

## STATUS OF THE SPring-8 LINAC

H. Hanaki, 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

SPring-8 in the top-up operation has been providing synchrotron radiation lights with constancy of 0.1% or less. A linac has been improved in order to stably maintain the top-up injections into a synchrotron and the NewSUBARU storage ring: We have enhanced the RF stability and the reliability of devices not to interrupt the minute-by-minute injections. A fast response switching magnet was installed in a beam transport line for the simultaneous injections into the two rings. An RF gun test bench has been reinforced: The beam energy was increased to 30 MeV and a laser system was improved to generate laser lights of 1.5% rms stability. The chemical etching was tried to treat a surface of an RF gun cavity. The maximum field gradient reached up to 183 MV/m after RF conditioning.

## SPring-8 線型加速器の現状

### 1. はじめに

SPring-8 1GeV線型加速器は、96年8月1日にコミッショニングを開始して以来、2004年6月までの約8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34,600時間に達する。

本年5月より、いよいよ蓄積リングのトップアップ運転が開始された<sup>[1]</sup>。本稿執筆の時点まで何の問題もなく運転は続いており、蓄積ビーム電流100mAの安定度は、兵庫県立大学の1.5 GeV放射光施設NewSUBARUへの入射などで蓄積リングのトップアップ運転が約25分中断される場合をのぞき、0.1%以下である。ビーム入射は、当然のことながらSRビームラインのシャッターは開いたまま、挿入光源のギャップは狭めたまま行われる。蓄積リング担当者らの努力の結果、蓄積ビームが入射時に揺れることもほとんどなく、ユーザーは、強度が一定で位置も非常に安定な放射光ビームを連続して利用できるという。実は、NewSUBARUもトップアップ運転を行って来たが、現在は中断している。後述するように、秋からSPring-8およびNewSUBARU両方同時のトップアップ運転を行う予定である。

このトップアップ運転がユーザーにもたらす利点は次の通り。まず、シングルバンチ運転のように、寿命の短い運転モードであっても、一定強度の放射光を供給できる。また、実験装置の精密な光学系は、大強度の放射光のために熱変形を避けられないが、強度一定ならば変形量も一定で、光学的に安定になり、より精密な測定が可能になる。

このように、理想的とも言えるトップアップ運転であるが、加速器にとってはとても厳しい。トップアップ運転中は、リニアックは1分毎にシンクロトロンへ入射する。リニアックがわずか数分間でもビーム出射できないと、蓄積電流が減衰し、安定度は目標の0.1%に納まらなくなる。すなわち、リニアックでは、トップアップ運転中は、クライストロ

ン変調器のフォー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。そこで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ようになった。

このトップアップ運転を順調に維持するために、リニアックでは以下の改良を行った<sup>[2]</sup>。詳細は後述するが、2002年から室温の変動が大きくなり、それにとまなう90 mドライブラインの位相変動が目立つため、ドライブラインの温度安定化を施した。また、NewSUBARUにもトップアップ運転を行うため、1秒周期で両ビーム輸送路の切換を可能にする、高速応答の積層型偏向電磁石を導入した。また、両方のリングへの入射調整をできる限り簡単に自動軌道調整の導入を進めている。

電子銃用高圧電源も、その設計が古く保守部品の入手が困難になるなど十分な信頼性が維持できない。そこで昨年より新型電源の開発を行い、まもなくテストベンチで総合試験が開始される。

RF電子銃試験装置の拡張が終わり、無事30MeV近いエネルギーに加速できた。またRF空洞内で100 MV/m以上の高電界を安定して維持するために空洞壁のエッチング処理を試み、好結果を得ている。

### 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。トップアップ運転のため、新たに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半分削減している。尚、1 nsビームの入射電流660 mAが蓄積リングへの最小入射電流を決めており、この値を小さくしてより高頻度で入射すれば、蓄積ビーム電流安定度はさらに良くなる。

7月現在、SPring-8蓄積リングへのトップアップ入射は1分毎に行い、NewSUBARUへは一日に二回、各回約25分の入射時間である。

リニアックのBPMシステムが整備されたため、まずステアリングによる自動ビーム軌道調整が試みられており、NewSUBARUビーム入射点直前のBPMにて50  $\mu\text{m}$ の精度で入射軌道が再現されている。

