

OPERATION 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.

SPring-8 加速器運転の現状

1. 加速器の現状性能

SPring-8 加速器は、1 GeV Linac (Li)、1-8 GeV Booster Synchrotron (Sy) および 8 GeV 蓄積リング (SR) からなる。各加速器の主なパラメータを表 1 にまとめる。

表 1: 主な加速器パラメータ。

Li			
全長	140 m		
加速管	25 本		
加速周波数	2856 MHz		
	Normal Mode	Top-up Mode	
Pulse width	1 ns	40 ns	1 ns / 500 ps
Repetition	1 pps	1 pps	1 pps
Pulse Charge	1.7 nC	2.8 nC	0.66 nC
$\Delta E/E$ (FWHM) [†]	0.45 %	0.55 %	0.32 %
Energy stability [†]	0.02 %	—	0.01 %
Sy			
周長	396.124 m		
Lattice type	FODO		
Cell #	40		
Repetition	1 pps		
加速周波数	508.58 MHz		
Harmonic #	672		
Betatron tune (H/V)	11.73/8.78		
Natural emittance @ 8 GeV	230 nm-rad		
Energy spread @ 8 GeV	0.126 %		
SR			
周長	1435.95 m		
Lattice type	Modified double bend		
Cell #	44 (normal: 36, matching: 4×2)		
蓄積電流値	100 mA		
加速周波数	508.58 MHz		
Harmonic #	2436		
Betatron tune (H/V)	40.14/18.35		
Natural emittance	3.4 nm-rad		
Emittance coupling ratio	0.2 %		
Energy spread	0.11 %		

[†]ECS (Energy Compression System) 動作時。

SR の lattice type は基本的には double bend achromat であるが、直線部に dispersion を漏らすことによって、そのピークを下げることで、emittance の低下がなされている。dispersion を漏らさない場合、emittance は 6.7

nm-rad である。また、全周で 4 箇所長さに 30 m の magnet free 長直線部が設けられている [1]。その上下流には betatron phase matching を取り力学的安定性を確保するため、matching cell が設けられている。長直線部近傍の lattice 関数を図 1 に示す。

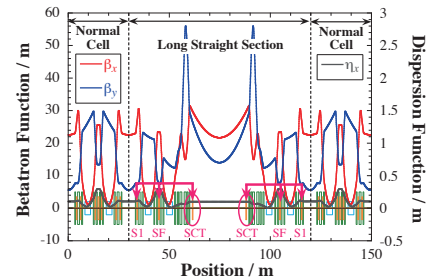


図 1: Lattice function of the SPring-8 storage ring.

以下で、主な蓄積リングのパラメータについて改良の歴史を含めて紹介する。

1.1 Dynamic Aperture

長直線部実現に際して、セル構造、即ち周期性が崩れることにより、力学的安定性が損なわれることになる。これを避けるため、30 m magnet free 長直線部を挟むセルでは電磁石配置および設定を変更して、この間の phase advance が 2π の整数倍 (水平: 4π 、垂直: 2π) になるよう phase matching が取られている。こうすることによって、長直線部の入口と出口で周回電子の位置と角度が一致することになり、長直線部が力学的に透明となつて、lattice の周期性が回復する。ただし、これは on-momentum の電子に限られた話で、off-momentum 電子に関しては phase matching が崩れるため、momentum acceptance が狭まる結果となる。2000 年の長直線部導入当初はこれを救済するため、matching cell に設置された六極電磁石 (図 1 中の SF) を用いて local chromaticity 補正を行い、off-momentum 電子の acceptance を確保していた。SF の非線形キックのため dynamic aperture が狭まることになるが、許容範囲として運転を行っていた。

