

SPring-8 加速器の運転状況

OPERATION STATUS OF THE SPring-8 ACCELERATORS

高雄勝*, for 加速器部門
Masaru Takao*, for Accelerator Division
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

In fiscal year 2014 the achieved user operation time amounts 4057 hours 48 minutes compared with the scheduled 4080 hours, whose availability is 99.46 %, the best record. Owing to the stable beam injection of the Top-up operation, fluctuation of the stored current is kept under 0.1 % (usual 0.03 %) over 99 % of user time. In this paper, the status of the operation of the SPring-8 accelerators and the beam performance are reviewed.

1. はじめに

2014 年度の利用運転状況は、計画利用運転時間 4080 時間に対し、実績 4057 時間 48 分と、利用率として 99.46 % を達成した。SPring-8 では利用運転中も電子ビーム入射を行うトップアップ運転を行っているが、安定なビーム入射により利用運転時間の 99 % で蓄積電流値の変動は最大 0.1 % (通常 0.03 %) に保たれている。

SPring-8 加速器は極めて安定に運転されているが、経年劣化によるトラブルが増加していることも事実である。殊に、RF 関係ではここ数年クライストロン電源周りのトラブルが発生しており、2014 年度はダウンタイムの過半数を占めるに至った。その対策としてクライストロン電源更新計画が進められており、電源の新規製作が終了し、今年度末以降順次更新の予定である。

また最近の利用運転において、挿入光源 (ID) の影響が顕著となってきた。ID 磁石列ギャップ駆動に伴う入射効率の低下やカップリングの悪化 (垂直ビーム拡がりの増大) が観測されており、その対応が必須となっている。前者については、ID 起因の tune shift が主因であり、その補正を実施している。後者については、ID 個別に直近に設置した skew 4 極電磁石を用いて補正を行っている。

その他、SPring-8 の加速器の最新の運転状況について報告する。

2. 運転状況

2.1 2014 年度利用運転状況

2014 年度の SPring-8 加速器の運転状況は、Table 1 に示す通りであった。過去 10 カ年度の利用運転統計を Fig. 1 にまとめる。例年、利用運転時間は 4000 時間を越えていたが、2013 年度は冷却設備熱源更新工事のため、2014 年 1 月始めから 3 月末まで運転を停止していたことにより、大きく割り込む結果 (3408 時間 29 分) となった^[1]。2014 年度は大きな工事が無かったため、利用運転時間は 4000 時間を越える結果となった。

2013 年度のダウンタイム (20 時間 2 分) は、計画利用運転時間が短かったこと (3432 時間) を考慮しても、利用率が過去最高を記録するほど少ないものであったが、2014 年度のダウンタイム (17 時間 5 分) は利用運転時間が 4000 時間台に復帰したにも拘わらず、2013 年

Table 1: Operation Statistics 2014fy

Total operation time	5099:15
Machine tuning & study	1019:15
Scheduled user time	4080:00
Achieved user time	4057:48
Downtime	17:05
Refill for filling change	5:07

度より少なく、利用率として 2013 年度に引き続き過去最高を記録した。Fig. 2、参照。

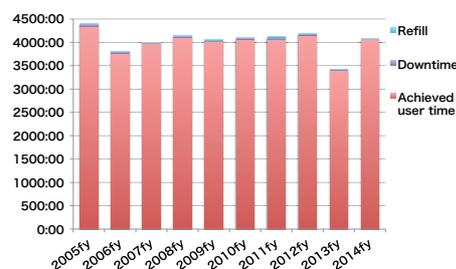


Figure 1: Operation statistics of past 10 fiscal years.

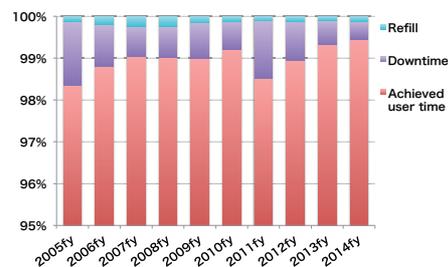


Figure 2: Availability of past 10 fiscal years.

