

## 加速器開発 (新規増設・改造、高度化制御)

### 1. 加速器部門概要

2001年度の加速器の総運転時間は5,456時間で、その内4,033時間がユーザータイムとして利用された。このユーザータイム内での加速器、ビームライン等機器の故障によるダウンタイムの割合は、昨年とほぼ同じで、1.6%と非常に低い水準であった。しかし、故障内容を見ると利用開始から5年が経過したことで、機器の放射線損傷と思われる故障頻度が増える傾向にある。今後、機器の放射線損傷に対する正確な診断が安定運転にとって重要となる。

また、線形加速器、シンクロトロンおよび蓄積リングで、電子ビームのエネルギー、ビーム電流、電子軌道に対して各種の安定化対策（各種電源の安定化、冷却水温度の精密制御等）が実施され、ビーム性能が昨年より著しく改善された。

加速器制御系では、今まで使用してきたOS（HP-UX10.20）のサポートが打ち切られるのにもなって、新しいOS（HP-UX11.0）に2001年夏期停止期間に切り替えられるとともに、制御システムの高性能化、高機能化、高信頼化が図られた。

一方、電子ビームの更なる高度化と高機能化を目指した高度化研究として、電子ビームの性能評価と高耐熱性機器の開発を可能とする加速器診断ビームラインの整備、および遠赤外レーザーの開発が昨年度に引き続き蓄積リングで実施された。これと平行して、rf - 電子銃による極低エミッタンス電子ビームの生成、蓄積リングにおける電子ビームの精密制御方法の開発、高純度ビームの生成、トップアップ運転および低エネルギー運転等の先端的課題が精力的に実施された。

加速器部門 部門長 熊谷 教孝

### 2. 加速器部門各グループの報告

#### 2.1 運転軌道解析グループ

##### (1) 加速器の運転

2001年のSPring-8 加速器の総運転時間（サイクル毎の線形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5,456時間、蓄積リングの運転時間は5,341時間であった。図1に1997年10月の供用開始から2001年末までの運転時間を示す。2001年は蓄積リング総運転時間の75.5%にあたる4,033時間が実際にユーザータイムとして利用された。加速器およびビームラインの調整には21.7%に当たる1,159時間が使われた。また、1.6%に当たる87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。2001年のユーザータイムでは、前年などと比べて、多バンチモードの運転の割合が減少しており、ユー

ザータイム全体（4,092時間）の37.8%の1,545時間であった。少数バンチモードでの運転の割合が増加して38.9%、1,592時間、ハイブリッドモードと呼ばれる多バンチモードと少数バンチモードが共存する運転も増加して23.3%、955.5時間であった。少数バンチモードでのバンチ不純度（電子の蓄積されたバケットの電子数と蓄積されていないはずのバケットに入り込んでしまう電子数の比）は単バンチビームの生成システムなどの改善により、 $10^{-9}$ 台以下となった。

2001年はトラブルにより、43回のビームダンプあるいは計画外のビーム廃棄が起きている。加速器のトラブルは高周波加速空洞、電磁石電源、冷却水流量低下、挿入光源部に設置されたビーム軌道インターロックの誤動作、ビームラインでの誤操作などであった。また、電力会社の送電線への落雷による瞬時電圧降下や2001年3月24日に発生した芸予地震による蓄積ビームのダンプもあった。高エネルギー放射光および放射線による機器損傷のトラブルが目立つようになってきた。夏期運転停止期間直前の2001年6月の最終週に、高周波加速空洞の水冷アブソーバから冷却水が真空中にリークするというトラブルが連続して発生した。

1回目の発生時はユーザータイム中であったが、予備品と交換して運転を継続した。2回目は加速器の運転パラメータなどを測定する調整・スタディ時に発生したが、予備品を使い切っていたため、蓄積リングの運転を停止して、予定より2日早く夏期運転停止期間に入ることになった。幸いにもユーザータイムのための運転スケジュールは終了していたため、ユーザーへの大きな影響は避けられた。その後の調査により、銅と冷却水が接触している箇所が高エネルギー放射光が照射されると、冷却水の条件によっては銅の腐食・溶解が非常に早く進行することが分かった。写真1は、冷却水リークのあった銅製の水冷アブソーバを切り開いて、冷却水路内の様子を見たものである。放射光の当たっていた部分が線状に溶解していることが分かる。この水冷アブソーバは、放射光の光軸から外した所に冷却水を流す構造に設計変更したものを製作して、2001年夏期運転停止中に全てを交換した。他の部分に使われているアブソーバも取り外してサンプリング調査を行ったが、わずかな腐食は見られるものの、冷却水リークに至るような激しい腐食は見られなかった。このような銅と水との接触面への放射光照射による腐食の進行はSPring-8では以前から見られていたが、高周波加速空洞のアブソーバに流している冷却水の容存酸素量が高かったことが激しい腐食進行の原因ではないかと考えている。また、放射線による損傷と思われる電磁石冷却水用のゴムホース配管の破損による漏水トラブルもあった。このゴム配管は耐放射線性の高いも

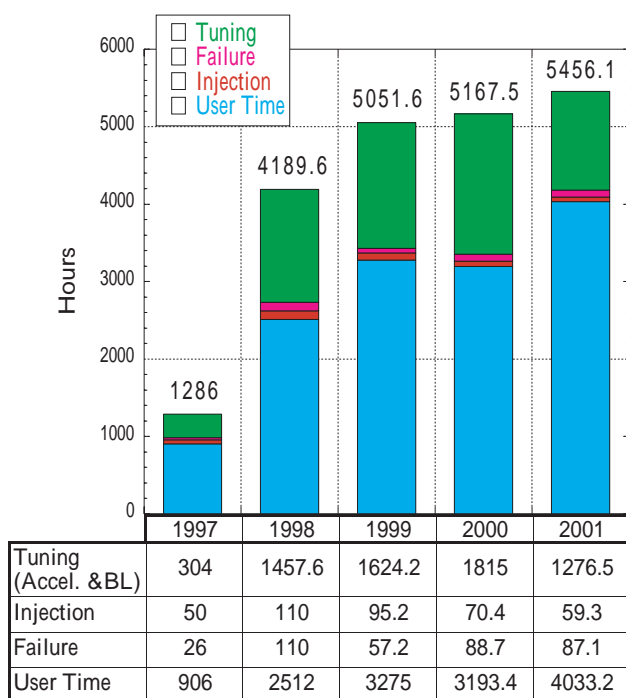


図1 運転統計、統計は従来通り1月～12月までの期間

のではあるが、漏水の発生した場所は、他と比べると放射線量の高い蓄積リング入射部近傍であった。蓄積リング運転開始から5年が経過しており、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必要な時期になっていると考えている。一方、入射系（線型加速器およびシンクロトロン）の機器の故障または不調のために、蓄積リングへの定時ビーム入射が延期され回数は2001年では12回、延べ時間で7.4時間であった。

