使用できる。
- ・パソコンの言語は、C、Ruby、Python、LabViewなどが使えて範囲は広い。
- ・信号の追加が容易である。
- ・サーバーはLinuxで開発されたが、Windowsでも動作する。
- ・WEBでのグラフ表示が可能。

などである。主にビームラインで使用されているが、ユーザーからの声をもとに、次バージョンでは、バイナリの画像データや、実験メモなども残せるように改良する。またセキュリティ、信号管理などの機能の強化も行う予定である。

参考文献

- [1] A. Yamashita and T. Ohata : “MyDAQ, a Simple Data Logging and Display Server”, P0roc. of PCaPAC’ 05, Hayama, Japan, 2005.

加速器部門

制御グループ

田中 良太郎