2.2 ダウンタイム

過去 10 年度のダウンタイム内訳を Fig. 3 に示す。2014 年度のダウンタイムの特徴として、RF 関係が半分以上になっていることがある。RF 関係のダウンタイムは大

* takao@spring8.or.jp

体一定で推移している一方、他の原因が減少したための結果ではあるが、最近の傾向として内容的には経年劣化によるものが増えている。2014年度では、RF Cステーションのクライストロン電源異常（コレクタ損失大インターロック誤動作）やマスター発信器故障（位相ノイズ多発により出力信号不安定）が発生した。2012年度には、RFDステーションクライストロン電源直流高圧盤冷却系異常が多発したが、原因は、保護抵抗の抵抗値が20%程高くなっており、低電流動作のため発熱量が増加していたものであった。これによりクライストロン電源の更新が決定され、2014年度に電源が製作された。今後2年計画で、長期停止期間を利用してリプレースの予定である。

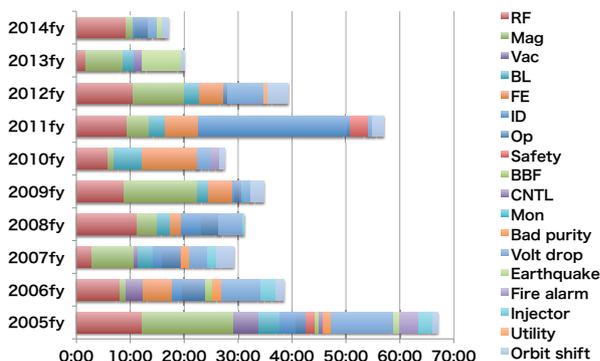


Figure 3: Details of causes of downtime for past 10 fiscal years.

2.3 トップアップ運転状況

SPring-8 利用運転のトップアップ運転統計では、目標電流値 99.5 mA のところ、これを 0.1 mA 下回るとトップアップを中断したものと定義している。2014年度は、173回、計40時間54分のトップアップ中断があった。実績利用運転時間の99.0%でトップアップ運転が継続していたことになる。

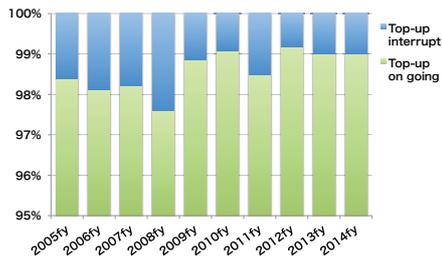


Figure 4: Duration rate of top-up operation of last 10 fiscal years.

2014年度のトップアップ中断の内訳を Fig. 5 に示す。Li は線形加速器、Sy はブースターシンクロトロン、NS は併設の New SUBARU 施設を表す。Sy RF ダウン (cavity 反射) によるトップアップ中断が大半を占めている。2012年度に可動チューナー冷却部からの漏水があることが判明し、交換修理したため一旦 Sy RF ダウンの頻度が減ったことにより、このトラブルは解消したと思われる

いたが、依然収束していなかった。2014年度になってさらに事態は悪化し、Sy RF ダウンが頻発するようになった。夜間0時から8時の間に集中して発生し、外気温、クライストロン室温度と相関があるようであった。ローレベル系を調査していたところ、クライストロン位相制御に使用するキャビティピックアップ信号伝送ケーブルに折れ曲がりを見出し、修理した。また、よく落ちるキャビティのチューナー駆動ステッピングモータドライバーに動作不良があったので交換した。これらに加え、基準信号が不安定になっていたことも重なって、反射が頻発していたものと思われる。現在では、トップアップ中断は月に10回程度と極めて安定にトップアップ運転が継続されている。

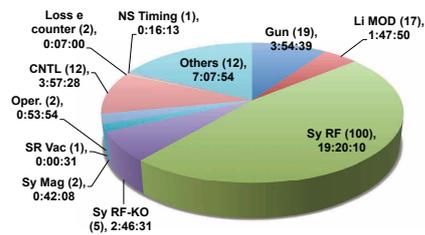


Figure 5: Details of causes of top-up interruption in 2014 fiscal year.