加速器部門 運転・軌道解析グループ 大熊 春夫

(2) 蓄積リングにおける軌道安定化

2001年1月から始まった軌道安定化プロジェクトは、2年間で明確な成果を出す事が求められている。このため、2001年度に軌道変動要因の調査を行い、2002年度にその対策をするという計画を当初から立てて活動を行ってきた。蓄積リングの水平方向の軌道振動の大きさは rms 値で10ミクロン以下と挿入型光源の光源点でのビームサイズ約350ミクロンと比べて十分小さいため、ユーザーの利用する光ビーム安定性にとっては、現状あまり問題とはならない。しかし、ビームサイズが数ミクロンと小さい垂直方向の軌道振動は光ビームの安定性にとって問題となる。この

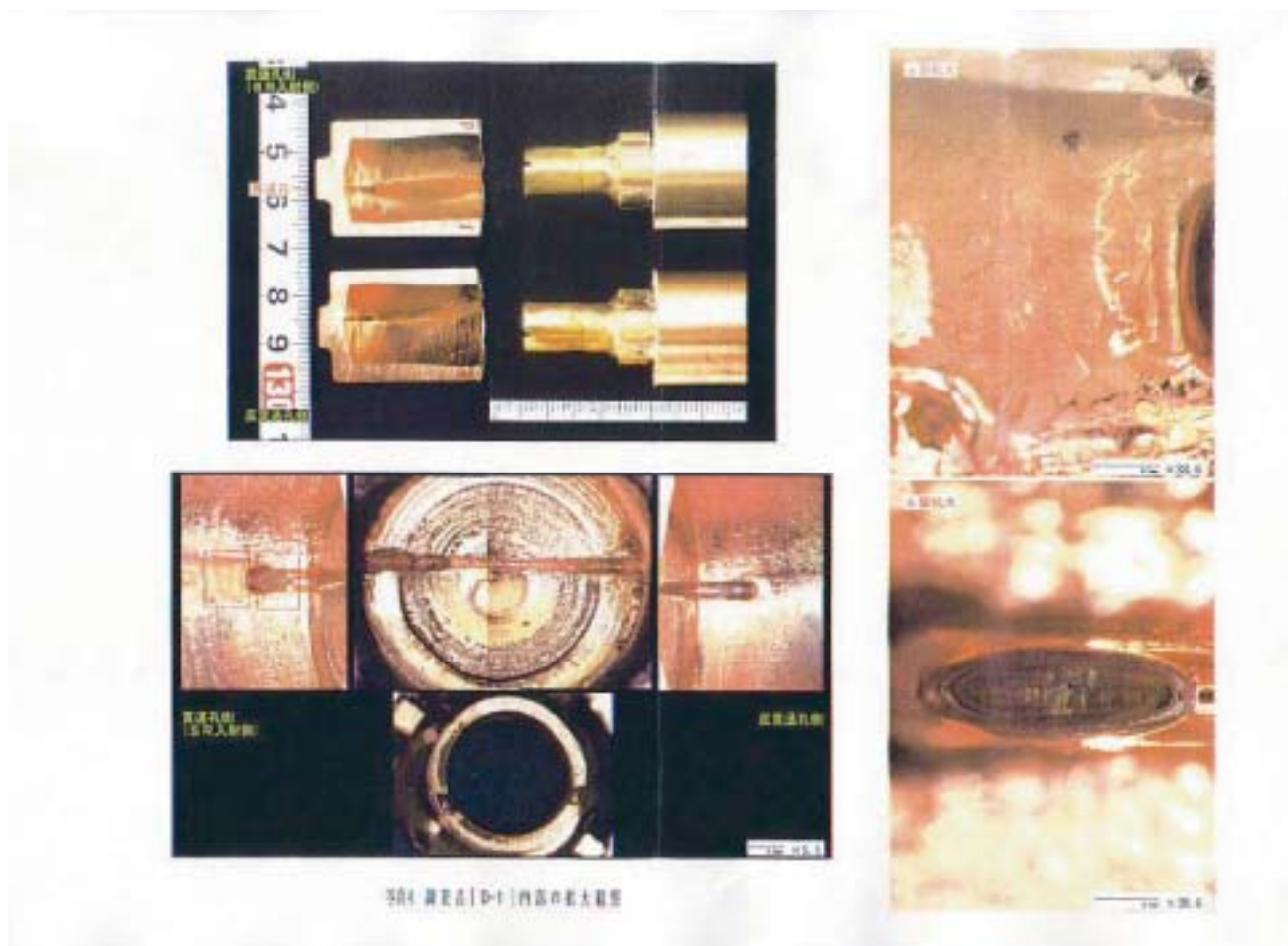


写真1 高エネルギー放射光の照射による激しい腐食の結果、冷却水の真空中へのリークが発生した高周波加速空洞の銅アブソーバ

理由から将来の低エミッタンス化をも視野に入れ、水平、垂直を問わず振動抑制対策を進めた。

- 1) 垂直方向の早い軌道変動の主要な振動成分は、30Hz 近傍に20Hz 程度の幅で分布している。振動測定の結果、偏向電磁石 BM1 上流部の四極電磁石内のチェンバ振動がビーム軌道変動の主要因であることが、また100Hz 以下の大部分の水平、垂直の軌道変動要因が冷却水による同種の振動によるものとほぼ特定できた。これらに対する振動対策は2002年度の間時点検期間および夏期運転停止期間に行う予定である。
- 2) シンクロトロンのパターン運転による電源ラインの変動により、蓄積リングの主四極電磁石電源の電流値が1Hz 及びその高調波成分で揺らぎ、それにより水平方向の軌道が数10ミクロン程度変動していた。2001年度冬期運転停止期間に四極電磁石電源の電流制御応答の高速化、電流制御回路の低雑音化等を実施し、電流値の安定度を  $3 \times 10^{-6}$  以下に改善した。その結果、1Hz 主ピークで一桁以上振動振幅を低下させることができ、蓄積リング軌道への影響はほとんど確認できないほど抑制された。また、この対策により 1 から15Hz 領域での水平方向の軌道変動の振幅も最大で5dB 程度抑制された。
- 3) ビーム軌道の変動に対して、基本的には変動要因の除去あるいは抑制することでその低減を目指しているが、最終的に除去できないで残る100Hz までの微小軌道変動を補正する高速軌道補正システムの開発を並行して進めている。現在、このシステムの要となる高速高精度ビーム位置検出器処理系を2003年度に一部導入できるように開発を進めている。
- 4) 比較的遅い軌道変動の主要因に、挿入型光源の位相やギャップの駆動による軌道変動がある。軌道に関する独立チューニングを実現するために、この変動をミクロンレベルで補正することが必要となる。そのため、高精度実時間軌道変動測定系の整備と、その軌道データから位相やギャップ駆動時の誤差磁場を正確に評価する解析手法の研究開発を行った。その結果、位相駆動型の挿入光源である BL23SU で、その位相およびギャップ駆動で発生する軌道変動を 1 ミクロン程度まで抑制することが可能となった。

加速器部門 軌道解析チーム 田中 均

### (3) 軌道解析

2001年度は、2000年夏期に導入された4カ所の30m 長直線部を有する新しいオプティクスのビーム性能の確認と改善を主に行った。それと並行し、入射時のビームロスも含めた、蓄積リングでのビーム性能を解析するための計算機プログラムの開発や、トップアップ運転の検討、蓄積リングにおける低エネルギー運転の可能性等の検討も行った。また、蓄積電流の大強度化および低クロマティシティー運

