

STATUS OF THE SPring-8 ACCELERATORS

Accelerator Division, JASRI/SPring-8^{A)}, and RIKEN Harima Institute Research Promotion Division^{B)}

^{A)}1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

^{B)}1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148

Abstract

SPring-8 is a third generation light source facility, which consists of 1 GeV linac, 8 GeV booster synchrotron, and 8 GeV storage ring. Here we report the present status of the SPring-8 accelerators, as well as the recent progress of the performance improvement.

SPring-8 加速器の現状

1. 加速器運転状況

1.1 運転統計

2009年度 SPring-8 加速器運転統計は、表 1 に示す通りである。計画利用時間 4056 時間に対する実績 4014 時間 53 分と利用達成率 99.0 % を遂げている。

表 1: 運転統計.

総運転時間	5068 時間 46 分
マシン調整	1019 時間 05 分
内マシンスタディ	253 時間 59 分
BL 及測定系調整	144 時間 00 分
利用運転	4014 時間 53 分
ダウンタイム	34 時間 48 分

過去 3 年度のダウンタイム内訳を図 1 に示す。総ダウンタイムは若干増加している程度であるが、電磁石 (電源) によるものが大幅に増加している。

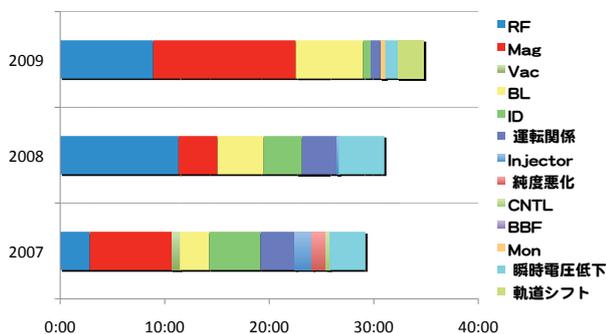


図 1: 2009 年度ダウンタイム内訳.

1.2 トップアップ運転状況

SPring-8 では平均蓄積電流値の改善、安定化のため、利用運転中も電子ビームを入射するトップアップ運転を行っている。トップアップ運転では、入射電流値は 30 μ A に絞られ、ビーム寿命によって 20 秒から数分間隔でビーム入射が行われる。典型的なトップアップ運転状況を図 2 (左) に示す。

右図は、全利用時間中の蓄積電流値の分布をプロットしたものである。毎秒データベースに記録している蓄積電流値を 0.01 mA 刻みで分布を見た。蓄積電流値は、

全利用運転時間の 97.3 % で 99.47 mA から 99.52 mA の間にある。

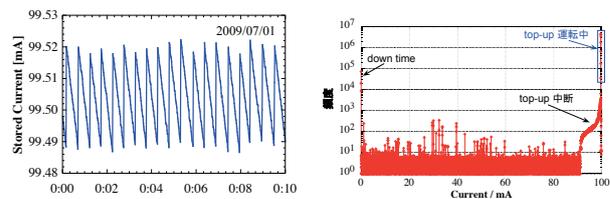


図 2: 2009 年度利用運転中の蓄積電流値とその分布.

SPring-8 のトップアップ運転では、目標電流値 99.5 mA で、99.4 mA を下回ったら中断したものと定義している。2009 年度は、164 回、計 45 時間 56 分のトップアップ中断があった。中断原因の主なものは、線型加速器モジュレータフォールト (60 回) とブースター RF ダウン (42 回) であった。それぞれ、中断時間に対する割合は、40 % と 25 % であった。これらは高出力の機器であるためフォールトを全くなくするのは困難ではあるが、信頼性を上げ、フォールト率を下げるための改善が続けられている。

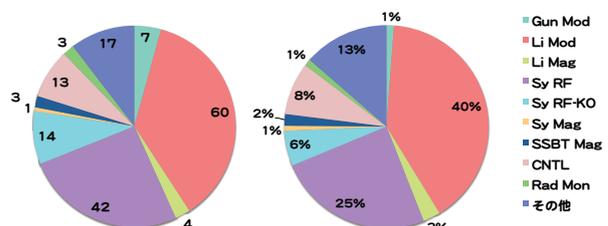


図 3: 2009 年度トップアップ中断回数と中断時間内訳.