この状況を解決するため、2007 年に長直線部に六極電磁石を追加 (図 1 中の SCT) 設置し、これを用いて SF の非線形キックを相殺することで、dynamic aperture の拡張が図られた [2]。図 2 に dynamic aperture (計算) を示す。x 軸+側は蓄積リング外側に対応し、入射ビームは内側 (-10 mm) から入射される。SCT の導入によって、入射効率は約 15 % 改善された。

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

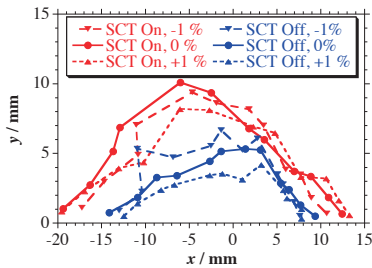


図 2: Dynamic aperture of the SPring-8 storage ring.

また、SPring-8 SR でのビーム寿命についても改善されていることが Touschek ビーム寿命の測定から確認されている。Touschek 効果がビーム寿命に対して支配的となるよう single bunch に 1 mA 蓄積することで、Touschek ビーム寿命は測定される。図 3 は、同条件でビーム寿命を測定したものである。RF 加速電圧を上げていくに従いビーム寿命は伸びていくが、transverse momentum acceptance に引っかかるころから、頭打ちになってくる。図 3 の点線は、RF 電圧で決まる longitudinal momentum acceptance のみにより求められる Touschek ビーム寿命を表している。SCT off の場合、SCT on の場合に比べてビーム寿命の伸びが悪く、momentum acceptance が狭いことの表れである。

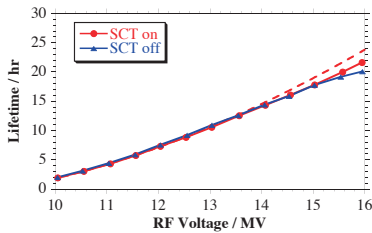


図 3: Touschek lifetime.

実際に aperture が拡大していることを、パルスバンプ電磁石を用いて蓄積ビームをキックすることで確認した^[3]。図 4 参照。SR へのビーム入射に用いるバンプ電磁石 4 台（実際のビーム入射時はこの 4 台により local bump を作り、蓄積ビーム軌道を入射ビーム軌道に寄せる）の内、上流または下流側 2 台だけ励磁することで、蓄積ビームに瞬間的に振幅を与えることが出来る。このように蓄積ビームを蹴り、その後のビーム生存率から aperture を測定した。SCT off の場合、ビーム生存率が落ちるところがほぼ dynamic aperture に一致しているのに対して、SCT on の場合にはそれより若干広いところまでビーム生存率が低下せずに広がっている。またこの低下は、大振幅の電子が入射部 septum 壁など physical aperture に衝突したことによるものと考えられる。このように、SCT により aperture が拡大していることが確認されている。

1.2 Emittance Coupling Ratio

高輝度光源にとって重要なパラメータである emittance coupling ratio は、SPring-8 SR では精密な alignment と適正な COD 補正により、運転開始当初 (1997) より無補正でも 0.2 % と大変小さいものであった^[4]。1999 年に実施した optics 変更に伴い垂直ディスパージョンが悪化した、skew 四極電磁石を用いてこれを補正している

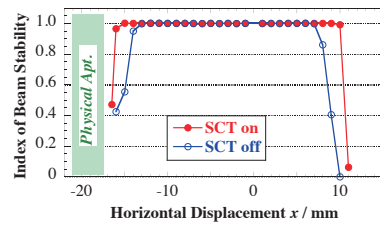


図 4: Measured aperture of the SPring-8 storage ring.