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%

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。

図1に2002年中のサイクル毎のインターロックフォールト統計を示す。最も頻度の高いRFフォールトのほとんどは、サイクロトンの自爆である。電子銃フォールトもやや目立つが、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ドが接続されるが、このフィードを装着する際に相手側のソケットを痛めてしまい、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クロトロンを一本交換した。

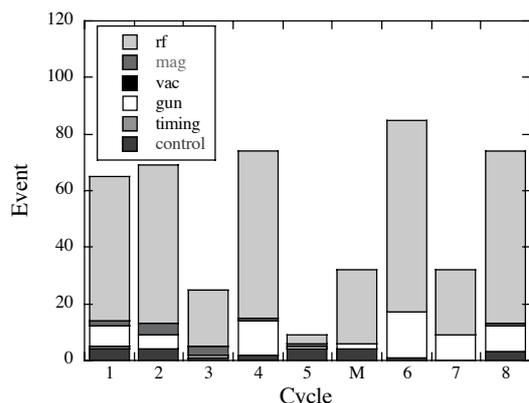


図1：インターロックフォールトの頻度と分類

### 3. 加速器の改良および安定化

#### 3.1 RF系

2002年から90m導波管ドライブラインにおける位相変動が目立つようになった。調査の結果、クライストロンギャラリでの温度変動が以前よりもかなり大きくなっていることが明らかとなった。その原因は以下の通りである。

SPring-8リニアックの空調は、冷房+除湿のみであり、室温が下がり過ぎても暖房で室温を維持することが出来ない。また、空調機は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。また、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、その結果リニアックの発熱量が大きく低下した。以上が原因となって、冬期にクライストロンギャラリの気温が大きく下がってしまったのである。また、雨天に除湿器が働き始めると、結果的に室温まで下げてしまう。

この位相変動の解決には、根本的には空調設備に暖房機能を増設して室温の完全安定化を計るしかないが、まず今回は以下の対策を行った<sup>[3]</sup>。

- (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 $\pm$ 1  $^{\circ}\text{C}$ )を循環させた。

対策(1)により、5, 6月の室温はほとんど一定に保たれた。また対策(2)により位相変動は当初の1/3に減少した。これでも冬期など室温が大きく下がる場合には不十分なため、さらに改良を検討している。

#### 3.2 トリガ系<sup>[2]</sup>

トップアップ運転ではビーム入射の中断を極力避けたい。そこでクライストロンや変調器の不調時に、待機クライストロンと速やかに交換できるよう、常時RF運転状態の待機クライストロンを用意する必要がある。そこで、待機クライストロンは、1 ppsのビーム加速時のみ変調器トリガ信号をマスクして、その瞬間だけRFが加速管に投入されないようにした。

#### 3.3 電子銃電源<sup>[4,5]</sup>

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。

- ・変調器回路の構成はインバーター電源+PFN
- ・サイクロ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、高電圧を下げて、パルストランス昇圧比を1:30とする。これは、変調器高圧部の小型化、高信頼化にもつながる
- ・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。

新型電子銃電源は本年完成し、現在調整中である。まもなく総合試験を開始し、十分な試験調整の後、来年度に現在使用中の電源と交換する予定である。

#### 3.4 高速応答型偏向電磁石<sup>[2,3]</sup>

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。鉄心に0.5 mm厚の50A400珪素鋼板を

使用している。これにより、旧電磁石では30 Gauss程度あった残留磁場は、10 Gauss以下に抑えられた。新たに高速電源も製作し、励磁パターンは、立ち上がり立ち下がりともに0.2秒、フラットトップは0.2秒以上である。電流安定度は、 $0.3 \times 10^{-4}$ であった。

## 4. RF電子銃の開発

### 4.1 レーザ<sup>[6]</sup>

レーザ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。またレーザ安定化のため室温の安定度を $\pm 0.3$ 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の性能を大きく損ねるからである。レーザ源自体も温度安定化を施した。その結果、レーザ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、低エミッタンスを達成するためにとっても重要である。過去にパッシブな方法で空間プロファイルを改善したが、現在はより自由度の高いアクティブな方法を開発している。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矩形パルスを得る。手動による予備試験は成功し、今後は自動成型アルゴリズムを開発する予定である。

