

## OPERATIONAL STATUS OF THE SPring-8 STORAGE RING

H. Ohkuma and Accelerator Division of JASRI/SPring-8  
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)  
1-1-1 Kouto, Mikazuki, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

### Abstract

The SPring-8 storage ring has improved its reliability and beam performance. In 2003, the total operation time of the SPring-8 storage ring was 5328.5 hours. By three years' activities of an orbit stabilization project, we have taken a remarkable progress on improvement of the orbit stability of the storage ring. The top-up operation has been started since May 20, 2004. The beam is injected at 1- or 5-minute interval to keep the stored current at 99mA. The temporal variation of the stored current is about 0.1%. The operational status and recent beam performance of the are presented.

### SPring-8蓄積リング運転の現状

#### 1. はじめに

SPring-8は世界最高エネルギーの第3世代X線光源加速器として、1997年に運転を開始した。当初導入したHybrid Optics (挿入光源(ID)設置直線部のベータトロン関数が交互に高低を繰り返す)は、その後直線部ベータトロン関数を全ての直線部で一定としたHHLV Optics (Optics with High Horizontal and Low Vertical betatron function)に変更された。2000年の夏期には4回対称点に設けられていたmissing bend cellの四極および六極電磁石を取り去り両端のmatching sectionに各々6台の四極電磁石を再配置する事により、約27mの電磁石フリーの長直線部を実現した。その1箇所には磁石長25mの長尺アンジュレータが設置されている。2001年からは軌道安定化をプロジェクト体制で進めて来た。冷却水が真空チェンバの振動を励起する事によるビーム振動の抑制などが行われて成果を上げている。2004年5月からは蓄積電流を0.1%の偏差で一定に保つTop-up運転が実用化されている。一方、運転開始から7年が経過しており、放射線による機器トラブルなども出始めており、それらに対する対策も必要となってきた。

ここ数年の蓄積リングの運転状況、今年の5月から始まったTop-up運転の状況などについて報告する。

#### 2. 運転の状況

2003年のSPring-8蓄積リングの運転時間は5328.5時間であった。図1に1997年10月のユーザー利用運転開始以来の運転時間の推移を示す。2003年は運転時間の74.4%にあたる3965.2時間(内、入射に要した時間が39.2時間)が実際にユーザータイムとして利用された。2003年当初に計画されたユーザータイムは4176時間であり、実施率は95%となる。2003年は後述するように復旧に時間を要するトラブルが数件発生したため実施率が95%に留まったが、1997年以降の平均で見ると97%を達成している。また、加速器およびビームラインの調整には21.7%に当たる1154.8時間が使われた。3.9%に当たる208.5時間がト

ラブルによりユーザータイムが中断した時間である。

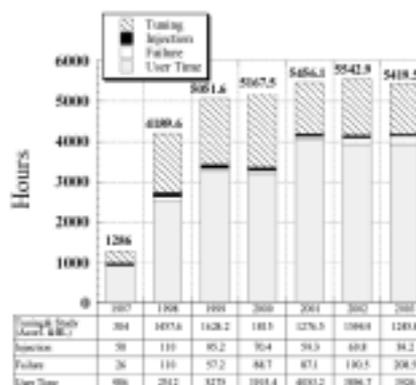


図1：1997年ユーザー利用開始以来の運転時間

2003年では、多バンチモードの運転の割合はユーザータイム全体の37.2%であった。少数バンチモードでの運転の割合は50.8%、多バンチモードと少数バンチモードが共存するハイブリッドモードは12%であった。少数バンチモードでのバンチ不純度は単バンチビーム生成システムなどの改善により、 $10^{10}$ 台以下を達成している。多バンチモードは完全なfull fillingではなく、イオン捕獲による不安定性を避けるために全周を12等分した位置の11箇所約160づつのバンチ群を配置している。1バンチ当たりの電子数は $1.8 \times 10^9$ 個、電流換算で $60 \mu\text{A}$ 程度である。一方、セバラルバンチモード、ハイブリッドモードとして、2003年は6つのフィリングモードでの運転が実施されている。均等203バンチ(1バンチ当たりの電子数 $1.5 \times 10^{10}$ ：電流換算 $0.5 \text{mA}$ )、全周の2/21に232連続バンチ、残りの19/21に均等に18の孤立バンチを配置したモード(1つの孤立バンチには $4.5 \times 10^{10}$ ：電流換算 $1.5 \text{mA}$ )等がある。

