

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

2003年のSPRing-8加速器の総運転時間（サイクル毎の線型加速器のビーム運転開始から全系加速器の運転停止までの時間の総計）は5,419.5時間、蓄積リングの運転時間は5,328.5時間であった。図1に供用開始依頼の運転時間を示

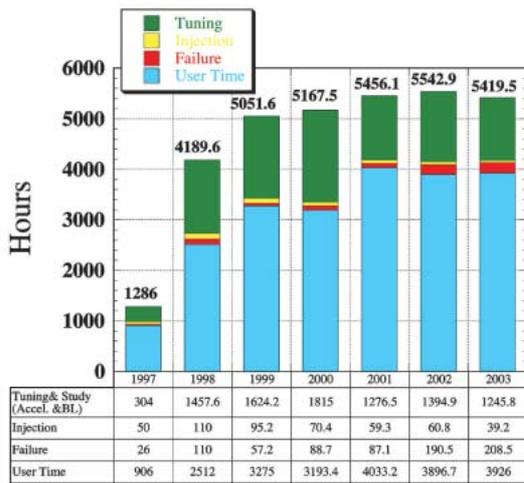


図1 1997年の供用開始以来の運転時間

す（脚注）。2003年は蓄積リングの総運転時間の74.4%にあたる3,965.2時間（内、入射に要した時間が39.2時間）が実際にユーザータイムとして利用された。2003年当初に計画されたユーザータイムは4,176時間であり、実施率は95%となる。2003年は復旧に時間を要するトラブルが数件発生したため実施率が95%に留まったが、1997年以来の平均で見ると97%を達成している。また、加速器およびビームラインの調整には21.7%に当たる1,154.8時間が使われた。3.9%に当たる208.5時間がトラブルによりユーザータイムが中断した時間である。

2003年では、多バンチモードの運転の割合はユーザータイム全体の37.2%であった。少数バンチモードでの運転の割合は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12%であった。少数バンチモードでのバンチ不純度は単バンチビーム生成システムなどの改善により、 10^{-10} 台以下を達成している。多バンチモードは完全なfull fillingではなく、イオン捕獲による不安定性を避けるために全周を12等分した位置の11箇所に約160づつのバンチ群を配置している。1バンチ当たりの電子数は 1.8×10^9 個、電流換算で60 μ A程度である。一方、セベラルバンチモード、ハイブリッドモードとして、2003年は6つのフィリングモードでの運転が実施されている。均等203

表1 蓄積リングの主要パラメーター

	HHLV Optics	Low Emittance Optics
Energy [GeV]	8	8
Number of buckets	2436	2436
Tunes (ν_x / ν_y)	40.15 / 18.35	40.15 / 18.35
Current[mA]: single bunch	13	10
multi bunch	100 (120 ^{S1})	100
Bunch length (FWHM)[psec]	32	34
Horizontal emittance[nm-rad]	6.3 ^{S2} / 6.6 ^{S3}	3.1 ^{S2}
Vertical emittance[pm-rad]	16.9 ^{S3}	8.7 ^{S3} / 3.9 ^{S4}
Coupling[%]	0.26 ^{S3}	0.28 ^{S3} / 0.13 ^{S4}
Beam size[μ m]: (σ_x / σ_y) ^{S5}		
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') ^{S5}		
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) ^{S6}	+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 ^{S7}	1.1 ^{S7}
Orbit stability (tune harmonics)[μ m]:		
horizontal (rms)	-	1.3
vertical (rms)	-	0.35

^{S1} Maximum stored beam current at machine study
^{S2} Measured by a pulse bump and scraper^{S2}, two dimensional interferometer^{S3}, and two photon correlation^{S4}

^{S5} Assuming that 0.26% coupling for "HHLV Optics" and 0.2% coupling for "Low Emittance Optics"

^{S6} With bunch-by-bunch feedback ^{S7}With correction by 24 skew Q's

パンチ（1パンチ当たりの電子数 1.5×10^{10} ：電流換算0.5mA）全周の2/21に232連続パンチ、残りの19/21に均等に18の孤立パンチを配置したモード（1つの孤立パンチには 4.5×10^{10} ：電流換算1.5mA）等がある。

多パンチモードでのビーム寿命は、全てのIDのギャップが全開状態の時、190時間に達する。ユーザー実験中では、各々のIDの状態にもよるが、ビーム寿命は約120時間である。ビーム寿命の低下の原因には、レーザーコンプトン散乱により2.4GeVガンマ線の生成を行っているBL33LEPの影響も大きい。一方、セベラルパンチの運転では、パンチ当たりの電子数が多くなるために、ビーム寿命は電子-電子散乱による効果が支配的になる。先に例に挙げた均等203パンチの場合ではビーム寿命は約30時間となる。

2003年はトラブルにより、42回のビームアポートあるいは計画外のビーム廃棄が起きている。原因は高周波加速空洞の反射、電磁石、真空機器などの冷却水流量低下、ビームラインでの誤操作などであった。また、全体のコンポーネントについて放射線による機器の劣化が進行している可能性があり、様々な観点からの調査と対策が進められている。

2002年11月から、従来の6.6nm・radの水平エミッタンスを3.4nm・rad程度まで低下させたオブティックスでユーザー運転を開始、以後運転が継続していた。しかしながら、2003年10月にインターロック動作により起こったビームアポートにより、入射部真空チェンバーの0.7mm厚の薄肉部が電子ビームによって溶解してリークが発生するトラブルが発生した。予備のチェンバーに交換してユーザータイムを再開するのに約120時間を要した。このような事態に到った原因が、低エミッタンスオブティックスでは、軌道に一番近くまでリング内側からチェンバー壁が接近している入射点で、アポートビームが集中的に失われる事になっているためであることが検討の結果分かった。そのため、現在オブティックスを以前のものに戻している。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。

（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

（大熊）

1-2 軌道安定化

2002年度には、4極電磁石内の真空チェンバーの振動の抑制により、蓄積リング内の振動の早い成分が劇的に減少した。この結果、挿入光源（ID）の発光点において、0.1～200Hzの周波数帯域の水平及び垂直の軌道変動は、各々 $4 \mu\text{m}$ と $1 \mu\text{m}$ まで低減されている。これは、ビームサイズに比べて十分小さいレベルである。

各ビームラインの光軸が常に固定されるように、2003年

9月から、各サイクルのマシン調整時に、光ビーム位置モニター（XBPM）の測定値に基づき、光軸を常にXBPMの参照点に再現させる試みを開始した。光源点から20m下流のこの観測点で、 $100 \mu\text{m}$ 以下の範囲に収まるように光軸の調整を行っている。この結果、年間を通して、ビームラインの光軸が一方向にドリフトし、ビームラインの光学系のアクセプタンスをオーバーするトラブルはなくなり、全てのビームラインの光軸の長期安定性が確保されるようになった。

これに対し、ユーザー運転中のゆっくりした軌道のドリフトは依然残っている。ユーザー運転開始一週間で合わせ込んだリングの軌道は $10 \mu\text{m}$ 程度ずれ、その後、 $\pm 10 \mu\text{m}$ の間を軌道がゆっくり変動するようになる。これは、最悪の場合、IDの発光点で約 $1.5 \mu\text{rad}$ 程度の光軸角度変動が生じることを意味する。このゆっくりした軌道ドリフトを滑らかに補正するため、軌道周期補正のアルゴリズムの改造を目下検討している。ユーザー運転中に観測される軌道変動を調べてみると、周期自動補正に使用している水平・垂直24台の高分解能ステアリングの台数が少なく、補正の自由度が足りないことが分かる。通常ステアリングがユーザー運転中の自動補正に利用できない理由は、磁場の設定分解能が約100倍悪いからである。通常ステアリングは鉄のヨークを持つので、ヒステリシスが生じる。これが大きいと電流を細かく設定しても磁場が思ったように設定できず、磁場の設定精度が要求される周期自動補正に適合しない。実験の結果、ヒステリシスの効果は予想以上に小さく、電流の設定精度を上げるだけで、磁場の設定分解能を数十倍向上できることが分かった。今後は、電流値の設定精度を改善する検討を行っていく。一方、補正用のステアリングの数を増加していくと、補正で各ビームラインの光軸が蹴り飛ばされる可能性が出てくる。これを防ぐために、光軸の正確な情報を補正アルゴリズムに組み込む必要がある。現状、ユーザー運転中のIDの光軸は、ID設置時の一時的な光軸軸出し用に、ID上下流に設置されたBPMが用いられている。このBPMはその設置目的から、機械的な安定性に乏しく、挿入光源の位相やギャップの駆動、また蓄積電流値の変化によりBPMのポジションがずれるという問題点がある。これを解決し、ユーザー運転中に精度良く、各IDの光軸をモニター出来るよう、BPMチェンバーの両脇にベローズを挿入した新しいチェンバーを試作し、テストを行った。蓄積電流の変化に対するBPM位置のずれは、半分程度に減少したが、予想した効果は得られなかった。原因は、ベローズの軸直角方向のパネ常数が大きく、挿入光源部で生じた横方向の応力がBPMチェンバーを変形させたためである。現在、この結果を考慮した新しいBPMチェンバーの設計・製作を進めている。

（田中）

1-3 Top-up運転

Top-up運転の導入は、従来の定時入射を、IDギャップを閉じた状態、かつ、MBSを開けた状態でのビーム入射 (Top-up入射) に置き換えた "Top-up Phase-1" の運用を先に行い、次に、短い時間間隔での入射による定電流運転を実現する "Top-up Phase-2" の運用を開始するという2段階で行われることとなった。Top-up運転の実現に向け、入射時のビーム損失低減化、ビーム寿命改善、入射時の蓄積ビーム振動抑制、さらに高水準の一定電流蓄積を目指したビーム診断系の改善や入射ビーム電流、及び入射ビーム軌道の安定化が進められた。蓄積リング入射損失電指数積算装置を用いたインターロックシステムが新たに構築され、放射線安全を担保する条件をクリアし、2003年10月14日から "Top-up Phase-1" の運用が開始された。引き続いて、2004年1月26日から、bunch-by-bunchフィードバックシステムがユーザー運転に導入され、低クロマティシティでの運転が可能となり、入射時のビーム損失の低減、蓄積ビーム寿命の増加が実現した。さらに、2004年2月26日から、入射パンプの漏れが少ない6極電磁石の最適設定パラメータを有する“振動抑制型Optics”がユーザー運転へ導入され、ユーザー運転での入射による蓄積ビーム振動の励起が低減された。2004年5月中の "Top-up Phase-2" の運用に向け、急ピッチで加速器の最終調整が進行中である。

入射ビーム損失抑制：実験とシミュレーションの結果に基づき、入射ビーム損失の抑制策として、(a) 低クロマティシティでの運転の実現と (b) 入射ビーム水平エミッタンスの低減の2つが推進された。低クロマティシティ運転の実現は、ビーム不安定性抑制を主目的として開発が進められてきたbunch-by-bunchフィードバックシステムの導入で可能となり、水平、垂直クロマティシティを共に+8から+2へと大幅に低減できた。さらに、2003年5月にSSBTビーム輸送路の上流に入射ビーム水平エミッタンス低減のためのコリメータシステムが設置された。このシステムは、水平ベータatron振動に関し、直交関係を有する位相位置

に配置された2つの水平ビームスクレーパーとビームプロファイル観測用OTRモニターから構成されている。蓄積リングの入射効率等を精度良く求めるために、SSBTビーム輸送路の蓄積リング入口、コリメーター直下流にビームチャージモニターが設置され、シンクロトロンと蓄積リングに組み込まれたDCCTと同期測定することで、蓄積リングの入射効率、SSBTビームトランスミッション率等が精度良く測定できるようになった。入射ビームのコヒーレント振幅を低減するため、入射軌道や入射電磁石パラメータの再調整が入念に行われた。低クロマティシティ運転、コリメータシステムによる入射ビーム水平エミッタンスの低減、及び入射軌道パラメータの精密調整による入射ビームの水平コヒーレント振幅抑制の結果、全ての挿入光源を閉めた状態でも入射効率が90%程度まで確保できる見通しを得た(図2)。入射ビームロスのみならず、中でも挿入光源の非線形磁場の果たす役割なども解析が進められている。

