

# STATUS OF THE SPRING-8 STORAGE RING

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

## Abstract

We present the operation status of the SPring-8 storage ring and the improvements of the machine performance. The outline of the upgrade project of the SPring-8 storage ring is also presented.

## SPring-8 蓄積リングの現状

### 1. 加速器運転状況

#### 1.1 運転統計

2008 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 80 % に達し、利用運転時間に対するダウンタイムの割合は 0.75 % と、ここ数年同様極めて低いレベルであった。

表 1: 運転統計.

総運転時間	5150 時間 07 分
マシン調整	1008 時間 11 分
内マシンスタディ	242 時間 03 分
BL 及測定系調整	191 時間 42 分
利用運転	4110 時間 55 分
ダウンタイム	31 時間 01 分

2008 年度ダウンタイムの特徴としては、RF 関係によるダウンが多くなっていること (14 回、通算 11 時間 19 分) である。2007 年度は、5 回 2 時間 50 分であった。経年劣化の影響が懸念される。

#### 1.2 トップアップ運転状況

2004 年以降、SPring-8 では利用運転中も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継続されている。2008 年度利用運転中の蓄積電流値の分布を図 1 に示す。毎秒保存されている蓄積電流値データを 0.01 mA 刻みで積算したものである。100 mA のピークはトップアップ運転継続中の電流値、0 mA のピークはダウンタイムのものである。80 mA のピークは、SPring-8 蓄積リングにある四つの RF ステーションの内一つがダウンし、34 時間にわたり 3 ステーション運転を余儀なくされた時のものである。この期間も含めて、全利用運転時間の 95 % で蓄積電流値は 99.48 mA から 99.52 mA の間にあり、蓄積電流値変動幅は 0.04 % に抑えられている。

利用運転中、放射光ビームラインのシャッターを開けたままビーム入射を行うトップアップ運転では、放射線安全上極力電子ビーム損失を減らすこと、即ち高い入射効率が必須である。また、SPring-8 蓄積リングの挿入光源はほとんどが真空封止型のため、機器保護 (電子ビーム被爆による挿入光源磁石列減磁対策) 上でも入射効率は重要である。

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

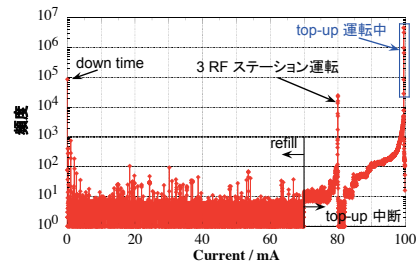


図 1: 2008 年度利用運転中の蓄積電流値分布.

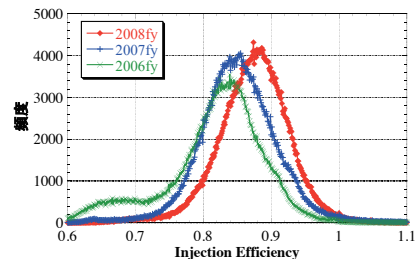


図 2: 2006-8 年度利用運転中の入射効率.

過去 3 年度の利用運転中の入射効率頻度分布 (0.1 % あたり) を図 2 に示す。2006 年度から 83.4 %、85.0 %、87.7 % と向上しているが、これは 2007 年度夏期停止期間に導入した六極電磁石による非線形ビーム力学安定性改善の効果である。これについては次節で詳しく説明する。

## 2. 加速器のビーム性能向上

### 2.1 カウンター六極電磁石追加

SPring-8 蓄積リングは、double bend achromat を基としたノーマルセル 36 セルと、30 m 自由空間とその両隣のマッチングセルからなる長直線部 4ヶ所からなる。この長直線部は、新たな挿入光源の開発・設置など先進的な光源の実現を目的としたものである。長直線部近傍のラティス関数を図 3 に示す。

蓄積リング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。on momentum 粒子の運動に対しては、長直線部の phase advance を  $2\pi$  の整数倍 (水平:  $4\pi$ 、垂直:  $2\pi$ ) とすることによって、長直線部を透明にすることで、リングの対称性を上げ安定性を高めている。エネルギー

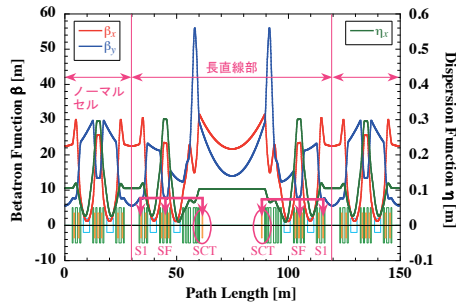


図 3: 長直線部オプティクス.