2. 加速器改善

2.1 線型加速器

2.1.1 電子銃二重化 電子銃がカソード交換を要するような重篤なトラブルがあった場合、復旧に多大な時間を要するので、トップアップ運転が長時間中断するだけではなく、ダウンタイムにも至りかねない。電子銃の信頼性向上のため、SPring-8 では電子銃の二重化を進めてきた。2007 年 9 月には第 2 電子銃真空チャンパーが設置され、2009 年 9 月には第 2 電子銃用高圧デッキとモジュレータが設置された。この間に、第 1 電子銃故

* takao@spring8.or.jp

障のため、2008年10月から12月までの利用運転で第1電子銃用電源による第2電子銃緊急運用があった。各電子銃の専用電源設置が終わり、現在は加速器安全インターロックを含め制御の整備を進めており、本年10月以降には迅速な切り替えが可能になる。

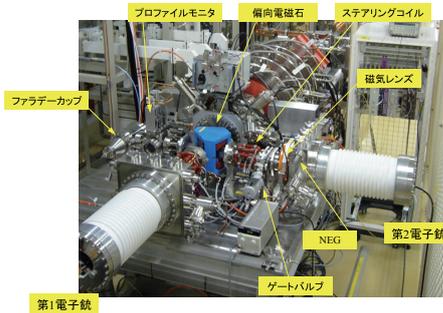


図4: 第2電子銃配置.

2.1.2 クライストロンモジュレータ改良 線型加速器クライストロンモジュレータでも、信頼性向上のための改良が加えられている。

メンテナンス性向上も考慮し、サイラトロンスタンド更新が行われ、モジュレータフォールト率の減少に貢献している。主な改良点は以下の通り。

- スタンド下部アース強化。
- 冷却能力強化のため、スタンド下部にあった冷却ファンを横付けに変更。
- 分圧回路をサイラトロン本体を囲むチムニー型からサイラトロン側方に配置するオープン型に変更。

また、HV Fanout 回路が温度ドリフトが激しいなど安定でなかったため、特性を揃えるよう回路の改修を行った。この結果、図5に見られるように、PFN 電圧の長期安定度が向上した。図5は、リニアックモジュレータの1台(H0モジュレータ)の設定値に対するモニタ値の比を Fanout 回路更新前後1年に亘ってプロットしたものである。更新前は長期的な変動が見られるが、更新後は一定になっている。

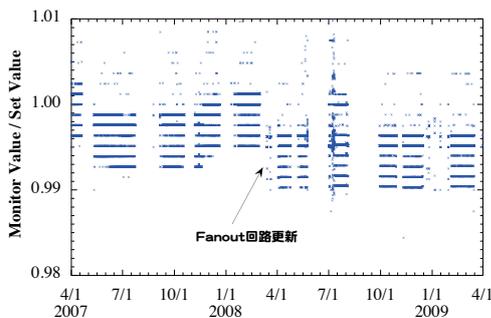


図5: Fanout 回路更新前後の PFN 電圧変動.

2.2 ブースターシンクロトロン

2.2.1 RF-KO システム二重化 SPring-8 蓄積リングのシングルバンチ運転では、ブースターシンクロトロンに設置された RF-KO 方式によるバンチ純化装置でシ

ングルバンチを生成して、蓄積リングへ入射している。ユーザの要求はバンチ不純度 10^{-8} 以下と非常に厳しく、RF-KO に用いるキッカーアンプの不発があると、不純度の高いビームが蓄積リングに入射され、蓄積ビーム廃棄、再入射の必要があり、ダウンタイムに直結する。これを避けシステムの信頼性を向上するため、2009年9月に RF-KO システムの二重化がなされた。

RF-KO システム 1,2 の稼働状態とバンチ不純度の関係は、表2に示す通りである。どちらか1台が稼働していれば、不純度 10^{-9} 以下とユーザの要求を満たしている。

表2: RF-KO システム稼働状態とバンチ不純度.

RF-KO		バンチ不純度	
1	2	主バンチ前方	主バンチ後方
稼働	稼働	3.4×10^{-10} 以下	8.1×10^{-10} 以下
稼働	停止	3.5×10^{-10} 以下	5.9×10^{-10} 以下
停止	稼働	3.6×10^{-10} 以下	8.4×10^{-10} 以下
停止	停止	9×10^{-8} 以下	7×10^{-6} 以下

2.2.2 省エネルギー運転^[1] ブースターシンクロトロンは、1-8 GeV のエネルギーランプアップを 1 Hz で行い、これに対応して主電磁石はパターン運転をしている。SPring-8 トップアップ運転でのビーム入射は、ビーム寿命に依存して 20 秒から数分に 1 ショットの頻度で行われるが、磁場等の安定性を考慮してビーム入射がない時でもブースター主電磁石はパターン運転を連続していた。

そこで、トップアップ運転においてビーム入射がない時にはパターン運転を停止して、ブースター主電磁石の消費電力を最大 1/5 にまで削減することができる。この時に問題となるのが、熱負荷変化に伴う磁場の変動である。四極磁場が変化すると、ベータトロンチューンが変動し、RF-KO の共振から外れ、図6に示すようにバンチ純度の悪化を引き起こす。

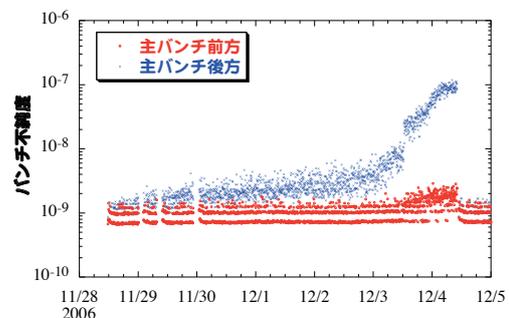


図6: 省エネルギー運転実施後のバンチ純度.