入射時の蓄積ビーム振動抑制：入射時の蓄積ビーム振動抑制は、水平と垂直振動についての対策が別々に行われた。水平振動対策としては、(a) 4台のパンプ電磁石の磁場波形の相似性の改善と励磁タイミングの調整、(b) 6極電磁石の最適化による入射軌道漏れの抑制、(c) 残留振動の高速補正電磁石によるフィードフォワード補正の3つを実施した。磁場波形の相似性改善のため、磁石端部の渦電流による磁場波形歪みが生じない改良型パンプ電磁石への交換が2003年夏期運転停止期間中に実施された。磁場測定によって、この電磁石の磁場波形が確認され、励磁タイミングの正確な調整がビームを用いて行われた。一方で、非線形性による入射パンプ漏れを抑える新しい方法として、入射パンプ漏れのエミッタンスを極小化する条件を用いることが提案された。その条件で6極電磁石を最適化すれば、入射パンプの漏れを抑制しつつ、ビーム入射のための安定領域が確保出来る。この考えに沿って、6極の最適化がなされた振動抑制型Opticsが設計され、性能の実験的検証が行われた。最終的に残った小さな振動は、振動を抑制する

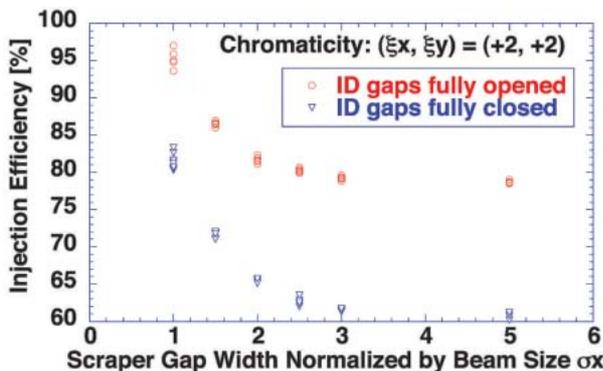


図2 コリメーターシステムのビームスクレーパー幅と入射効率

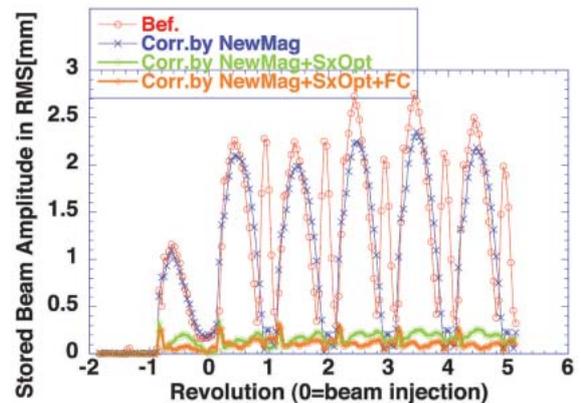


図3 パンプ軌道の改善による蓄積ビーム振動の低減(水平)

磁場発生パターンを任意波形発生装置で作成、増幅し、48セルに設置した高速補正電磁石を励磁することで低減した。上記の3つの対策を講じ、振動を水平ビームサイズの1/3以下に抑制できた。蓄積ビームの水平振動の低減の推移を図3に示す。垂直振動抑制対策としては、(a) 4台のバンパ電磁石の傾き誤差の補正と(b) 残留振動の高速補正電磁石によるフィードフォワード補正の2つを実施した。入射に同期した蓄積ビームの垂直振動データを解析し、この振動が減少するように2つのバンパ電磁石を傾けた。さらに2セルに設置した高速補正電磁石で残留振動を補正し、垂直振動を最終的に垂直ビームサイズの1/2以下に抑制できた。蓄積ビームの垂直振動低減の様子を図4に示す。

蓄積電流の安定化：蓄積電流の一定性として0.1%を達成するには、入射ビーム電流、及び入射効率の安定化等が重要である。また、蓄積電流だけでなく、個々のパンチ電流の安定性をTop-up運転に渡って維持していく事も重要になる。このため、蓄積リングのパンチ電流測定システムの構築、Top-up運転用のビーム入射制御プログラムの作成、入射器の安定性改善、LSBT振り分け電磁石のパターン化などが進められた。2003年の冬期運転停止期間には、ニュースバルへのビーム入射と蓄積リングのTop-up運転を効率的に運用するため、LSBTビーム輸送路の振り分け電磁石とその電源をパターン運転に対応した物と交換した。また、線型加速器の出射ビーム電流及びエネルギーを安定化するため、モジュレーターに供給されるRFパワーと位相のより一層の安定化が進められた。入射効率安定化に向けては、SSBTビーム輸送路に、軌道モニタリング用のOTRモニターが増設されたほか、常時使用しながら入射可能な薄膜式のOTRモニターが蓄積リング入射点に設置された。蓄積リングには、20GS/sの高速大容量オシロスコープとパワーコンバイナーを用いた高速パンチ電流計測システムが構築され、約25秒で2436のパンチ電流を5%の精度で計測可能になっている。

(田中/大島)

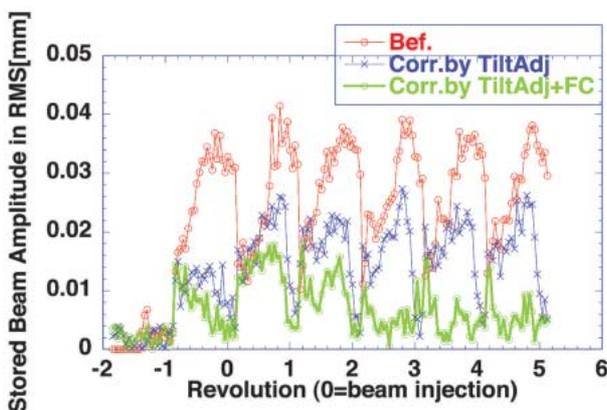


図4 パンパ軌道の改善による蓄積ビーム振動の低減(垂直)

1-4 ビーム不安定性除去装置の開発

真空封止型挿入光源や加速空洞、ビームパイプの凹凸などが引き起こす、水平や垂直方向のビーム不安定性は、蓄積リングの運転において大きな問題であり、従来はクロマチシティを非常に強くすることにより抑制していた。しかし、Top-up運転の実施に際し、この強いクロマチシティでは真空封止型挿入光源などの垂直方向の開口部が狭い部分において入射ビームの一部が失われることが判明し、クロマチシティに代わるビーム不安定性の抑制方法が必要とされた。そこで、bunch-by-bunchフィードバックの開発が行われ2003年秋に完成、長期安定性試験をへて2004年1月より利用運転に用いられ、追加調整等の必要もなく順調に稼動し、種々のビーム不安定性を抑制している。また、入射時の軌道変位により蓄積ビームが揺すられて残留振動が発生するが、この振動も、このシステムにより、従来より一桁はやく減衰させることができています。図5に bunch-by-bunchフィードバックの概念図を示す。

bunch-by-bunchフィードバックは、2nsごとにやってくる電子のパンチの位置を次々と測定して、パンチ毎に振動をデジタル信号処理により解析し、キッカーでその振動を減衰させる装置である。SPring-8の装置の特徴として、位置の測定の際の誤差がフィードバックを通してキッカーに伝わりビームを不必要に揺すってしまう現象が問題となることに気づき、そのビームの揺れをミクロン以下に押さえるために必要な測定精度を求める式を導出し、その測定精度を実現するための手法を開発したこと、また、超高速での信号処理が可能なFPGAを用いて従来では数十台のDSPを用いていたシステムに対して、数台のFPGAによるシステムとすることを可能とし、システムの簡略化および低コスト化がはかれていることが挙げられる。

測定精度の向上に向けては、ストリップライン型の高感度高精度位置モニタの開発を行い、また同時に、従来の直接

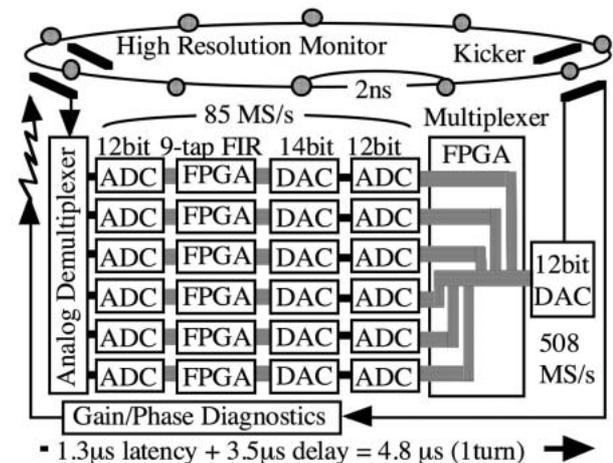


図5 bunch-by-bunchフィードバックシステム

サンプリングではADCの分解能は8-bitが上限であり、それでは分解能が不足していたのに対して、SPring-8では高速のアナログ分配器をその原理から開発し、それによりパンチの位置信号を3パンチごとに切り出してADCに入力する周波数帯域を低減し、これにより12-bit ADCの適用を可能として高精度信号処理を行っている。

図6にはフィードバックによる減衰時間の短縮の様子を示す。図7はビーム不安定性の抑制試験を行ったときのビームの水平方向の振動のスペクトルを示している。上はフィードバックが切られているときであり、多くの振動のピークがみられる。下はフィードバックが入っている時であり、ピークが消えておりフィードバックがビーム不安定性を抑制していることがわかる。残っているピークはビーム不安定性によるものではない

また、より高輝度の光を発生するために、電流の増強や低エネルギーでの運転が検討されているが、その場合にはビーム不安定性は非常に強くなるが、それにもこのシステムは容易に対応することが可能である。

(中村)

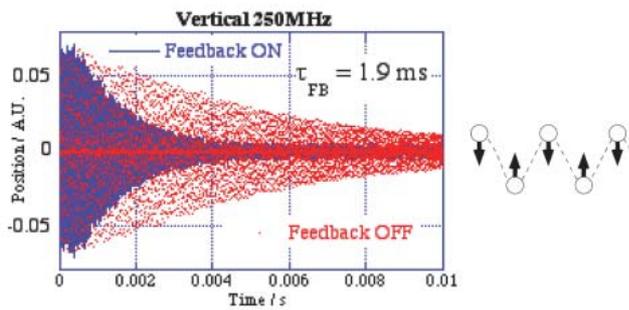


図6 フィードバックによる減衰時間の短縮。ビームを強制振動させ、強制力を切ったときの減衰を示す。

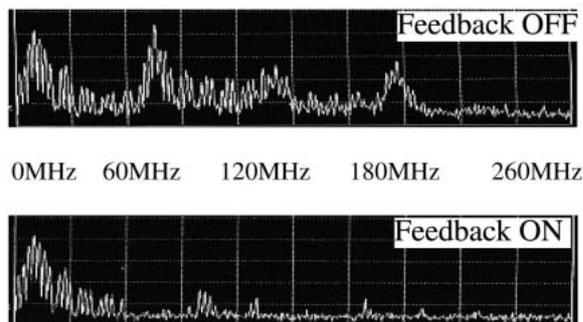


図7 ビームの水平方向の振動のスペクトル。上はフィードバックが切られているときであり、多くの振動のピークがみられる。下はフィードバックが入っている時であり、ピークが消えておりフィードバックがビーム不安定性を抑制していることがわかる。残っているピークはビーム不安定性によるものではない。

1-5 加速器診断

(1) 加速器診断

加速器診断では、偏向電磁石からの放射光を利用して、蓄積リング光源電子ビームの診断や加速器を構成する機器の試験・開発等を行っている。また、遠赤外線レーザー光と蓄積リング電子ビームとの逆コンプトン散乱による10MeV領域のガンマ線の生成試験を進めている。

偏向電磁石からのX線放射光をフレネルゾーンプレートにより結像させて得られる電子ビーム像をX線ズームング管を用いて観測し、電子ビームのサイズ測定を行った(図8)。単色X線を得るために用いている二結晶分光器の結晶ホルダーを、結晶のクランプ歪みが生じないように改良し、光源電子ビームの二次元像が得られた。X線ビームサイズモニターによって測定した電子ビーム像の一例を図9に示す。このときの蓄積リングのラティスは低エミッタンスラティスで、フィリングパターンとビーム電流は、マルチパンチ、100mAであった。ビームサイズは、挿入光源が全てギャップ全開の状態、水平が $x = 118\mu\text{m}$ 、鉛直が $y = 14\mu\text{m}$ であった。測定を進めていく中で、100mAの蓄積ビームからの放射光を減光せずに観測する場合に、X

