

### 3. 大型放射光施設の現状と高度化

#### 3-1 加速器

##### 1. 運転の概況

図1に過去5ヵ年度の運転時間の推移を示す。2015年度のSPring-8加速器総運転時間は4817.9時間であった。この時間には、加速器立ち上げ調整時の入射器系加速器の先行運転なども含まれている。2015年度の蓄積リングの運転時間は4804.9時間、この内4033.9時間（蓄積リング運転時間の83.9%）がユーザータイムに充てられた。2015年度の計画ユーザータイム4056時間に対して利用率としては99.5%となり、記録を更新した2014年度に並ぶものであった。

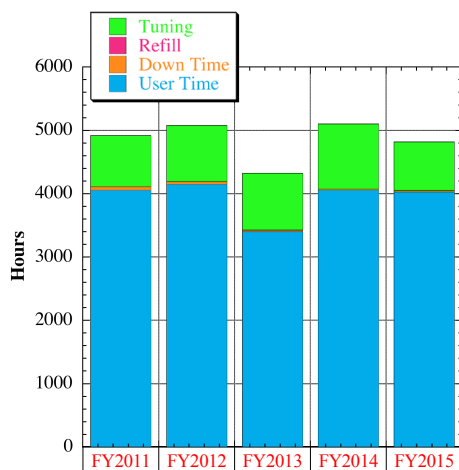
トラブルによりユーザータイムを停止しなければならなかった時間（ダウンタイム）は計画ユーザータイムの0.41%に当たる16.8時間であり、20回のビームアポートあるいは計画外のビーム廃棄が発生した。また、ユーザータイム中のバンチ運転（フィリング）モード変更のため、5.3時間（11回）を再入射に費やした。ダウンタイムの内、6.6時間（9回）は加速高周波関係の機器トラブルが占めている。近年、高周波電源の経年劣化の影響が顕著となってきており、現在、電源の更新計画が進行している。2014年度末までに電源の製作は完了し、2015年度に4ステーションある高周波源の内2ステーション

の更新を実施した。残り2ステーションは、2016年度の年度末に更新する予定である。

SPring-8では、積分輝度と光源強度安定度の改善のため利用実験中も随時電子ビーム入射でのトップアップ運転を行っている。入射器のトラブルなどによるトップアップ運転の中断は極めて少なく、ユーザータイム中のトップアップ入射継続率（トップアップ目標電流値99.5 mAに対し±0.1 mAの範囲にある時間割合）は99.6%に達しており、ユーザー運転同様に極めて安定にトップアップ運転が行われた。この間、蓄積電流値の変動としては全幅0.03 mA（0.03%）程度に抑えられている。

バンチ運転モードでは、パルス放射光を用いる利用実験が増加してきたため2011年度以降マルチバンチモードでの運転がない。バンチ運転モードには、3種のセパラルバンチモード（等電流バンチ等間隔フィリングモード）と5種のハイブリッドバンチモード（高電流孤立バンチと低電流バンチトレインからなるフィリングモード）が用意されている。利用運転時間に占める割合は、セパラルバンチモードが56.8%（2014年度は54.1%）、ハイブリッドバンチモードが43.2%（2014年度は45.9%）となっている。ハイブリッドバンチモードでは、より強い単パルス放射光を利用するため、全周の11/29に配置された低電流バンチトレインの対向に1個の高電流孤立バンチ（5 mA、電子数にして $1.5 \times 10^{11}$ 個）を配したモード（Hモード）が開発され、2012年12月より利用運転への供用を開始しているが、2015年度には16.5%の割合で利用された。

一方で、孤立バンチモードは、バンチ電流値が高くなるため、原理的にビーム不安定性に脆弱になり、安定な利用運転の遂行には注意が必要となる。通常、ビーム不安定性は不安定フィードバック（Bunch-by-bunch feedback: BBF）システムにより抑制されているが、挿入光源の増設、バンチ電流値の増強、あるいは機器の経年劣化により、近年不安定性の励起が強くなってきており、現状のBBFでは抑制しきれない状況が確認されるようになってきた。特に、203バンチモード（Aモード）では利用運転中にもビーム不安定性が発生していることが見受けられ、ビーム振動により垂直方向ビームサイズの増加として観測されるようになった。また、Hモードなどシングルバンチ電流値の高いモードでは、ビーム不安定性によりシングルバンチが削られて、所定のシング



