

SPring-8 線型加速器の現状

花木博文¹、安積隆夫、小林利明、鈴木伸介、谷内努、出羽英紀、富沢宏光、堀利彦、水野明彦、柳田謙一
古寺正彦、福井達、細田直康、増田剛正、山下明広、田中良太郎
高輝度光科学研究センター放射光研究所
〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

概要

SPring-8線型加速器ではECSを導入し、ビームエネルギー広がりや安定度を改善した。その結果、シンクロトロンへの入射電流は大きく増加した。また制御システムを更新し、その保守性および制御性を向上させた。BPMの整備が進行中であり、本体はすでに四極電磁石に組み込まれ、信号処理システムは本年中に完成の予定である。

1. はじめに

SPring-8 1GeV線型加速器は、96年8月1日にコミッションを開始して以来、2001年6月までの約5年間、大きな故障もなく運転を続けている。97年の8GeV蓄積リング共用開始以来、累計運転時間はこの6月で約18000時間に達する。また98年10月からは、New SUBARUへの入射も順調に続けられている。

リニアックからシンクロトロンへのビーム入射をより安定化するための改良作業は、98年から始まり、本年で4年目を迎えた。まず当初は、加速RFの位相振幅変動を抑制し、ビームエネルギー変動が小さくなるように各種の改善が行われ、最終的に入射ビーム電流の安定度は著しく改善された。続いて、ビームエネルギー広がりをより小さくし、さらにはRF機器不調などを原因とするエネルギー変動を最小限に抑えるために、ECS（エネルギー補償システム）を設置し、本年4月より運転に使用している。また、入射部およびクライストロン励振用の7MWクライストロンの使用を取りやめ、クライストロンを80MW球に統一することでRF系の信頼度を高めるための作業が、今夏に行われる。

SPring-8加速器では、その歴史的経緯から、リニアック、シンクロトロンおよび蓄積リングはそれぞれ異なる制御システムを採用していた。そのため加速器の統一的総合的制御が困難であった。そこで蓄積リング制御システムをベースとした統合作業が、加速器部門制御グループ主導により98年から始まった。リニアック制御系の更新作業は99年から始まり、リニアック及び制御グループスタッフのほぼ全員が分担する大きな作業であったが、昨年8月に終了。

その直後から新制御系による運転が無事再開された。その結果、リング加速器と共通の制御システム採用による保守性の向上、データベース利用による制御性の向上など、多くの成果が得られた。

開発中であったビーム位置モニタシステムは、予定の性能を満たすことがほぼ確認された。本年夏から計測システムの設置が始まり、来年より実際の運転調整に使用される予定である。

短パルス低エミッタンスの高品質電子ビームを生成する技術は、FELやポンプ&プローブ分析などに不可欠である。SPring-8でもRF電子銃開発を高品質ビーム研究の一環として続けており、99年に光電子ビーム生成に成功した。現在は電子ビームのさらなる低エミッタンス化に取り組んでいる。

2. 運転状況

現在、シンクロトロンとNew SUBARU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。40nsビームは、ECS導入によりエネルギー広がりが半分以下に抑制されたため、入射電流値を以前の7倍に増強することが出来た。

表1：入射ビームのパラメータ（ECS運用時）

	シンクロトロン		New SUBARU
パルス幅	1 ns	40 ns	1 ns
繰返し	1 pps	1 pps	1 pps
入射電流	2 A	350 mA	200 mA
dE/E（全幅）	—	1.4 %	—
エネルギー安定度	0.02%rms	—	—
ϵ_n (90%, μ mrad)	<240 π	<160 π	<200 π

2000年における総運転時間は、昨年より若干長い約5,200時間であった。総運転時間中、いずれかの機器が故障または不調のために、1GeVビーム入射を延期した時間の割合は、約0.13%である。

2000年運転サイクル別に故障等の分類を行ったのが図1である。例年のように、RF系の故障が最も多かった。その主たる内訳は、サイクロトロン劣化・不調やクライストロン管内の放電である。夏期保守期間後、故障が急増しているように見えるのは、デー

