

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、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 リニアックでは、リング RF と同期して発振する主信号発生回路を導入し、シングルバンチ入射電流を安定化した。さらに最小のビームエネルギー変動量は、ECS とあわせて 0.01% (rms)にまで小さくなった。長く使用したカソード部からのグリッドエミッションを加速させないために、電子銃直後にビームデフレクタを入れた。新しい BPM システムはほぼ完成し、すでに運転に使用し始めた。RF 電子銃の開発では、レーザーシステムの安定化および UV レーザーパルス空間形状の一部最適化の結果、電子ビームエネルギー 3.1 MeV、バンチ電荷量 0.1 nC において、約 2mm・mrad の規格化エミッタンスを得た。

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、2002 年 6 月までの約 6 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 月中旬で約 24,000 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、5 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^[1]。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、昨年 4 月より運転に使用し始めた。その結果、予定通りビームのエネルギー広がりも縮小され、入射電流を増強する事が出来た。また長期間にわたりビームエネルギーは安定化されるようになった^[2]。またリニアック制御系も更新され、データベースが使用できるようになるなど、制御性が向上した^[3]。2001 年度はビームパルスと 2856 MHz RF との完全同期化、およびクライストロン励振用増幅器系の高信頼化を図り、2002 年度は主にクライストロンドライブラインの安定化、RF およびビームのモニター系を完成させ、これにより当初の安定化計画は今年度をもってほぼ完了の予定である。

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。ECS 導入の結果、40 ns ビームは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。また、1 ns/200 mA のビームは、後述するビーム同期 2856 MHz 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。

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

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

2001 年における総運転時間は、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。幸い、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。

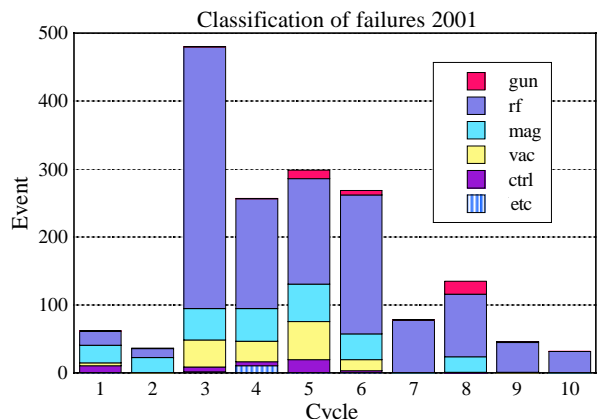


図 1: Linac failure statistics for 2001.

2001 年の運転サイクル毎に、インターロックフォールト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。特に第

¹ E-mail: hanaki@spring8.or.jp

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、サイクロトロン 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。

3 . 加速器の改良および安定化

3.1 RF 参照波発生回路

線型加速器電子銃用のガントリガパルスは蓄積リングの 508.58 MHz 基準信号を分周して作られている。しかし、線型加速器の 2856 MHz と、蓄積リングの 508.58 MHz 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 2856 MHz に非同期である。それゆえ例えば 1 ns ビームの場合、バンチ数は 2 または 3 個とショット毎に変化し、各バンチの電荷量も一定しないため、RF のビームローディングも変動し、結果的にビームエネルギーがショット毎に変動してしまう。

この問題を解決するために、2856 MHz をガントリガに同期させて発振させるという方法が考え出された。その方法とは、2856 MHz の 32 分周である 89.25 MHz 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を入力する。そしてこの信号を 32 逓倍すれば、ガントリガに同期した 2856 MHz が得られる仕組みである。

実際の回路は図 2 のように組み立てられている。89.25 MHz の波形は、あらかじめ 508.58 MHz でサンプリングされたデータが任意発生器に自動的にプログラムされており、508.25 MHz をデータ読み出しクロック、ガントリガをスタート信号として、290 μ s の間発振を続ける。すなわち、連続波ではなくバースト波である。この中間信号の位相雑音を最小にするため、Q の非常に高い水晶フィルタ (バンド幅 12 kHz) を通してから 32 逓倍している。

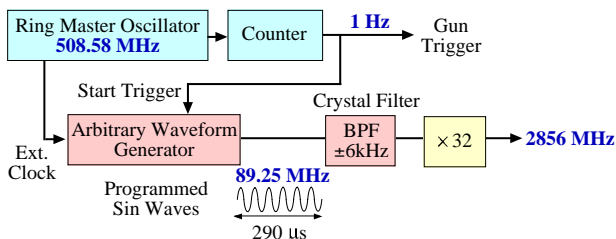


図 2: Block diagram of RF reference generator.

