

# OPERATION STATUS OF THE SPRING-8 ACCELERATORS

Masaru Takao<sup>1</sup>, for Accelerator Division  
JASRI/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

## Abstract

Since May 2004, the top-up operation of the SPring-8 accelerators is going on, and the stable photon beam is delivered to the user experiments. The operation status of the SPring-8 accelerators is presented. The improvements of the SPring-8 storage ring are also reported.

## SPring-8 加速器運転の現状

### 1. はじめに

SPring-8 では、2004 年 5 月よりユーザー実験中も随時ビーム入射を行い蓄積電流値を一定に保つトップアップ運転が導入されるようになり、その蓄積電流値の高い安定度は放射光実験の精度向上に貢献している。更に、昨年度にはトップアップ運転モードがそれまでの一定時間間隔（固定インターバル）入射モードから電流値をより一定に保つ随時入射モードに変更され、電流値変動量が 0.1 % から 0.03 % に改善された。また、積年のマシン高可用化の努力の結果、昨年度の放射光利用率は 99 % を越え、安定に放射光ビームがユーザーに供給された。本発表では、このように高い安定度にある SPring-8 加速器の運転状況について報告する。

SPring-8 加速器では、更なる安定化、高可用化の努力は続けられており、その一環として昨年度は非線形力学的安定性改善のためカウンター六極電磁石が蓄積リングに導入された。これにより、SPring-8 蓄積リングのビーム寿命や入射効率に改善が見られた。これに加えてその他、線形結合補正などビーム性能の維持向上のために実施しているものについても報告する。

また、光源加速器としての可能性を追求するため、蓄積リングの low alpha 運転などのマシンスタディや理論的研究が鋭意行われているが、これらの成果についても紹介する。

### 2. 加速器運転状況

#### 2.1 運転統計

2007 年度 SPring-8 加速器運転統計は、表 1 に示す通りである。総運転時間に対する利用時間の割合は 79 % に達し、利用運転時間に対するダウンタイムの割合は 0.74 % と極めて低いレベルであった。

表 1: 運転統計.

総運転時間	5029 時間 33 分
マシン調整	1031 時間 01 分
内マシンスタディ	276 時間 01 分
BL 及測定系調整	283 時間 17 分
利用運転	3969 時間 20 分
ダウンタイム	29 時間 12 分

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

2007 年度ダウンタイムの内容についての統計は表 2 の通り、発生回数 27 回、平均ダウン時間 1 時間 5 分であった。ダウン発生回数の中でビームアポートを伴うものは括弧内に示してある。ダウン時間の最も大きな割合を占めている電磁石関係のダウンは、電源の故障（入射パルスバンプ電磁石 3 回、ステアリング電磁石 1 回）によるものであった。ステアリング電磁石電源故障はここ数年、発生するようになってきている。SPring-8 加速器も運転開始から 10 年を経ており、経年劣化なども考えられるため、現在の安定な運転を維持するにはより入念な機器保守が求められる。

表 2: ダウン原因内訳.

原因	発生回数	通算ダウン時間
RF 関係	5 (5)	2 時間 50 分
電磁石関係	4 (3)	7 時間 52 分
真空関係	1	45 分
挿入光源関係	4 (3)	4 時間 55 分
ビームライン関係	2 (2)	2 時間 48 分
入射器関係	4	1 時間 39 分
パンチ純度悪化	2 (2)	1 時間 19 分
運転関係	3 (2)	3 時間 18 分
制御関係	1	20 分
瞬時電圧低下	1 (1)	3 時間 26 分
計	27 (18)	29 時間 12 分