多バンチモードでのビーム寿命は、全てのIDのギャップが全開状態の時、190時間に達する。ユーザー実験中では、各々のIDの状態にもよるが、ビーム寿命は約120時間である。ビーム寿命の低下の原

因には、レーザーコンプトン散乱により2.4GeVガンマ線の生成を行っているBL33LEPの影響も大きい。一方、セベラルバンチの運転では、バンチ当たりの電子数が多くなるために、ビーム寿命は電子-電子散乱による効果が支配的になる。先に例に挙げた均等203バンチの場合ではビーム寿命は約30時間となる。

2003年はトラブルにより、42回のビームアポートあるいは計画外のビーム廃棄が起きている。原因は高周波加速空洞の反射、電磁石、真空機器などの冷却水流量低下、ビームラインでの誤操作などであった。また、2002年から起こり始めた四極電磁石冷却水のゴムホース配管の放射線損傷による漏水トラブルが頻発し、2003年3月中旬に特に放射線量の高い部分のゴムホースを全周に渡って交換した。全体のコンポーネントについて放射線による機器の劣化が進行している可能性があり、様々な観点からの調査と対策が進められている。2003年10月には、ユーザータイムを約120時間ロスする入射部真空チェンバのリークが発生した。これについては後で述べる。

表1に蓄積リングの主要なパラメーターを示す。

	HHLV Optics	Low Emittance Optics
Energy [GeV]	8	8
Number of buckets	2436	2436
Tunes ( $\nu_x / \nu_y$ )	40.15 / 18.35	40.15 / 18.35
Current[mA]: single bunch	13	10
multi bunch	100 (120 <sup>51</sup> )	100
Bunch length (FWHM)[psec]	32	34
Horizontal emittance[nm-rad]	6.3 <sup>52</sup> / 6.6 <sup>53</sup>	3.1 <sup>52</sup>
Vertical emittance[pm-rad]	16.9 <sup>53</sup>	8.7 <sup>53</sup> / 3.9 <sup>54</sup>
Coupling[%]	0.26 <sup>53</sup>	0.28 <sup>53</sup> / 0.13 <sup>54</sup>
Beam size[μm]: ( $\sigma_x / \sigma_y$ ) <sup>55</sup>		
Long ID section	381 / 13.4	283 / 11.4
ID section	397 / 8.5	289 / 7.2
BM section	149 / 21.0	103 / 15.2
Beam Divergence[μrad]:( $\sigma_x' / \sigma_y'$ ) <sup>55</sup>		
Long ID section	16.1 / 1.2	11.9 / 0.81
ID section	15.9 / 1.9	11.7 / 1.3
BM section	57.4 / 0.78	53.8 / 0.68
Chromaticities:( $\xi_x / \xi_y$ )	+7 / +6 (+2 / +2) <sup>56</sup>	+8/+8
Lifetime[hr]:		
100mA (multi bunch)	~150	~97
1mA (single bunch)	~24	~9
Dispersion distortion[mm]:		
horizontal (rms)	4	9.3
vertical (rms)	1.1 <sup>57</sup>	1.1 <sup>57</sup>
Orbit stability (tune harmonics)[μm]:		
horizontal (rms)	-	1.3
vertical (rms)	-	0.35

<sup>51</sup>Maximum stored beam current at machine study

Measured by a pulse bump and scraper<sup>52</sup>, two dimensional interferometer<sup>53</sup>, and two photon correlation<sup>54</sup>

<sup>55</sup> Assuming that 0.26% coupling for "HHLV Optics" and 0.2% coupling for "Low Emittance Optics"

<sup>56</sup>With bunch-by-bunch feedback <sup>57</sup>With correction by 24 skew Q's

### 3. 軌道安定化

2001年1月から軌道安定化を進めてきた。真空チェンバのアブソーバなどを流れる冷却水により誘起される振動がビームの振動を引き起こしている事が分かり、その対策が進められた。特に垂直軌道変動の30Hz近傍の成分は真空チェンバがセル上流部のQ3電磁石中で振動することにより、そのチェンバ表面に渦電流が発生して、それが作る電磁場がビームを振動させるためであることが分かった[1]。チェンバ振動抑制のための支持構造追加、アブソーバ冷却水流量低減、配管系サイズ変更、流量調整弁の種類