転等で問題となるビーム不安定性に対して、それを抑制するフィードバックシステムの開発を進めた。

#### 1) ビーム応答関数の測定と解析

ビーム応答関数の解析は、リングの状態を把握する上で極めて有用な手法であり、継続して開発を行った。今年度はビーム応答関数の解析で水平・垂直振動の混合を取り扱えるようにリングモデルを改良した。これにより現リングの Skew 四極誤差磁場分布を初めて求めることができた。この分布を用いると、蓄積リングの垂直 / 水平エミッタンスの結合比は0.001と計算され、タウシェック寿命から推定された値と良い一致を示した。また、30m 長直線部導入後にオプティクスの対称性が大きく崩れていることがこのビーム応答関数の解析によって確認された。

#### 2) オプティクスの対称性の回復

計算機シミュレーションから、このオプティクスの歪みが非構造共鳴を強く励起し、運動量偏差の大きい粒子の安定性を悪くし、特にタウシェック効果が支配的な小数バンチモードの運転ではビームの寿命を短くしていることが分かった。このオプティクスの歪みを補正するために、2001年度冬期に、リングの12箇所の四極電磁石の磁場に 1% 以下の微弱な変調をかけることができるように各電磁石の電流端子間に補助電源を設置した。2002年1月に試験調整を行い、オプティクスの歪みが rms 値で 2% まで補正され、これによりタウシェック効果で決まるビーム寿命が20%程度改善された。2002年第2サイクルのユーザー運転から上記補正が実施されている。

#### 3) トップアップ運転

挿入光源のギャップを閉めた利用状態で、蓄積リングへビーム入射を可能とするトップアップ運転の検討が本年度も引き続き検討された。

##### (a) トップアップ運転時の入射ビームの損失過程の解明

入射時の損失過程を明らかにするための計算機シミュレーションプログラムの開発を引き続き実施するとともに、マシンスタディとの比較検討を行った。

##### (b) 入射バンパ軌道に関する検討

トップアップ運転時、入射バンパ軌道が閉じないことで蓄積ビームに軌道振動が誘起されることが分かった。このビーム振動は、4台のバンパ電磁石の磁場相似性がわずかに崩れていること、および、バンパ軌道中にある六極磁石が作る非線形の効果の2つによって生じている。2001年夏期停止期間にバンパ電磁石(4台)の励磁電流波形の相似度を 1% 程度に改善するとともに、2002年3月にはバンパ電磁石のトリガタイミングを遠隔で調整が行えるようデジタルレイモジュールを導入した。現在、バンパ軌道の漏れによる蓄積ビームの振動はリング1周の二乗平均で約0.6mm、ピークの振幅はおよそ 3 mmp-p 程度である。現在、バンパ電磁石の実効磁場の相似性の向上と、六極磁石が



作る非線形効果等を補正する高速かつ任意波形で励磁可能なキッカー電磁石の検討を行っている。

#### 4) 低エネルギー運転の試験

蓄積リングのビームエネルギーを下げた場合、原理的には、そのエミッタンスはエネルギーの2乗に比例して小さく、またエネルギー拡がりもエネルギーに比例して小さくなる。(バンチ長もまた短くなる)。蓄積リングは通常8 GeVで運転を行っているが、エネルギーを下げることでさらに高輝度な光の生成、およびスペクトル幅の低減等による新規利用分野の開拓が可能となる。そのため低エネルギー運転に関する各種試験を開始した。

2001年度は、8 GeVでビームを蓄積(多バンチモードで蓄積電流5 mA)した後、ビームエネルギーを4 GeVまで段階的に下げながらトラッキング比等の各種のビームパラメータを測定した。この結果、ビーム不安定性も認められず、エミッタンス、バンチ長等は期待どおりに低減していることが確認された。また、4 GeVでの低エネルギー入射試験ではビーム蓄積に成功したものの入射効率が著しく悪いこと、その際シンクロトロンからのビーム形状をSSBT輸送系に設置してあるOTRモニター(電子ビームを薄いアルミフィルムに当てて、それからの発光によりビームの形状を測定するもの)を用いて測定した結果、SSBTラインの4極電磁石の磁場が、4 GeV運転時設計値からずれている可能性等が指摘され、今後システムとして詳細なビーム調整と解析が必要となった。

#### 5) 不安定性抑制

バンチしたビームが、高周波加速空洞や真空封止型挿入型光源を通過する際、金属表面に長寿命の残留電磁場が発生する。この電磁場が後続のバンチに影響し横方向の振動を誘起し、その振動したバンチが、また新たな残留電磁場を発生し後続のバンチの振動をさらに誘起する。この連鎖過程によりリング中の電子ビームは不安定になる。また、バンチ電流が大きいときには、バンチがビームダクト内表面のミリメートル以下の凹凸を持つベローズやフランジ等を通過する際、短寿命の電磁場が発生し、この電磁場によりバンチ内の電子軌道が乱れビームの不安定性が引き起こされる。現在、SPring-8蓄積リングでは、これらのビーム不安定性をクロマティシティ(ビームのリング内での横方向振動の振動数のエネルギー依存性の度合い)等を調整して抑制している。しかし、今後、トップアップ運転等高機能運転の導入やさらなる挿入光源の増設を考えると、この方法でのビーム不安定性の抑制には限界がある。そのため、bunch-by-bunch フィードバック装置等のビーム不安定性抑制装置の開発を開始した。この抑制装置では、ビームを構成する各バンチの位置を個々に測定し、その信号を用いて個々のバンチの横方向振動をリアルタイムに解析し、そ

のデータに基づいて個々のバンチに対して必要な補正量を高速キッカーで与え、ビームの横方向振動の減衰時間を1/10程度まで小さくし、不安定性を抑制する。2001年度は1台のモジュールからなる試作機を開発し、ビーム試験を行って動作原理が正しいことを確認した。2002年度は、少数バンチモードの1つである203バンチ運転への適用、さらに多様な運転モードに対応できる装置へと段階的に整備を行う。

加速器部門 軌道解析チーム 田中 均

#### (4) 光ビーム診断

##### 1) 加速器診断装置(1)の整備

偏向電磁石からの放射光を利用して蓄積リングのビーム診断、高耐熱機器の開発等を行なうために、加速器診断装置(1)の整備を昨年度に引き続き実施した。

可視域放射光を利用して、ストリークカメラによるバンチ長測定、高速光シャッター付き光子計数装置による単バンチ純度測定を継続して実施し、光源電子ビームの品質を改良する上で重要な知見を得た。バンチ長測定の精度向上のために、ストリークカメラの校正や入力光学系調整などの改良を行なった。また、単バンチ純度測定の感度向上のために、ポッケルスセル高速光シャッター駆動用高電圧パルサーの最適化調整、光シャッターの二段化、光子検出器の低ノイズ化調整を行った。