#### 2.2 トップアップ運転状況

SPring-8 では 2004 年 5 月にトップアップ運転が導入され、以来、利用運転は常にトップアップ運転モードで行われている。昨年 11 月には、蓄積電流値安定度改善のため、トップアップ運転モードをそれまでの固定インターバル入射モードから電流値優先随時入射モードに変更した。固定インターバル入射モードでは、ショット当たりの入射電流値が 0.03 mA に設定されているにもかかわらず、入射間隔が 1 分（マルチパンチモードでは 5 分）固定のため、この間の蓄積電流減少量と不一致があり、蓄積電流値変動は 0.1 mA となっていた。そこで、入射インターバル固定の制限を外し、ビーム寿命による電流値の減少に合わせて随時ビーム入射を行い、1 入射当たり 1 ショットを確立することで、蓄積電流値変動が入射電流値と同じになるようにした。この結果、総蓄積電流値 100

mA に対して、その変動幅は 0.1 mA から 0.03 mA に改善され、光源強度安定度  $3 \times 10^{-4}$  が達成された。

トップアップ中断回数は、表 3 の通りである。ほとんどの場合は電流低下 1 mA 以下に留まる短時間の中断で、その原因のほとんどは電子銃、ライナックモジュレータのフォールト及びブースターシンクロトロン RF ダウン等入射器トラブルとパンチ電流測定などのモニター系トラブルである。低下電流値 0.5 mA 以下の軽微なトップアップ中断を含めても、平均トップアップ運転持続時間は 9 時間であった。2007 年 6 月には、154 時間に亘ってノンストップでトップアップ運転が続けることができ、この間に 9240 回 23300 ショット（この時は固定インターバル入射モード）のビーム入射が休み無く行われた。

表 3: トップアップ運転中断状況。

低下電流値	頻度
< 0.5 mA	328
< 1.0 mA	92
< 5.0 mA	19
< 10.0 mA	1
< 20.0 mA	3
< 40.0 mA	2

### 2.3 蓄積リング軌道安定度の現状

ビーム位置モニター (BPM) の精度と処理速度の向上を目指して、信号処理回路が 2006 年 9 月に更新された<sup>[1]</sup>。これによって、ビーム位置の測定分解能で 3 倍、測定速度で 7 倍の改善が見られた。利用運転中は COD 自動補正が働いており、ビーム軌道は一定に保たれている。その補正周期は、旧信号処理回路使用時には約 30 秒であったものが、約 15 秒に短縮された。この結果、ビーム位置測定分解能向上と相俟って、ビーム軌道安定度に改善が見られた。図 1 は、測定された COD チューン成分振幅を 24 時間に亘ってプロットしたものである。上段は旧システムによるもの、下段は新システムによるものである。COD 変動は、 $\sigma$  で評価して約 20% 改善している。

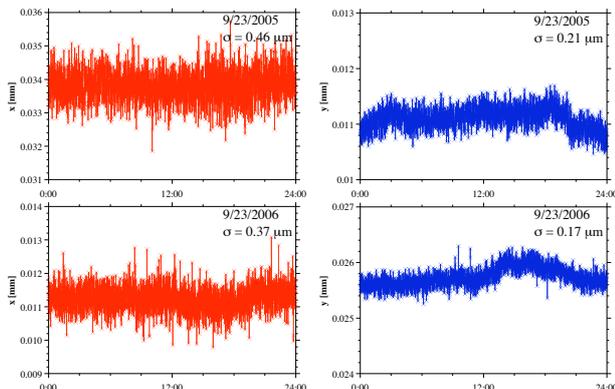


図 1: COD チューン成分振幅の変動. 上段: 旧処理回路、下段: 新処理回路、左: 水平、右: 垂直。

BPM 新信号処理回路の性能からすると、COD 補正システム系の制御の改良による、補正周期短縮化

を実施することによって、さらなるビーム軌道安定度向上が可能である。現在、COD 自動補正の周期は 12 秒程度であるが、1 Hz を目指して COD 補正高速化の R&D を進めている。