[5]。線形結合共鳴についても時間経過と共に悪化してきたので、2007 年より補正を実施している。現在、SR には 54 台の skew 四極電磁石が設置されており、上記二つの補正を行っている。手順は、摂動理論 single resonance 近似に基づいて線型結合共鳴補正を行い、その上で線形結合共鳴を励起しない拘束条件の下に垂直 dispersion の補正を行っている。

線形結合共鳴補正は、operation point を囲む 4 本の共鳴線 ($x - y = 21, 22, x + y = 58, 59$) について実施している。各共鳴は、実部、虚部の 2 自由度あるが、skew 四極電磁石の組み合わせにより独立に調整できる。垂直ビームサイズをモニタしながら、線形結合共鳴の beam based 補正を行っているが、その過程を図 5 に示す。

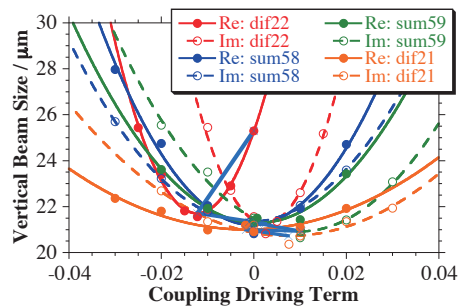


図 5: Coupling resonance correction at the SPring-8 storage ring.

垂直ディスパージョンは、skew 四極電磁石により水平ディスパージョンを捻って垂直ディスパージョンにカウンターを当てて補正している。その例を図 6 に示す。補正前 3.9 mm r.m.s. であった垂直ディスパージョンが、1.4 mm r.m.s. まで補正されている。

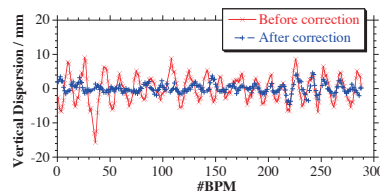


図 6: Vertical dispersion correction at the SPring-8 storage ring.

Coupling 補正前後のビームプロファイルを図 7 に示す。ここで、左図は補正無し、右図は補正有りのものである。現状では、emittance coupling ratio に換算して、1 % から 0.2 % まで補正されている。

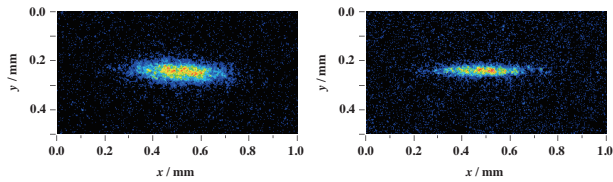


図 7: Beam profiles of the SPring-8 storage ring without (left) and with (right) coupling correction.

1.3 Orbit Stability

高輝度光源リングにとって軌道安定度は、その極度に小さいビームサイズのため大変重要である。このため SPring-8 SR では、利用運転中 COD 自動補正を行っているが、現状の 1 日の軌道変動は、図 8 にあるとおりである。その r.m.s. は、図 9 にあるとおり、水平、垂直とも $1 \mu\text{m}$ 以下を達成している。

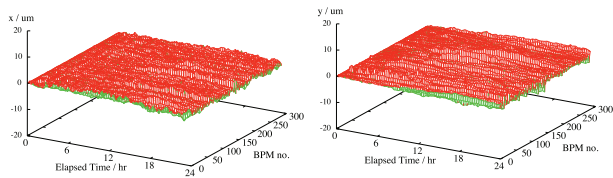


図 8: COD drift over one day.

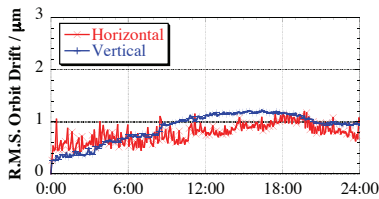


図 9: Drift of COD r.m.s..