変更などの振動対策を実施した。これにより、30Hz近傍の垂直振動の振幅は約1桁低減できた。この対策は水平方向の70~100Hzの振動抑制にも効果があり、この周波数帯域での水平振動振幅を10dB程度低減できた。さらに対策を進めることにより、水平、垂直ともに50~70Hzの振動成分を10dB程度抑制できた。これらの対策の結果、現在では、200Hz以下の帯域で、ID部でのビーム振動は、水平4μm、垂直1μm（共にrms値）程度にまで低減されている。

ゆっくりした軌道変動は1998年9月以来、周期的な軌道補正を施すことにより抑制している。補正性能を向上させるために、当初は無かった分解能が高く低ヒステリシス特性を有する空芯型補正用ステアリング電磁石が水平、垂直各24台を導入した。この結果ユーザー運転時の1日におけるビーム軌道ドリフトは水平、垂直ともに約5μm(rms)程度となり、補正による光軸位置の飛びも殆ど発生せず、極めて安定な軌道を実現できている。

### 4. Top-up運転[2]

Top-up運転は、蓄積電流を一定にするだけでなく入射時間を気にせず実験スケジュールを自由に構築できる事や、ビームラインの光学系の熱負荷の変動がないためにより安定な放射光が得られるというメリットが大きい運転であると言うことが出来る。しかしながら、入射の度に蓄積ビームがその影響を受けて振動するのでは受け入れられないという実験もあり、これを以下に克服するかが重要である。バンブ軌道が完全に閉じていないと、蓄積ビームがバンブ軌道通過時にバンブ電磁石の誤差磁場によりキックを受け、ベータatron振動が誘起される。エミッタンスの増大は短い時間（約30msec）ではあるが、精密実験にとっては問題となる。ビーム振動の様子をturn by turn beam monitorを用いて測定した結果、ビームの振動はa)バンブ電磁石の立ち上がり部分、b)サイン半波の中間部分、c)サイン半波終了時の磁場のオーバーシュートの3つ部分から生じていることが分かった。a)については、それぞれの磁石によるキック量を測定し、トリガータイミング調整を行うことによりある程度小さくすることができた。b)については、バンブが六極電磁石を跨いで配置されているため、非線形性によるバンブ軌道の漏れを原理的に完全に無くす事は出来ない。しかしながら、六極電磁石を励起される振動の極小エミッタンスを与える条件に設定することが出来る事が分かり、この効果を低減させる事に成功した[3]。また、非線形性の補正を行うパルスキッカー磁石および電源の開発を行い、水平方向の入射時の蓄積ビーム振動はビームサイズの約1/3以下とすることが出来た。c)に対する対策として、端板を絶縁体として渦電流の発生を抑えた改良型バンブ電磁石4台を製作、設置する事により、改善する事が出来た[4]。

入射ビームのロスを抑えることは、放射線安全上も重要であるが、ロスビームがIDの永久磁石に衝突する事による磁石の減磁を生じさせないためにも必要である。入射効率の改善に対しては、bunch-by-

bunch feedback (BBF)の導入により低クロマティシティでの運転が出来るようになったため、入射ビームロスを最小化する非線形電磁石分布を取ることが出来るようになった。また、シンクロトロンからの入射ビームは、元々Top-up運転を想定していたものではないという問題がある。そこで、SSBTの(位相関係が $\pi/2$ となる)2箇所スリットを配置して水平位相空間でビームを整形して入射する事にした[5]。現在、入射ビームをスリットにより $1\sigma$ に切っている。これにより、入射ビーム軌道を入射点で2mmセプタム壁に寄せることが可能になり、これらのことにより、入射効率は平均で90%近くになった。ビームロスに関して、残された問題はIDの軸から外れた箇所での複雑な非線形磁場がもたらす入射ビームへの影響があるが、これは今後の課題である。

