

# SPring-8 線型加速器の現状

花木博文<sup>1</sup>、安積隆夫、小林利明、鈴木伸介、谷内努、出羽英紀、富沢宏光、水野明彦、柳田謙一

高輝度光科学研究センター放射光研究所/SPring-8

〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

## 概要

SPring-8 リニアックのビーム安定性改良作業はほぼ目的を達成したが、長期安定度をさらに向上するため、クライストロン変調器の改良等を行っている。電子銃からのグリッドエミッション電流を減衰させるビームデフレクタはその効果が確認されたが、バンチャ空洞等からの暗電流除去が課題である。RF 電子銃の開発では、高量子効率と取り扱いの容易さを両立するため、Cs<sub>2</sub>Te を光電面としたカートリッジ式カソードに取り組んでいる。さらに高電界を空洞内に安定に持続させるため、高周波放電や製造時の空洞洗浄についても研究を進めている。

## 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、2003年6月までの約7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月末で約29,500時間に達する。

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、2002年度までに以下の改良作業が行われた。すなわち、1) 空調や冷却系の見直しにより加速 RF の位相振幅変動を抑制、2) ECS 導入により、ビームエネルギー拡がりの縮小およびエネルギー変動の抑制、3) リニアック制御系更新および BPM 等ビームモニタ増強による制御性の向上、4) ビームパルスと 2856 MHz RF との完全同期化[1]、5) クライストロン励振用増幅器系の高信頼化、励振用導波管の位相変動改善、6) クライストロン RF 電力および位相モニタの導入、などである。その結果、最小の短時間ビームエネルギー変動量は、0.01% (rms) 以下にまで抑制され、運転制御が容易になり信頼性も向上した。しかしながら ECS 無しでは長期的なエネルギー変動がやや目立つ。その主因はクライストロン変調器出力の安定度不足、まだなお若干残る励振用導波管の位相変動等である。これらへの対応を急いでいる。

電子ビーム高品質化の一環として、真の電子ビームバンチに付帯する暗電流を削減する研究も続いている。2001年末に導入されたビームデフレクタにより電子銃グリッドを起源とする暗電流は除去できることが確認され、次はバンチャ空洞や初段加速管からの暗電流を低減する研究を開始した[2]。

ビームモニタについては、BPM をリニアック直線部にすでに整備しておりビーム調整に活躍している

が、2003年度は分散部にも設置を完了する。ビーム電流モニタ回路の温度依存性が問題になり、一部は恒温槽に入れることで解決を図った[3]。

また、2003年度から SR のトップアップ運転が予定されており、まず秋から 30分 2時間間隔の定時トップアップ入射、そして 2004年5月からは定電流トップアップ運転が計画されている。そのため、NewSUBARU 入射と両立させるための 1秒周期でパターン運転可能な偏向電磁石の導入、リニアック軌道調整の自動化などに取り組んでいる。

RF 電子銃実用化に係わる大きなテーマの一つに、取り扱い易く高量子効率で安定なカソードの開発がある。JASRI 加速器部門では、2002年度から浜松ホトニクス株式会社、東京大学と共同で、真空中で脱着可能な高量子効率カソードの開発を開始した[4]。さらに、RF 電子銃では 100MV/m 以上の高電界を安定して維持し、かつ低暗電流を実現する必要がある。これは通常の進行波型加速管においても重要な問題であることから、高エネルギー加速器研究機構と共同で加速管内の高電界発生の研究を進めている[5-7]。

## 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。また、1 ns/200 mA のビームは、ビーム同期 2856 MHz 発振器の導入により、短時間エネルギー安定度 0.01% rms を達成している[1]。

表1：リニアックのビームパラメータ (ECS は動作)

	Synchrotron		NewSUBARU
Pulse Width	1 ns	40 ns	1 ns
Repetition	1 pps	1 pps	1 pps
Current	2 A	350 mA	200 mA
dE/E (p-p)	0.62%	1.4%	0.4%
Energy Stability (rms)	0.02%	-	0.01%
$\epsilon_n$ (90%, mm-mrad)	<240 $\pi$	-	<200 $\pi$

2002年における総運転時間は、昨年より若干長い約5,540時間であった。大電力クライストロン変調器の2002年末までの累計運転時間は、ヒーターオン時間で約42,500時間、高圧オン時間で約34,900時間に達した。幸い、今だ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。