現在の軌道安定度を達成するために、COD BPM および steering magnet の改良を進めてきた。現状の COD BPM のスペックは表 2 のとおりである。現在の COD 補正周期は約 7 秒を実現しており、直近の COD の差は r.m.s. で $0.3 \mu\text{m}$ 以下に抑制されている。

補正周期が短くなり精密に補正するためには、steering magnet の設定分解能も上げる必要がある。SPring-8 では自動 COD 補正用に、電源に DAC を追加し、追加した DAC の出力を 1/32 に減衰して元と和をとって電磁石に出力することで、実効的に分解能を上げた HD ST (High Definition Steering) 電源を用意している [7]。ST 電源のスペックは表 3 のとおりである。総計で水平 276 台、垂直 262 台の steering magnet が設置されているが、この内水平 52 台、垂直 132 台が HD 化されている。ほぼ 1 セルあたり水平 1 台、垂直 3 台の HD ST が設置されていることになる。垂直方向に重点をおいているのは、電磁石架台などの熱変動による変位が大きく、COD に local bump として現れるため、これを補正するには台数を要するからである。

1.4 Top-up Operation

SPring-8 では、高輝度化において不可避免的なビーム寿命の低下を救済し、平均 (積分) 輝度の向上を図るため、2004 年よりユーザー利用中もビーム入射を行う

表 2: COD BPM スペック.

COD BPM 個数	257
COD BPM 処理回路台数	24
Resolution	$0.1 \mu\text{m}$
測定時間	3 s

表 3: ST 電源スペック.

	Normal ST		HD ST	
	水平	垂直	水平	垂直
Max. Kick	1 mrad	0.5 mrad	$31 \mu\text{rad}$	$16 \mu\text{rad}$
Min. Step	30 nrad	15 nrad	1 nrad	0.5 nrad

Top-up 運転を実施している [8]。そこでは挿入光源磁石列ギャップを閉じたままビーム入射を行うことから、磁石列の減磁を避けることなどから高い入射効率が要求される。

また、ユーザーが利用運転中であるので、ビーム入射が実験に支障を来さないようビーム入射による蓄積ビームの振動を誘起しないようにする必要がある。これらの問題に対して、SPring-8 において取ってきた対策について紹介する。

1.4.1 Improving Injection Efficiency 入射効率低下の一番の原因は、表 1 にあるとおり Sy と SR の emittance の mismatch である。入射ビームサイズが大きいため SR の aperture から溢れてビーム損失が起こっている。Top-up 運転では、蓄積電流値の変動削減およびセベラルバンチモード運転におけるバンチ電流値一定化のため大きな入射電流値を必要としない。そこで、Sy-SR 間のビーム輸送経路 (SSBT) に beam collimator (図 10 中の SL1A_ss, SL1B_ss; この間に 90° の位相差がある) を設置して、水平方向に入射ビームを切り、ビーム拡がりを削減することで入射効率の改善を図っている [9]。挿入光源磁石列ギャップ全開の条件下では、collimator 全開では 92~93 % であった入射効率が、入射ビーム位相空間において 1σ でビームを切ることによってほぼ 100 % の入射効率達成している。

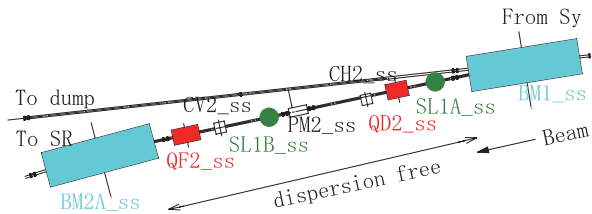


図 10: SSBT collimator.

その他、ベースの入射効率を改善するため、前述のカウンター六極電磁石 (SCT) 導入 [2] を初め、数多くの力学的安定性改善策を行ってきた。その主なものを紹介する。

まず、リング応答関数測定によるオプティクス対称性の回復がある [10]。これは、steering magnet 全台数を 1 台ずつ順に励磁し、励磁前後の COD を測定する (応答関数測定)。ノーマル四極誤差磁場を SR の 236ヶ所に分布させ、応答を再現するようフィッティングを行う。評価モデルに従って、四極電磁石用トリム (補助) 電源を用いて誤差磁場の補正を行う。測定例を図 11 に示す。

