

## STATUS OF THE SPring-8 LINAC

H. Hanaki<sup>#</sup>, T. Asaka, H. Dewa, T. Kobayashi, A. Mizuno, S. Suzuki, T. Taniuchi, H. Tomizawa and K. Yanagida  
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/Spring-8)  
Kouto, Mikazuki, Sayo, Hyogo, 679-5198

### Abstract

The SPring-8 linac has been improved in order to stably maintain top-up injections into a booster synchrotron and the NewSUBARU storage ring: RF phase variations in a long drive line has been finally stabilized. Beam feedback controls compensate for residual long-term variations of beam trajectory and energy. Enhancement of machine reliability has reduced the down time of the top-up injection to 0.2%. An RF gun test bench has been reinforced: A laser shaping optics successfully generated an almost ideal laser shape to realize low emittance electron beams.

## SPring-8 線型加速器の現状

### 1. はじめに

SPring-8 1GeV線型加速器（リニアック）は、96年8月1日にコミッショニングを開始して以来、2005年6月までの約9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、リニアックの累計運転時間は、この6月末で約39,980時間に達する。

2004年5月より開始した蓄積リングのトップアップ運転は、昨年台風被害の修理のために3ヶ月ほど中断したものの、順調に維持されている。また、2005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が始まり、現在も継続されている。SPring-8およびNewSUBARUそれぞれについて、トップアップ運転の最短ビーム入射間隔は、1分および5秒、ビーム電流安定度は、0.1%および0.2%以下であった。

このように頻繁に入射を行う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出来る限り避けねばならず、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。すなわち、リニアッ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リニアックでは、1998年よりビームの安定化を進めてきており、さらに2003年からは安定なトップアップ入射を実現すべく信頼性の向上に努めている<sup>[1,2]</sup>。

2002年から目立つようになった室温変動は、ようやくほぼ完全に安定化でき、90 mドライブラインの位相変動は、解決できる目処が立った。ビームエネルギーや位置の長期変動を最小に抑えるため、フィードバック制御を導入し、入射効率が長期的に変動することは見られなくなった。また、初段加速管から放出される暗電流を抑制し、電子ビームのS/Nを極限まで高める試みも進んでいる。

一方、信頼性向上のため、電子銃および初段クライストロンの二重化が急がれているが、後者については、大電力RF用導波管スイッチを開発し、2005年末頃には二重化を完成する予定である。また、ビーム調整の時間を最小にするため、自動調整の導入を

進めており、クライストロンの自動位相調整ができるようになった。

RF電子銃試験装置では、レーザーの安定化が進み、理想に近いレーザーパルス形状を実現する光学系もほぼ完成した。今では $2\pi$  mm mrad以下の小さなエミッタンスを再現性よく測定することが出来る。

### 2. 運転状況

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。トップアップ運転のため、トップアップ入射専用の1 ns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1 ns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。

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%

SPring-8蓄積リングへのトップアップ入射間隔はフィリングパターンにより異なり、1分または5分固定である。NewSUBARUでは、入射間隔は固定せず、蓄積電流が一定になるよう入射を行っており、最短で5秒間隔である。1.5 GeV運転の場合は一日に二回、各回約25分の入射を行っている。

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。

図1左に2004年中のサイクル毎のインターロック

<sup>#</sup> hanaki@spring8.or.jp

フォールト統計を示す。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ー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、落ち着いた。図1右には、トップアップ入射がリニアックのフォールトにより延長された時間をトップアップ運転時間で割った、ダウンタイムを示す。対策の結果、第8サイクルではダウンタイムは0.2%にまで減少した。

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、真空ベローズを損傷してしまったのである。

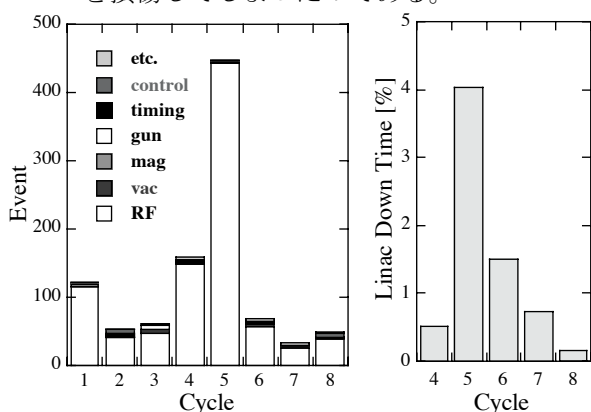


図1：インターロックフォールトの頻度。左は原因別の頻度、右はフォールトによるダウンタイム。

### 3. 加速器の改良および安定化

#### 3.1 温度安定化<sup>[2]</sup>

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60 ppsから10 pps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ラ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ブ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、以下の対策を行った事を昨年報告した。

- (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) 90 m導波管を断熱材で被い、内部に冷却水(27±1 °C)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°C以下になると、5°C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、ギャラリ内の気温も大きく変動する。その様子が、図2左に示したドライブ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°Cでもドライブラインの温度は27°Cに保たれていることが分かる。