<sup>1</sup> E-mail: hanaki@spring8.or.jp

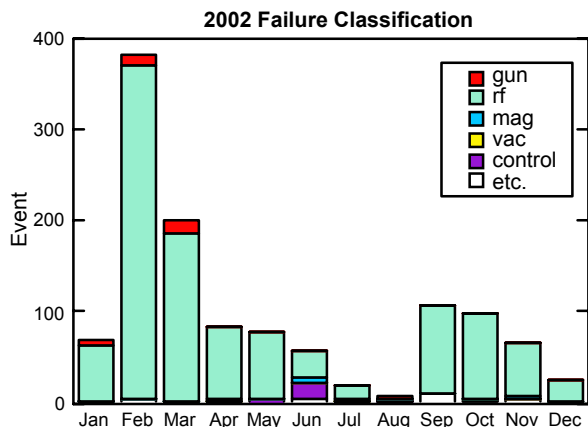


図1: インターロックフォールの頻度と分類

2002年の月毎に、インターロックフォールの分類を行ったのが図1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2、3月のRF系フォールトが目立つが、これは2月にクライストロン1本のヒーター回路に不調が多発し、3月は交換したクライストロンのコンディショニングに伴うフォールトが起こったからである。

2002年の線型加速器では、SRへのビーム入射に支障が出るような深刻な故障は無かったが、以下のような機器の故障や交換があった。まず2年間使用した電子銃カソードを大気暴露したところ、エミッション電流が取れずに再使用できなくなり、新年早々新しいカソードに交換した。また加速管1本の冷却水漏れが発見され、夏の停止期間中に新品と交換した。前述したようにクライストロン1本にヒーター回路の不調が頻発したが、結局附属するヒータートランスの短絡が判明し、このクライストロンは新品と交換した。サイクロトロンは1本を交換している。

その他、シンクロトロンへのビーム輸送路電磁石電源は従来シンクロトロンの入射電源室に設置されていて、この電源室が機器で込み合っており保守作業に支障があった。そこで電磁石電源をリアック棟のビームモニタ室に移設し、保守性は大きく向上した。

### 3. 加速器の改良および安定化

#### 3.1 RF系安定化

SPring-8の変調器はDeQ型電圧安定方式を採用しているが、IVRの制御が不十分なため、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。そこで昨年度からクライストロン変調器の長期安定度を向上させるための検討を行っている。試みに一台の変調器について、高圧モニタ回路の精度改善およびIVR制御ロジックの改良を施した結果、高電圧直流電源の長期電圧安定度は1/2以下に向上したことが確

認された。

入射部のSF<sub>6</sub>充填導波管のガス圧は、運転中ごく僅かずつ低下することが分かっており、それに伴う僅かな位相変化を気にしている。またクライストロン励振用70m導波管のガス圧を安定化しても、まだ位相変動は残っている。これらについても2003年度に対策を予定している。

その他、クライストロンRF電力および位相のモニタ回路も導入され、RF系の故障診断が以前よりも容易に行えるようになった。特に位相検出器（日本高周波製）は従来のモデルに改良を加え、位相検出精度±1 deg.以下、温度特性0.1 deg./°C以下、位相出力立ち上がり時間（10-90%）80ns以下を達成している。

#### 3.2 ビームデフレクタ[2]

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た。このグリッドエミッション電流を除去するために、2枚の平行電極に高電圧パルスを加えてグリッドエミッションを横方向に蹴飛ばすビームデフレクタを2001年度に導入した。その後の試験で、グリッドエミッションだけでなくバンチャ空胴や初段加速管の空胴壁から発生する暗電流の一部も1GeVまで加速されてシンクロトロンに入射されてしまうことが分かった。そこで、とりあえずバンチャ空胴や初段加速管のRF電力を可能な限り下げて暗電流を減らし、測定を行うことにした。

まず線型加速器のECS下流部にシンチレータ付き光電子増倍管を置き、暗電流ビームをスクリーンモニタに当てたときに発生するX線を観測した。その結果、図2のようにデフレクタなしで観測される暗電流が、デフレクタによりほとんど除去されることが分かった。

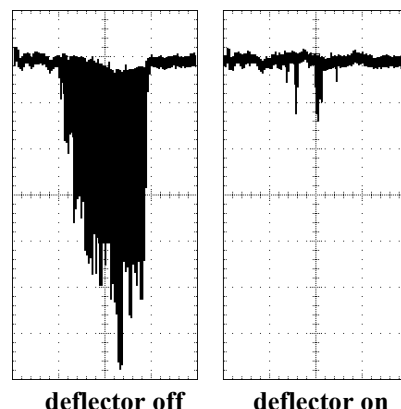


図2: ビームデフレクタによるグリッドエミッションの除去 横軸: 1μs/div

次にSRに蓄積されているビームの電荷量を、高感度な光子計数法により測定した。目的とするRFバケットの前後に存在した電荷分布は、ビームデフレクタを動作させるとほとんど観測されなかった。