ここで、上(下)段は補正前(後)のベータatron関数(左: 水平、右: 垂直、リング 1/4 周分)を表す。ベータatron関数のデザインからの偏差は、トリム電源オフでは水平 7.2%、垂直 8.6%であったものが、トリム電源オンでは水平 2.0%、垂直 1.2%まで補正されている。これによって、利用運転中の入射効率が 10%程度改善されていることが確認されている。

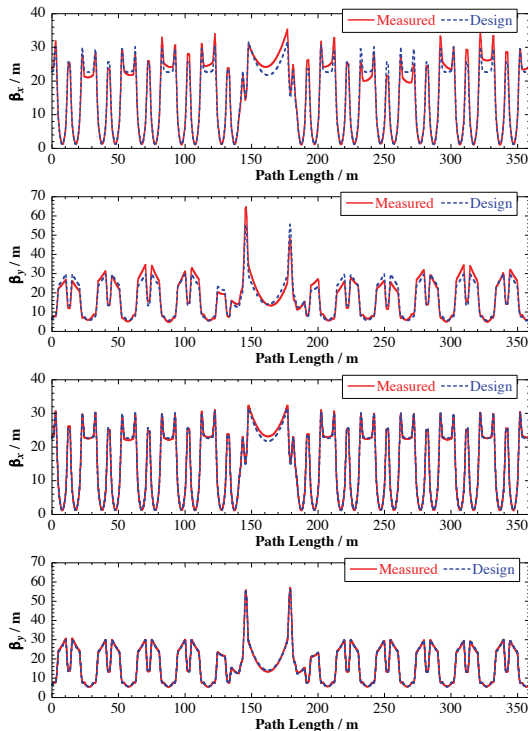


図 11: Measured betatron functions.

次に、bunch-by-bunch feedback (BBF) の導入 [11] により chromaticity の低減が可能となり、その結果として入射効率の改善が見られた。BBF 導入前はビーム不安定性を Landau 減衰を利用して抑制するため、chromaticity は $(\xi_x, \xi_y) = (8, 8)$ と相当大きな値に設定していた。BBF 導入の第 1 段階 (2004 年) では、これを $(2, 6)$ まで下げることが可能となった。この段階で、約 20% の入射効率改善を見た。垂直 chromaticity が、水平ほど下げられなかったのは、single bunch 電流値が 3 mA と大きいバンチフィリングモード運転において、single bunch 不安定性が発生して single bunch 部の蓄積ビームが失われたためである。このバンチフィリングモードでは、100 mA 蓄積するために single bunch 5 個と全周の 1/7 を埋める bunch train からなるハイブリッドフィリングになっている。高いバンチ電流値比のため入力部に attenuator を入れる必要があり、BBF が効きにくい状況であった。バンチ電流感応型 attenuator を開発し [12]、BBF を改良することで、2010 年から垂直 chromaticity も水平と同程度まで下げることが可能となった。これにより利用運転中の入射効率を 10%程度改善することができた。ただし、入射効率の改善は蓄積リングの状態によるので、単純な和にはならない。

1.4.2 Suppressing the Stored Beam Oscillation at Injection

入射時の水平方向蓄積ビーム振動の主な原

因は、入射バンパ軌道中の六極電磁石による非線形キックとバンパ電磁石磁場の非一様性であった。前者は、SR 全周にわたって電子ビームを蓄積する必要があるが、バンパ電磁石磁場のピークでバンパ軌道が閉じるようにしても途中では六極電磁石による非線形磁場のため閉じなくなるからである。これを解決するため、入射バンパ軌道中の六極電磁石の磁場が相殺するように六極電磁石の励磁に条件を課した [13]。後者については、バンパ電磁石磁場の非一様性の由来が、バンパ電磁石端板を流れる渦電流によることが判明し、非金属端板を持つバンパ電磁石に更新することで対応した [14]。