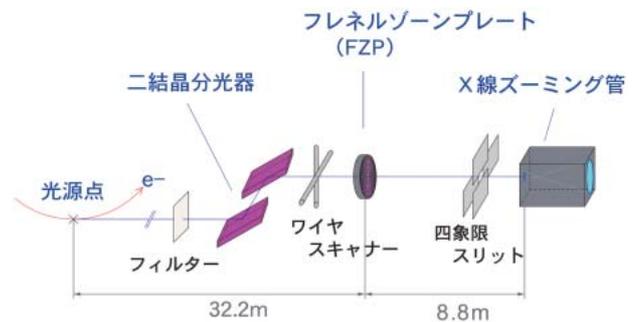


図8 X線ビームサイズモニターの概念図

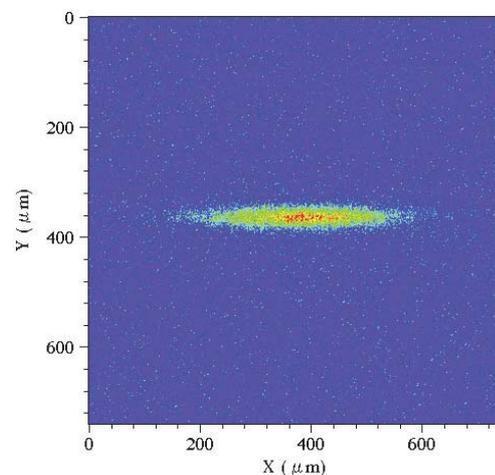


図9 X線ビームサイズモニターで測定した光源電子ビーム像の例

線ズームング管の入射光電面等が劣化することがわかってきた。今後、この対策を行う予定である。

Top-up運転に向けた蓄積リングの調整運転に対応して、バンチ電流の測定、Top-up入射に伴う蓄積ビームの振動や実効ビームサイズの増大の測定などを行った。セベラルバンチ運転時のTop-up入射では、ビームを入射するRFバケットを選択するために、各バンチ毎のビーム電流を精度良く測定することが重要である。可視光放射光を利用した光子計数法により各バンチ毎のビーム電流測定を行い、測定精度の評価を行った(図10)。Top-up運転がユーザー利用実験に影響を及ぼさないためには、入射に伴う蓄積ビームの振動を抑制することが重要である。鉛直方向の開口を狭めたスリットで切り出した白色X線の強度変動をイオンチェンバーを用いて観測し、Top-up入射に伴うビームの鉛直方向の振動を測定した(図11)。蓄積ビームの振動の影響は、ミリ秒オーダーの積分時間での測定では、電子ビームの実効サイズの増大として現れる。X線ビームサイズモニターを用いて、Top-up入射後の実効ビームサイズの変動を積分時間1msで測定した。

放射光を利用して加速器の構成機器を試験・開発するために、光学ハッチ内の輸送チャンネルに、フォトンアップソーパーの照射試験を行うための真空チェンバー、白色X線を大気中に出す為のベリリウム窓等を整備した。また、大気中に出した白色X線を照射し、電磁石コイルの放射線損傷の加速試験も行われた。

(2) 加速器診断

加速器診断 は、蓄積リング直線部に設置する挿入型光源装置やその上下流の偏向電磁石の端部磁場からの放射光を利用して光源電子ビームの診断や高耐熱機器・高耐放射線機器等の開発を行う為の装置として整備を進めている。また、遠赤外線レーザー光を蓄積リングに導入し直線部での電子ビームとの逆コンプトン散乱により10MeV領域の大強度ガンマ線を生成させる実験が計画されている。

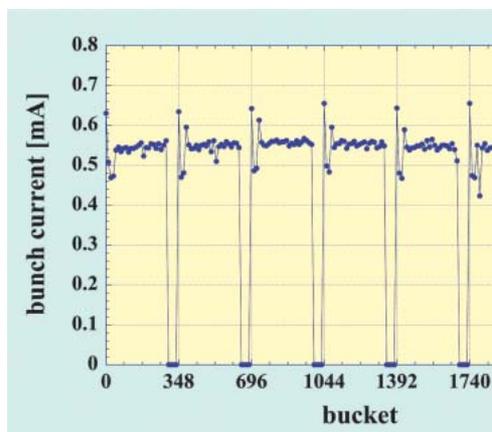


図10 バンチ電流測定の場合

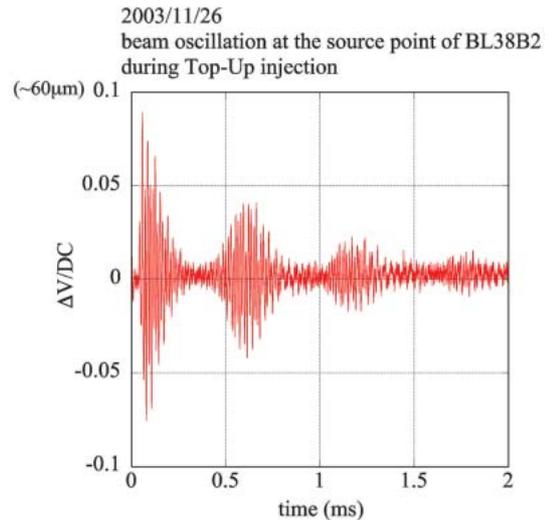


図11 ビーム振動の測定例

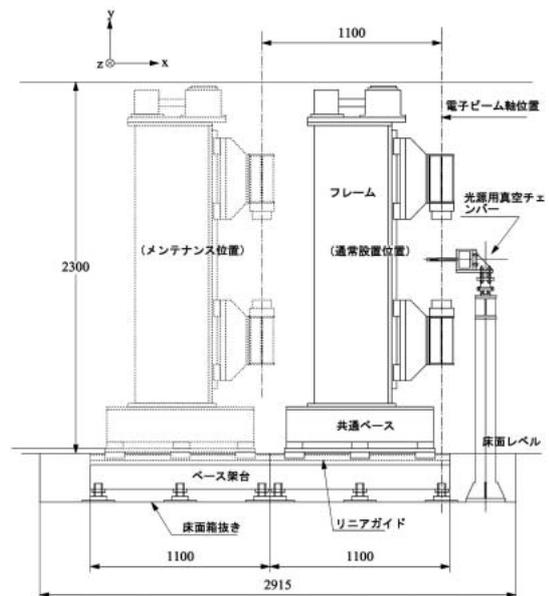


図12 加速器診断 に設置される光源装置の概念図

2003年度は、高耐熱機器・高耐放射線機器等の開発に必要な高パワー光源の設計検討、使用目的に応じて各種の光源用磁石列を効率的に取付・交換を可能にするための光源挿入装置の設計検討を進めた(図12)。また、蓄積リングの直線部にOut Vacuum型の挿入光源装置を設置するための真空チェンバー、高パワー光源に対応するための基幹チャンネル用アップソーパー等の設計・製作を行った。

(高野 / 正木 / 田村 / 大熊)

1-6 遠赤外レーザーを用いたガンマ線の生成

電子ビームと遠赤外レーザー光との逆コンプトン散乱により、10MeV領域の狭い角度拡がりを持った直線偏光また

は円偏光のガンマ線を生成する試験を行っている。MeV領域ガンマ線を利用した核物理、核物性等の研究の展開が期待されるだけでなく、生成されたガンマ線の偏光度の測定などから電子ビーム診断を行うことも考えている。SPring-8で遠赤外レーザーコンプトンを行うメリットとして、SPring-8蓄積リングの運動量アクセプタンスによるエネルギー巾 ($\pm 200\text{MeV}$) が十分に広いので逆コンプトン散乱により蓄積電子が失われることがなく、蓄積ビームに影響を与えない事がある。また、高エネルギー低エミッタンスの電子との相互作用であるので、生成線の角度拡がりも従来にない小さいものとなる。

前年度までに、CO₂レーザー励起の高出力の遠赤外レーザーの開発を行ってきた。CH₃OHを媒質とした遠赤外レーザーで高出力が得やすい118.8 μm の連続発振において、出力ミラー直近で約1.6Wの出力が得られている。

長波長レーザーである遠赤外レーザー光は回折拡がり大きいので、実験ホールに設置された遠赤外レーザーからの光を、乾燥空気を中に流したアクリル製の中光導波管を用いて伝送している。蓄積リング収納部への導入には、遮蔽壁天井部の貫通孔に光導波管を通して行った。これらのシステムを2003年度に設置した。伝送された遠赤外光は、基幹チャンネルの途中に設置された真空中に最終ミラーを格納したチェンバーの窓から入射する。現在、基幹チャンネル上流部での遠赤外光のプロファイルを測定するモニターの製作などを行い、試験的なガンマ線生成試験を開始している。

遠赤外レーザーを用いた逆コンプトン散乱による10MeV領域のガンマ線生成を加速器診断で行う計画を進めている。電子ビームとの相互作用領域になるべく近い所から効率よくレーザー光を導入するために、チェンバー内に可動式ミラーを組み込んだ蓄積リング真空系の一部であるクロッチチェンバーを製作し、蓄積リングに組み込みを行った。加速器診断は先に述べたように約5mの直線部を有しており、レーザー光の高効率導入と組み合わせることにより、高強度のガンマ線生成が期待できると考えている。

(大熊)

加速器部門
運転・軌道解析グループ
大熊 春夫

2. 線型加速器グループ

2-1 運転状況

2003年における総運転時間は、約5,420時間であった。大電力クライストロン変調器の2003年末までの累計運転時間は、ヒーターオン時間で約48,300時間、高圧オン時間で約40,500時間に達した。

2003年の運転中に発生したインターロックフォルトの内、最も頻度の高いのは、例年通りRFフォルトである。

その内訳のほとんどは、サイラトロンの自爆であった。電子銃フォルトもやや目立つが、そのほとんどがカソードヒータ立ち上げ時の真空悪化が原因である。

2003年中に起こった故障の筆頭は、電子銃カソードのソケット損傷である。このソケットには、グリッドおよびヒータに給電するフィーダが接続されるが、このフィーダを装着する際に相手側のソケットを損傷してしまい、結局カソードそのものを交換した。その他、電磁石電源二台の修理を行い、電子銃変調器用のサイラトロンを一本交換した。

2-2 加速器の改良および安定化

2004年5月から、蓄積リングの蓄積電流をほぼ一定に保つトップアップ運転が予定されている。たとえばビーム電流安定度を0.1%に保つとすると、蓄積ビームの寿命にもよるが、数十秒から数分の間隔でビームを常時入射する必要がある。すなわち、リニアクでは、トップアップ運転中は、クライストロン変調器のフォルト等による加速中断は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。そのためリニアクには従来とは比較にならない安定度と信頼性が求められる。

SPring-8リニアクでは、冷却水の温度安定化、エネルギー補償システム(ECS)の導入、ビームパルスと2856Mhz RFとの完全同期化など、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トップアップ運転に大きく寄与すると期待される。

以下は、特に上記トップアップ運転を念頭に置いて、2003年度に行われたリニアクの改良である。

(1) 高速応答型偏向電磁石

SPring-8とNewSUBARUへの頻繁な入射を両立させるためには、ごく短時間で電子ビームを両方のリングに振り分ける必要がある。そこで、1秒周期でパターン運転可能な積層型偏向電磁石を製作し、従来のブロック型偏向電磁石と入れ替えた。

この偏向電磁石は残留磁場を少なくするために、ヨークとして厚さが0.5mmの50A400珪素鋼板を積層している。これにより旧ブロック型偏向電磁石では30Gauss程度あった残留磁場を10Gauss以下に抑えた。また、従来使用していた直流電源も高速励磁可能な電源に置き換えた。この偏向電磁石は、200msで立ち上がり、最大0.9Tの磁場強度を発生する。高速応答型偏向電磁石、および電源の主要パラメーターを表1にまとめた。

パターン励磁中、この偏向電磁石内の真空チェンバーには渦電流が発生する。この渦電流が作る過度的な磁場のために、チェンバー内磁場の立ち上がり時間は、磁場励磁電流の立ち上がり時間より遅くなる。この遅延時間を調べる

ため、励磁タイミングに対するビーム偏向角度を測定した。ビーム位置測定は、偏向電磁石後方に設置されているストリップライン型ビーム位置モニターによる。測定結果は図1の通り。励磁開始から200msの立ち上がり時間以降、さらに150msの時間を要して、規定のビーム偏向角度に到達している。

表1 高速応答型偏向電磁石および電源の主要パラメーター

型式	積層鋼板構造レクタングュラー型
最大磁場	0.9T
偏向角	15°
磁極長	950mm
電磁石コイル	9列2層×4コイル72turn
立ち上がり時間	200ms
電源電圧・電流	100V / 400A
電源電流安定度	0.3 × 10 ⁻⁴