2.4 フィリングモード

SPring-8 の特徴の一つに、その多彩なビームフィリングパターンがある。現在、利用運転にはマルチバンチモード (160 bunch-train × 12) の他に Table 2 に示す 8 パターンのセベラルバンチモードが用意されている。等間隔フィリング (A-C) モードと高シングルバンチ電流を必要とする実験用にハイブリッド (D-H) モードがある。特に、バンチ電流の高い H モードのため、バンチ電流に応じて attenuation を変える不安定性抑制システム (Bunch-by-Bunch Feedback, BBF) が開発されている [3, 4]。

2014年度利用運転におけるバンチモードの内訳は、Table 2 に示す通りであるが、2011年以降、マルチバンチモードの利用は無く、2014年度は B,E モードの利用も無かった。より強いパルス放射光を利用するため 2012年12月より利用に供されるようになった H モードの利用割合も 20%を越え、放射光のパルス性の利用が進んでいる。

3. ビーム性能

SPring-8 蓄積リングのパラメータを Table 3 にまとめる。輝度向上のため、2013年5月よりオプティクス変更が行われ、natural emittance がそれまでの 3.5 nm-rad から 2.4 nm-rad に改善された。

3.1 ビーム形状

高輝度放射光光源リングにとって垂直ビーム拡がりには重要なパラメータである。垂直ビーム拡がりには誤差磁場などによる水平垂直振動の結合 (線形共鳴結合) や垂直ディスパージョンなどで生じるが、光源リングではこれを抑えるため色々な対策が取られている。SPring-8

Table 2: Filling Pattern for User Operation

Name	Bunch pattern	Single bunch current	Injection interval	Share of user time 2014fy
Multi	160 bunch-train × 12	0.05 mA	several minutes	0 %
A	203 bunches	0.5 mA	30 s	22 %
B	4 bunch-train × 84	0.3 mA	40 s	0 %
C	11 bunch-train × 29	0.3 mA	40 s	32 %
D	1/7-filling + 5 bunches	3.0 mA	30 s	10 %
E	2/29-filling + 26 bunches	1.4 mA	20 s	0 %
F	1/14-filling + 12 bunches	1.6 mA	20 s	12 %
G	4/58-filling + 53 bunches	1.0 mA	20 s	3 %
H	11/29-filling + 1 bunch	5.0 mA	40 s	21 %

Table 3: Parameters of the SPring-8 Storage Ring

Circumference	1435.95 m
Lattice type	Modified double bend
Cell #	44 (normal: 36, matching: 4×2)
Stored current	100 mA
Natural emittance	2.4 nm-rad
Emittance coupling ratio	0.3 %
Betatron tune (H/V)	41.14 / 19.34
Chromaticity (H/V)	2 ~ 3 / 2

蓄積リングでは精密な電磁石アライメントと適正な軌道補正により、垂直ビーム拡がりには運転開始当初より非常に小さいものであった。

通常、垂直ビーム拡がりには水平ビーム拡がりとの比、カップリング比で測られるが、近年、電磁石アライメントやCODの経年変化により悪化してきている。1999年より垂直ディスパージョン補正を、2007年より線形結合共鳴補正を行っている。これら補正の改善を行うことにより、SPring-8蓄積リング運転開始当初のカップリング比0.2%に近いところまで補正している (Table 3)。Figure 6は、カップリング補正の有無に対する偏向電磁石を光源とするX線ピンホールカメラによるイメージである。垂直方向の幅が広く、傾いていたものが、補正により水平方向に扁平になっている。

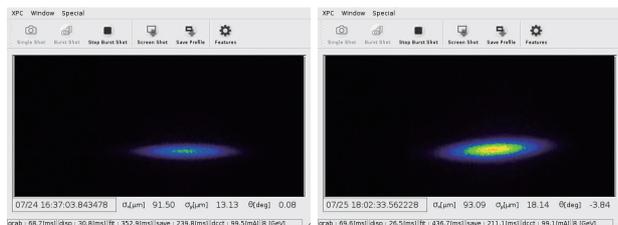


Figure 6: Beam images by X-ray pinhole camera with (left) and without (right) the coupling correction.