入射時水平方向蓄積ビーム振動の改善の過程を図 12 に示す。SR 周回時間は、5 μ s、バンパ電磁石パルス幅 8 μ s、バンパ電磁石磁場ピークに時間の原点をとっている。図 12 において、幅の広い山は六極電磁石非線形磁場によるものである。5 μ s 周期で表れる幅の狭いピークは渦電流によるものであり、バンパ電磁石更新後 (青線) は無くなっている。六極電磁石磁場最適化後において、バンパの立ち上がりで 0.4 mm 程度の鋭いピークが残っている。現在、これを補正すべく速いパルススキューの導入して、調整を進めている。

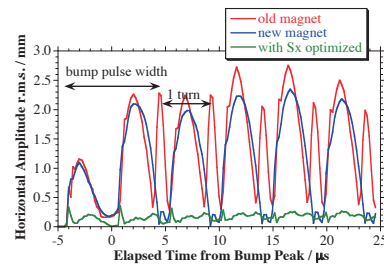


図 12: Horizontal oscillation amplitude of stored beam by injection bump.

本来、バンパ軌道は水平方向なので、入射バンパによる垂直方向蓄積ビーム振動はないはずであるが、バンパ電磁石回転エラーのため垂直振動が発生する。SPring-8 ではこれを効率よく補正するため、遠隔バンパ電磁石 tilt 制御システムを導入した。その調整例を図 13 に示す。

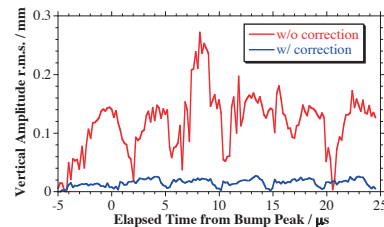


図 13: Vertical oscillation amplitude of stored beam by injection bump.

現時点での入射時蓄積ビーム残留振動は、水平方向 100 μ m、垂直方向 5~6 μ m 程度まで抑えられている。この程度の振動がユーザーの利用する放射光強度に対する影響は小さく、ユーザー実験に擾乱を与えることはほとんど無いと考えられる。

2. 加速器運転状況

2.1 運転統計

2010年度 SPring-8 加速器運転統計は、表4に示す通りである。計画利用時間4104時間に対して実績4071時間33分と放射光利用率99.2%を達成している。図14に過去5年度の利用率を示すが、2010年度は、過去最高の記録となった。

表4: 運転統計 (2010年度)

総運転時間	5125 時間 36 分
マシン調整	1026 時間 34 分
内マシンスタディ	318 時間 09 分
利用運転	4071 時間 33 分
ダウンタイム	27 時間 29 分

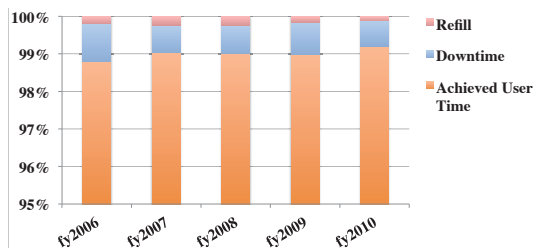


図14: 過去5年度の利用率。

過去5年度のダウンタイム内訳を図15に示す。2010年度のダウンタイムの特徴は、加速器の原因によるものは1/3以下と少なく、フロントエンドを含むビームラインに起因するものが半分以上であった。フロントエンドでは、MBS (Main Beam Shutter) など圧空駆動機構の電磁弁誤動作により機器保護インターロックが発報したことによるものがほとんどであった。放射線損傷が原因と考えられるため、予防的に交換することが計画されている。

加速器起因のものでは、RF 機器インターロックによるものがほとんどで、その8回のダウンタイムの内ではサーキュレーターアークによるものが5回を占めていた。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たが、2010年度にはその後サーキュレーターアークによるRF ダウンは起こらなかった。