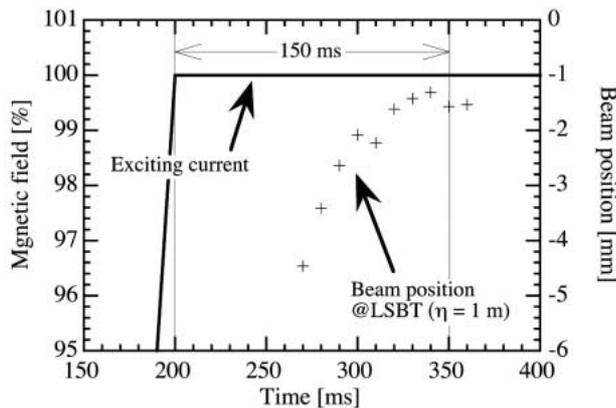


図1 高速応答型偏向電磁石励磁の際、真空チェンバーに発生する渦電流の影響。

(2) トリガ系

クライストロン増幅器の故障時には、従来、運転停止中の予備加速ユニットを故障ユニットの代わりに立ち上げて、線型加速器の運転を再開していた。このとき、再立ち上げの所要時間は予備加速ユニットのRFコンディショニングで決まり、1時間程度が通例である。この立ち上げ時間短縮のためには、ビーム入射中においても予備加速ユニットに継続したRF供給を行っておく必要がある。ビーム加速に影響なく予備加速ユニットへRF供給をおこなう(待機運転)のために、10Hzのクライストロン変調器電源駆動用トリガ信号を、1Hzのビームトリガ信号に同期して間引きするマスク回路を導入した。このマスク回路はクライストロン変調器電源へ分配しているトリガ信号生成部に設置され、任意の加速ユニットに対して、待機運転の設定が可能である。

現在、11台のクライストロンで励振されている加速ユニットがビーム加速に寄与し、2台のクライストロンが待機

運転状態にある。待機クライストロンからは予備加速ユニットに常時RF供給がおこなわれている。これらの加速ユニットはRFコンディショニングを完了した状態にあり、緊急時の加速ユニットの切り替えは迅速に行える。

(3) クライストロン変調器

SPring-8の変調器は、IVR式可変直流電源 + DeQ型電圧安定回路を採用している。IVRの制御が十分精密ではないため、整流後のDC高電圧が、DeQ型電圧安定回路が十分な安定度を確保できる電圧範囲を外れてしまうことが少なくない。SPring-8のサイトにおける400V系ACライン電圧の一日の最大変動範囲はおよそ5%であるので、変調器によってはDeQ型電圧安定回路が効果的に電圧制御出来ず、ACライン電圧の変動が抑制しきれずに明らかにクライストロン電力の変動として見えてしまうこともある。そこで以下の対策を行った。

- 1) 高圧モニタ回路の分解能を改善する
- 2) IVRをパルス駆動してIVRを微調し、DeQ型電圧安定回路が十分な安定度を確保できる電圧範囲内に直流高電圧を安定化する

これらの改良を施して、直流高電圧の長期変動を約2.5%以下に抑え、その結果、PFN電圧の長期電圧安定度は、従来の1/2以下である0.03%rmsに向上したことが確認された。

(4) 新型電子銃電源

現在使用中の電子銃電源は、当初から高圧電源部の放電など不具合が多く、また今ではその部品に製造中止品が少なくないなど、保守が難しくなってきた。そこで、新しい電源を製作することにし、以下の方針をたてた。

- 1) 変調器回路の構成はインバーター電源 + PFN
- 2) サイラトロンのかわりに半導体スイッチを使用しやすくするため、一次高電圧を下げ、パルストランス昇圧比を1:30に上げる。これは、変調器高圧部の小型化、高信頼化にもつながる。
- 3) 制御システムはPLCおよび液晶タッチパネルにより構成し、スイッチやメーターリレーは極力使用しない。これにより制御系の高信頼化および高機能化を図る。

製作された電源の仕様は表2の通りである。

表2 電子銃変調器の仕様

尖頭出力電力	15MW
平均出力電力	1.8kW
PFN充電電圧	15kV
パルス幅(半値幅)	~ 4μs
パルス幅(平坦部)	~ 1μs
パルス立ち上がり時間	~ 1.5μs
出力インピーダンス	6W
最大繰り返し	60pps

新型電子銃電源は2003年度末に完成し、現在調整中である。2004年度は、試験調整および耐久試験を続け、2005年度に現在使用中の電源と交換する予定である。

2-3 フォトカソードRF電子銃開発

(1) レーザ

レーザークリーンルームを大きく拡張し、作業性と機能性を高めた。またレーザー安定化のため室温の安定度を ± 0.3 度以下にまで高め、湿度は55%近傍に制御して、光学系の誘電体が帯電して埃を吸着しないようにした。埃が焼き付くとレーザーの性能を大きく損ねるからである。レーザー源自体も温度安定化を施した。その結果、レーザーエネルギーの安定度は1.5%rms程度にまで改善された。

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。我々は過去にパッシブな方法で空間プロファイルを改善し、低エミッタンスを得るのに成功したが^[2]、現在は、次のような、より自由度の高いアクティブな方法を開発中である。すなわち、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ことができる。

(2) RF電子銃

従来のRF電子銃試験装置では、遮蔽室が狭く、機器を増設するなどの増強ができなかった。そこで、2003年に遮蔽室を拡張し、RF電子銃2台および3m加速管1本を設置した。

RF電子銃に加速管を増設することにより、ビームエネルギーは30MeVまで増強され、OTR光等を利用したパンチ長測定や、Qスキャン法によるビームのエミッタンス測定も容易になった。計算によれば、1nCのパンチをエミッタンス約2 mm-mradで加速可能である。2003年度末現在、レーザーを含めた機器調整を続けており、調整が完了すればすぐに30MeV加速の試験を開始する。

もう一方の単独のRF電子銃試験装置では、カートリッジ型高量子効率カソードの開発^[3]を続けている。

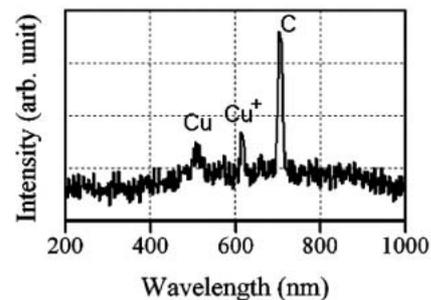
2-4 高電界試験

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。

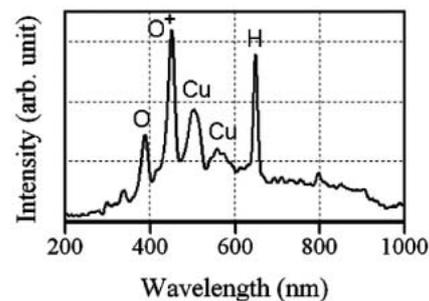
我々は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同でSバンド加速管の高電界試験を行ってきた。これは、高エネルギー加速器研究機構で使用されている進行波型加速管と同型の加速管に大電力RFを供給し、どれくらいの高電界を生成できるかを調べる実験である。加速管は、その内部に高圧純水洗浄を行ったもので行っていないものを用意された。

RFコンディショニングは、洗浄済みの加速管の方がはるかに早く進み、到達する加速電界強度も高いことが、KEKでの実験で確認された。我々は、RFコンディショニング中の放電発光に注目し、放電発光の高速分光および高感度質量分析等の手段を用いて、加速管内の高周波放電を分析することにより、RFコンディショニングによってどのような変化が起こり、そして高周波放電の原因は何なのかを探ろうとした。分光は分光器と映像増倍管を組み合わせたイメージング分光装置で行っており、可視光スペクトルをビデオ記録できる^[4]。

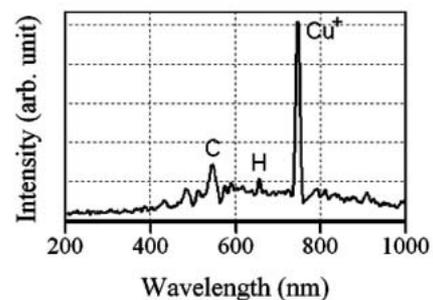
一方、高圧純水洗浄の効果については、銅の試験片を用いて洗浄試験を行い、その後試験片表面に付着している物



(a) 未洗浄、コンディショニング終了(40MV/m)



(b) 洗浄済、コンディショニング途中



(c) 洗浄済、コンディショニング終了(45MV/m)

図2 未洗浄および洗浄済み加速管のコンディショニング中に観測された放電発光スペクトルの例。()内の値は到達した加速電界強度である。

質を分析した^[5]。CHあるいはOH等の分子結合は、フーリエ変換赤外線分光（FTIR）により、その存在を調べた。また、X線光電子分光（XPS）も一部の分析に用いた。

以上の分析の結果、以下のような知見^[5]が得られた。

- (1) 放電発光の分光からCu⁺イオンの存在が明らかで、放電時に銅プラズマが生成している（図2参照）。
- (2) 放電分光から、高圧純水洗浄によりCを含む炭素化合物がかなり除去されていたことが明らかとなった（図2(a)と(c)を比較）。しかし、FTIR分析によれば、なお取り切れていない炭素化合物が残っている。
- (3) コンディショニング後の未洗浄加速管カップラ部内壁に黒く変色した部分が認められたが、XPS分析によれば、これはグラファイトであった。
- (4) 顕微鏡による表面観察では、高圧純水洗浄は圧力5MPa以上では銅の表面を傷めていた。
- (5) FTIR分析によれば、洗浄圧力を2MPaまで下げても銅表面にOHを侵入させている可能性がある。コンディショニング途中の放電スペクトル図2(b)でも、OおよびHが認められる。

今後、これらの知見を元に、高電界でも放電を起こしにくいRF空洞内壁の実現に取り組む予定である。

参考文献

- [1] H. Hanaki et al.: “Beam Stabilization in The SPring-8 Linac”, APAC2004, Gyeongju, Korea.
- [2] 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.
- [3] H. Dewa et al.: “S-band Photocathode RF gun at SPring-8”, APAC2004, Gyeongju, Korea.
- [4] H. Tomizawa et al.: “Spectrographic approach for the diagnosis of rf breakdown in accelerating rf structures”, Applied Surface Science, to be published.
- [5] H. Tomizawa et al.: “高圧超純水洗浄の無酸素銅表面に対する影響について”, 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003, Tokai.

加速器部門
線型加速器グループ
花木 博文

3. リンググループ

3-1 シンクロトロン

(1) トップアップ運転対応SSBTスリットシステム

これまでのユーザー運転では、蓄積リングの電子ビーム寿命時間を考慮し、電子ビームの減少分を補うため、マルチバンチ運転で1回/日、単バンチ運転（単バンチ

運転をベースにしているセベラルバンチ運転も含む）で2回/日の追加入射を行っており、放射光の強度は時間と共に変化し、入射の間放射光の利用を数十分程度中断している。このような問題点を回避し、放射光の強度を一定化するために、放射光の利用実験中にトップアップ運転を行う。SPring-8では、単バンチをブースタシンクロトロン（以下、シンクロトロン）にて生成しているため、単バンチ（セベラルバンチ運転も含む）でのトップアップ運転が可能である。

シンクロトロンからの出射ビームの水平方向エミッタンスは、放射損失により予想されるナチュラルエミッタンスと誤差の範囲で一致した^[1]。しかし、蓄積リング挿入光源のギャップを閉じたまま入射する場合、現状のビームサイズでは入射ビームの一部が磁極に当たり、挿入光源の磁極を減磁してしまう可能性がある。シミュレーションの結果、トップアップ運転を実現するためにはエミッタンスをさらに小さくする必要のあることがわかった。エミッタンスを実効的に小さくするため、シンクロトロンから蓄積リングまでのビームトランスポート（SSBT）にスリットシステムを設置した。スリットの形状はナイフエッジ型であり、水平方向ビームプロファイルを整形する。スリットは左右両方向からステップモータで制御して挿入し、ビーム分布の裾を削る。ビームのエミッタンスを実効的に小さくするためには、位相空間において、x、x'の両方を削る必要がある（図1）、2組のスリット（SL1A_ss、SL1B_ss）を位相間隔 $\pi/2$ で設置した。これらのスリットは、ビーム分

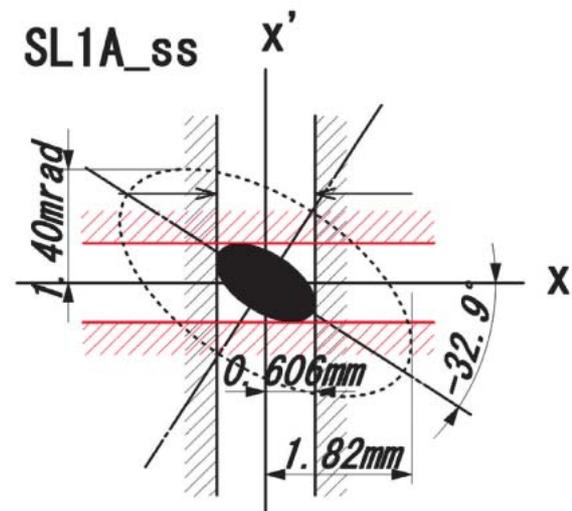


図1 SL1A_ssの位置の水平方向位相空間と位相楕円。点線は位相楕円の設計値（3）を示す。楕円の面積がエミッタンスである。エミッタンスを小さく（黒塗り）するためにはx、x'両方向カットする必要があるが、実空間でカットできるのはx方向だけである（実線）。さらに位相が $\pi/2$ だけ進んだ場所（SL1B_ss）でカットするとx'方向がカットできる（赤）。