2000年度にハッチに設置したX線輸送部には、光源電子ビームのサイズ、形状を測定するためのビーム診断装置として、X線ビームプロファイルモニターが組み込まれている。このビームプロファイルモニターは、微少な鉛直方向エミッタンスが精度良く評価可能なように1ミクロンの空間分解能を目標性能としており、二結晶分光器で得られた単色X線を位相型ゾーンプレートを用いて結像し、光源電子ビームのX線像をX線ズームング管により観測する方式を採用している(図2)。2001年度は、X線輸送部の立ち上げ・調整として、光軸確認に用いる蛍光板モニターの位置校正、X線ビームの整形に用いる4象限スリットのブレード位置校正等を行った。二結晶分光器については、定位置出射のための結晶駆動機構の調整、分光性能評価のためのイオンチェンバーを用いたロッキングカーブの詳細測定、エネルギーを校正するために金属薄膜の吸収端構造の測定(図3)を行った。また、ビームサイズ測定のための準備として、位相型ゾーンプレートを取り付けた真空チェンバの真空立ち上げと真空特性の評価、ゾーンプレート光学系の調整、X線ズームング管の調整等を行った。

また、加速器コンポーネントなどに用いられる材料の光衝撃脱離についての実験的研究を行なうために、放射光照射を行なうと同時に、光衝撃脱離や温度・応力分布の測定、表面界面分析等のその場観察を行なうための実

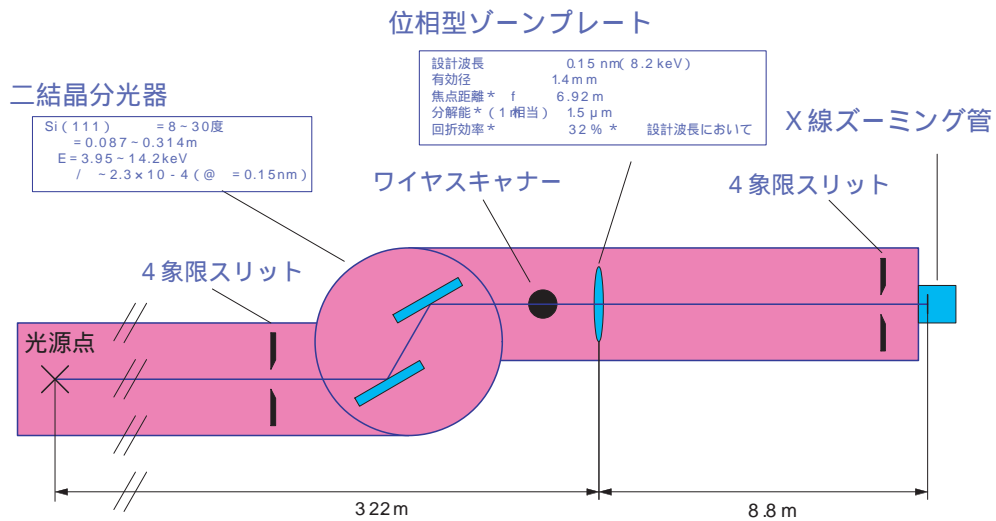


図2 X線ビームプロファイルモニター光学系

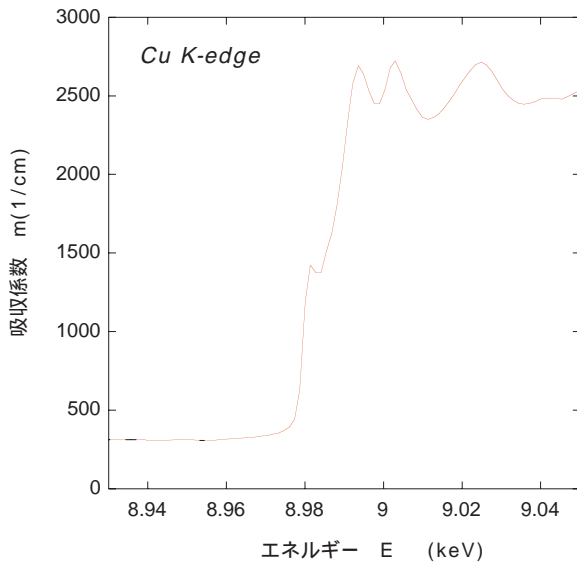


図3 二結晶分光器を用いて測定した銅薄膜の吸収スペクトル。縦軸は線吸収係数に換算した値。横軸は、校正後のエネルギーである。

験用真空装置の設計、製作を行った。

2) 加速器診断装置(II)の整備

加速器診断装置(II)は、SPring-8 蓄積リングのセル5直線部に設置する予定の挿入型光源等の光ビーム診断用光源装置およびその上下流に既設の2台の偏向電磁石(セル4のBM2偏向電磁石、セル5のBM1偏向電磁石)の端部を光源とする放射光を観測することにより、蓄積リング光源電子ビームの物理的状態を診断し、蓄積リングの安定な運転、光源加速器の性能向上や、高耐熱、高耐放射線機器の開発を目的とし、2001年度より整備を始めた。2001年度は、ビーム診断光を蓄積リング実験ホールに導くために加速器収納部内に設置される超高真空装置である基幹部の設計、製作を行なった。2002年度には、基幹部の加速器収納部への設置、実験ホールに設置する放射線シールドハッチの建設を予定している。

3) 2次元放射光干渉計

2次元干渉計の較正を行うために、4つのスリット開口を独立に閉じることができる可動式マスクを導入した。これを用いてスリット間の光量バランス、光学素子の歪みなどによる波面誤差を実験的に評価し、干渉計の点像強度関数を得た。観測された2次元干渉縞に点像関数を用いてモデル関数をあてはめることにより、水平、垂直ビームサイズのみならず、ビームの傾きの情報を得ることが可能となった。

(5) 光励起遠赤外レーザーを用いた低エネルギー線の生成

SPring-8 蓄積リングの8 GeV 電子と遠赤外(FIR)レーザー光との逆コンプトン散乱によるMeV領域の線生成のための研究開発を2001年度も継続して行った。FIRレーザーの励起用であるCO<sub>2</sub>レーザーは、回折格子の交換、再調整などを行った結果、9P(36)発振線の出力を従来の約190Wから234.5Wに増加させる事に成功した。また、9P(36)発振線によりCH<sub>3</sub>OHを励起して発振する波長118.8μmのFIRレーザー光もシステムの改良、ガス流量などのパラメータの最適化により1.6W以上の出力を得ることに成功した。

図4はFIRレーザー光の輸送系と逆コンプトン散乱によるガンマ線生成の概念図である。FIRレーザー光は実験ホールに設置されたレーザークリーンルームから収納部天井に開けられたケーブル用の穴から収納部内に導入され、加速器診断装置(1)の基幹部に設置するミラーチェンバから入射する。ミラーチェンバの設計・製作は2001年度に行った。クリーンルームから基幹部に設置するミラーチェンバまでは約20mの距離があり、アクリルもしくは石英の導波管でレーザー光を輸送する。ミラーチェンバへの導入直前でレーザー光を最適な形に整形して入射する。ミラーチェンバから電子との衝突点までの距離は約20mである。