これを解決するため、電磁石系および電磁石電源系の冷却水温度の精密調整が可能となるよう各冷却設備改造を実施した。この結果、機器の温度変動が抑えられ、ベータトロンチューンが安定化して、図7に示されている通り、省エネルギー運転実施後の利用運転中に純度の悪化は全く見られていない。

表 3: SPring-8 利用運転に使用されるバンチフィリングモード。

Mode	Filling Pattern			電流値 / A		Ratio	Attenuation / dB	
	Train Fill	バンチ数	Singlet バンチ数	Train	Singlet		Train	Singlet
Multi-bunch	160 bunch-train × 12	1920	-	0.05		-	0	
203 Bunches	-	-	203	0.50		-	20	
Hybrid	1 / 7	348	5	0.24	3.0	12.36	20	35
	1 / 14	174	12	0.46	1.6	3.47	20	35
	2 / 29	168	26	0.38	1.4	3.73	20	35
	4 / 58	168	53	0.28	1.0	3.61	20	35

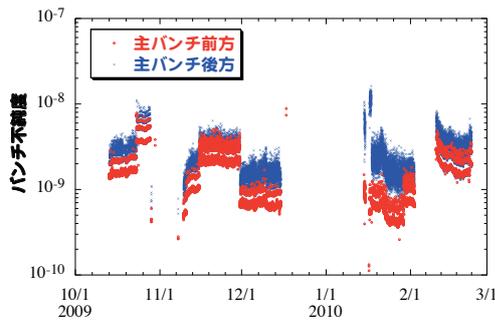


図 7: 省エネルギー運転実施後のバンチ純度。

2.3 蓄積リング

2.3.1 BBF 改良と低クロマティシティ運転 SPring-8 蓄積リングの特徴の一つに、多彩なバンチフィリングパターンがある。時間構造を必要としない実験には、可能な限り多くのバケットに電子を蓄積しバンチ電流値を抑えたマルチバンチモードを使用する。時間構造を必要とする場合は、全周に等間隔でシングルバンチを蓄積する。特に広い時間間隔を必要とする場合にはバンチ電流値が大きくなるが、これによる RF コンタクトやセラミックチャンパーでの発熱の問題で、シングルバンチ電流値が制限されている。その場合、蓄積電流値 100 mA を確保するため、一部の間隔を連続的にバンチ (バンチトレイン) で埋めたハイブリッドモードが使用される。現在、SPring-8 の利用運転中に使用されるバンチフィリングモードを表 3 に示す。

蓄積リングでは、ビーム不安定性を抑制するため bunch-by-bunch feedback (BBF) が導入されている。ところが、フィリングモード '1/7 fill + 5 single bunches' では、表 3 にある通りトレイン部とシングルバンチ部電流値の高いコントラストのため、シングルバンチ部の垂直方向不安定性が十分に抑制できなかった。シングルバンチ部の信号レベルが高すぎるため飽和してしまい、フィードバックが働かずに不安定性が起こるからである。このため、2009 年 12 月までは垂直クロマティシティを 6 と大きな値に設定することで、ランダウ減衰を利用して不安定性を抑えていた。

この状況を解決するため、バンチ電流値に応じて自動的に減衰率を変える減衰器の開発を進めてきた [2]。これにより、入力信号の減衰率を表 3 にある通りトレイン部とシングルバンチ部で変えられ、飽和の問題を避けることができる。同時に、BBF キッカーのパワー増強もなされ、2010 年 1 月より垂直クロマティシティを 2

まで下げることができた。この結果、利用運転時の入射効率が 10 % 程度改善された。図 8 に垂直クロマティシティ変更前後の利用運転サイクル中の入射効率を示す。

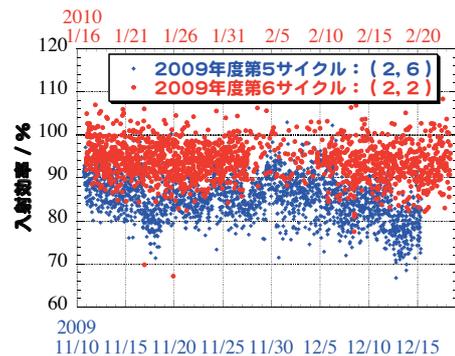


図 8: 垂直クロマティシティ変更前後の利用運転サイクルの入射効率。

2.3.2 ビーム入射時の蓄積ビーム振動抑制

利用実験中もビーム入射を行うトップアップ運転では、ビーム入射に伴う蓄積ビームの振動を極力抑えなければいけない。このため、SPring-8 では入射時蓄積ビーム振動抑制の努力を続けてきた。入射時蓄積ビーム振動の主な原因は、入射バンプ軌道内にある六極電磁石の非線形磁場によるキック [3] とバンプ軌道を形成する 4 台のバンプ電磁石の磁場波形の非相似性 [4] である。前者については、六極電磁石非線形磁場が相殺するラティスを開発することでほぼ解決した。