布の裾を確実に削除するため、SSBTのなるべく上流区間で、且つ水平方向ディスパージョンがほぼ0である場所に設置した。スリットの開口幅を変えながら蓄積リングでのビーム損失を測定した結果、開口幅をビームサイズに対して ± 1 とした場合、当面の目標である入射ビームの損失を20%以下とすることができた^[2]。

スリットでビーム位置が変動すると、スリット前後のビーム通過率が変化し、1ショット当りの入射電流値が変わるので、スリットのビーム位置を連続的に監視する必要がある。そこで、スリットの上流側表面をビーム軸に対して

45度にし、スリット表面で発生したOptical-Transition-Radiation (OTR) を上方に導き観測する(図2)。スリットに当たった電子数に比例した強度のOTRが発生するため、削られたビームのプロファイルが観測できる。スリットSL1A_ssにおいて開口幅 ± 1 とした場合のOTRの測定例を図3に示す。このプロファイルからビームの拡がりやガウス分布でフィッティングしビーム中心位置を求めた。今後、ビーム中心位置、サイズ等をショット毎にデータベースへと記録する予定である。

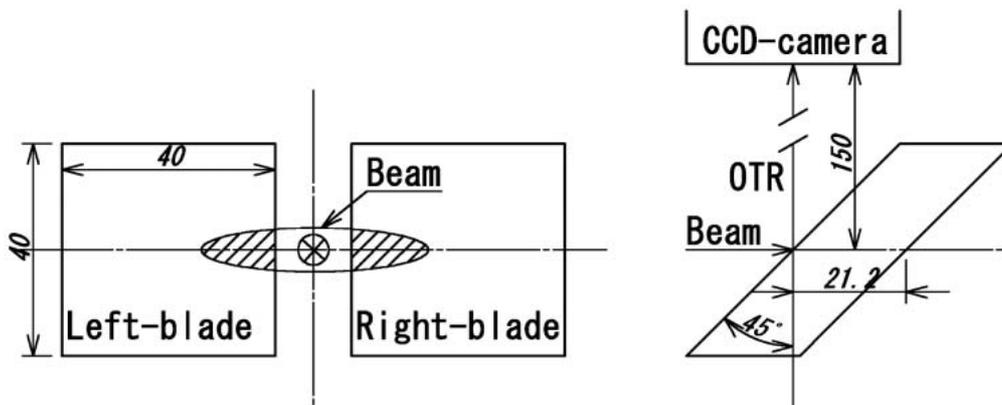


図2 スリットの概略図。スリット上流側表面をビーム軸に対して45度傾けて、真上にOTRを取り出せる構造とした。

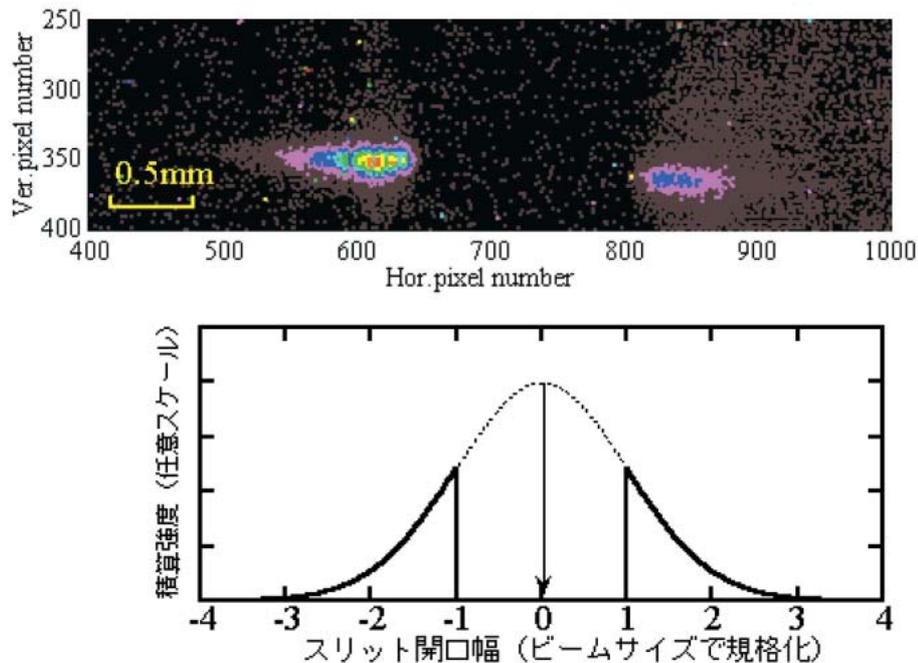


図3 スリット表面からのOTRの相対的強度分布(上)。強度は赤が最高、黒が最低である。軸の数值はCCDカメラのピクセル番号であり、 $8.1\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。測定データを水平方向に積算し(下図、実線)、ガウス分布でフィッティングしてビーム中心位置を求めた(下図、点線)

- [1] K. Fukami et. al.: “Ejected Beam Emittance of the SPring-8 Booster Synchrotron”, 8 th European Particle Accelerator Conference, EPAC2002, 2002, June, Paris, France.
- [2] K. Fukami et. al.: “Beam Collimation System for the SPring-8 Top-up Operation”, 3 rd Asian Particle Accelerator Conference, APAC2004, 2004, March, Gyeongju, Korea.

(深見 健司)

3-2 蓄積リング

(1) 電磁石関係

1) 電磁石コイルの放射線損傷の加速試験

四極電磁石コイルの放射光による損傷加速試験を実施した。テストピースを作成し、偏向電磁石からの放射光を 10^6 Gyから 10^8 Gy照射した。これらのコイル絶縁物に対しスクラッチ試験を実施した結果、 10^6 Gyの照射で一端硬度が増すが、その後照射量が増すに従って絶縁物の硬度は低下し、 10^8 Gyでは 10^6 Gyのときの3%の硬度になることがわかった。これは照射によりエポキシ樹脂の炭化が進んで行ったためと考えられる。しかし、完全に炭化しているわけではなく、抵抗はギガオーム以上あった。現在のトンネル内における電磁石の最大照射量は 2×10^7 Gyと推定され、今後もコイル間の抵抗値が問題となるまで低下することはないと予想される。また加速試験とは別に長直線部改造工事で取り出した電磁石のコイルを調査した。散乱放射光があたっている部分のコイルの色は変色していたが、黒く炭化した状態には至っていなかった。また強度も特に低下した状態ではなかった。(積算照射量は 6×10^6 Gyと推定される。)

2) 軌道フィードバックのためのステアリング磁場のチェンバーによる減衰測定

厚さ3.3mmのアルミニウムチェンバー、1.6mmと1.0mmのSUSチェンバーに対してチェンバー内の磁場の減衰と位相の遅れを10kHzまで測定した。その結果アルミニウムチェンバーは渦電流の影響で磁場の減衰は1kHz以上で7%以下となってしまう、位相も500Hzで180°遅れてしまう。このことはアルミニウムチェンバーは実際には使えないことを意味している。これに対しSUSチェンバーは磁場の減衰が10kHzで40%程度にとどまり、位相の遅れも180°以下であることから十分実際のフィードバックに使えることがわかった。

3) ステアリング磁場のヒステリシスと応答特性の測定

蓄積された電子ビームの軌道は、鉄心のステアリング電磁石により補正されてきた。このステアリング電磁石の磁場強度は、垂直が 13340 G \cdot cm、水平が 26680 G \cdot cmで、電源は ± 5 Aで16ビットのRIOを使用し

ている。そのため、磁場の変化の最小単位が 0.81 G \cdot cm(電流の変化の最小単位は 0.000153 A)となり、ユーザー運転時の自動軌道補正のとき軌道がなめらかで連続的に変化せず、軌道の飛びが見受けられた。そこで自動補正には磁場強度が 300 G \cdot cmの空心のステアリングを用い、電源は通常のステアリング電源と同じ ± 5 A電源を使うことにした。通常のステアリングでも電源のRIOのビット数を増やすか、電流の最大値を小さくして磁場の変化の最小単位を小さくすれば、軌道フィードバックに使用できる可能性がある。鉄のヒステリシスの影響が懸念されたので、実際にヒステリシスの影響を調べた。測定は(1) ± 5 A、(2)2A \sim 2.1A、(3)2A \sim 2.01A、(4)0.2A \sim 0.2016A、(5)0.2A \sim 0.200145Aの場合について行った。(4)は、現行の電源の最小ビット電流 0.00016 Aステップで電流を変化させて、磁場の変化を測定したものである。(5)は、さらに電源のDAC出力の設定を1/11にして、最小電流ステップを 1.5×10^{-6} として測定したものである。いずれも電流を上げ下げすると閉じたループを作り十分に1:1の関係を得ることができた。また 1.5×10^{-6} だけ電流値を変化させた時、磁場は電流に追従して変化するのが認められた。

以上の結果より現行の鉄心のステアリングでも電源を改造して最小電流出力を現在の1/10程度に小さくしても十分に軌道のフィードバックに使える見通しを得た。

4) DCセプタムの漏れ磁場測定

3台のDCセプタム(Sep 5、Sep 6、Sep 7)の蓄積軌道上での漏れ磁場が大きいと、トップアップ運転時に蓄積中の電子の軌道が変化する。この軌道変化を小さくするため、漏れ磁場の小さなセプタムを製作し、既に設置してあるセプタム(初号機)と2001年夏に交換した。さらに改良したセプタム(改良機1)の予備機(改良機2)も2002年度に製作した。今回、初号機と新たに製作した予備機(改良機2)の漏れ磁場測定を実施した。

(2) アライメント関係

1) HLS

2003年11月に水連管レベルシステム(HLS)を蓄積リングのアンダーパス部の収納部に設置した。セル8からセル10の間に6個のセンサを収納部床面に固定し、床のレベルの変動を常に観測している。図4のHLSの値はアンダーパス部の上流側の中央部に対するレベル差を示しておりこれが減少しているのは気温の上昇に伴い春から夏にかけて1日 3μ m中央部が上昇していることを示している。床面の変動のため9セル

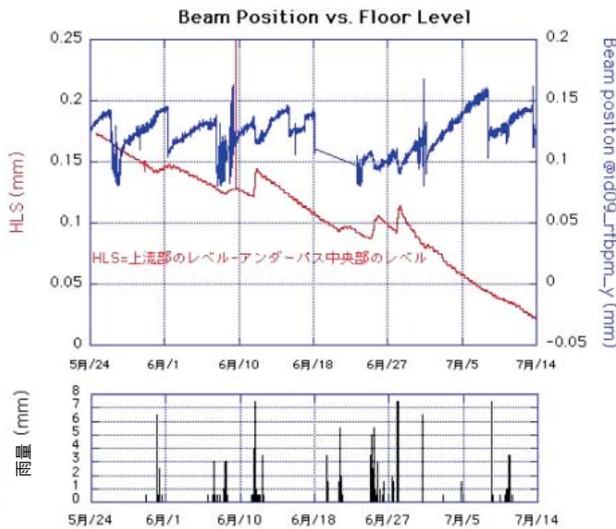


図4 HLSと雨量

ID BPMで観測したビーム軌道の上下方向変動はこれと逆になっており大きさもほぼ等しい。さらに降雨により上流側が短期的に上昇するのがわかる。この時もID BPMにその影響が出ていることがよくわかる。さらにHLSやBPMの減衰の時定数はちょうど水位のそれとよく一致していることがわかっており、水位が床のレベルを押し上げていることがはっきりした。このようにHLSはBPMの変動の原因をBPMの回路や磁石による軌道の変動ではなく床面そのものの変動であることをはっきりさせるのに役立っている。

2) 架台内直線性の測定

建設時以降初めて、架台上の4極と6極、計5~7台の磁石の直線からのずれを建設時と同じレーザとCCDカメラで測定した。132架台測定した中で1割程度は架台中央部が数十ミクロン沈下していることがわかった。これは架台を支える3枚のベースプレートの内中央部が面積当たりの荷重が両端に比べかなり大きいことが原因と考えられる。