ギアが異なるため位相がずれてしまう off momentum 粒子の dynamic aperture を広げるため、長直線部には local chromaticity correction が施されている。

local chromaticity correction 補正に用いる六極電磁石 (図 3 中の SF) の非線形キックは、蓄積リングの力学的安定性を損なっていたが、2007 年夏以降は非線形キックを相殺する目的で長直線部に導入した六極電磁石 (図 3 中の SCT) を用いて安定性改善を図っている。SF による非線形キックを相殺するという意味から、カウンター六極電磁石と呼んでいる。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>[1]</sup>。

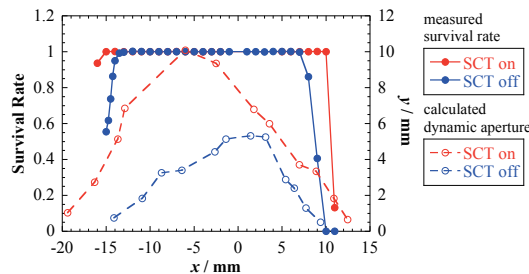


図 4: Dynamic aperture.

SCT の効果を確認するため、dynamic aperture の測定を実施した。入射パルスポンプ 4 台の内、上流 (下流) 側 2 台を励磁することによって瞬間的に電子ビームに変位を与え、その後の電子ビームの残存率から dynamic aperture を求めた。残存率は、ビーム強度に比例する turn-by-turn ビーム位置モニタの 4 電極電圧和から求められる。

図 4 において、SCT off の dynamic aperture は測定と計算がよく一致しているが、SCT on の場合は測定の方が狭くなっている。これは、SCT on の場合にビーム損失が physical aperture で起こっているためである。ターン毎のビーム残存率を見ると、その減少が最初の数ターンでステップ的に起こっていることから分かる。一方、SCT off の場合は徐々に減少していて、ビーム損失が dynamic aperture によるものであることを示している。

図 5 に測定されたビーム振動データをフーリエ変換することによって得られた振幅依存チューンシフトを示す。曲線はシミュレーションによる予想を表す。図 5 から、SCT により非線形性が弱められていることが分かる。右図はチューンをマップ上にプロットしたものである。SCT off の場合、dynamic aperture は

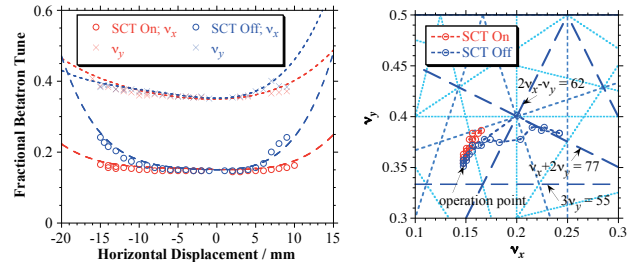


図 5: 左: amplitude dependent tune shift、右: tune map.

3 次共鳴  $v_x + 2v_y = 77$  が影響していたものと考えられる。

## 2.2 長直線部の新しい応用

SCT の導入により長直線部を独立に調整する幅が広がった。その応用として新長直線部ビームライン計画が始まった。これまでは 1ヶ所の長直線部に 25 m 長 (磁石列周期長: 32 mm、周期数: 780) の真空封止 undulator が設置されており、SPring-8 標準型 4.5 m 長 undulator (周期長: 32 mm、周期数: 140) に比べて約 5 倍の輝度の放射光を発生していた。新ビームラインでは、より高エネルギーの X 線を利用するため周期長を 20 mm にすることが考えられている。

しかしながら、周期長を短くすると磁場が弱くなるので undulator ギャップを閉じる必要があるが、長直線部ベータ関数が大きい現状では散乱電子の広がりのため、最小ギャップは 12 mm に制限されている。そこで、自由空間を 3 分割してその間に四極電磁石を設置することで垂直ベータ関数を絞り、ギャップを 6 mm 程度まで閉じられるよう修正した長直線部オプティクスを設計した。図 6 参照。直線部に四極電磁石を設置するため挿入光源の全長としては損をするが、周期長が短くなっているため周期数を増やすことができるため、3 台の undulator の位相を合わせることで前述の 25 m 長のものより数倍の輝度の硬 X 線を発生することができる。

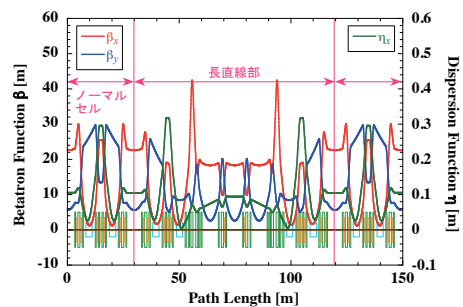


図 6: 新しい長直線部オプティクス.

1ヶ所の長直線部のみをこのように変更したとしても、SCT のおかげで dynamic aperture がほとんど狭まらないことがシミュレーションで確認されている。

## 2.3 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誤差磁場などによる共鳴結合で決まっている。元々 SPring-8

蓄積リングでは、高精度の電磁石アライメントと適正な COD 補正の結果、エミッタンス結合は 0.2 % 程度と大変小さいものであった。ここ数年来、軌道変動などにより悪化してきたので、最近では線形共鳴結合補正を行っている。

SPring-8 蓄積リングの場合、誤差磁場は弱く、その摂動的取り扱いが有効である。そこでの単共鳴近似によれば、線形共鳴結合による垂直ビームサイズはその結合強度に比例しており、これをプローブとして共鳴結合補正が可能である [2, 3]。現在蓄積リングには、46 台のスクュー四極電磁石が設置されているが、線形共鳴では重ね合わせが成り立つので、スクュー四極電磁石の組み合わせによって、各共鳴を独立に補正することができる。