### 4.2 RF電子銃<sup>[7]</sup>

拡張した遮蔽内に加速管1本を導入してビームエネルギーを30 MeVまで増強し、その結果バンチ長やQスキャン法によるビームのエミッタンスの測定が容易になった。計算によれば、1 nCのバンチをエミッタンス約 $2\pi$  mm·mradで加速可能である。まだレーザの最適化が未完了の段階での試験測定では、Qスキャン法により、24.4 MeVにて約 $10\pi$  mm·mradのエミッタンスが得られた。なお、拡張した遮蔽内には、もう一台のRF電子銃単体を設置出来る。

## 5. 高電界加速

### 5.1 RF空腔内表面処理<sup>[8]</sup>

過去の高電界試験で得られた知見から、加速空腔壁面の汚れおよび酸化銅に静電的に付着する埃が加速管内放電の原因と考えた。そこで空腔内壁の酸化銅を除去し清浄にするため、化学エッチングを試みた。表面粗度をほとんど悪化させないエッチング量は試験片による調査の結果、 $0.3\mu\text{m}$ 以下であった。

実際にRF電子銃空腔をこの最適条件でエッチング処理し、RFコンディショニングを行った。その結果、以下の図に示すように、無処理の空腔に比べてコンディショニングの進行ははるかに速く、コンディショニングとともに暗電流は減少し、最大電界強度は3週間後に183 MV/mに達した。また量子効率も、155 MV/mにて $8.6 \times 10^{-3}\%$ と、過去最高の値であった。

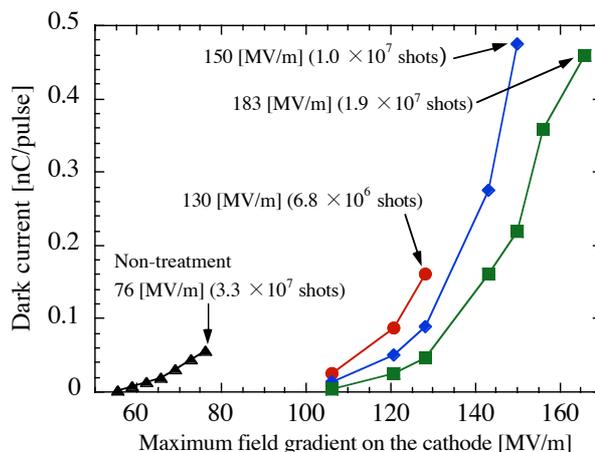


図2：RF電子銃空腔のコンディショニング過程

### 5.2 加速管RFカップラ<sup>[9]</sup>

我々は放電が起こりにくく単純な構造のカップラとして、ビーム軸が導波管E面を貫通し、その貫通孔を加速管第一空腔と共有する、電界結合型カップラの設計を行っている。

この構造の利点は、計算によれば次の通り。

- ・カップラの電界強度は、加速セル最大電界の約1割と小さく、放電を起こしにくいことが期待される。
- ・シングルフィードでも電磁場非対称性によるビームへの影響が小さい。
- ・寸法許容誤差が比較的大きい

その他、構造が簡単のため製作しやすいことも長所である。しかし、このままでは、導波管と第一空腔部での加速ゲインが小さすぎてこの部分が空間的に無駄になる、という欠点がある。

今後も設計を進め、低電力モデルを製作したい。

## 参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., "Top-up operation at SPring-8 - towards maximizing the potential of a 3<sup>rd</sup> generation light source", EPAC2004, Lucerne, Switzerland.
- [2] T. Asaka, et al., "SPring-8線型加速器のTop-Up運転対応", these proceedings.
- [3] S. Suzuki, et al., "Improvement of SPring-8 linac towards top-up operation", EPAC2004, Switzerland.
- [4] S. Nagasawa, et al., "Spring-8線型加速器電子銃電源システムの開発", these proceedings.
- [5] T. Hasegawa, et al., "電子銃モジュラータ用制御システムの開発", these proceedings.
- [6] H. Tomizawa, et al., "フォトカソードRF電子銃のためのレーザ光源の高品質化", these proceedings.
- [7] H. Dewa et al., "Photo cathode RF gun designed as a single cell cavity" EPAC2004, Lucerne, Switzerland.
- [8] H. Tomizawa et al., "化学エッチングの無酸素銅製RF空腔の表面に対する効果", these proceedings.
- [9] T. Taniuchi, et al., "進行波管における導波管電界結合型カップラのRF特性", these proceedings.