3) 電磁石の傾き測定

1996年以降8年において4極と6極電磁石の傾きを全周測定した。据え付け時は水平であったものが、広い範囲で同じような傾きを示しているところから床面がうねったと推測される。今回の測定では96年に見えていた床のうねりがさらに拡大しているが最も大きなところで0.2mrad程度である。

4) 地盤微小変動測定装置

蓄積リング内周側の160m観測井には上下、東西、南北方向3成分の振動計が2式、埋設しており、周期50

秒から0.01秒程度まで測定することができる。常時、0.01秒周期で測定し、この出力は記録している他、地震時には中央制御室でその振動波形を見ることができるよう測定系を整備した。電子ビームが振動した時の原因の特定に役に立つことが期待できる。図5に、例として地震時振動の一つの成分と分散がある部分での軌道の変動を示した。このようなデータの解析から地盤表面の振動の方位による異方性などSpring-8の載っている地盤の特性がわかってくるものと期待される。

また、水深50、30、20、10、5mのところ白金抵抗温度計を設置し10分ごとに記録をはじめた。周長の季節変動等考える場合、地表面付近でのモデルをつくる必要があるが、この垂直方向の温度分布は、実測値として重要である。

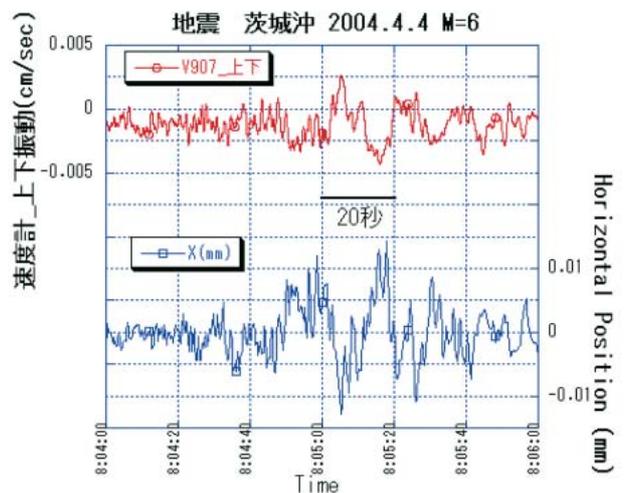


図5 上段：地盤振動、下段：電子ビーム軌道の変動

(3) 軌道安定化関係

200Hz付近までのビーム振動の主たる原因は4極磁場中の真空チャンバーの振動であることがはっきりしている。真空チャンバーの振動の原因はそこを流れる冷却水によるものと、床の振動が架台を通して増幅され伝わってくる2つが主である。磁石の振動が架台を揺らしチャンバーを揺らす寄与は、垂直方向はわずかで水平方向には45Hz付近に少しある程度である。図6は収納部の天井(パワーにして100分の1)と床面での振動を場所ごとに示した。冷却機械室の付近を除くとよく一致しているのがわかる。その他天井と床で同時測定を行い、振動の位相を解析した。このような結果から、床からくる垂直方向振動は冷却機械室に近い±1セル(±30m)程度は冷却機械室から床を通して伝わってくる振動が主であるが、それ以遠では収納部天井の冷却水配管のサポートからの振動の寄与が大きいと考えられる。

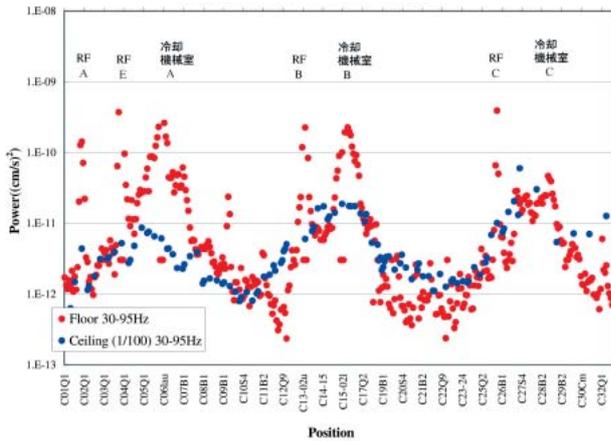


図6 収納部床と天井における垂直方向振動

(松井 佐久夫)

(4) アブソーバ遮蔽

四極電磁石のコイルおよび冷却水ホースにアブソーバからの散乱放射線が照射し、冷却水漏洩などの問題が昨年度発生した。このため、アブソーバに放射線遮蔽を設けた(図7)。この結果、コイルは遮蔽無しに比べ4%以下に、ホース部も遮蔽無しに比べ10%以下に抑えることができた。



図7

(5) 入射部チャンバーの損傷

10/5 10:23に電子ビームがアポートされた。その際、電子ビームが入射部の真空チャンバーに当たり、入射部チャンバーが損傷、大気がリング内にリークした。真空インターロックによりすぐに入射部上下流の仕切り弁が閉じたため、入射部(長さ約6m)は大気圧になったが、それ以外に被害は及ばなかった。入射部の真空チャンバーは予備チャンバーと交換し、10/9 22:00過ぎに運転を再開した。シンクロトロンからの入射ビームは蓄積リング内側から

入射点に入る。入射部真空チャンバーの蓄積リング内周側は入射ビームを曲げるセプタムマグネットと隣接しており、その部分のステンレス製真空チャンバーの寸法の制約で肉厚は0.7mmしかない。その薄肉の部分にアポートされた電子ビームが当たり、ステンレスチャンバーを溶融させ、大気リークを発生させた。溶融した部分の幅は約0.1~0.2mm、長さ約40mmであった(図8)。

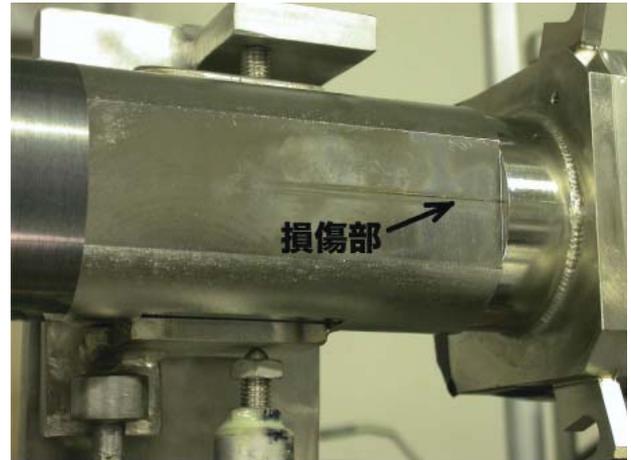


図8 損傷した入射部チャンバー

事故再発防止のため、原因の調査および対策の実施までは、低エミッタンスオプティクスから従来のオプティクスに変更した。

(大石 真也)

(6) 高周波加速空胴

2002年夏電子ビーム熔接により製造された蓄積リングD-stationの複数の加速空胴において真空漏れが発覚した件は2002年度の年次報告に書いた通りである。

2003年は電子ビーム熔接にかわり拡散熔接で製造された単セル加速空胴8台を新たに製造し、一台ずつテストスタンドにて空胴本体温度150度で24時間以上のベーキングを実施し真空漏れの試験を行った。さらに空胴を放射線シールドの部屋に設置しハイパワー試験で最大120kWまでパワーを投入し反射等で落ちなくなるまで約1週間の連続試験を行い、最終的に真空漏れがないことを確認した。こうして8台全ての加速空胴の試験を行った後、電子ビーム熔接で製造した加速空胴を全部取り外し、新しい加速空胴を所定の場所に設置し真空引きをして完了した。

(川島 祥孝)

(7) 高次モード減衰型高周波加速空胴の開発

将来、大電流のビーム蓄積がある場合に備え、新型の高周波加速空胴の開発を開始した¹⁾。

この新型加速空洞は現在稼働中のベル型加速空洞とは異なり、高次共振モード（HOM）の結合インピーダンスを大きく減少させてカップルパンチ不安定性を抑制するHOM減衰型である。この加速空洞の内部形状はリエントラント疑似ハーフセル構造で、ビーム加速モードのシャントインピーダンスはベル型加速空洞よりも約5%程大きい。空洞両端ビームパイプのカットオフ周波数（約2.3GHz）以下でカップルパンチ不安定性の原因となるHOMの数は少ない。更にモノポール高次モードの結合インピーダンスが小さく、高周波入力カップラーが多くの高次共振モードに対して減衰アンテナとして機能する。しかし、この構造にも欠点があり、ダイポール高次モードの最大結合インピーダンスがベル型加速空洞のもの比べて約2倍になる。この欠点を補うため、ダイポール高次モードの結合インピーダンスを大きく低減させる高次共振モード振り用ダミーポート（SKIP）及び溝付きビームポート（GBP）が設けられている。SKIPはダイポールモードをビーム軸回りに回転させる効果があり、結合インピーダンスの大きいダイポール高次モードの2共鳴双方に対して高周波入力カップラーが減衰アンテナとして機能する。またGBPは高エネルギー加速器研究機構で開発されたダイポール高次モード減衰方法^[2]、リエントラント疑似ハーフセル構造に適したHOM減衰システムである。シミュレーションの結果、これらの高次共振モード減衰機能によって新型加速空洞の高次共振モード結合インピーダンスはベル型加速空洞の1/100以下となる。

シミュレーションにて形状を最適化した新型加速空洞の

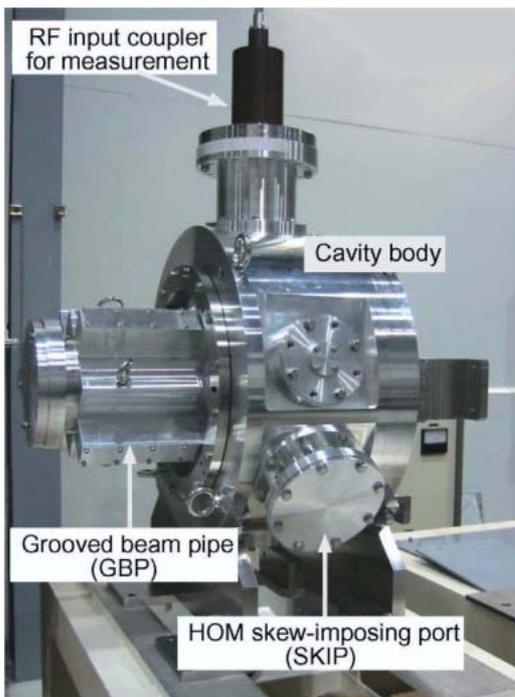


図9

性能を確認するために、アルミモデル空洞を製作した。このモデル空洞のビーム加速モード及びHOMの高周波特性を測定した結果、シミュレーション結果と同等の性能を持つことが確認された。

[1] H. Ego : Nucl. Instr. and Meth. **A 516** (2004) 270.

[2] T. Kageyama : Proceedings of the 8th Symposium on Accelerator Science and Technology, Saitama, Japan (1991) 116.

(恵郷 博文)

(8) SR入射・損失電子数積算計

トップアップ運転時の入射に伴う損失電子数、および、入射電子数の管理のために、SR入射・損失電子数積算計を導入した。電子数は、チャージモニター、電流モニター等に使用しているトランスの出力から換算して求めている。使用しているモニター類は以下のとおりである。

- シンクロトロンDCCT（直流電流トランス）
- SSBT1、SSBT2に設置されたBCM（ビームチャージモニター）
- 蓄積リングDCCT。

BCMは、積分電流トランス（ICT）コアと信号処理回路で構成され、トランスを通過した電荷量を測定する。これを用いて、蓄積リングへビーム入射を行なう際にSSBT1、SSBT2を通過する電荷量を測定する。シンクロトロンのDCCTではシンクロトロンのビーム入射電荷量を測定する。蓄積リングDCCTはビーム入射前後の測定値の差から新たに蓄積された電荷量を求めるために用いられ

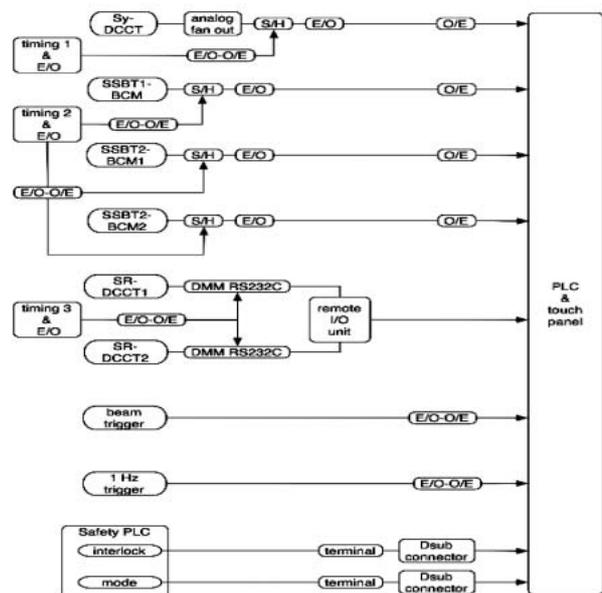


図10

ている。蓄積リングへの入射の際に発生する損失電子の数はSSBT2のBCM測定値と蓄積リングのDCCT測定値の差分との差から求める。

トップアップ運転時は上記ビーム入射時の損失電子数をシフト単位・週単位で積算し、上限に達した場合はトップアップ運転を止めるインターロックが働く。この機能および、その他必要な電子数の積算値の管理を実現するため、PLCを用いて必要な計算と論理回路動作をさせている。上限値、現在値、状態表示等のためにタッチパネルを用い、必要な情報が得られるようにしている。

