

STATUS OF THE SPring-8 ACCELERATORS

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

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 operation status of the SPring-8 accelerators, as well as the recent progress of the performance improvement.

大型放射光施設 SPring-8 加速器の現状

1. 加速器運転状況

1.1 運転統計

2011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 4120 時間に対して実績 4058 時間 32 分と放射光実績利用率 98.5 % を達成している。図 1 に過去 6 年度の利用率を示すが、2011 年度は、2006 年度以来 6 年ぶりに利用率 99 % を割り込むものであった。

表 1: 運転統計 (2011 年度) .

総運転時間	4918 時間 37 分
マシン調整、スタディ	803 時間 03 分
利用運転	4058 時間 32 分
ダウンタイム	57 時間 02 分

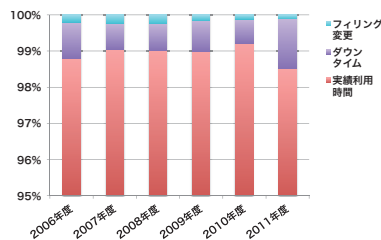


図 1: 過去 6 年度の利用率.

過去 6 年度のダウンタイム内訳を図 2 に示す。2011 年度は、総ダウンタイムの半分を挿入光源 (ID) のトラブルが占めていた。SPring-8 蓄積リングの ID はそのほとんどが真空封止であるが、その内 1 台の ID の変換部冷却水配管導入部からの真空リークが 1 日以上に渡るダウンタイムを引き起こした。

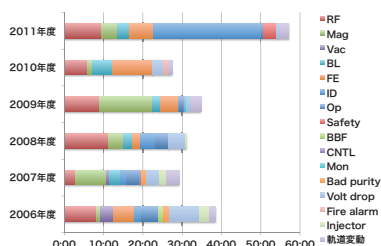


図 2: 過去 6 年度のダウンタイム内訳.

加速器起因のものでは、RF 機器インターロックによるダウンタイムが 2010 年度に比べて 1.6 倍になってい

* E-mail: takao@spring8.or.jp.

る。これは、クライストロン出力部冷却水漏水による 6 時間 2 分のダウンタイムがあったためである。その他 RF 機器インターロックは、サーキュレーターアークによるものが大半を占めていた (5 回/11 回)。2010 年度前半にもサーキュレーターアークが頻発したことがあり、アークセンサー誤動作が考えられたため同センサーを交換し、収まったということがあったが、2011 年度は 4 つある RF ステーションで満遍なく起こっており、現在経過観察中である。

SPring-8 蓄積リングでは、ID からの強力な放射光によるフロントエンド (FE)、ビームライン (BL) 機器の損傷を防ぐため、軌道変動に対して ID 両端に設置された RF BPM によるインターロックが設けられているが、2011 年度は原因不明の軌道変動によるビームアポートの頻度が上がってきた。一部については、ステア電磁石電源の電流変動によるものであることが分かってきた。さらに、軌道変動の原因については調査中である。

1.2 Top-up 運転統計

SPring-8 の Top-up 運転では、目標電流値 99.5 mA のところ、これを 0.1 mA 下回ると中断したものと定義している。2011 年度は、186 回、計 61 時間 38 分の Top-up 中断があった。実績利用運転時間の 98.5 % で Top-up 運転が継続していたことになる。

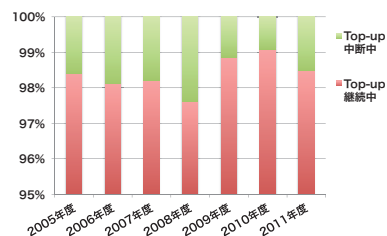


図 3: 過去 6 年度のトップアップ継続率.