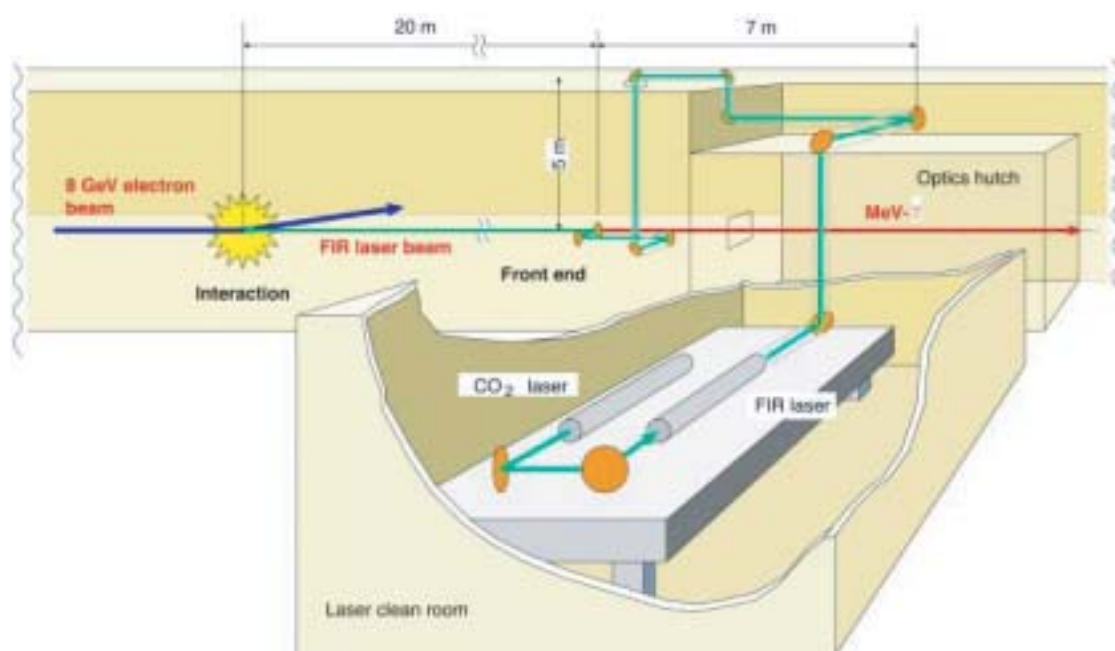


図4 FIRレーザー光の輸送系と逆コンプトン散乱によるガンマ線生成の概念図

衝突点までに多数のアーチャーを制限するコンポーネントが設置されており、FIRレーザー光をアーチャーに当たらずに衝突点まで輸送することは不可能である。これらのアーチャーに当たった分は回折を引き起こし強度減衰の原因となる。アーチャーでの回折を考慮したレーザー光の伝送効率の計算を行い、それから見積もった線の発生量は、 $N = 1.09 \times 10^4$  photons/secとなった。ここで、FIRレーザー光の出力、電子ビームの蓄積電流はそれぞれ2W、100mAとした。この生成量はガンマ線を利用する実験には十分とは言えないが、FIRレーザーを用いた低エネルギー線の生成についての原理的な測定には十分な量である。2002年度には、ミラーチェンバ、レーザー光輸送系などの設置を行い、線の生成テストを行う予定である。

加速器部門 運転・軌道解析グループ 大熊 春夫

## 2.2 線型加速器グループ

### (1) 線型加速器の運転

現在、シンクロトロンとNew SUBARUに入射されている

表1 Beam parameters for SPring-8 linac (with ECS)

	Synchrotron	NewSUBARU
Pulse Width	1 ns	40ns
Repetition	1 pps	1 pps
Current	2 A	350mA
dE/E (p-p)	0.62%	1.4%
Energy Stability (rms)	0.02%	0.01%
$\epsilon_n$ (90%, mm · mrad)	<240	<200

るビームの種類とその質を表1に示す。ECS導入により40nsビームのエネルギー広がり半分以下に抑制されるため、入射電流値はECS offの場合の2倍に増強することが可能となった。また、1ns/200mAのビームは、後述するビーム同期方式の2856MHz発振器の導入と合わせて、短時間エネルギー安定度0.01% rmsを達成した。

2001年における線型加速器の総運転時間は、昨年より若干長い約5,500時間であった。大電力クライストロン変調器の2002年6月末までの累計運転時間は、ヒーターオン時間で約39,000時間、高圧オン時間で約33,000時間に達した。今のところいずれのクライストロンにもパーピアンズ低下など性能の劣化に繋がる現象は観測されていない。

2001年の運転サイクル毎に、インターロックフォールト

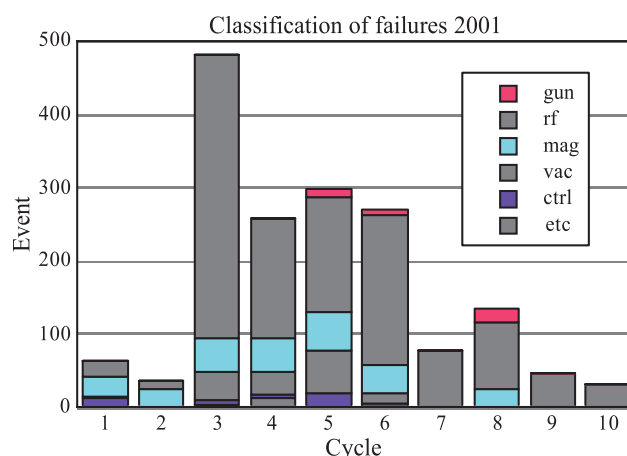


図5 Linac failure statistics for 2001 .



の分類を行ったのが図5である。例年のように、RF系のフォールトが最も多かった。特に第3サイクル以降のRF系フォールトが目立つが、これはECS設置後にECS立体回路の真空フォールトが多発したからである。特に第3サイクルはまだコンディショニングの最中で、特に多い。RF系の故障としては、サイラトロン1本を交換し、また変調器受電部放電回路の焼損があったため全変調器を改修した。真空系では、能力の低下したイオンポンプ5台を交換し、シケインの真空チャンバは真空リークを起こしたため、全数を製作し直した。また2000年に入れ替えたVME-CPUが相次いで故障したが、調査の結果放熱が不十分と分かり、CPUまわりに十分冷却風が流れるように工夫して解決した。

(2) 加速器の改良および安定化

1) ビーム同期方式の2856MHz 発信器 (RF 参照波発生回路)

線型加速器電子銃用のガントリガーパルスは、今まで蓄積リングの508.58MHz 基準信号を分周して作られていた。この方式では、線型加速器の2856MHz と、蓄積リングの508.58MHz とは整数倍の関係にないため、電子銃を出たビームパルスは2856MHz の加速周波数とは非同期状態にあるため、1 ns ビームの場合、ショット毎にバンチ数が2または3個と変化し、さらに各バンチの電荷量も一定しない。そのため、加速管でのビームローディングがショット毎に変化し、結果的としてビームエネルギーもショット毎に変動する。

この問題を解決するために、2856MHz の32分周である89.25MHz を任意波形発生器にプログラムしておき、その発振開始の外部トリガとしてガントリガーを入力し、この信号を32逓倍しガントリガーに同期した2856MHz の加速周波数を発生させる周波数発生装置を開発した。図6に実際の回路構成を示す。89.25MHz の波形は、あらかじめ508.58MHz でサンプリングされたデータとして任意関数発生器にプログラムされており、ガントリガーをスタート信号として508.25MHz のデータ読み出しクロックにより290 μs の間発振し外送される。この89.25MHz の中間信号での位相雑音を最小にするため、

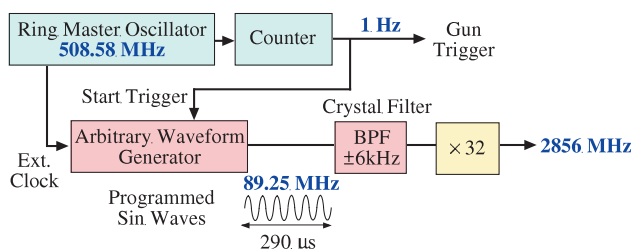


図6 Block diagram of RF reference generator .