図10に主な構成要素とそれら相互の接続の概略を示す。
(佐々木 茂樹)

(9) サブピコ秒パルス光の生成

1) 概要

蓄積リングのバンチの形状が垂直方向に薄い性質を利用し、バンチスライシングによる短パルス光の生成が原理的に可能である。2003年度は蓄積リングの運転条件における到達性能の見積を行い、実現にむけての問題点を把握しその解決方法の検討を行った。その結果、超伝導空洞を導入することによりパルス幅 $2\sigma_t = 0.6p \text{ sec}$ 、1パルス当たりの光束密度は $7 \times 10^{15} \text{ photons/rad}^2/1\% \text{ BW}$ の性能が得られるが、位相変動 $14.1 \times 10^3 \text{ deg}$ 未満の安定性が要求されることが分かった。この位相安定性を実現させる基礎研究として、国内で稼働中の超伝導空洞の位相変動測定を行いその原因と変動抑制の対策を検討した。また、位相帰還デバイスとして高電力高速移相器の開発を行ない、低電力モデルによる試験を行った。

2) サブピコ秒パルス光の生成原理

サブピコ秒パルス光の生成原理を図11に示す。

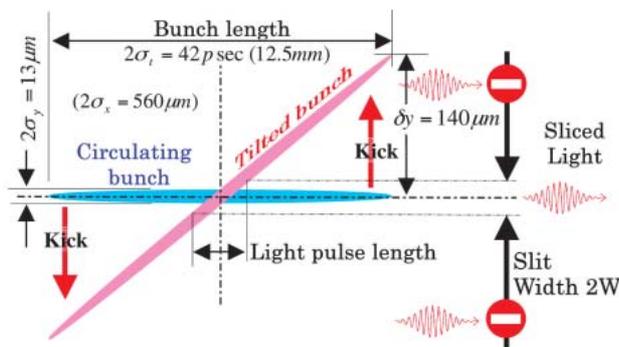


図11 サブピコ秒パルス光の生成原理。蓄積リングを周回するバンチの先頭と後尾を逆方向に蹴って傾け、バンチの中央部から放射される光のみをスリットで切り取って取り出す。得られる短パルス光の時間幅はバンチの傾斜角とスリットの間隙幅で決まる。

蓄積リングの8 GeVの電子のバンチ形状は水平方向 $2\sigma_x = 560 \mu m$ 、垂直方向 $2\sigma_y = 13 \mu m$ 、進行方向 $2\sigma_t = 42p \text{ sec}$ (12.5mm)である。図11のようにバンチを傾斜させると、バンチの先頭から後尾にかけて放射された光は垂直方向に分布するので、中央から出た光だけをスリットで切り出せば、よりも短いパルス光を得ることができる。ここでスリットを電子の軌道から離れた場所に設置すれば、電子はスリットに衝突することはない。

バンチ全体から放射される全光束に対するスリットで切り出される光束の割合 η を取り出し効率と呼び次の式で与えられる。

$$\eta \cong \frac{2W}{\sqrt{2\pi\sigma_t} \tan \theta_{\text{tilt}}}$$

ここで $2W$ はスリット幅、 $\tan \theta_{\text{tilt}} = y/\sigma_t$ はバンチの傾斜である。スリット幅を狭くするに従って取り出し光のパルス幅は小さくなり、 $2W \rightarrow 0$ の極限で得られる到達パルス幅 σ_{min} は次式で与えられる。

$$\sigma_{\text{min}} = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_r^2} / \tan \theta_{\text{tilt}}$$

ここで σ_r は回折による空間サイズで光源によって決まる量である。

バンチを傾斜させるためには、図12のような高周波デフレクタを蓄積リングの長直線部に設置すればよい。デフレクタは高周波空洞で、 TM_{110} モードの磁場でバンチを垂直方向に偏向させる。ここではデフレクタ4台を設置する方法を示したが、Def2とDef3を四極電磁石に置きかえる方法も考えられる。

3) 概念設計と性能

上式から、サブピコ秒領域のパルス光を得るためにはデフレクタの偏向磁場(またはそれと等価な偏向電圧 V)を大きくして $\tan \theta_{\text{tilt}}$ を大きくする必要があることがわかる。ここでは長直線部の限られた空間で十分な偏向磁場を実現するために、KEKで開発された超伝導空洞(単一セルCrab空洞)の導入を考え、偏向電圧はKEKの達成値 $V = 1.67 \text{ MV}$ を使用して設計した。この値によると8GeVにおけるバンチの傾斜は $\tan \theta_{\text{tilt}} = 6.67 \mu m/p \text{ sec}$ (4GeVではこの2倍)となる。

以上の条件で得られるパルス光の幅と効率の計算値を図13に示す。この計算は回折による効果も考慮されている。ここでは標準型アンジュレータ(周期長 $\lambda_u = 32 \text{ mm}$ 、周期数 $N_u = 140$ 、 $K = 0.92$)と、回折の効果が小さくなるミニポールアンジュレータ($\lambda_u = 10 \text{ mm}$ 、 $N_u = 101$ 、 $K = 0.92$)の場合を示した。通常の電子エネルギー8GeVの場合(エミッタンス $\sigma_y = 3 \times 10^{-12} \text{ mard}$)の他に、4GeV運転の場合($\sigma_y = 0.75 \times 10^{-12} \text{ mard}$)も併せて示した。4GeV運転で取り出し効率を1%とすると、2

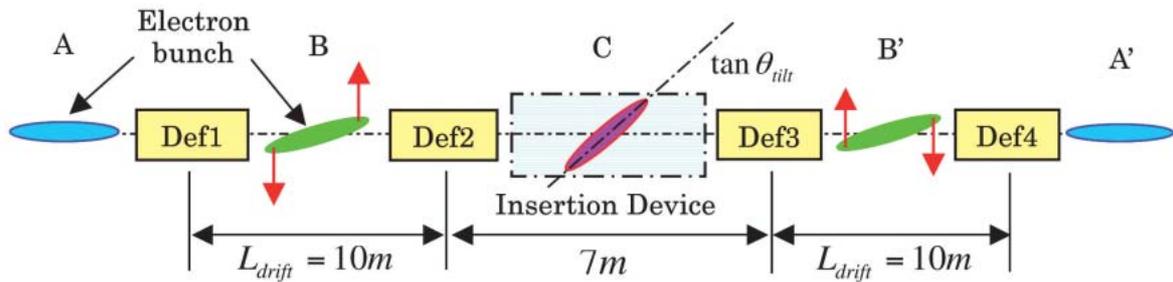


図12 バunchを傾ける方法。Bunchは図のAから入射し、デフレクタDef1でBunchの先頭を上方に後尾を下方に蹴る。BunchがBのドリフト空間を通過する間に傾斜角が増加するが、Def2でDef1と反対方向に蹴って傾斜角を一定にする。Bunchは傾斜した状態で挿入光源を通過して光を放射した後、Def3、B'、Def4で逆の過程を辿ってA'でAと同じ状態になり、蓄積リングを1周してAに戻る。この装置を長直線部に設置できるように設計する。

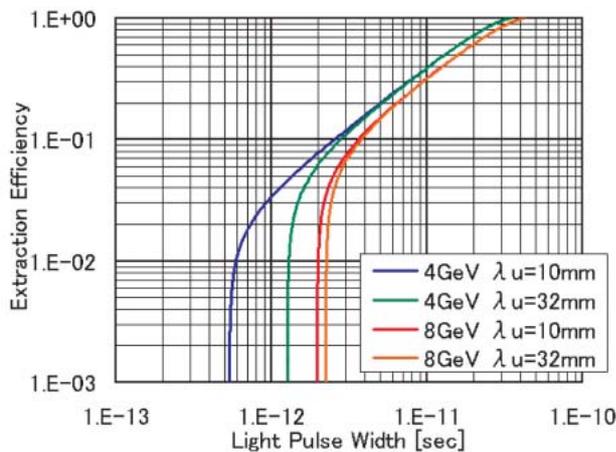


図13 生成される光のパルス幅と取り出し効率。パルス幅は2、取り出し効率は光源の全光量に対するスリットを通過する光量の割合、 τ はアンジュレータの周期長である。

$=0.6\tau$ secのパルス幅が得られることがわかる。この条件において1次光のエネルギーは42.5keV、1パルス当たりの光束密度は 7×10^{15} photons/rad²/1%BW、全光束は 5×10^6 photons/1%BWである。

4) 現状における問題点

短パルス光の生成・利用と他のビームラインの利用を共存させるためには、傾斜させたBunchの垂直方向の運動量を元の状態に戻し、蓄積リングの他の部分にCODが発生しないようにする必要がある。そのためには図12のA部においてデフレクタ4台による偏向が完全に打ち消された状態にならなければならない。このためには4台のデフレクタの強さとタイミングが精度良く一致している必要がある。この系によってリングに作られるCODの最大許容値を $1\mu\text{m}$ として計算す

ると、位相変動（位相雑音）が 14.1×10^{-3} deg未満である必要がある。この位相雑音は通常の高周波制御系の1/10以下の量であり、既存の技術だけで構築するのは困難である。特に超伝導空洞は液体ヘリウムで冷却されているため、その共振周波数が液体ヘリウムの振動によって変化する可能性があり、Q値が高いために本質的に位相雑音が発生しやすい機器である。従って、KEKで開発された超伝導空洞をそのまま導入できず、位相雑音の対策を施しておく必要がある。また、位相雑音は、高周波系の部品（特にクライストロン）でも発生する。位相雑音はこれまで測定評価されておらず、高精度の位相雑音測定装置を導入して高周波部品の位相雑音を測定する必要があり、位相雑音を補正する高速大電力移相器の開発が必要となる。

5) 問題解決に向けた研究開発

(a) 超伝導空洞の位相変動の測定

国内で唯一稼働しているKEK-Bの超伝導加速空洞の位相変動を計測し、その量と原因の調査を行った。その結果、チューナによる位相制御がある場合の位相変動の測定値（標準偏差）は0.58deg、位相制御がない場合は1.32degであった。チューナによって21Hz、13Hzで変化する位相変動成分は減衰しているが、46Hz、70Hzの位相変動成分は減衰しない。前者は入力カプラの振動に起因する位相変動であり、後者は超伝導空洞本体の機械的固有振動によるものであることが振動測定と有限要素法による解析結果から明らかになった。また、クライオスタットの機械的振動や液体ヘリウムの圧力変動の位相変動への影響は少ないことが分かった。この研究の結果、超伝導空洞とチューナの機械的結合を可能な限り小さくすることが重要であることが明らかになった。

(b) 高速大電力移相器の開発

クライストロン出力の位相変動を測定した結果、帰還によって位相変動を抑制しても0.26degの変動があることがわかった。この位相変動はクライストロンの電源の電圧変動に起因し、これ以上圧縮するのは難しい。しかし、図12のデフレクタの位相制御精度は相互の相対的な位相が一定であればよく、この問題は1台のクライストロンから高周波電力を分岐して供給すれば解決できる。そこで高速に位相制御が可能な大電力移相器が必要になるが、2003年度は位相可変量 ± 1 deg、制御速度10kHzの移相器の低電力モデルを作成して動作試験を実施した。

(中里)

加速器部門
円型加速器グループ
米原 博人

4. 制御グループ

4-1 計算機・ネットワーク

(1) セキュリティ対策

Windows OSをターゲットとしていたウイルスやワームの増加への対応として、FireWallによって外部ネットワークと遮断されている制御LANにも、中継サーバー経由で最新ウイルス定義ファイルへの更新が可能なウイルス対策統合ソフト(Symantec Client Security)を導入した。制御LANはFireWallで外部とのアクセスが制限されているため、従来個別に導入していたウイルス対策ソフトでは、ウイルス定義ファイルの更新が常時行えなかった。しかし本システムのクライアントを導入する事により、制御LAN内のアンチウイルスソフト定義ファイルも、常時最新版を保てるようになった。