図2にユーザータイムTop-up運転時の5日間の蓄積電流の変化を示す。

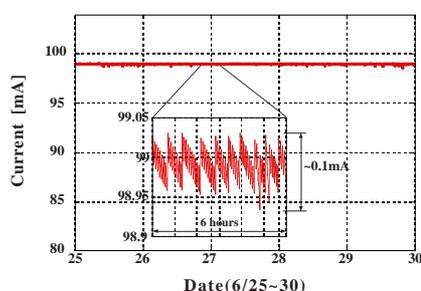


図2 : Top-up運転5日間の蓄積電流の変化

## 5. 低エミッタンス化

ID設置用直線部の無分散を積極的に崩しエネルギー分散を直線部に漏らす事で、偏向電磁石部での放射励起を緩和し、水平エミッタンスを低下させることができる。2002年の夏期停止期間に、長直線部のエネルギー分散を保ったまま、Chasman Greenユニットセルのエネルギー分散のみを崩せるように、長直線部両端の8箇所マッピング部四極電磁石の配線を一部変更した。その結果、従来の $6.6\text{nm}\cdot\text{rad}$ の水平エミッタンスを $2.5\text{nm}\cdot\text{rad}$ 程度まで安定に低下させることに成功した。X線の実効的光源サイズで規定される有効エミッタンスは、電子ビームのエミッタンスの他に、発光点での分散と電子ビームのエネルギー拡がりにも依存する。それらも含めて、X線光源のエミッタンス(有効エミッタンス)が最小になるように、2002年11月から水平エミッタンス $3.4\text{nm}\cdot\text{rad}$ のオペティックスでユーザー運転を開始、以後運転が継続していた。

しかしながら、2003年10月にインターロック動作により起こったビームアボートにより、入射部真空チェンバの $0.7\text{mm}$ 厚の薄肉部が電子ビームによって溶解してリークが発生するトラブルが発生した。幸い、ゲートバルブの遮断によりリークは入射部だけに留まったが、予備のチェンバに交換してユーザータイムを再開するのに約120時間を要した。図3にチェンバ内部からの溶解により、外面に亀裂が入った入射部チェンバの写真を示す。ビームアボートは

これまで何回も発生しているが、このような事態に到った原因が、低エミッタンスオペティックスでは、軌道が一番近くまでリング内側からチェンバ壁が接近している入射点で、アボートビームが集中的に失われる事になっているためであることが後の検討で分かった。そのため、現在オペティックスをそれまでのものに戻しているが、9月以降、チェンバ壁の溶解によるリークが発生しない新規製作の入射部チェンバを設置して、低エミッタンスオペティックスでの運転を再開する予定である。



図3 : アボートビームによって亀裂が入りリークが発生した入射部チェンバ

## 6. ビーム不安定性除去装置の開発[6]

蓄積リングにおける横方向のビーム不安定性除去のためFPGAを用いたBBFシステムが開発された[6]。これまで横方向のビーム不安定性に対しては、強いクロマティシティを用いてベータatron振動に周波数変調を導入し非線形振動を引き起こすことにより抑制してきた。しかしながら、真空封止型IDの数の増加などによりこの方法は限界を迎え始めた。また、入射効率にも影響するため、Top-up運転の導入の面からも低クロマティシティの運転が望まれていた。開発されたBBFシステムにより、不安定性の抑制に成功し、今まで制限のあったフィリングモードでの運転を可能にするとともに、低クロマティシティでの運転を実現する事が出来るようになった。

## 参考文献

- [1] S. Matsui, et al., JJAP, 42(2003)L338.
- [2] T. Hitoshi et al., "Top-up Operation at SPring-8 - Towards Maximizing the Potential of a 3<sup>rd</sup> Generation Light Source", presented at EPAC04, 5 to 9 July, 2004 Lucerne, Switzerland.
- [3] Tanaka, et al., submitted to Physical Review E.
- [4] T. Ohshima et al., "Suppression of Stored Beam Oscillation Excited by Beam Injection", presented at EPAC04, 5 to 9 July, 2004 Lucerne, Switzerland.
- [5] K. Fukami et al., "Beam Collimation System for the SPring-8 Top-up Operation", presented at APAC04, 22 to 26 March, 2004 Gyeongju, Korea.
- [6] T. Nakamura et al., "Transverse Bunch-by-bunch Feedback System for the SPring-8 Storage Ring", presented at EPAC04, 5 to 9 July, 2004 Lucerne, Switzerland.