	FY2011	FY2012	FY2013	FY2014	FY2015
Acc. Operation Time	4918.6	5078.8	4330.0	5099.3	4817.9
SR Operation Time	4904.2	5063.1	4265.5	5080.7	4804.9
Tuning&Study (Acc.&BL)	803.0	884.0	898.0	1024.7	767.2
Refill	4.4	5.2	3.5	5.1	5.3
Down Time	57.0	39.2	20.0	17.1	16.8
Mean Time between Failures	117.7	107.7	213.0	163.2	202.8
Achieved User Time	4058.5	4155.6	3408.5	4057.8	4033.9
Planning User Time	4120.0	4200.0	3432.0	4080.0	4056.0
Availability (%)	98.5	98.9	99.3	99.5	99.5

図1 過去5ヵ年度の運転時間の推移

ルバンチ電流値まで蓄積できないことが起こっている。これらBBFでの抑制が厳しい場合には、蓄積リングの6極電磁石設定を変更するなどの対策を取って抑制している。今後も現SPring-8の光源を安定に運転し、高い利用率を保つべく、ビーム不安定性問題の調査と対策が加速器部門における最優先課題の1つと位置づけられる。

以下に、各加速器（線型加速器、ブースター・シンクロトロン、蓄積リング）の概況を示す。

（高雄 勝、渡部 貴宏、後藤 俊治）

## 2. 線型加速器の概況

2004年9月からSPring-8蓄積リングとNewSUBARUの両方同時のトップアップ運転が始まり、現在も継続されている。NewSUBARUについては、通常の1 GeVトップアップ運転のための入射に加え、週に1～2回程度行われる1.5 GeV運転時には1日に1～2回、このための入射を行い、利用に供している。

近年のトップアップ運転では短寿命のフィリングパターンが増え、入射の頻度が増加している。その対応としてSy/NSの2 Hz高速切替を2013年度から実施している。これら機器の高信頼性を確保するため、通常のメンテナンスに加え、機器の老朽化対策を順次行っている。2015年度はステッピングモーターのドライバーが製造中止になっているL3スリットの更新、プロファイルモニタ用カメラシステムの一部更新、オシロスコープ用画像転

送システムの更新、電子銃アノード交換等を行った。

2015年度における線型加速器総運転時間は4817.9時間であった。図2にトップアップ運転を開始した2005年度から2015年度までの故障頻度とダウンタイムを示す。2008年度に電子銃バイアス回路のトラブルによる突出してダウンタイムの長いサイクルがあったが、機器の改良を繰り返した結果、漸次故障頻度が減少しているのが分かる。2012年度までは装置の改良の結果、順調に減少していったが、近年は中断頻度が増加の傾向にある。これは中断原因が多岐にわたっており、各種部品の老朽化によるものである。事前診断と共に老朽化パーツの漸次交換を進めていく予定である。

（鈴木 伸介、後藤 俊治）

## 3. ブースター・シンクロトロンの概況

ブースター・シンクロトロンでは主電源の主要構成部品であるサイリスタが供給停止となっているため、後継の代替品への転換を実施している。2014年度に手配した収束4極電磁石用パターン電源のサイリスタの交換作業を2015年度の夏期点検・調整期間に終了した。これで、4極電磁石電源に関しては、収束・発散とも老朽化対策が終了した。

その他、2014年度に偏向電磁石用パターン電源のアクティブ・フィルタ故障対策として、構成部品でありながら供給停止となったアンプの後継器の手配を行ったものに関し、故障時に迅速に交換可能とするための調整を2015年度に実施した。

また、2014年度に出射キッカー高圧ケーブルの電流導入端子が腐食により固着するとともに、Oリングの劣化により真空がリークするトラブルが発生したが、この部分の交換・補修を2015年度に行った。