トップアップ中断の内訳を図 4 に示す。中断原因の主なものは、ブースターシンクロトロン (Sy) RF ダウン (30 時間 23 分 42 秒)、蓄積リング (SR) 入射ポンプ電磁石ダウン (7 時間 15 分 8 秒)、データベース (8 時間 5 分 4 秒) であった。トップアップ運転導入当初に中断原因の大半を占めていた線型加速器 (Li) モジュールフォールトによるトップアップ中断は、モジュール電源改修などメンテナンスに加えて、モジュールフォールト時にスタンバイ機と自動で切り替える機能を追加したため、かなり削減されている (2 時間 39 分)。

調査の結果、Sy RF ダウンは可動チューナー冷却部からの漏水が原因であることが判明した。当該チューナーは交換したが、構造上問題があることから他のチューナーについてもリークチェックなど調査を継続している。

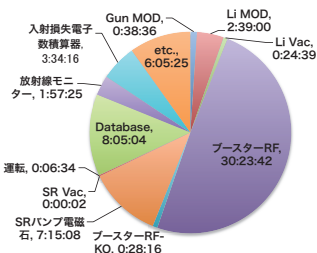


図 4: 2011 年度のトップアップ中断内訳。

1.3 節電運転

1.3.1 2011 年度の節電運転 2011 年度の加速器運転のトピックとして、原発事故に伴う電力需給逼迫による節電運転がある。節電要請期間の利用運転 (2011/07/11-29、2011/12/05-22) では、SPring-8 加速器でもビーム性能に大きな影響のない範囲内で節電対策を実施した。その主なものは以下の通りである。

1. Li モジュール繰り返し削減 (10 pps → 5 pps)。
2. Li モジュールスタンバイ機削減 (2 台 → 1 台、1 台停止)。
3. Sy RF 加速電圧低減 (18.4 MV → 16.4 MV)。
4. SR RF 加速電圧低減 (16 MV → 14.4 MV)。

それぞれ節電実績は、1: 65 kW、2: 15 kW、3: 300 kW、4: 300 kW と、ほぼ見積もり通りの効果があった。その他、マシン収納部照明の減灯 (半減) など実施し、SPring-8 全体の電力量 33 MW に対し、820 kW、2.5 % の節電を達成した。

節電運転のデメリットとして、以下のものがあった。1 では、PFN 電圧保持時間が長くなりそれだけ電圧が降下するため、印加電圧を上げる必要がある。2 では、スタンバイ機から遠いモジュールがフォールトした場合切り替えても電流値減少が大きい。4 では、ビーム寿命が短くなるため、特にバンチ電流値の高いセパラルバンチ運転では、トップアップ運転ではあるが蓄積電流値変動が大きくなる。通常は 0.03 % である蓄積電流値変動が、0.05 % ~ 0.06 % まで悪化した。

1.3.2 蓄積リング低エネルギー運転 さらなる節電の可能性を調べるため、低エネルギー (7 GeV) 運転の試験を実施した。これにより電磁石磁場および RF 加速電圧を削減できることから、SPring-8 加速器全体として約 3.4 MW (10 %) の節電となることが確認された。

低エネルギー運転のデメリットとして、放射光強度の低下が懸念される。SPring-8 標準型アンジュレータ (周期長: 32 mm、周期数: 140、最大 K 値: 2.5) と偏向電磁石に対する輝度および部分フラックス (口径: 0.5 mm × 0.5 mm、発光点からの距離: 39 m) の放射光強度計算コード SPECTRA^[1] による計算結果を図 5 に示す。アンジュレータ放射光では、低エネルギー化によりエミッ

タンスがエネルギーの 2 乗に比例して減少するため、8 GeV との比較では寧ろ 7 GeV の方が輝度的には高い場合がある。部分フラックスは、輝度ほどエミッタンス低減の効果がなく、10 keV 以上の X 線領域では 20 % から 50 % 程度低下している。加速器診断ビームラインのアンジュレータ (周期長: 76 mm、周期数: 51、最大 K 値: 5.8) を用いて部分フラックス測定を行い、SPECTRA による計算とほぼ一致することを確認した。

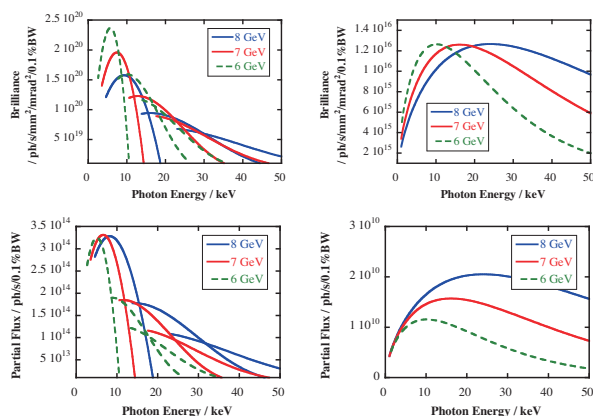


図 5: SPECTRA で計算した輝度 (上左図: SP8 標準型アンジュレータ、上右図: 偏向電磁石) と部分フラックス (下左図: SP8 標準型アンジュレータ、下右図: 偏向電磁石)。