¹ E-mail: hanaki@spring8.or.jp

データベースが導入されたために、インターロック履歴が漏らさず記録できるようになったからである。

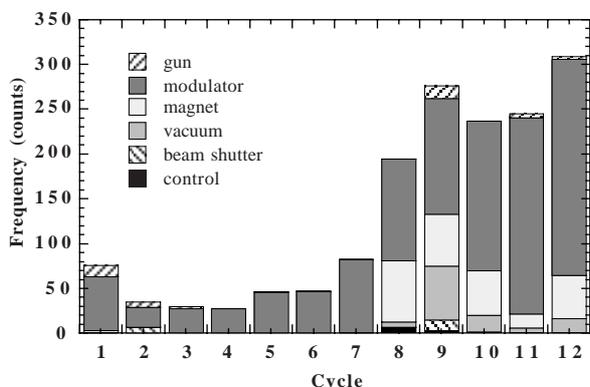


図1：運転サイクル別故障頻度

3. RF系の現状

大電力クライストロン変調器の昨年末までの累計運転時間は、ヒーターオン時間で約29,000時間、高圧オン時間で約23,000時間に達した。クライストロンの寿命を気にしているが、今のところいずれのクライストロンにもパービアンズ低下などは観測されていない。

昨年も80MWクライストロン1本を、管内真空悪化のため交換した。その他の目立った故障としては、7MWブースタクライストロン収束コイルが冷却水が流れていなかったため焼損し、コイルとクライストロン両方の交換を余儀なくされたことである。冷却水流量リレーを備えていたが動作せず、コイルにも温度センサは付いていなかったため、被害が大きくなった。

クライストロン変調器用サイラトロンは、TRITON社F351を三本、MARCONI社サイラトロンCX1937Aを二本交換した。F351二本の故障原因はリザーバヒータ部分ショートと思われ、F351の典型的な老化である。CX1937Aについてはジッタが大きくなったために交換したが、グリッド電源側の問題の可能性もあり、調査中である。

前述した7MWブースタクライストロンの変調器は、リニアック開発の初期に製作された物であり、13台の80MWクライストロン用変調器とはその構成、メーカーとも異なる。そのため、リニアックRF系の要であるにもかかわらず信頼性や保守に問題が多く、対策が望まれていた。幸いバンチャ直後の加速管1本のみRF電力供給している80MWクライストロンは出力に十分余裕があるため、出力を分岐すればブースタクライストロンを兼ねてバンチャ部にRFを供給することができる。現在そのための改造作業が進行中である。

尚、現在はビーム繰り返しをほとんどの場合1ppsで入射しているため、RFパルスの繰り返しは常時60ppsである必要は無い。従って、今後はRF機器の寿命を延ばすため、RF源の通常運転は10ppsで行う予定である。

4. 加速器の安定化

98年、クライストロン冷却水の温度安定化、クライストロン変調器デキューイング回路の調整によるPFN電圧の安定化などを実施し、加速RFの振幅、位相の変動を抑制した^[1]。その結果、1pps入射ビームのエネルギー安定度は、ショット毎変動±0.018% (1 σ)、および比較的安定なときの長時間 (10分) 変動±0.03% (1 σ)と大きく改善された。続いて、ビームローディングによるビームエネルギーの広がりをより小さくすること、およびRF機器の不調あるいは室温変動を原因とするエネルギー変動を補償することを目指し、ECS (エネルギー圧縮システム) を設置する事にした。99年から設計を開始したが、ECS加速管に供給するRFの電力および位相の安定化に特に注意を払った。本システムは2000年秋に完成、本年4月より実際の運転に使用している^[2]。

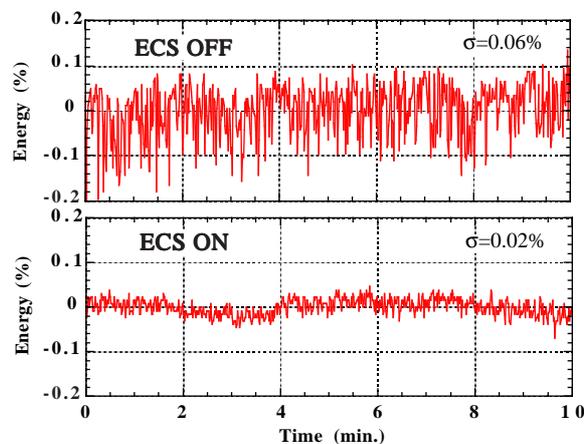


図2：ECSによる1ns/1.9nCビームのエネルギー安定化

その結果、40ns/350mAの条件でのビームエネルギー幅 (全幅) は、3.5%から1.4%に抑制されてシンクロトロンへの最大入射電流は一気に7倍となり、また1ns/1.9nCビームのエネルギー安定度は、図2に示すように、0.06%rmsから0.02%rmsへ改善されるなど、ECS導入による著しい効果が確認された。また、ECSによるエネルギー補償により、ビーム電流を増減しても一定エネルギーを維持できるため、電子銃を調整してリニアックの出射電流を増減することにより、蓄積リングのフィリングパターンを微調するという運転方法も行われるようになった。さらに