SPring-8蓄積リングの垂直ビームサイズは、IDのギャップ駆動に伴い大きく変化している。これは、IDの発生する誤差磁場によりカップリングが変わったことに因るものである。Figure 7は、2015年度第4サイク

ル (2015/7/9~25) の利用運転中のX線ピンホールカメラで測定した垂直ビームサイズの変遷である。ID20のギャップ駆動に伴い増大した垂直ビームサイズを直近のスキュー4極電磁石を用いて補正した。現在、自動補正ソフトウェアを開発中である。

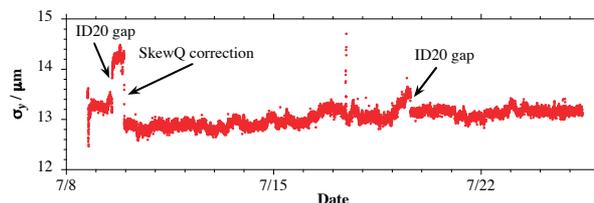


Figure 7: Trend of vertical beam size over the 4th cycle 2015.

3.2 ビーム寿命

SPring-8ではトップアップ運転を行っているため、ビーム寿命は重大な問題ではないが、放射線安全や挿入光源の減磁の問題を考えると、なるべく長いビーム寿命が望まれる。SPring-8の利用運転は、2.4節で述べた通り高バンチ電流のセバラルバンチ運転で行われており、8 GeVの高エネルギーにも拘わらずタウチェックビーム寿命が短く、タウチェック効果がビーム寿命に対して支配的である。タウチェック効果でエネルギー交換した電子は、ディスパージョンに応じて横方向にも振動を開始するため、モーメントムアクセプタンスはRFで決まる縦方向だけでなく、横方向のダイナミクスにも影響される [5, 6, 7, 8]。

Figure 8は、RF電圧を変えていったときのタウチェックビーム寿命の変化を測定したものである。SPring-8蓄積リングでは、バンチ電流1 mAにおいてタウチェックビーム寿命がビーム寿命に対して支配的となる。タウチェックビーム寿命は、ほぼモーメントムアクセプタンスの冪に比例しているため、RF電圧を上げるに従い延びていくが、横方向のダイナミクスで決まるアクセプタンスまで達すると延びなくなる。Figure 8に示す通り、3.5 nm-rad オプティクスでは、3.2%あったモーメントムアクセプタンスが、2.4 nm-rad オプティクスに変更した当初は2.4%まで減少した。2回の6極電磁石の調整を経て、3.5 nm-rad オプティクスと同等の3.2%まで回

復した。

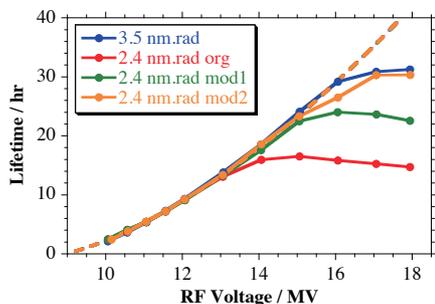


Figure 8: Tauschek lifetime vs. RF voltage.

通常、SPring-8 蓄積リングは加速 RF 電圧 16 MV で運転されているが、節電の関係から 2015 年 5 月よりこれを 14.4 MV に下げて利用運転が行われている。この影響はビーム寿命が短くなることからトップアップ運転のビーム入射間隔が少し短くなる程度で、ビーム性能を犠牲にすること無く利用運転が行われている。

3.3 ビーム入射効率

トップアップ運転では、ビームライン main beam shutter (MBS) が開いたまま、ID ギャップは閉じたままビーム入射が行われるため、ビーム入射効率もビーム寿命同様に高いことが望まれる。SPring-8 では不要なビームハローをカットして入射効率を改善するため、ブースター蓄積リングビームトランスポート (SSBT) にビームコリメーターが設置してある。トップアップ利用運転中、これを閉じることによって常時 80 % 以上の入射効率を確保している。Figure 9 は、2015 年度第 4 サイクル (2015/7/9~25) の入射効率の変遷である。

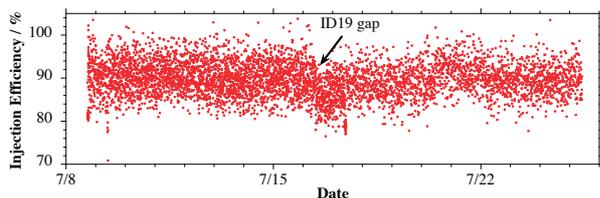


Figure 9: Trend of beam injection efficiency over the 4th cycle 2015.