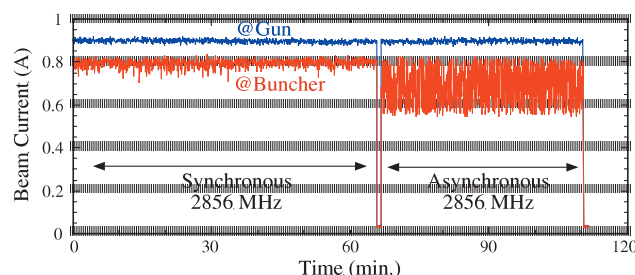


図7 Stability of single bunched beam

バンド幅12kHzの狭帯域のクリスタルフィルタを通してから32逓倍し2856MHzの加速周波数を作り出している。

図7は、ビーム電流の時間変動を電子銃出口とバンチャ出口で測定したものである。新しい同期方式の周波数発生器を用いた場合、ビームパルスと2856MHzでの加速位相が同期しているため、ショット毎のバンチ電荷量が常に一定に保たれ、ビーム電流の安定度が大幅に改善されていることが分かる。

2) 入射部励振系の改造

従来は、7 MW のブースタークライストロン (1本) でバンチャ部および13本の80MW クライストロンを励振していた。しかしこのクライストロン用の変調器はSPRING-8 開発初期に製作されたもので信頼性に難点があること、および他の80MW クライストロン用変調器とは全く別の物であるため保守維持に大きな問題を抱えていた。2001年夏に、この7 MW クライストロンを廃止し、図8に示すように最上流の80MW クライストロンでバンチャー部および残りの12本の80MW のクライストロンを励振するように立体回路を組み替えた。これにより線型加速器の高周波源は全て80MW のクライストロンで統一され、線型加速器の運転維持保守性の向上とバンチャー部のRF電力の安定化により、より安定な電子ビームの供給が可能となった。

3) ビームデフレクタ

長期間使用した電子銃から放出されるグリッドエミッションは、蓄積リングでの少数バンチ運転でのバンチ純度の悪化の原因となる。このグリッドエミッションを除

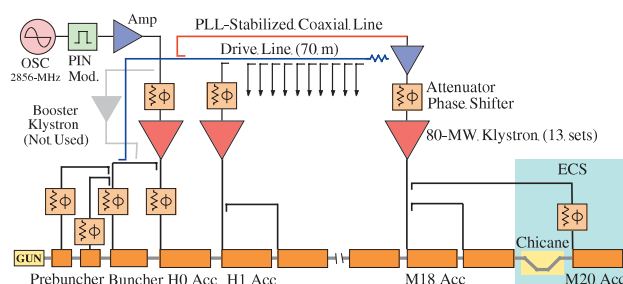


図8 Diagram of improved RF system .

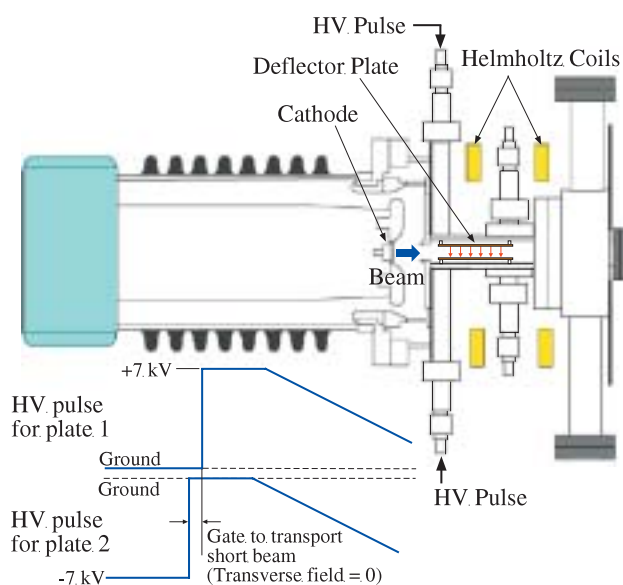


図9 Beam deflector

去するため、小型のビームデフレクタを一昨年試作した。ビームデフレクタは図9のように2枚の平行電極よりなり、高電圧パルス印加してグリッドエミッションを横方向に蹴り飛ばす。試験の結果、1 nsの電子ビームだけが約80%の透過率で通り抜けてくることが確認された。線型加速器内へのデフレクタの導入に対して、ビームのエミッタンス増加や電流値の減少を最小限にするため、改めてデフレクタの小型化、位置およびソレノイドコイルの最適化を行い、2001年末に設置し現在試験中である。

#### 4) RF 電子銃の開発

新しく導入したフォトカソード用レーザーの改良および調整の結果、長時間に渡って安定な実験が可能となった。また、低エミッタンスを実現するため、UVレーザーパルス空間形状の最適化を試み、マイクロレンズアレイを用いて、鉛直面の強度分布をほぼシルクハット様に整形する方法を開発した。さらに、ピンホールスリットを併用して強度分布の平坦な中央部を切り出し、レーザービームのエネルギーおよび位置の安定性を改善した結果、レーザースポット、RF空胴、輸送系のアライメントが精度よく行えるようになった。現在、UVレーザーパルスの時間軸方向の光子分布がまだ十分調整されていない状態であるが、電子ビームエネルギー3.1 MeV、パンチ電荷量0.1 nCで約2 mm・mradの規格化エミッタンス(double slit法で測定)を実現する事ができた。

加速器部門 線型加速器グループ 花木 博文

### 2.3 リンググループ

#### (1) ブースターシンクロトロン

##### 1) タイミングシステムの統合化

シンクロトロンは線型加速器で1 GeVに加速された電子ビームを受け取り、8 GeVまで加速し蓄積リング

に供給する。この加速器間での電子ビームの授受に用いるタイミング信号は、蓄積リングのタイミングシステムによって加速周波数508 MHzと1秒周期の信号をもとに作られ、各加速器のタイミング設備に送られ、これによって各種機器が動作している。シンクロトロンのタイミング設備は、建設時の事情から蓄積リングとは異なる回路構成で作られていたため、新しい加速モードを導入する場合の装置の改造のし難さ、および機器の保守維持の煩雑さ等の問題があった。このような事情から、予備品の共通化と運用の柔軟性を確保するために、シンクロトロンのタイミング設備を蓄積リングと同じ方式に改造した。これにより8パルス入射、蓄積モードへの変更、rf-koによるビーム純度の改善等に対して柔軟に対応することが可能となった。