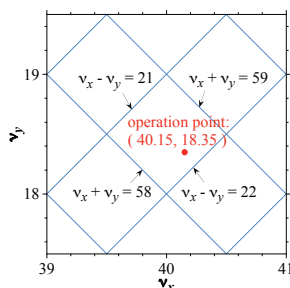


図 7: SPring-8 蓄積リング運転点と線形共鳴線。

SPring-8 蓄積リング運転点 (40.15, 18.35) の周辺の共鳴線を図 7 に示す。影響の大きい運転点を囲む 4 本の共鳴線について、運転点に近いものから順に共鳴結合補正を実施している。その過程を図 8 に示す。それぞれの共鳴線の実部、虚部の強度を独立に振り、垂直ビームサイズが極小となる点からスクュー四極電磁石の強さを決めていった。図 8 の水色の直線は、補正前のところから各共鳴補正による垂直ビームサイズの極小点を繋いだものである。共鳴からの距離が遠くなるほど垂直ビームサイズへの影響は小さくなっているが、差共鳴  $\nu_x - \nu_y = 21$  でも十分応答があり補正可能であった。

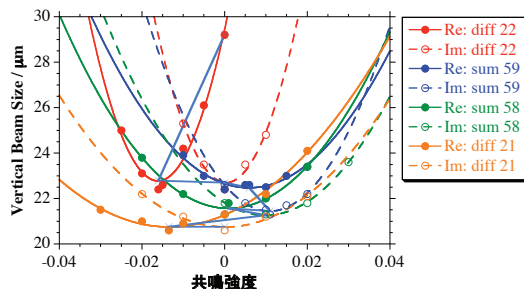


図 8: スクュー四極電磁石励磁量調整。

垂直ビームサイズは、線形共鳴結合のほかに垂直ディスパージョンによる寄与もある。これについても同じスクュー四極電磁石を用いて補正を行っている。垂直ディスパージョン補正は共鳴を励起しない条件をつけて行っているため、共鳴結合補正とは独立に実施可能である。これらの補正を行った結果、エミッタンス結合度 0.2 % を回復している。

### 3. 蓄積リングアップグレード計画

加速器、挿入光源、ビームライン技術の進展やトップアップ入射、軌道安定化などの加速器運転の高度化を踏まえ、SPring-8 が 10 年後の将来においても最先端のサイエンスを展開できる施設であるよう、リング型硬 X 線放射光光源として最高性能を維持が可能なアップグレード計画を考えている。SPring-8 蓄積リングの高輝度化の方策として以下の検討を行っている。

まず高輝度化のため蓄積リングの低エミッタンス化を図る。これは、偏向電磁石を分割 (multi-bend 化) し、そこでの水平ビームサイズを絞ることにより可能である。ただし、収束用四極電磁石、そのクロマティシティ補正用六極電磁石が強くなり、安定領域が狭くなる。両者を勘案して、最終的なラティスを決定する必要がある。現在検討中のラティスの比較を表 2 に示す。ただし、double bend は現状のラティス、dynamic aperture は六極電磁石に 10  $\mu\text{m}$  の設置誤差があるものとして評価した。

表 2: Lattice 比較。

	エミッタンス	dynamic aperture
double bend	3.4 nmrاد	-20 mm, 13 mm
triple bend	0.76 nmrاد	-13 mm, 9 mm
quadruple bend	0.29 nmrاد	$\pm 3$ mm

エミッタンスは電子エネルギーの 2 乗に比例しているため、これを下げることによっても低エミッタンス化が可能である。ただし、この場合に硬 X 線を発生するためには、挿入光源磁石列の周期長を短くする必要がある。これに対処するため、より挿入光源ギャップが閉められるラティス設計やより強力な磁場の挿入光源開発などを行う必要がある。

電子エネルギーを下げる利点は、エミッタンス低下だけでなく、エネルギー広がりも低減することができる。これも高輝度化に貢献する。また、電子エネルギーを下げると放射パワーが下がり、熱負荷も低下することから蓄積電流値を増加することができる。さらには、電磁石の強さもエネルギーを下げた分だけ弱くてすむため、ラティス設計が楽になる。一方、硬 X 線の利用や、電子エネルギーを低下することにより不安定性に対して脆弱化すること、intra-beam scattering でエミッタンスが増加することなどを考慮して、電子エネルギーとして 6 GeV が有力と考えている。

このようにアップグレード計画では、multi-bend ラティスで 6 GeV, 500 mA 運転を行うことにより、輝度二桁向上が可能となる。

### 参考文献

- [1] K. Soutome, et al., Proc. of EPAC'08 (2008), 3149.
- [2] M. Takao, Phys. Rev. ST Accel. Beams **9** (2006), 084002.
- [3] M. Takao, et al., 第 4 回日本加速器学会年会第 32 回リニアック技術研究会報告集 (2007), 622.