2015年の11月頃より、クライストロンのコレクター損失大というインターロックの発報で高周波加速空洞への高周波電力の供給が停止する現象が頻発するようになった。一度この現象が発生すると、シンクロトロンの運転再開まで20分程度を要し、その間トップアップ入射が中断される。現在、その原因究明を行っており、究明ができ次第、早急に対策を行う<sup>1</sup>。

（佐々木 茂樹）

## 4. 蓄積リングの概況

蓄積リングでは、ID07のギャップ駆動に伴って生じる非線形結合に起因する入射効率の低下を抑制するため、2014年度に2台のスキュー8極電磁石を増設した。ID07は、Aゾーン長直線部に設置された8連Figure-8

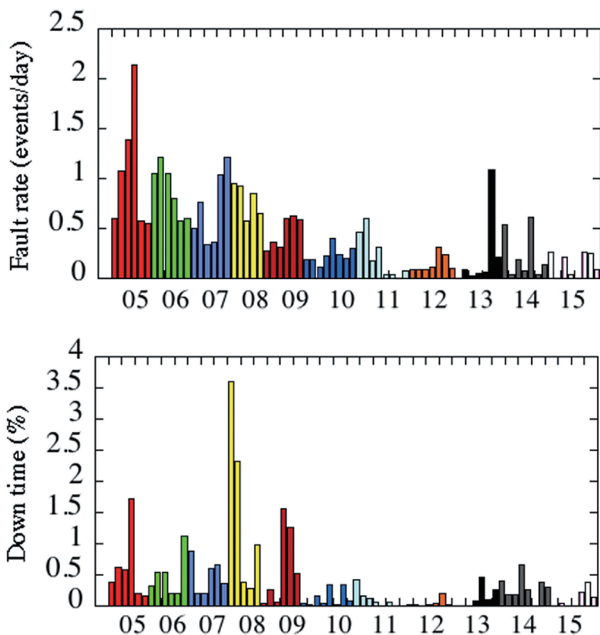


図2 2005-2015年度の線型加速器故障頻度（上）とダウンタイム（下）

1 2016年度までずれ込んだ調査の結果、実際にコレクター損失が増大していたわけではなく、インターロック信号系統の一部不整合があり、不要な発報であったことが分かった。不整合を修正することで2016年度現在、この現象の発生はなくなっている。

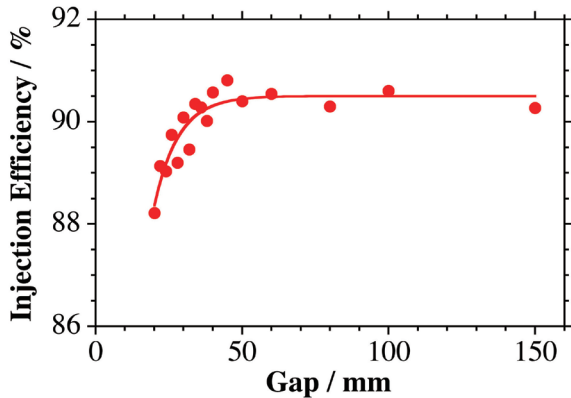


図3 入射効率 vs. ID07のギャップ

undulatorで、強くスキュー8極共鳴を励起することが分かっており、これによる共鳴結合のため入射効率の低下が起こる。図3は、ID07のギャップを閉じていった時の入射効率の変化を示す。ID07は真空外挿入光源であるため、入射効率の低下は垂直物理口径の低減によるものではなく、ID07の磁場の影響によるものである。利用運転中、ID07以外のIDの状況によっては、10%以上の入射効率の低下が起こることがあるが、スキュー8極電磁石を励磁することにより回復している。ID07のギャップが全開であっても、蓄積リング固有のスキュー8極共鳴の励起が観測されており、この補正にも同じスキュー8極電磁石が使用されている。

また、別の非線形結合（スキュー6極共鳴結合）も観測されており、これを補正するため8台のスキュー6極電磁石が設置されている。2015年度より利用運転中の本格的な運用が開始され、入射効率の向上が図られている。IDギャップの状況によっては、約10%の改善が認められている。

クライストロン直流90 kVの高圧電源の老朽化対策として、電源の更新機を2014年度に製作した。高周波加速空洞は蓄積リングの90度ずつ離れたA、B、C、Dステーション4カ所に設置されているため、全部で4式の電源を製作した。