#### 2) 高周波加速空洞の冷却水温度の安定化

加速空洞の冷却水温度は空洞入り口で32から37の間で周期的に変動し、それが加速空洞のHOMによるビーム不安定性を誘起しビーム電流値の変動を引き起こしていた。そのため、HOMの周波数を安定化し電流値の変動を除去するために冷却塔ファンモータを可変型に交換するとともに、温度制御を系の温度で帰還をかける方式に改造した。その結果、冷却塔系統の水温度変動が±0.3程度に抑えられ、空洞入り口温度は±0.1程度に安定化された。これにより今まで見られた特徴的な変動周期は見られなくなり、図10に示すようにビーム電流値は±3%程度に安定化された。

#### (2) 蓄積リング

##### 1) DCセプタム電磁石交換

蓄積リングのビーム入射はバンプ電磁石4台、DCセプタム電磁石3台、パルスセプタム電磁石1台で行われている。ビーム入射時、DCセプタム電磁石の漏れ磁場

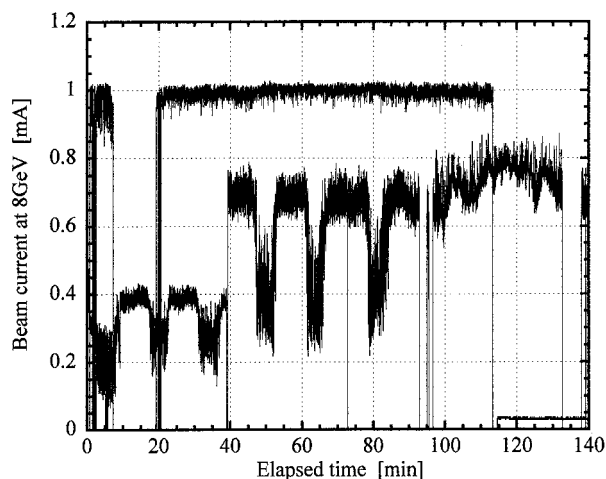


図10 シンクロトロンでのビーム電流値の安定化。黒線は改造前の電流値、赤線は改造後で±3%程度の変動幅に安定化されている。



が蓄積ビームの軌道に影響を与えることが分かった。今後トップアップ等の高機能運転を視野に入れる、周囲ビームに対するこの漏れ磁場による影響を極力小さくしておくことが必要となった。この漏れ磁場のビーム軌道に対する影響を、ビームサイズの1/10とすること(これによる漏れ磁場の積分量は、鉛直方向では $1.10\text{G}\cdot\text{m}$ 、水平方向では $0.05\text{G}\cdot\text{m}$ となる)を目標にDCセプタム電磁石およびシールド方法の開発を行った。その結果、セプタム電磁石3台を合わせた漏れ磁場(積分値)を鉛直、水平 $0.51\text{G}\cdot\text{m}$ 、 $0.04\text{G}\cdot\text{m}$ と目標値を達成することができ、2001年夏の停止期間に、この新しいセプタム電磁石が入射部に導入された。

## 2) 電磁石の冷却水流量スイッチ交換

偏向、四極、六極電磁石では、冷却水流量が規定値より低減した場合には流量スイッチにより電源が停止する。2000年頃から、この流量スイッチの誤動作により電源が停止する故障が頻繁に発生した。原因は、流量スイッチ内の浮き子の磨耗(写真2は磨耗した流量スイッチの浮き子部分と未使用品の写真)によるものであった。そのため、電磁石に個別に付いていた流量計を止め、信頼性の高い流量計を冷却水母管側に母管毎に設置した。これにより流量異常による電源停止はほとんど無く、安定な運転を実現することができた。



写真2 流量スイッチの浮き子部分。上が未使用の浮き子部分、下が誤動作を起した流量スイッチの浮き子部分である。形状が磨耗によって変形している。

## 3) 四極電磁石電源の性能向上

蓄積リングの四極電磁石は10ファミリーに分けられ、おのおのが別々の電源により励磁されている。マシンスタディー等の進展により、ビーム性能が当初設計を上回るようになったことから、電源の電流安定度として当初設計の0.01%以下ではビーム軌道を数10ミクロン以下に安定化させることが難しくなった。特に四極電磁石電源の電流変動がアルミ製の真空チャンバー内の渦電流磁場を通して軌道変動に影響していることから、電源の制御応答の高速化、電流制御回路の低雑音化を行い、電流値の長時間及び短時間の安定度を $3\times 10^{-6}$ 以下に改善した。その結果電流変動による軌道変動は観測されない水準まで低減することができた。

## 4) 地盤変動観測装置の設置

蓄積リングでは、軌道安定化で述べた1から100Hz領域の振動の他に周期数十分から1年近くに及び地球潮汐以外の変動が観測されている。このゆっくりした変動の原因を調べるために蓄積リングの内周側に深さ160mの地番変動を観測するための直径200mmの観測井戸を掘り、振動計、傾斜計、歪み計、温度計、水位計等の観測装置を2002年3月設置した。これら機器の調整終了後、ビームの軌道変動との相関を取ることで変動原因の特定を進めていく予定である。

加速器部門 円型加速器グループ 米原 博人

## 2.4 制御グループ

### (1) 線型加速器制御

2000年度の線型加速器制御系の統合化以来、線型加速器の制御用VMEでは、月に1~2回程度のCPUボードのハングアップや故障が発生し、またアナログ入力ボードの故障も何度か発生した。そこで、線型加速器制御用VMEの安定化対策を行った。

まず、故障したボード等の調査・分析を行なった結果、1. AC電源ライン耐ノイズ性の向上、2. CPUボード発熱対策、3. アナログ入力ボード前段へのアイソレーションカードの導入、という3つの対策を施すことにした。まず1については耐ノイズ性能を実際に測定した結果から、絶縁トランス+ノイズフィルター付きの新たなAC電源ユニットを製作し、既存のAC電源ユニットと全数交換した。次に2については、CPUボード上の放熱フィンの温度を測定したところ、70以上にも達していることが分かった。使用しているCPUボードの発熱量が多いこと、CPUボード部分に十分な風量が得られていないこと、および使用しているCPUボードの構造上の問題等の原因が推測された。そこで対策としてCPUボードの隣のスロットを空け、ブランクパネルで蓋をせず解放するという方法で、ファンなどの可動品を導入せずに放熱効果が得られるようにした。3については、故障したアナログ入力ボードの調査を行い、

アナログ入力部の前段にアイソレータカードを挿入することでこの問題に対処することにした。上記3つの対策を施したところ、CPUボードのハングアップや故障は発生しなくなり、アナログ入力ボードの故障の頻度も下がり、線型加速器VMEは十分な安定度が得られるようになった。

線型加速器VMEのDC電源を全て交換した。これは既存のDC電源が既に入手不可能なこと、既に稼働後5～6年が経過しておりDC電源故障の可能性が考えられること、およびVMEのメンテナンス性が良くない等の理由による。新しい電源の設置によってVMEシャーシ背面部へのアクセス性が改善された。