NewSUBARUへの入射においても、90%以上の高入射効率を無調整で長時間維持できるようになった。

5. 加速器の改良と高度化

5.1 制御系更新

主な作業は、旧システムの調査、機器制御用VMECPU25台の更新、制御プログラム（VME上）の新規作成、制御端末用GUI作成、データベースシステムの導入などであった。VMEのOSもOS9からSolarisに変更された。またこの作業に伴い、クライストロン変調器の信頼性保守性を高め、より故障診断が容易になるように、PLC制御系も見直して、変調器制御盤上で得られる情報量を大きく増やし、かつそれら全てがリモート監視できるようにした。

その結果、アラームシステムによる状態変化の自動監視が可能となり、データベース上に保存された機器の履歴データを利用することで機器パラメータの変動把握が容易になるなど、故障診断に要する時間が大きく短縮された。また以前よりGUIを作りやすくなったため、新しい機能の搭載などのソフトウェア生産性も向上した。例えば、クライストロンの自動コンディショニングは、最近GUI上のプログラムから行えるようになっている。

5.2 ビームモニタ

開発を続けていたビーム位置モニタ（BPM）システムは、静電型ストリップラインモニタの採用を決定し、リニアックの非分散部四重極電磁石に28台を組み込んだ。信号処理回路は、広いビーム電流範囲を検出できるLog演算方式を試作し、測定可能な信号強度範囲は45dB以上、最高分解能は十数マイクロ程度と、十分な性能を有することを確認した^[3]。信号処理回路には、Log変換回路、ピークホールド回路、ADC等を含み、上位のVME光伝送リモートボードにパラレル接続する。光伝送リモートボードは4チャンネルの17bitパラレル入力をシリアル変換し、光ファイバによってさらに上位のVME光伝送ボードへデータを転送する。光伝送ボードは共有メモリにデータを書き込み、データ取得は共有メモリからデータを読み出すことにより行う。共有メモリのデータ更新周期は最短で5msを想定している。この計測システムは年内に設置を終了し、来年からの運用を目標としている。

ビームエネルギーのモニタは、ECS用シケイン中央に設置されたスクリーンモニタでビームスポット位置を観測することにより行っている。現在はスクリーンとして12.5 μ mのカプトンフィルムにアルミを

0.4 μ m蒸着したものを使用し、ビーム照射により発生したOTR光を観測している。このスクリーン挿入によるエミッタンス増加は十分に小さいため、スクリーンはビーム入射中常時挿入したままである。ビームスポットの映像は画像解析され、エネルギーとその広がりを出算する。現在、それらの値を運転中に連続してデータベースに書き込めるよう、システムを構築中であり、秋から運用の予定である。

5.3 ビームデフレクタ

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へのビーム入射の際の不要なバックグラウンドとなっている。このグリッドエミッション電流を除去するために、小型のビームデフレクタを昨年試作した^[4]。ビームデフレクタは2枚の平行電極より成り、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、1nsビームが通過する期間のみ電極間電圧はゼロになり、必要とする電子ビームだけが通り抜けてくることが確認された。しかしながら、このデフレクタをそのままリニアックに取り付けると電子銃直後のドリフトスペースが長くなりすぎ、エミッタンス増加や電流値の減少が生じるため、改めてデフレクタの小型化と、プリバンチャまでの既存輸送部の見直しを行っている最中である。

6. RF電子銃開発^[5]

昨年度は、安定な電子ビーム生成を目指して、真空系、レーザー系の装置改良を主として行った。レーザーパルス幅の可変、レーザーパワーの安定化のため、新しいレーザーを導入した。以前のレーザーでは、パルス幅は10ps固定であり、最小エミッタンスを得るには最適値ではなく、レーザーパワーもパルス毎に20%以上の変動があった。新しいレーザーでは、パルス幅を1~30psの間で選択することができ、安定度も4%程度と、改善された。新レーザーの調整、安定化に手間取ったため、本年夏にようやく実験を再開したばかりである。

3次元ビームシミュレーションコードも計算精度を高めるため、細部を改良した。

参考文献

- [1] T. Asaka et al., Proc. 18th Particle Accelerator Conf., 3507(New York, 1999).
- [2] T. Asaka et al., these proceedings.
- [3] K. Yanagida et al., these proceedings.
- [4] T. Kobayashi et al., Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, 171(Himeji, 2000).
- [5] A. Mizuno et al., EPAC2000, 839(Wien, 2000).