2. 性能改善

2011 年度以降に実施した主な蓄積リング性能改善について報告する。

2.1 長直線部改造

SPring-8 蓄積リングの特徴の一つに、30 m 長の電磁石の設置されていない長直線部 (4ヶ所) がある。2011 年度夏期点検調整期間には、このうち 1ヶ所 (D ゾーン、LSS-D) に短周期アンジュレータが設置された。このアンジュレータは短周期であるため磁石列ギャップを通常より閉じる必要があり、このため当該長直線部は四極電磁石トリプレット 2 式を追加して 3 分割することにより、垂直ベータatron 関数が絞られることとなった^[2]。改造前後の長直線部近傍のオプティクス関数を図 6 に示す。現在、中央の直線部に 5 m の ID1 台が設置されており、2012 年度年度末点検調整期間に残り 2 台が設置される予定である。

D ゾーン長直線部に設置された ID (BL43LXU) のパラメータを B ゾーンに設置されている長尺 ID (BL19LXU) と比較して、表 2 に示す。BL43 のユーザーの要求する 15-20 keV 領域の X 線輝度を最大化するため、ID の周期長を 19 mm と SPring-8 標準型の 32 mm と比べて短縮化している。周期が短くなると磁場強度を出すためにはギャップを閉じる必要があり、ラティスを改造することにより最小ギャップ 5.81 mm を実現した。四極電磁石を設置するため ID の磁石列長は短くなるが、これを短周期化により周期数が増えることで補っている。また、垂直ベータatron 関数が絞られていることもあって、ID 3 台が揃った段階では 15-20 keV 領域の輝度は BL19LXU の最大輝度よりも高く 10^{21} 台に達

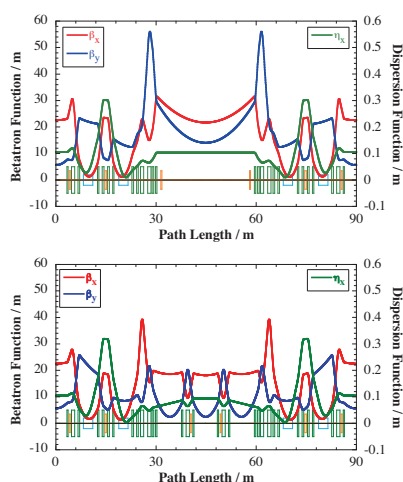


図 6: 長直線部近傍のオプティクス関数 (上図: 改造前、下図: 改造後)。

することになる。図 7、参照。

表 2: ID パラメータ。

	BL43LXU @ LSS-D	BL19LXU @ LSS-B
磁石列周期長	19 mm	32 mm
磁石列周期数	260 (× 3)	780
磁石列長	5 m (× 3)	25 m
最小ギャップ	5.81 mm	12 mm

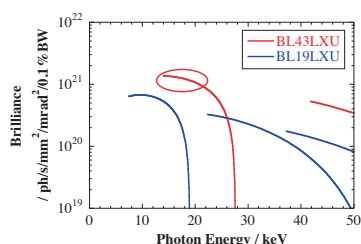


図 7: 長直線部 ID 放射光の輝度 (SPECTRA による計算) の比較。

4ヶ所ある長直線部の内1ヶ所を改造することにより、蓄積リング対称性は4回から1回に下がることになる。このため蓄積電子の力学的安定性が損なわれ、ビーム寿命や入射効率などのビーム性能の低下が懸念されたが、長直線部六極電磁石の局所的な調整(局所クロマティシティ補正およびその非線形キックの相殺)により、改造前と遜色ないレベルまで回復されている。図8は、SPring-8蓄積リングに設置された垂直スクレーパのビーム中心からの位置に対する入射効率を測定した結果を表している。入射ビーム条件は、トップアップ入射用(Sy-SR間のビーム輸送路に設置したビームコリメータを入射ビームサイズの 1σ まで閉じた状態)、挿入光源の条件は全ての磁石列ギャップ全開であった。この時、ビーム中心から3mmまでは位置によらず100%であるが、それ以下では位置に応じて減少していく。これは、本来水平方向である入射ビームの振動が、垂直方向に回り込むためであるが、Dゾーン長直線部オプティクス改