## 3. 加速器のビーム性能向上

### 3.1 カウンター六極電磁石導入

2007 年度に行われたビーム性能向上の一つに、カウンター六極電磁石導入による動力学的安全性改善がある。SPring-8 蓄積リングには、新たな挿入光源の開発・設置などによって、先進的な光源を実現することを可能とする 30 m の長直線部が 4ヶ所設けられている。その線形光学系の力学的安定性は、長直線部の betatron phase matching を取ることで確保されているが、off momentum 粒子の dynamic aperture を広げるため長直線部を含む matching section には local chromaticity correction が施されている。この補正に用いる六極電磁石 (図 2 中の SF) の強さは弱い。ラティスの対称性を低下させ、蓄積リングの力学的安定性を損なっていた。そこで 2007 年秋に、この matching section の非線形キックを補正するためカウンター六極電磁石を長直線部両端に設置した (図 2 中の SCT)。これによって力学的安定性が向上し、ビーム寿命や入射効率の改善がなされた<sup>[2]</sup>。

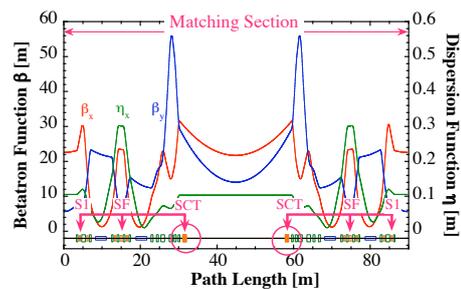


図 2: 長直線部オプティクス。

### 3.2 線形共鳴結合補正

通常、電子蓄積リングの垂直ビーム拡がりには誤差磁場などによる共鳴結合で決まっている。SPring-8 蓄積リングの場合、 $\nu_x - \nu_y = 22$  の線形差共鳴が運転点 (40.15, 18.35) に最も近く影響が大きい。SPring-8 蓄積リングでは定期的にチューンサーベイを行い、この共鳴の励起状態を確認している。高精度の電磁石アライメントと適度な COD 補正の結果、建設時の SPring-8 蓄積リングの共鳴結合強度は 0.002 程度と大変小さいものであったが、近年徐々に悪化して 0.01 を越えるようになった。そこで、2006 年度よりこれを補正し、共鳴結合を改善することにした。

SPring-8 蓄積リングには、28 台のスクュー四極電磁石が設置されており、内 20 台は Double Bend Achromat (DBA) ユニットセルアーク部に、残り 8 台は長直線部両端にある。それぞれは最近接線形差共鳴に関して独立な 2 自由度として扱うことができ、共鳴結合強度を 0.0012 まで抑制することができた<sup>[3, 4]</sup>。

### 3.3 不安定性フィードバック改良

SPring-8 蓄積リングでは、ビーム不安定性抑制のため bunch-by-bunch feedback システムが導入されており、今やユーザー運転には不可欠である。SPring-8 蓄積リングではユーザーの要望に応じて、色々なビームフィリングモードによる運転を行っている。大電流シングルバンチを必要とする実験のため、ハイブリッドモードが用意されており、そこでは大電流シングルバンチと低電流バンチトレインが混在している。その電流比は 10 倍にも達するため、信号飽和の問題から全てのバンチを同時に扱うのは困難であった。この問題を解決するため、バンチ毎に電流に応じて信号の減衰率を切り替える機能を feedback システム追加し、利用運転で使用される全てのビームフィリングモードに対して、安定運転が実現できるようになった [5]。

### 3.4 入射パルスバンブ電磁石傾き補正

蓄積電流値が安定化しても、ビーム入射によって蓄積ビームが振動し、光源強度変動となって実験の障害となるようではいけない。SPring-8 では、入射による蓄積ビームの振動を抑制するため、様々な努力を重ねてきた。2007 年度は、蓄積リング入射パルスバンブ電磁石の遠隔傾き補正装置を導入し、入射時の垂直方向蓄積ビーム振動抑制の改善を行った [6]。入射時の蓄積ビーム垂直振動は、主に入射パルスバンブ電磁石のアライメントエラー（回転）で引き起こされる。バンブ電磁石遠隔傾き補正装置によって、入射パルスバンブ電磁石調整が容易かつ高精度に行えるようになった。