電源の設置時期はDステーションの1994年が最も古く設置から20年以上経過している。最も新しいAステーションは2000年に設置されているが、2015年度末で16年を経過する。また、電源の構成として、アノード電圧の印加方式が抵抗分割によるものと変調アノード電源を用いるものの2種類があり、維持・管理上の効率を欠くこととなっている。

更新に際し、整流方式は現在のサイリスタ・チョッパ方式から構成の単純な12相全波整流方式に変更するとともに、4式とも変調アノード変調電源を備える構成とした。また、電源の制御はこの20年間の技術の進展を考慮して、個別信号をVMEで取り込む方式からPLCを介し

て制御し、上位計算機とはFL-netを介して通信する方式へと変更した。

2015年度はSPring-8の受変電設備である特別高圧変電所のうちの1カ所（特高第一変電所）のサブ変電所の設備更新のため、冬期に3ヶ月間の蓄積リングの運転を停止する点検・調整期間が設けられた。この期間を利用して、更新電源4式のうち、設置時期の古いC、Dステーションのクライストロン直流高圧電源の設置工事を行った。

旧電源の解体、搬出、更新電源の設置、配線・配管、試験・検査、動作確認、制御系接続試験、高周波電力投入試験を経て、2016年度当初からの運用に備えた。

2016年度に特高第一変電所の主変電所の更新が予定されており、2015年度と同様に3ヶ月間の点検・調整期間が設定される予定であるので、残るA、Bステーションについてはその期間に更新電源の設置工事を行う予定である。

また、蓄積リング入射部のDCセプタム電磁石で、2014、2015年度と立て続けに地絡故障が生じた。この地絡故障は経年劣化によるもので、これに対する対応を行った。いずれも、点検・調整期間に発生しており、結果的に加速器運転のスケジュールに影響はなかったが、運転再開直前まで対応に追われ、最悪の場合は運転再開の延期を想定する必要があった。経年劣化対策の重要性を示すものであるため、これらの詳細については次項にて報告する。

（佐々木 茂樹、高雄 勝、渡部 貴宏）

## 5. DCセプタム地絡故障対応

ブースター・シンクロトロンからのビーム輸送ライン最下流にある蓄積リング入射系電磁石のDCセプタム電磁石3台（上流側よりSEP5、6、7）のうち2台で経年劣化による地絡故障が2014年8月、2015年8月と2度発生した。DCセプタムの故障対応、改修について報告する。

DCセプタム電磁石の諸元を表1に記す。

3台のDCセプタム電磁石は1台の電源によって直列励磁されているが、ビーム輸送ラインを蓄積リング入射直線部と並行にするため、2台の長鉄芯長磁石と1台の短鉄芯長磁石で曲げ角を分割している。そのうち地絡故障が発生した電磁石は2台の長鉄芯長のSEP5、6である。

地絡故障の原因は励磁用銅製水冷管コイルの絶縁破壊である。DCセプタム電磁石は蓄積リングへの漏洩磁場の影響を防ぐための構造上の要請から、励磁電流の割にコイル寸法が小さく冷却水量が制限され温度上昇が大きい。そのため、励磁時にコイルは長鉄芯長で数mm程度伸長する。ユーザー運転中の励磁状態と加速器停止中の通電停止状態の熱サイクルを年間10～20回、20年を

表1 蓄積リングDCセプタム電磁石諸元

	SEP5	SEP6	SEP7
励磁電流	2460 A	2460 A	2460 A
冷却方式	水冷 30 L/min	水冷 30 L/min	水冷 14 L/min
鉄芯長	1089 mm	1089 mm	500 mm
設計磁場	1.29 T	1.29 T	0.73 T
ギャップ	17 mm	17 mm	15 mm
重量	1500 kg	1500 kg	250 kg
地絡時絶縁強度	2 kΩ	2 kΩ	30 MΩ (正常値)