また、セキュリティ上脆弱なネットワークポートを放置した計算機を検出するための診断ツール(Symantec Netrecon)を導入した。これを用いて制御LAN内の計算機が適切に対策されているかのスキャンを加速器停止中に行い、問題が発見された時は機器の担当者と協議して対策を施した。制御LANにはWindows OSを組み込んだオシロスコープ等の機器があり、それらはアンチウイルスを導入することができず、セキュリティパッチにより動作が保証されなくなる場合がある。このため脆弱性診断ツールによるスキャン結果を参考に、OSの不要なサービスを停止する対策が要となっている。

(2) ネットワーク

線型加速器の機器制御系更新に伴い、クライストロンギャラリーおよびクライストロン準備室にSwitching HUBを設置し、光ファイバーによるネットワークを整備した。Top-up運転用インターロックの整備と、SSBT用OTR制

御用ネットワーク等の整備のために、蓄積リングおよびシンクロトロンに光ファイバーの布設を行った。RF GUNの試験に伴いマシン実験棟へのネットワークを整備した。GPSを用いたNTPサーバーの運用を開始した。それまでは、二つのファイアーウォールを経由して、インターネット上にあるNTPサーバーを使用して計算機の時刻合わせを行っていたため、インターネット上の経路差による時刻の不安定があったが、GPSを使用することで安定した運用ができるようになった。

(3) サーバー・計算機

運転用webサーバーは、データベース内に保管されているログデータの閲覧、運転情報表示等、運転上必要不可欠な要素になっている。このため、高信頼性を得るため、webサーバーにディスク共有する二重化クラスター構成を導入した。サーバー本体は2.8GHz Pentium4x2のDell 2650、OSとクラスターソフトウェアにRedhat linux enterprise serverを用いて、webサーバーソフトウェアapacheと組み合わせ使用した。高信頼性をねらったクラスターの導入であったが、当初はクラスターソフトウェアの運用について経験が不足していたため、数回のトラブルを経験し、結果的には本年度においてはクラスターの導入は高信頼性に直結しなかった。その後、知見が増し、このトラブルの経験は本年度以降の運用に生かされている。

4-2 機器制御

(1) 線型加速器制御

夏期運転停止期間に線型加速器制御系の更新を行った。更新の主たる目的は制御システムの安定性、可用性と保守性の向上である。更新は線型加速器制御系全体に渡り、光伝送ボードの導入によるVME計算機の構成の大幅な変更、新しいコネクタボックスの設置、新しいモーターコントローラの設置、それらの導入に伴う機器制御用ソフトウェアの変更を行った。

従来の制御系は、ノイズ源であるモジュレータの近傍にVME計算機が設置され、VMEbusの入出力ボードによって機器の制御が行われていた。機器構成がフラットであるため上位計算機からの見通しは良かったが、特に、アナログ信号の引き回しという点でVME計算機をノイズ源の近傍に設置したために、系全体としての安定性に欠けていた。VMEシャーシを抱いたコネクタボックスを使用していたが、保守性が悪く、信号の追加や接続の変更などが実質的に不可能な状態にあった。またアナログ信号の処理が適当でないと思われる箇所が多く、ボード故障等の症状が発生していた。

更新後の制御系は光伝送ボードを基本とするシステムとなっている。光伝送ボードの導入により、VME計算機をノイズ源から離れた場所に設置することが可能となり、システムの安定性が向上した。また光伝送ボードの大きな特



図1 線型加速器モーターコントロールユニット (MCU)



図2 線型加速器機器制御用コネクタボックス

徴として、スレーブボードのアナログ出力およびデジタル出力が、マスター側のVME計算機の状態に依らず保持されることが挙げられる。従来の制御系では、障害等でVME計算機のレポート等を行うとこれらの出力は保持されず、再度設定を行う必要があった。当然その間は加速器の運転を行うことは出来なかったが、今回の更新でシステム全体の可用性が向上したと言える。

コネクタボックスの更新も行った。新しいコネクタボックスは保守性と拡張性の向上を主眼に開発したものである。前面に扉を設けることで内部へのアクセスを容易にし、また信号ケーブルをコネクタ受けする背面パネルも開閉可能な構造にしたため、新規コネクタの追加が容易に行えるようになった。また、特にアナログ信号については、コネクタボックス内部に端子台を設け、信号のチェックが行えるようにした。また、必要な箇所にはアイソレーションアンプを入れ、アナログ信号の適切な処理を行った。ボードの破損等の現象は起こらなくなったが、アナログ信号については依然としてモニタデータのノイズが大きい箇所が残っており、さらに調査を進めより適切な処理を行う必要がある。

新たにパルスモーター・コントローラを開発を行った。

従来の制御系では、パルスモーターの制御はVMEボードで行っていたため、現場での制御性は必ずしも良いとは言えなかった。そこでタッチパネル付きのネットワーク接続型コントローラを開発し、遠隔での制御性と同等程度の現場制御性を実現した。具体的には、初期化や引き抜き、移動などといったシーケンス制御、パルス値と物理値の間の変換等の処理をパルスモーター・コントローラ内部で行わせるようにした。これにより処理が複雑で現場では行うことが困難であった初期化処理を簡単に実行出来るようになった。またシーケンス制御は、軸毎に独立したタスクとしてコントローラ内部で処理されるため、最大で12軸までの初期化処理を平行して行うことが可能になった。これにより初期化処理に要する時間を大幅に短縮することが出来るようになった。新しいモーターコントローラは位置情報をコントローラ内部で保持している。従来の制御系ではVME計算機をリポートするたびに初期化処理、パラメータ再設定を行う必要があったが、新制御系ではその必要がなくなった。

実際の更新作業は約1ヶ月半という短い時間で行ったが、大きな問題もなく進めることが出来た。更新後のシステムも問題なく動作しており、目標としていた安定性、可用性、保守性の向上は達成出来たとと言える。

(2) ボード開発

昨年度に引き続いて高速高精度のビーム位置検出器用処理系の開発を行った。昨年度に試作を行ったVMEベースのDSPを用いた信号処理回路をバックエンドとすると、これに inputsするアナログ信号処理用のフロントエンドとして、1 Ms/sec、16bit精度のA/D変換ボードの開発を行い、必要な精度が確保できることを確認した。

4-3 MADOCAフレームワーク機能強化

(1) イベント駆動型フレームワークの開発

Top-up運転など、SPring-8の運転の高度化に伴い、データ収集システムに対する要求が多様化してきた。それらの要求の中には既存のMADOCAフレームワークのデータ収集では対応が困難なものも存在した。そこで、EMA

(Equipment Manager Agent) と呼ばれる、中程度のフィードバック制御に使われていたフレームワークをベースにして、EMA-EV (イベント駆動型EMA) を開発した。これはイベント監視をしている子プロセス: EVGEN (イベントジェネレータ) からのイベント通知をメッセージで受け取ると、あらかじめ用意された信号リストファイルの全信号データを取得し、ネットワーク共有可能なデバイス上にリングバッファ形式で書き出すというものである。各々のイベントには時刻データと共にイベント番号が付けられ、異なる計算機上で取得されたデータが、同一イベントであるか否かを識別出来る。収集されたデータは、filler というプロセスによってネットワーク共有可能なデバイスからイベント毎に読み出され、データベースに書き込まれる。

このフレームワークは最初に線型加速器のビームモニター (BPM) に利用された。線型加速器全体に 6 台設置された VME 計算機を用い、全 47 台の BPM から 386 個の信号を、最大 10Hz で出射されるビームに同期して収集するシステムである。ネットワーク共有可能なデバイスとして転送速度 4MB/sec の共有メモリネットワークを用いた。現状では全イベントの 99.9% を取りこぼしなく収集出来ている。

(2) データ収集用フレームワークの開発

データ収集用フレームワークとして、EMA-DR (EMA データレコーダ) を開発した。これはリストに指定されたデータ群を、決められたサンプリング間隔で内部のリングバッファに取り続け、指令を受け取ると、リングバッファの全データを NFS ファイル上にダンプするものである。このフレームワークは蓄積リングのビームアポート・ダンプ時のリング全体の真空度の変化 (合計 334 点) を、200msec 間隔で前後約 10 秒間モニターするのに使用された。

4-4 Top-up 運転 Phase-1 対応

Top-up 運転 Phase-1 の導入に向けて、パンチ電流値のモニター系の整備を行った。これにより従来のパンチ電流値モニターに比べ高精度且つ高速なパンチ電流値の測定が可能となり、パンチ毎の蓄積電流値の平滑性が高いレベルで実現可能となった。SSBT 部コリメータスリットにおける OTR 観測系の整備を行った。Top-up 運転では、入射効率改善のため、SSBT で入射ビームの裾をコリメートする必要があり、正確にビームの裾を取り除くため、コリメータスリット上の OTR を観測する必要があった。そこで、電子ビームプロファイルの動的測定系として、高速なカメラシステムを導入した。将来の線型加速器 60Hz 運転にも対応可能となるように、外部トリガによる高速同期取り込みが可能となるシステムとした。画像取り込み部は、高速なカメラインターフェースとして標準的なカメラリンク接続とし、Linux ベースのサーバー計算機に MADOCA を搭載し、画像収集/解析を行っている。これにより中央制御室から SSBT の OTR 画像を常時モニターすることが可能になった。

4-5 データベース

(1) 運転制御用データベース

データベースに追加された信号は計 2,267 点。新設されたオンラインデータベースのテーブルは 32 テーブルであった。また蓄積されたログデータは計 72GB だった。2003 年度中に運転制御用データベースは順調に稼働し、データベースの不調が加速器の運転に影響を及ぼすことはなかった。データベースサーバーはクラスターシステムにより二重化されているが、主サーバーがダウンすることは一度もなかった。

(2) 分散データベース

昨年度から開始されたデータベースの分散化は本年度に実運用を開始した。計画は 1997 年からのアーカイブデータベースを分散化させるだけであったが線型加速器 BPM の高速データ収集 (376 点、~10Hz 取得) のデータも分散させることにした。つまり、a) 主サーバーにはパラメータと 15 日分のログデータの蓄積、b) データ倉庫には 1997 年からのログデータ、c) 高速データサーバーには線型加速器 BPM の高速データというように 3 箇所にデータベースを分散させた。分散化は Sybase のミドルウェア (OmniConnect) を使用し、ユーザーは主サーバー上の代理テーブルから分散化されたテーブルにアクセスできる。このためユーザープログラムは全く変更せずにデータベースの分散化ができた。分散化によって、主サーバーの負担の軽減、クラスターフェイルオーバー時の時間短縮、高速データ収集、ログデータの高速な解析とバックアップが可能になった。

4-6 ITV 収納部監視システム

収納部監視システムでは、中央制御室の計算機上で起動した WWW ブラウザで、蓄積リング収納部内に設置したカメラ映像を表示し、カメラコントロールを行う事が出来る。従来は各クライアントの WWW ブラウザは、カメラからの画像信号を WWW ブラウザ用に変換する装置から直接読みとっており、同一チャンネルに複数のクライアントからアクセスすると大幅な速度低下があったが、今回サーバーシステム用ソフトウェアを更新したことで速度向上が達成できた。また、動画表示性能を向上させるために、処理能力の高い画像中継サーバー (Intel Xeon CPU 3.06GHz x 2 Linux kernel 2.4.21 SMP) を導入して、各カメラチャンネルの動画信号を一旦このサーバー上に集めてからクライアントに配信する方法に改めた。コンテンツデザインの見直しも行き、WWW ブラウザにおけるカメラチャンネルの選択やコントロール (パン・チルト・ズームなど) について使い勝手を向上させた。この改善によって、目的のカメラチャンネルを選択すると、ワンクリックで画像を表示でき、プリセットのアングルへの切り替えもワンクリックで行うことが可能になった。

4-7 広域遠隔操作

加速器やビームラインのエキスパートが出張などの不在時に、機器にトラブルが発生したとき運転が困難になるという可能性が以前から憂慮されていた。近年、学会などでエキスパートが不在になる機会も多く、SPring-8を外部から安全にネットワークを通じて制御するしくみが求められていた。それには、ファイアウォールで遮断された制御ネットワークと、外部ネットワークと接続するしくみを作成する必要がある。このため、ファイアウォール越しに接続を許す仕組みとして、webサーバー、ファイアウォール、通信認証、暗号化プログラムを組み合わせた安全な接続法を開発した。Virtual private network (VPN) が近年普及しつつあるが、条件が合わないためこれは使用しなかった。新システムを用いて何度か接続実験を行い、国内外からのいろいろな条件での接続に成功した実績をもとに実運用に入った。

加速器部門
制御グループ
田中 良太郎