以下は、この新しい参照波発生回路によるビーム安定度改善の一例である。線型加速器の電子銃は、250 ps 幅の電子ビームを生成出来る。バンチャはこ

の電子ビームの一部を圧縮してシングルバンチを形成する。図 3 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。新しい同期式参照波発生回路を用いた場合は、ビーム電流が安定していることがよく分かる。これはビームパルスと 2856 MHz が同期しているため、ショット毎のバンチ電荷量がいつも同じだからである。

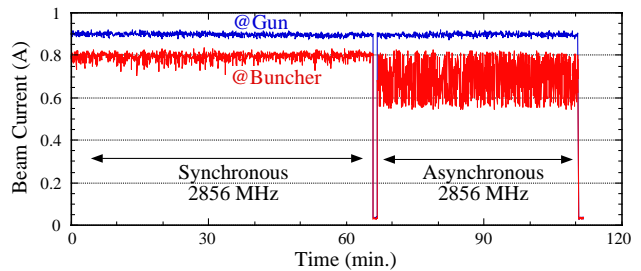


図 3: Stability of single-bunched beam.

3.2 入射部励振系

従来は、7 MW クライストロン 1 本がバンチャ部および 13 本の 80 MW 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今や信頼性に乏しく、また他の 80 MW クライストロン用変調器とは全く別の物であるため、保守性にも問題があった。一方、最上流の 80 MW クライストロンは、バンチャ直後の加速管 1 本のみで RF 電力を供給しているため、出力にかなり余裕を残していた。このクライストロンでバンチャ部および残りの 12 本の 80MW クライストロンを励振しても何ら無理がないことが明らかになったため、2001 年夏に 7 MW クライストロンを廃止し、立体回路を一部組み替えて、全てのクライストロンを 80MW 球に統一した。これにより保守性が向上し、バンチャ部 RF 電力も安定となった。

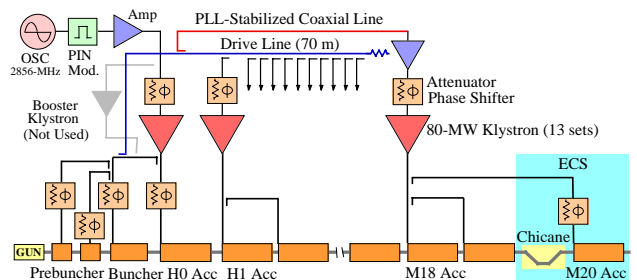


図 4: Diagram of improved RF system.

12 本の 80MW クライストロンを励振するためのドライブラインは、図 4 に描かれているように長さ 70 m の窒素ガスを充填した導波管である。この導波管は冷却水などによる温度安定化を行っていない。導波管終端での位相変動を測定すると最大約 18 度の変動が観測され、これは明らかにビームエネルギー変動の原因となっている。そこで室温、管内窒素ガス圧力、RF 位相の変動を同時に計測したところ、それらには明らかに相関が見られるものの、主たる原因は明らかにならなかった。

しかし試みに窒素ガス圧力の安定化を行った。その結果位相変動は約 1 / 3 に減少したが、現在も調査を続けているところである^[5]。

3.3 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一昨年試作した。ビームデフレクタは 2 枚の平行電極よりなり、高電圧パルスを印加してグリッドエミッションを横方向に蹴り飛ばす仕組みである。試験の結果、1ns 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。デフレクタ設置による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 年末に設置した^[6]。現在試験中である。