造の前後でほとんど違いがない。

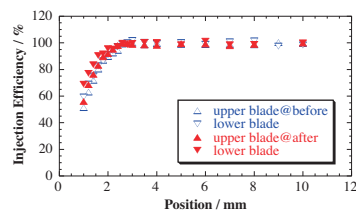


図 8: 入射効率のスクレーパ位置依存性。

2.2 低エミッタンスラティス開発

SPring-8では将来の放射光利用を見据えて、改修計画を策定中である。そこでは、究極の放射光リングを目指し、回折限界に迫るラティス設計がなされているが、世界では1nm.radを切るエミッタンスの光源リングが計画、建設されている情勢から、改修を待つだけでなく、現状の蓄積リングを大規模な改造をせずに、磁場勾配の変更などラティス変更で可能な範囲での低エミッタンスを進めている。2012年度内のユーザー運転開始を目指して、現在実ビーム調整中である^[3]。

現在利用に供しているオプティクスと現時点での低エミッタンスオプティクスのパラメータを表3に示す。水平方向にビームをより収束することから、水平ベータトロンチューンが1上がり、natural chromaticityも大きくなっている。

表 3: 設計ラティスパラメータ。

	現状	低エミッタンス
Natural emittance	3.5 nm.rad	2.4 nm.rad
Energy spread	0.0011	0.0011
Betatron tune	40.14/19.35	41.14/19.35
Natural chromaticity	-88/-42	-117/-47

SPring-8標準型アンジュレータに対するSPECTRA^[1]による輝度計算の比較を図9に示す。低エミッタンス化により、全体的に数10%の輝度の改善が達成されることになる。

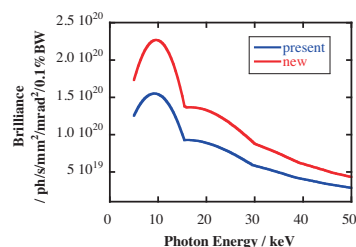


図 9: 輝度 (SPECTRA による計算) の比較。

低エミッタンス化のためより強く電子ビームを収束することから、力学的安定性の悪化が懸念されたが、六極電磁石調整等の結果、入射効率は従来のオプティクスと同等のレベルまでになっている。さらに調整を進め、利用試験を経て、ユーザー運転に供する予定である。

2.3 大強度シングルバンチフィリングの供用化

SPring-8蓄積リングの運転の特徴の一つに多様なバンチフィリングモードがある。時分割実験等のため、現

在の利用運転では表4の7つのセバールバンチモードが提供されている。上の3つのフィリングモードは均等間隔を必要とする実験のため、下の4つのハイブリッドフィリングモードは比較的大電流値のシングルバンチを必要とする実験のために用意されている。後者のフィリングモードでは、RFコンタクトやセラミックチャンパーでの発熱の問題からシングルバンチ電流値が制限されているため、蓄積電流値100 mAを達成するためバンチトレインと複数のシングルバンチを等間隔に配したハイブリッド構造となっている。時間構造を必要とする実験の実施が全てのビームラインでない時のために、マルチバンチフィリングモード(160 bunch train × 12)も用意されているが、その運転は2010年度10月以降ユーザー運転で行われていない。

表4: バンチフィリングモード.

バンチフィリングモード	single bunch current
203 bunches	0.5 mA
4 bunch train × 84	0.3 mA
11 bunch train × 29	0.3 mA
1/7-filling + 5 bunches	3.0 mA
1/14-filling + 12 bunches	1.6 mA
2/29-filling + 26 bunches	1.4 mA
4/58-filling + 53 bunches	1.0 mA

特にシングルバンチ電流値の高いフィリングモード”1/7-filling + 5 bunches”では、フィードバック(Bunch-by-Bunch Feedback, BBF) [4, 5] によるシングルバンチ不安定性の抑制が限界に近いこともバンチ電流値の制限になっていた。近年、シングルバンチ電流値増強の要望が強くなってきたことから、大バンチ電流シングルバンチを含むフィリングモードを実現するため、BBFシステムの高度化を進めてきた。