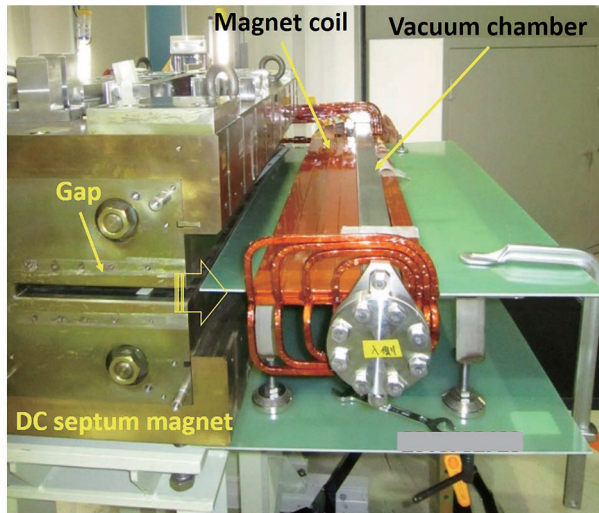


図4 DCセプタム電磁石 ビーム軸方向正面より臨んだ様子。チェンバーを抱えたマグネットコイルを磁石ギャップより引き抜き、地絡箇所同定作業に入る直前の状態。

超過した設置以来の総数では400回程度経験している。銅製コイルと鉄心・SUS製真空チェンバーとの線膨張係数の違いにより、コイル絶縁体が鉄芯・真空チェンバーと擦れることを繰り返した結果、絶縁破壊を引き起こし地絡故障に至った。鉄芯長が半分程度である短鉄芯長のSEP7は地絡故障に至っていない。これは、膨張による伸びがSEP5、6に比べ半分程度であるためと考えられる。

地絡故障の際は故障電磁石部を大気開放し真空チェンバーごと一体で取り出し、コイルを引き抜いて地絡箇所

を同定した(図4)。故障箇所を図5に示す。絶縁破壊は端部磁場整形用の鞍型構造の曲線部と、チェンバー・磁石ギャップ・セプタム壁間で起こっている。コイルはセラミック溶射の絶縁膜とカプトンテープで絶縁層を形成しているが、カプトンテープが破れセラミック絶縁膜が削れている状態であった。セラミック再溶射は難しいため、故障箇所にはセラミック製接着剤を塗布し、カプトンテープを補修した上で、0.1 mm厚GFRP板を絶縁材として新たに挿入した。

漏洩磁場を低減するためのセプタム構造上、コイルと磁極端との間にクリアランスを設けることができないため地絡故障を避けることが難しい。このため予備機を製作して故障に備えている。現在、故障後改修を済ませた実機を予備機と再度交換しユーザー運転を安定に継続している。

(満田 史織、佐々木 茂樹)  
加速器部門

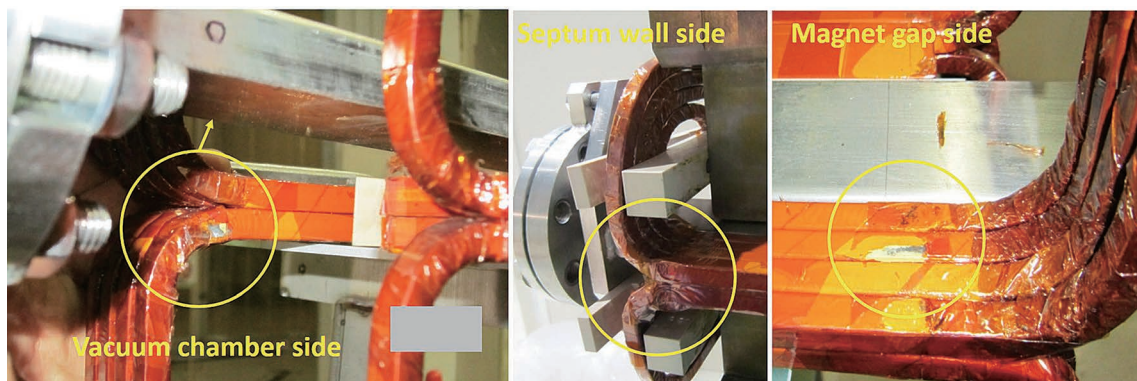


図5 DCセプタム地絡故障箇所拡大写真