3.4 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、測定可能な信号強度範囲が 45dB 以上、最高分解能は 10 μm 程度と、十分な性能を有する事が確認され^[7]、データ収集系の構築もデータベース関係を残しほぼ終了した。全 BPM のデータをビームに同期して 60 Hz で読み込むため、VME システムには図のように共有メモリ方式を採用している^[8]。

すでにシステムは稼動しており、リニアック運転者はディスプレイに表示されるビーム軌道を見ながらステアリング電磁石を操作して、容易に軌道調整を行うことが出来る。ステアリング電磁石の自動調整プログラムも作成され、現在試験中である^[9]。

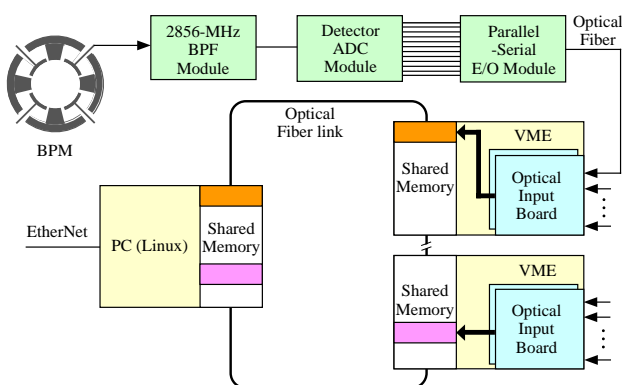


図 5: Block diagram of BPM data acquisition system.

ECS 補償前のビームエネルギーおよびエネルギー幅の監視のため、ECS 用シケインの中央部に OTR 光によるスクリーンモニタを設置している。このスクリーンはアルミコートされた薄いカプトンフィルムで出来ており、ビームエミッタンスの悪化は無視できるため、挿入したままでシンクロトロンへのビーム入射が出来る。スクリーン上のビームプロファ

イルは画像処理され、エネルギーの重心とその幅を連続的に求めてデータベースに取り込めるよう整備された。その結果、ビームの変化をより早く知ることが出来、また RF などの変動との相関もすぐに見ることが出切るようになった^[10]。

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に努めた結果、ようやく長時間の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て来たが、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できた。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得た。その結果、レーザーポット、RF 空洞、輸送系のアライメントも精度よく行えるようになった。UV レーザーパルスの時間軸方向光子分布についてはまだ十分に調整できていないが、電子ビームエネルギー 3.1 MeV、パンチ電荷量 0.1 nC において、約 $2\text{mm}\cdot\text{mrad}$ の規格化エミッタンスを達成した^[11]。

5 . 謝辞

RF 基準波の同期発信回路は、蓄積リング RF グループが発案し開発した。またビームモニタのデータ収集系は加速器コントロールグループにより構築された。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Asaka et al., "Stabilization of the RF System at the SPring-8 Linac", to be published in NIM-A.
- [2] T. Asaka et al., "Performance of the Energy Compression System at the SPring-8 Linac", EPAC2002, Paris.
- [3] T. Masuda et al., "Upgrade of Linac Control System with New VME Controllers at SPring-8", ICALEPCS 2001, San Jose, USA.
- [4] Y. Kawashima et al., 電子ビーム用線型加速器と円型加速器間の RF を同期化する新しい方法, 本予稿集.
- [5] N. Hirota et al., SPring-8 線型加速器における高周波励振部の安定化, 本予稿集.
- [6] T. Kobayashi et al., ビームデフレクタの開発 (2)本予稿集.
- [7] K. Yanagida et al., "A BPM System for the SPring-8 Linac", Proc. of the 20th Int. Linac Conf., Monterey USA, Aug. 2000, pp. 190-192.
- [8] T. Masuda et al., "Data Acquisition System with Shared Memory Network", ICALEPCS 2001, San Jose, USA.
- [9] K. Yanagida et al., SPring-8 線型加速器 BPM を用いたビーム位置測定, 本予稿集.
- [10] T. Asaka et al., ビーム透過型薄膜スクリーンモニターの開発, 本予稿集.
- [11] H. Tomizawa et al., SPring-8 フォトカソード RF 電子銃における電子ビームの低エミッタンス化, 本予稿集.