## 4. 短パルス放射光生成のスタディ、R&D

SPring-8 蓄積リングの光源としての可能性を引き出すため、様々なスタディを行っている。その一つとして、短パルス放射光生成がある。現在の SPring-8 蓄積リングのバンチ長 (r.m.s.) は、条件によって 10 ps から数 10 ps であるが、ps あるいはサブ ps の短パルスを目指して、スタディを進めている。

### 4.1 低モーメントコンパクション運転

短パルス放射光を生成するために、バンチ長そのものを短くする方法の一つとして、低モーメントコンパクション (low alpha) 運転がある。電子蓄積リングのバンチ長は、モーメントコンパクションの平方根に比例しているため、これを小さくすることによってバンチ長の短縮が図れる。

通常運転時の SPring-8 蓄積リングのモーメントコンパクションは  $1.68 \times 10^{-4}$  であるが、このオプティクス調整によって  $1.58 \times 10^{-5}$  まで小さくすることができた。さらに高次モーメントコンパクションが未調整であるためビーム寿命は短いものの、 $5.8 \times 10^{-6}$  まで小さくすることが可能であった。このとき、低バンチ電流 ( $10 \mu\text{A}$ ) でのバンチ長は 1.8 ps まで短縮することができた。

### 4.2 短パルス放射光切り出し

また、垂直ビーム広がりが小さいという SPring-8 蓄積リングの特質を生かして、蓄積ビームを垂直方向に傾け、ビームラインでスリットなどにより切り出すことで短パルス放射光を生成することが検討されている。

ビームを垂直方向に傾ける方法の一つとして、垂直ダイポールキックによるものが考えられる [7, 8]。縦方向の位相空間分布を考慮すると、垂直クロマティシティを適当に設定しておけば、パルスの垂直キックを与えることによって、蓄積ビームを傾けることができる。これは、エネルギーによってベータトロンチューンが異なるため、縦方向の位置によってベータトロン位相差が開いて行くからで、シンクロトロン振動半周期で傾きは最大となる。図 3 は、クロマティシ

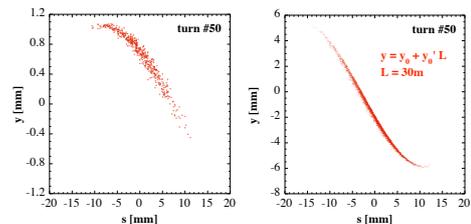


図 3: 垂直キック後のビームプロファイル. 左: 光源点, 右: 30 m 下流.

ティ  $(\xi_x, \xi_y) = (2, 2)$ 、エミッタンス結合比  $\kappa = 0.1\%$ 、振幅 1 mm の垂直キックを与えた場合の 50 ターン (シンクロトロン振動半周期) 後の y-z 空間プロファイルのシミュレーション結果である。光源から 30 m 下流で 0.1 mm の垂直スリットで切り出すことによって、1 ps 程度の短パルス放射光を生成することが可能である。実ビームを使ったの予備実験の結果については、別に報告がある [9]。

最近、KEKB で開発が進んでいるクラブ空洞を利用して、蓄積ビームを傾けることによる短パルス放射光生成についても検討している。SPring-8 蓄積リングの特徴である 30 m 長直線部に、クラブ空洞を配置し RF デフレクターとして使用して、ローカルに蓄積ビームを傾けるといものである。これを実現するための R&D も行っている。

## 参考文献

- [1] S. Sasaki, and T. Fujita, 加速器 3, 344 (2006).
- [2] K. Soutome, et al., Proc. of EPAC'08, 3149 (2008).
- [3] M. Takao, et al., 第 4 回日本加速器学会年会第 3 2 回リニアック技術研究会報告集, 622 (2007).
- [4] M. Masaki, et al., Proc. of EPAC'08, 3035 (2008).
- [5] T. Nakamura, et al., Proc. of EPAC'08, 3284 (2008).
- [6] K. Fukami, et al., Proc. of EPAC'08, 2172 (2008).
- [7] M. Katoh, Jpn. J. Appl. Phys. 38, L547 (1999).
- [8] A. Zholtens, et al., NIM A 425, 385 (1999).
- [9] K. Tamura, et al., in these proceedings.