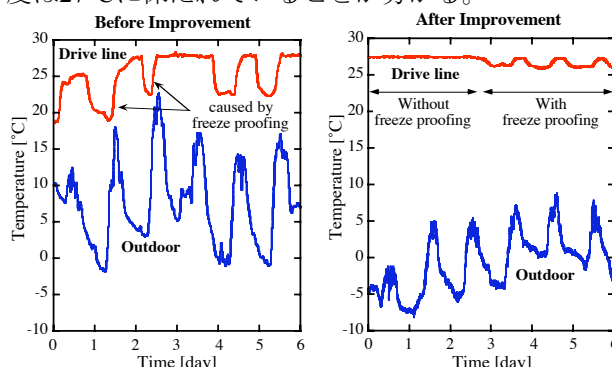


図2：改良前後のドライブライン温度変化

#### 3.2 初段クライストロンの二重化

SPring-8リニアックでは、初段すなわち最上流にある80 MW クライストロンが、バンチャおよび初段の加速管にRFを供給し、さらに下流の12本のクライストロンを励振している。したがって、このクライストロンが停止すると、電子ビームを全く加速できなくなる。そのような事態を避けるため、常時予備のクライストロンを運転状態で待機させ、必要ときに初段クライストロンと入れ替えられるシステムを製作中である。このシステムで最も重要な大電力導波管切換器<sup>[3]</sup>は現在順調にコンディショニング中であり、投入RF電力は、現時点で61 MWである。

#### 3.3 暗電流の低減<sup>[4]</sup>

2003年に報告したように、電子銃から放出される暗電流、すなわちグリッド放射電流は、電子銃直後のビームデフレクタによって、ほぼ完全に除去することが出来た。しかし、初段加速管から放出される暗電流が加速され、最後には蓄積リングのRFバケットに捕獲されることが明らかになった。そこで、この暗電流を低減させる方法を検討した。

実は、バンチャ部からも少ないながら暗電流は放出されている。この暗電流は、バンチャ部のビーム集束用ソレノイド磁場をゼロにすると大きく増える。そこで、初段加速管にもソレノイドコイルを巻くことで暗電流を低減できないか、試験を開始した。

#### 3.4 フィードバックによるビーム安定化<sup>[5]</sup>

前述したドライブ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を利用して、以下のフィードバック自動制御を導入した。

- ・三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が行われたのは、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あり、以下の三カ所である。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への輸送路である。

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。

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。

図3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。

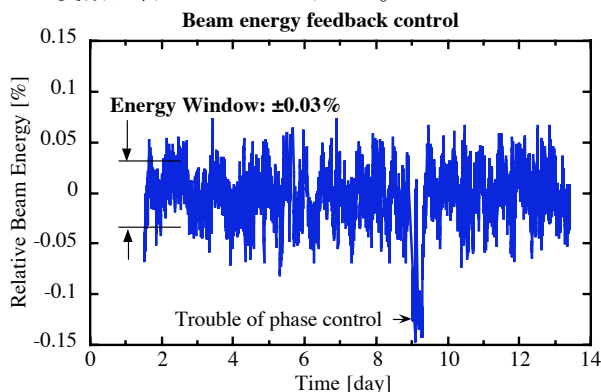


図3：フィードバック制御によるエネルギー安定化

### 3.5 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<sup>[5]</sup>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。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ため、ビーム入射中でも可能である。

ビーム軌道自動調整に関しては、リニアック入射部において、まずはビーム軌道の計算値と実際の軌道との不整合について調査を進めている。今までのところ、(1)リニアックで使用されている四重極電磁石は、いわゆる薄肉レンズ近似が使えないこと、(2)初段加速管両端部でのRF電磁界によるビーム収束発散効果が無視できない<sup>[6]</sup>、などが明らかになった。今後も調査検討を進め、実際のビーム軌道なるべく正確に模擬できるよう、研究を進める。

### 3.6 制御

昨年、リニアックビーム運転に関わる安全インターロック系を改良し、装置からのインターロック信号を取り込む端末にPLCを導入した。さらに、オープンなネットワークプロトコルであるFL-netを導入し、これらPLCを接続した。これにより、このFL-netに接続するPLCは、異なるメーカー製であっても、上位制御系から同じコマンドでアクセスできる。現在、変調器制御用PLCをFL-netに接続して試験を続けている<sup>[7]</sup>。

## 4. RF電子銃の開発<sup>[8]</sup>

現在、新レーザクリーンルームの温度安定化、および安定性の高い光学支持部品の採用などによる、レーザシステムのパッシブ安定化の結果、レーザの長期安定度（3時間～1日間）が第3高調波で $0.7 \sim 1.3\%$  (rms)（基本波で $0.2 \sim 0.3\%$ ）までに改善された。

レーザの空間・時間プロファイルの最適整形については、補償ミラーと石英板空間位相変調器を使った自動整形システムが、一部の自動整形ソフトウェアを除いてほぼ完成した。空間整形ではフラットトップ・ビームの生成、時間整形でも矩形パルス（幅： $2 \sim 12$  ps）生成が実証された。

上記レーザシステムにより生成されたレーザパルスにより電子ビームを生成させ、約 $30$  MeVまで加速して、 $2\pi$  mm mrad以下の小さなエミッタンスをQスキャン法により再現性よく測定することが出来るようになった。しかしQスキャン法によるエミッタンス測定には誤差が大きいことも明らかになった。複数の極細スリットを用いて正確にエミッタンスを測定できる装置も完成し、秋には稼働する予定である。

## 参考文献

- [1] H. Hanaki, et al., “Enhancements of Machine Reliability and Beam Quality in SPRING-8 Linac for Top-Up Injection into Two Storage Rings”, PAC2005, Knoxville, USA.
- [2] S. Suzuki, et al., “SPRING-8 Top-Up運転に向けた線型加速器の対応”, these proceedings.
- [3] T. Taniuchi, et al., “Sバンド真空導波管切替器の大電力試験”, these proceedings.
- [4] T. Kobayashi, et al., “ビームデフレクターの開発(4)”, these proceedings.
- [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”, these proceedings.
- [6] A. Mizuno, et al., “Sバンド加速管におけるビーム収束効果について”, these proceedings.
- [7] T. Hasegawa, et al., “FL-netを用いた電子銃電源の制御”, these proceedings.
- [8] H. Tomizawa, et al., “レーザパルス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”, these proceedings.