SPring-8 の ID は、そのほとんどが真空封止型で、狭いギャップまで閉じることで強力な放射光を発生している。真空封止 ID のギャップが閉じられると、垂直口径が狭まるため入射効率が低下するが、ID 磁場によるチューンシフトにより共鳴励起が増幅され、入射ビームの水平振動の垂直方向へ流れ込みが増加するため、口径制限以上に入射効率が低下することになる。Figure 9 の入射効率がステップ的に変化しているところは、チューンシフトの大きい長尺 (25 m) の ID19 が最小ギャップ 12 mm まで閉じられたことによるものである。この際は、平均入射効率が 80 % を下回っていなかったが、他の ID のギャップ状態との兼ね合いで 60 % を切るような場合もある。そのような時には、チューンをフィードバックすることで入射効率の回復を図っている。

入射効率を低下させるものは、ID によるチューンシフトの他にも蓄積リング同期位相のシフトなどがある。SPring-8 蓄積リングでは、偏向電磁石による放射損失は 9 MeV 程であるが、利用運転中の挿入光源によるそれはギャップ状態により数 MeV にも達する。このため、ID ギャップ閉閉により同期位相は 10 度前後シフトすることになる。節電運転のため RF 電圧を下げた結果、シフト量は拡大することになり、入射ビームとのタイミングのズレが大きくなって、入射効率にも影響が見られるようになった。利用運転中に多数の ID が閉じられた時には、入射タイミングを調整することによって入射効率の改善が図られている。Figure 10 は、この過程を示したものである。

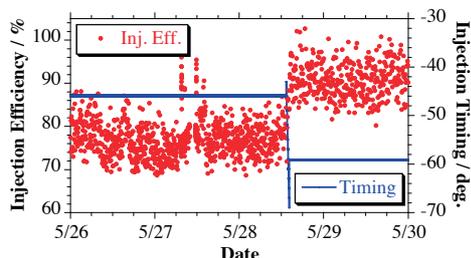


Figure 10: Trend of beam injection efficiency and injection timing.

参考文献

- [1] M. Takao, for Accelerator Div., “大型放射光施設 SPring-8 の現状とビーム性能改善 (Status of the SPring-8 Accelerators and Improvement of the Beam Performance)”, 第 11 回日本加速器学会年会報告集 (Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan) (2014), 384 (FSP020).
- [2] M. Takao, for Accelerator Div., “大型放射光施設 SPring-8 加速器の現状 (Status of the SPring-8 Accelerators)”, 第 10 回日本加速器学会年会報告集 (Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan) (2013), 302 (SSFP02).
- [3] T. Nakamura, and K. Kobayashi, Proc. of EPAC04 (2004), 2649.
- [4] K. Kobayashi, and T. Nakamura, Proc. of ICALEPCS2009 (2009), 659.
- [5] M. Takao, K. Soutome, and H. Tanaka, Proc. of EPAC00 (2000), 1569.
- [6] M. Takao, K. Soutome, and H. Tanaka, Proc. of 13th Symposium on Accelerator Science and Technology (2001), 316.
- [7] H. Tanaka, J. Schimizu, K. Soutome and M. Takao, Proc. of EPAC02 (2002), 1305.
- [8] M. Takao, J. Schimizu, K. Soutome, and H. Tanaka, “SPring-8 蓄積リング低エミッタンスオブティクスとモーメンタムアクセプタンス (Momentum Acceptance in the Low Emittance Optics at the SPring-8 Storage Ring)”, 第 10 回日本加速器学会年会報告集 (Proc. of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan) (2006), 898 (FP53).
- [9] K. Fukami, et al., Proc. of APAC04 (2004), 103.