現状のSRでは、水平方向はRF空洞HOMによるモードカップリング不安定性が発生しており、垂直方向は真空封止IDの磁石列ギャップを閉じた際にwake fieldの影響でシングルバンチ不安定性が生じている。特に、垂直方向不安定性は高バンチ電流値に対して厳しいものとなっている。SPring-8のIDは、そのほとんどが真空封止で、磁石列ギャップの最小値が5.81 mmになるものも含め設置台数が増えてきたことも、シングルバンチ不安定性を強くしている一因である。

ハイブリッドフィリングモードでは、異なるバンチ電流値に対して不安定性を抑制する必要があるが、これに対応するためバンチ電流感応型アッテネータを開発してきた。これは、シングルバンチの過大な信号入力に対して処理回路が飽和しないように、バンチ電流値に応じてアッテネータを高速で切り替えるものである。セバールバンチモードでは、マルチバンチモードに対してバンチ電流値が高いため、20 dBのアッテネータが入っている。ハイブリッドモードでは、シングルバンチ部に対してさらに10 dBのアッテネータがダイナミックに入るようになっている。これらのアッテネータと入力段のRFアンプのゲイン調整と高効率のBBF用キッカーを導入することにより、6 mAのシングルバンチを含むフィリングモード”11/29-filling + single bunch”を利用運転に提供できるようになった。2012年度後半の利用運転より、ユーザーに公開する予定である。

2.4 COD 補正の高速化

高輝度放射光源リングでは、そのビームサイズが非常に小さいものであるため、ビーム軌道の安定度も高度なものが要求される。SPring-8では、256台のCOD BPMと水平96台、垂直140台の補正用高精度ステア電磁石により周期的にビーム軌道フィードバックを行っている。

2006年夏に実施したCOD BPM処理回路の更新により、COD測定の高精度化、高速化が図られ、それまで30秒であったCODの補正周期が7秒まで短縮された。図10は、連続するCODの差のR.M.S.を表す。処理回路更新前(2006/05/13)は水平: 1.10 μm 、垂直: 1.05 μm であったCODの差が、更新後(2007/05/14)には水平: 0.58 μm 、垂直: 0.35 μm まで改善した。

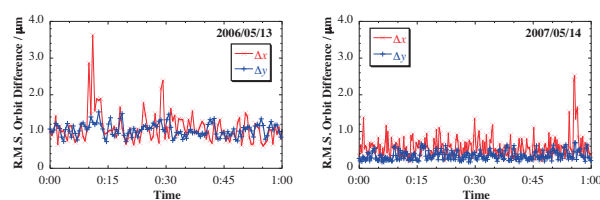


図10: COD差のR.M.S.の変化。左図: COD BPM処理回路更新前、右図: 更新後。

補正周期を高速化することで軌道安定度が改善されることから、COD BPM処理回路更新直後から補正の更なる高速化(1 Hz化)を目指して、ビーム軌道フィードバックシステムの改修を進めてきた。CODデータの通信、制御ソフトの改修、ステア電磁石設定時間の最適化などを実施し、2012年4月よりCOD補正を1 Hzで行っている。これによりそれまで(2011/05/10)水平: 0.52 μm 、垂直: 0.60 μm であったCODの差が、1 Hz化後(2012/05/07)には水平: 0.42 μm 、垂直: 0.37 μm まで改善した。

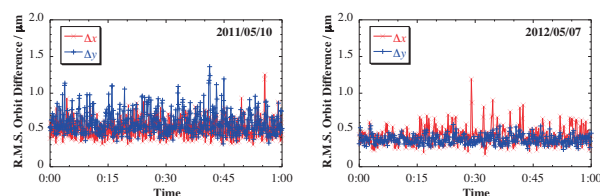


図11: COD差のR.M.S.の変化。左図: 1 Hz化前、右図: 1 Hz化後。

参考文献

- [1] Takashi Tanaka and Hideo Kitamura, <http://radiant.harima.riken.go.jp/spectra/index.html>
- [2] K. Soutome, et al., 本プロシーディングス, FRUH01.
- [3] Y. Shimosaki, et al., 本プロシーディングス, THUH07.
- [4] T. Nakamura, and K. Kobayashi, Proc. of EPAC04 (2004), 2649.
- [5] K. Kobayashi, and T. Nakamura, Proc. of ICALEPCS2009 (2009), 659.