以上の実験から、ビームデフレクタは確実に動作してグリッドエミッションを除去し、蓄積リングでのバンチャ純度も大きく改善されることが確認できた。次の課題はバンチャ空胴、初段加速管などで発生する暗電流の対策であ

るが、現在この暗電流を偏向電磁石により分離することを検討中である。

### 3.3 トップアップ入射

SPring-8 と NewSUBARU への頻繁な入射を両立させるための 1 秒周期でパターン運転可能な偏向電磁石を導入し、年末に現在の偏向電磁石と入れ替える。鉄心をブロックから珪素鋼板積層に変更し、励磁パターンは、立ち上がり 0.2 秒、フラットトップ 0.2 秒、立ち下がり 0.2 秒を予定している。

安定な高周波入射を実現するため、リニアックの自動調整および運転も重要と考え、検討を開始した。

## 4. RF 電子銃の開発

現在試験中のカソードは、図 4 の写真のように真空カートリッジに封入された  $Cs_2Te$  カソードである [4]。このカートリッジを RF 電子銃空洞背面に取り付けた装填機構にセットし、真空中でカートリッジ端面のフォイルを破って RF 空洞にカソードを装着できる。このような構造にすることにより、高量子効率ではあるが、常時真空中で取り扱う難しさのある  $Cs_2Te$  カソードを、安定に製造し、かつ小規模な施設に於いても容易に扱うことが出来る。

今年度は試作品について脱着試験および RF 電界印加試験を行い、従来と同様の 90 MV/m の電界に耐えられることを確認した。また RF 電界中での量子効率の測定も行った。2003 年度は装填機構やカソードの改良後に再度試験を予定している。



図 3: カートリッジ式カソードの試作品  
ベローズ先端に直径 7.2 mm のカソードがあり、リング状の RF コンタクトが付いている。

2003 年度から、RF 電子銃試験装置に加速管 1 本を導入してビームエネルギーを 30 MeV まで増強し、ビームのエミッタンスやバンチ長の測定を容易にするとともに、RF 電子銃から加速管への最適ビーム輸送の研究を行うことにした。さらに、レーザー用クリーンルームも面積を拡張し、温度安定性、恒湿性、防振性など性能を向上させて新設することにした。すでにクリーンルームを完成させ、2003 年度前半に放射線遮蔽の拡張および加速管等機器の設置を終える予定である。RF 電子銃試験装置の拡張後は、RF 電子銃空洞を 2 台並べて設置し、切り替えて試験することが出来る。

## 5. 高電界試験

高エネルギー加速器研究機構にて共同で S バンド加速管の高電界試験を行い [5]、放電発光の高速分光および高感度質量分析により、加速管内の高周波放電を観測した。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。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、試験片表面の元素分析を行った。その結果、以下のような知見が得られた [6,7]。

- ・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 4 参照)。
- ・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ることが明らかとなった。
- ・コンディショニング後の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、これはグラファイトである。
- ・高圧純水洗浄は圧力 5 MPa 以上では銅の表面を傷め、また圧力を 2 MPa 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。

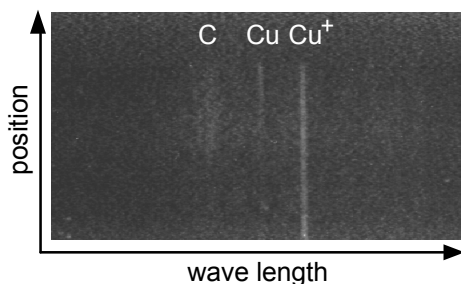


図 4: 高圧純水洗浄していない加速管のコンディショニング中に観測された放電発光スペクトル

## 参考文献

- [1] T. Asaka et al., 同期タイミングシステムの性能とビーム特性, 本予稿集.
- [2] T. Kobayashi et al., Beam deflector の開発 (3), 本予稿集.
- [3] M. Adachi et al., ビーム電流積分回路の特性, 本予稿集.
- [4] H. Dewa et al., カートリッジ式  $Cs_2Te$  カソード RF 電子銃, 本予稿集.
- [5] Y. Igarashi et al., KEKB 入射器用 S バンド 2 m 加速管の高電界試験, 本予稿集.
- [6] H. Tomizawa et al., 超純水洗浄の無酸素銅表面に対する影響について, 本予稿集.
- [7] H. Tomizawa et al., "Spectrographic Approach for Diagnosing Rf Breakdown in Accelerating Rf structures", Proc. of the 8th European Vacuum Congress, Berlin Germany, Jun. 2003.