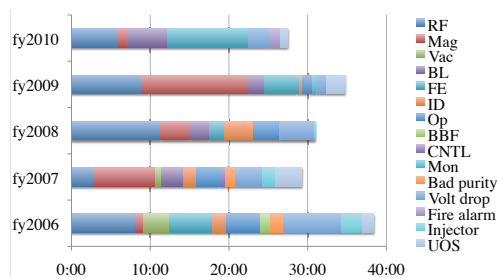


図15: 過去5年度のダウンタイム内訳。

2.2 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 を下回ったら中断したものと定義している。2010年度は、173回、計37時間26分

の Top-up 中断があった。実績利用運転時間の 99.1% で Top-up 運転が継続していたことになる。中断原因の主なものは、線型加速器モジュレータフォールト (35回) と Sy RF ダウン (61回)、SSBT 偏向電磁石電源ダウン (43回) であった。それぞれ、中断時間に対する割合は、9%、57%、16%であった。

2010年度 Top-up 中断の特徴は、Sy RF ダウンによるものが大幅に増加したことと、SSBT 偏向電磁石電源ダウンが頻発したことである。前者は、カプラー交換に際してリークが発生するようになったためであった。リーク箇所特定後、当該部品交換により復旧した。後者は、2009年度にSSBT 偏向電磁石の電源を更新したが、DCCT ノイズにより電源保護インターロック誤動作が起こっていたものであった。改修後、SSBT 偏向電磁石電源ダウンは起こっていない。

2009年度の Top-up 中断は、164回、計45時間56分であったが、Sy RF、SSBT 偏向電磁石ダウンが頻発したにも拘わらず、2010年度の Top-up 中断の回数、累計時間とも減少していたのは、電子銃、Li モジュレータのフォールトが大幅に減っていたことによる。これは、モジュレータ電源改修などメンテナンスの成果である。

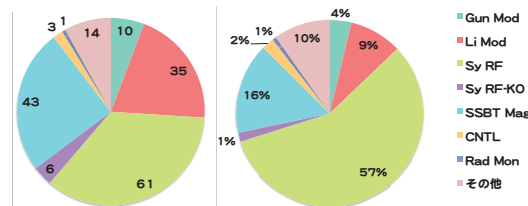


図16: 2010年度のトップアップ中断内訳。左図: 通算回数、右図: 積算時間。

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., Nucl. Instrum. Method A 486, 521 (2001).
- [2] K. Soutome, et al., Proc. of EPAC08 (2008), 3149.
- [3] M. Takao, et al., Proc. of IPAC10 (2010), 4671 (THPE067).
- [4] N. Kumagai, et al., Proc. of PAC99 (1999), 2352.
- [5] H. Tanaka, et al., Proc. of EPAC2000 (2000), 1575.
- [6] M. Takao, et al., Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (2007), 622 (TP69).
- [7] H. Takebe, et al., Proc. of the 2th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan (2005), 591.
- [8] H. Tanaka, et al., Proc. of EPAC04 (2004), 222; H. Tanaka, et al., J. Synchrotron Rad. 13, 378 (2006); H. Tanaka, et al., Proc. of EPAC06 (2006), 3359.
- [9] K. Fukami, et al., Proc. of APAC04 (2004), 108.
- [10] H. Tanaka, et al., Proc. of EPAC2002 (2002), 1196.
- [11] T. Nakamura, and K. Kobayashi, Proc. of EPAC04 (2004), 2649.
- [12] K. Kobayashi and T. Nakamura, Proc. of ICALEPCS2009 (2009), 659.
- [13] H. Tanaka, et al., Proc. of EPAC04 (2004), 1330; H. Tanaka, et al., Nucl. Instrum. Method A 539 (2005), 547.
- [14] T. Ohshima, et al., Proc. of EPAC04 (2004), 1330.
- [15] S. Mitsuda, et al., Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (2010), 415 (WEPS036).
- [16] K. Fukami, et al., Proc. of EPAC08 (2008), 2172.