バンプ電磁石磁場波形の非相似性は、外側 2 台と内側 2 台の形状が異なるため、キック量に差があることに起因する。バンプ電磁石磁場波形の始点付近では、キック量の違いから電源の立ち上がり特性がずれるため相似性が崩れ、その残差によって蓄積ビームが蹴られる。一方、終点近傍では、バンプ電磁石の金属端板を流れる渦電流の影響によって蓄積ビーム振動が引き起こされていた。バンプ電磁石形状によってバンプ電磁石磁場と渦電流による磁場の比率が異なり、磁場波形の相似性が乱れていた。これによる蓄積ビーム振動の振幅は 2 mm にも達するものであったが、渦電流が流れないように非金属端板を持ったバンプ電磁石に更新することでほぼ解消した。

立ち上がりの入射時蓄積ビーム振動の抑制に関しては、補正用高速キッカーの開発が進められている [6]。図 9 の赤線は、バンプ電磁石励磁後の蓄積ビーム振動を turn-by-turn BPM で測定したものである。ビーム周回時間は 4.8 μ s、バンプ電磁石パルス幅 8 μ s、x 軸の原点が

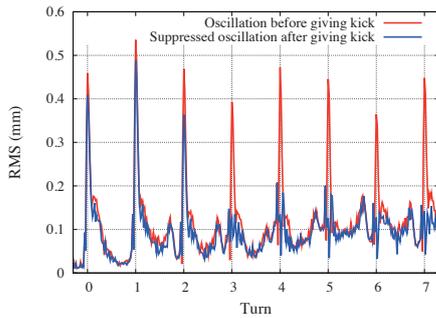


図 9: 高速キッカーによる蓄積ビーム振動の抑制.

バンブ電磁石立ち上がりに対応する。蓄積ビームは、立ち上がりで蹴られるため周回毎に振幅がピーク状に大きくなっている。これをキャンセルするための高速キッカーが開発され、2010年10月以降の利用運転で本格運用される予定である。図10は、高速キッカーパルス幅に対する蓄積ビーム振動抑制効果を見たものである。図9の青線は、補正後の蓄積ビーム振動を表す。高速キッカー設置場所のベータatron位相の関係から、バンブ電磁石励磁後3ターン目に高速キッカーは励磁され、それ以降の蓄積ビーム振動が抑えられている。

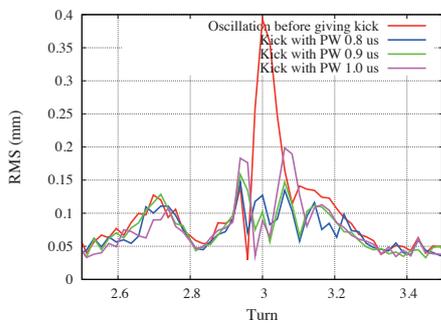


図 10: 高速キッカーによる蓄積ビーム振動の抑制.

また、バンブ電磁石は水平方向に蓄積ビームをキックするものであるが、回転エラーのため垂直方向にもキックすることになる。これを効率よく補正するため、遠隔バンブ電磁石 tilt 制御システムを開発した^[5]。現在、更なる抑制を目指して調整手法の改良が進んでいる。元々、振動を測るモニタとして turn-by-turn BPM を用いていたが、S/N の関係で抑制性能が制限されていた。モニタとして可視光干渉計ビームサイズモニタを用いることで、抑制性能が改善することができた。現在、更なる向上を目指して、感度の良いBBFのビーム位置モニタを用いたバンブ電磁石 tilt 調整法を開発している。

参考文献

- [1] T. Aoki, et al., 本年会報告集, THPS120.
- [2] K. Kobayashi, and T. Nakamura, Proc. of ICALEPCS2009 (2009), 659.
- [3] H. Tanaka, et al., Proc. of EPAC04 (2004), 1330; H. Tanaka, et al., Nucl. Instrum. Method A **539** (2005), 547.
- [4] T. Ohshima, et al., Proc. of EPAC04 (2004), 1330.
- [5] K. Fukami, et al., Proc. of EPAC08 (2008), 2172.
- [6] S. Mitsuda, et al., 本年会報告集, WEPS036.