線型加速器へのBeam Position Monitor (BPM) の導入に伴い、すべてのBPM信号処理回路からのデータを同時にVMEまで伝送する読み出し系を開発し、整備した。BPM信号処理回路に置かれるリモートボードとVMEボード間に使用するケーブルの耐ノイズ性、およびBPM信号処理回路からの大量のデータを扱うためのコンパクトな形状等を考慮して、伝送路として光ファイバーを使用した光伝送ボードの開発を行った。この光伝送ボードは、1枚のマスターボードに4枚までのスレーブボードを光ケーブルで接続可能で、スレーブから20 $\mu$ s周期でマスターまでデータが転送されるものである。本年度は、複数のVME間でビームに同期してデータ収集が可能となるように、新しく共有メモリネットワークを用いたイベント駆動型ソフトウェアを開発した。

## (2) シンクロトロン制御

2001年度夏にシンクロトロンタイミング系の更新を行った。目的はメーカー独自の回路から、市販のモジュールを用いたロジック動作の明らかな回路に変更することで、保守性の向上や、新たな機能の追加などの改造を行いやすくすることであった。タイミング系の変更により、合計20台のパルス電磁石電源のタイミング調整用はVME Digital delay generator (BNC社, B951) にて制御するように変更した。またTTL DIOボードでロジック回路の設定、状態の読み込みなどが行えるようにした。

シンクロトロン電磁石電源は電子ビームのエネルギーに対応して出力を約1 Hzで変化させている。このうち80台ある補正電磁石電源は台形型のパターンでしか出力を変化させることができなかった。しかし軌道補正をより詳細に行う、あるいはシンクロトロンでの蓄積運転に対応するなどの要求が出て来たため、補正電磁石電源の制御に用いている日立造船製NIOシステムの改造を行い、任意のパターンに対応できるようにした。

シンクロトロンの偏向/四極/六極電磁石電源の安定性は、蓄積リングへ送られる電子ビームの量や個々のRFパンチ中の電子の数に影響を与える。そこでこれらの電源の出力電圧や電流などを入射時、出射時それぞれで測定し、

データベースに取り込むことで、電子ビームの量やチューンとの相関を調べるため、横河電機製WE7000システムを計測系として採用し、投入した。

シンクロトロンで用いているVMEシステムのうち、建設時から使用している14台のシャーシが製造中止になり、その保守性が問題になってきたことからVMEのDC電源を他と共通の、入手できるものに置き換えた。

## (3) 蓄積リング制御

蓄積リング収納部内を汎用のCCDカメラで撮影し、WWWブラウザで表示できる収納部監視システムの構築を行った。2001年夏季停止期間中に、画像情報の通信に対応した基幹ギガビットネットワークの敷設、リング棟保守通路へのノードラックとネットワーク機器・カメラ用サーバーの設置、収納部内へのカメラ取り付けを行い、第7サイクルより試験運用を開始した。運用後、カメラの設置位置と加速器コンポーネントの位置関係により、カメラに対する放射線影響があることが分り、カメラに対する遮蔽処置を改良した。今後、放射線影響の調査をさらにを行い、カメラ取り付け台の再配置を予定している。

電磁石および真空インターロック用PLCマスター局の誤動作の対策のためUPSをPLCマスター局に追加した。また、自動軌道補正の安定運用のための蓄積リングのBPM読み出し用VMEへのUPSを追加することで瞬停等による不用なVMEの停止を避ける対策を行った。

## (4) 中央制御系

中央制御室に設置しているオペレータコンソールのOSとしてHP-UX10.20を用いてきたが、このバージョンがサポートを打ち切られる事になった。このため2000年より新しいバージョンのHP-UX11.0に移行することを目指して、互換性などの調査を行い、問題がないことから2001年夏季停止期間中に開発環境と運転用ワークステーションを全てHP-UX11.0に移行させた。全ワークステーションのOS切り替えは運転停止期間中に完了し、運転用ソフトウェアは全て新開発環境で再コンパイルを終えて、第7サイクルから完全に新OSに移行した環境での開発・運転に切り変わった。

## (5) ネットワーク

制御機器室内のネットワークノードに100BASE-FXのSwitching HUBを2台設置し、線型加速器制御用の各VMEには100BASE-FX - 100BASE-TXを変換するメディアコンバーターを設置した。ネットワークノードとVME間の光ファイバーは既存のものを流用し、線型加速器制御ネットワークを10Mbpsから100Mbpsに変更した。また、線型加速器BPM読み出し用VMEのネットワーク配線を行った。

蓄積リング用データ収集系ネットワークを整備するため、ネットワークノードとして収納部監視システムで立てたラック内にネットワーク機材を配置して、蓄積リング全周に渡って12か所にネットワークの接続ポイントを用意し、保守通路に置かれたデータ収集用のフィールドステーションから100m以内にポイントが存在するように構成した。

#### (6) データベースシステム

##### 1) 高可用性クラスター計算機システム

前年度の線型加速器の制御系統合により、制御用データベースはSPring-8の全ての加速器とビームラインの制御データを管理することになった。より高信頼性を得るため、昨年度後半にデータベースサーバーの高可用性機能を導入した。実際2001年度中にこの機能は2度役に立った。このときサーバーソフトウェアのバグ等により主サーバーが停止したが、クライアントプログラムには影響を与えることなく、副サーバーにスイッチ（フェイルオーバー）した。高可用性テストが柔軟にできるように、データベーステスト用サーバーとして新たにクラスター機を導入した。これにより、新バージョンのソフトウェアのテストなどが自由にできるようになった。

2001年度には1008の機器信号が追加された。データの増加に対応するためにデータベースサーバーに36GB\*16のディスクを増設した。データベーステーブルを分散配置することにより高速化を果たした。

##### 2) 画像処理データのデータベース化

アーカイブデータベースには機器データが記録されてきた。今回、これらの単純なデータに加えNTSCデータを画像処理することにより、visibilityや線型加速器のビーム透過型スクリーンモニターのデータもオンラインデータベースに入れることができ、リアルタイムでの観測/記録が可能になった。

##### 3) 機器のコンフィギュレーションのデータベース化

EMが使用するパラメーターは今までテキストファイルで管理されてきたが、これをリレーショナルデータベースに収納するようにした。またWebからデータを閲覧するシステムを開発して容易にデータにアクセスできるようになった。

#### (7) アラーム通知システム追加

アラームが発生したときに担当者に通知するシステムを作成した。予め担当者が管理したい信号を定義しておき、アラームが発生した場合にインターネットメールを送るシステムである。制御系ネットワークはファイアウォールにてインターネットと隔絶しているため、制御ネットワークから直接にはインターネットにメールが出せない。そのため中立ゾーンに置かれたhttpサーバーを経由してアラーム情報を得てインターネットメールを送るシステムを開発した。

#### 発表等

- [1] T. Masuda et al.: Control group, Upgrade of Linac Control System with New VME Controllers at SPring-8, Proc. of ICALEPCS'01, San Jose, USA, 2001.
- [2] T. Masuda et al.: Control group, Data Acquisition System with Shared Memory Network, Proc. of ICALEPCS'01, San Jose, USA, 2001.
- [3] T. Fukui et al.: Control group, Toward a Reliable Gigabit Network-An Upgrade of the SPring-8 Network, Proc. of ICALEPCS'01, San Jose, USA, 2001.
- [4] 山下明広:SPring-8/NewSUBARUの制御システム、分子科学研究所ミニ研究会「高輝度光源加速器の制御システム」、2001年2月。

ビームライン 制御グループ 田中良太郎