

3. 大型放射光施設の現状と高度化

3-1 加速器

1. 運転・軌道解析グループ

図1に過去5ヵ年度の運転時間の推移を示す。2014年度のSPRING-8加速器総運転時間は5099.3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。2014年度の蓄積リングの運転時間は5080.7時間、この内4057.8時間（蓄積リング運転時間の79.9%）がユーザータイムに充てられた。2014年度の計画ユーザータイム4080時間に対して利用率としては99.5%となり、2013年度に引き続き記録を更新した。

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0.42%に当たる17.1時間であり、26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パンチ運転（フィリング）モード変更のため、5.1時間（10回）を再入射に費やした。ダウンタイムの内、9.2時間（15回）は加速高周波関係が占めている。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、2016年度の年度末に順次更新する予定である。

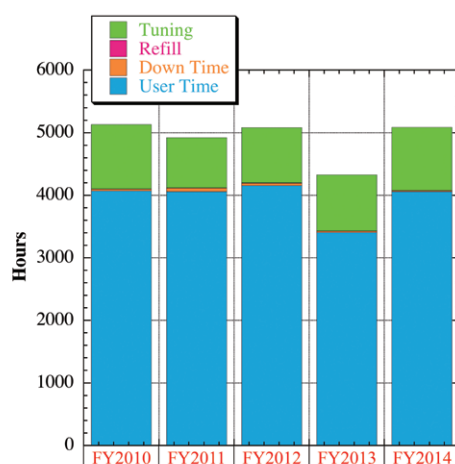


図1 過去5ヵ年度の運転時間の推移

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を行う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は99.0%に達している。この間、蓄積電流値の変動は0.03%程度に抑えられ、光源として極めて安定している。トップアップ運転では、ビームラインのメインビームシャッター（MBS）を開けたまま、かつ挿入光源（ID）ギャップを閉じたままビーム入射を行うため、放射線安全とID磁石の減磁防止の観点から電子ビーム損失を低減する必要があり、高い入射効率を維持しなければならない。IDの磁場の電子ビームへの影響で入射効率が低下することがあるが、これを補正することでユーザータイム中の入射効率は80%以上に保たれている。

パ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年度以降マルチパンチモードでの運転がない。パンチ運転モードには、3種のセベラルパンチモード（等電流パンチ等間隔フィリングモード）と5種のハイブリッドパンチモード（高電流孤立パンチと低電流パ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、セベラルパンチモードが54.1%（2013年度は54.6%）、ハイブリッドパンチモードが45.9%（2012年度は45.4%）となっている。ハイブリッドパンチモードでは、より強い単パルス放射光を利用するため、全周の11/29に低電流パンチトレインと対向に1個の孤立パンチ（5 mA、電子数にして 1.5×10^{11} 個）を配したモードが開発され、2012年12月より利用運転への供用を開始した。2013年度には16.8%の割合で利用され、2014年度には20.6%と順調に延ばしている。

（高雄 勝）

2. 加速器第1グループ

2-1 線型加速器の運転状況

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では1 GeVでのトップアップ運転のほか1日1回または2回の入射を行い、1.5 GeVまで加速し利用に供している。1.5 GeV運転は週に1、2回程度である。

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の増加、入射の頻度が増加している。その対応としてシンクロtron/ NewSUBARUの2 Hz高速切替えを2013年度から実施した。高速切り替え以前に比べNewSUBARUへの入射時間が改善すると共にSPRING-8蓄積リングの蓄積電流の変動幅も約50%に減少した。2014年度には入射部の立体回路の改造を行い、全て真空化した。それに伴い、企業と協力して開発してきた10 MW真空型サーキュレータを世界で初めて採用した。

2014年度における線型加速器総運転時間は、5099.3時間であった。蓄積リングのユーザータイムは4057.8時間であり、入射器トラブルにより入射を中断した場合以外はトップアップ運転が行われた。図2に2014年度における線型加速器のサイクル毎インターロックフォールト

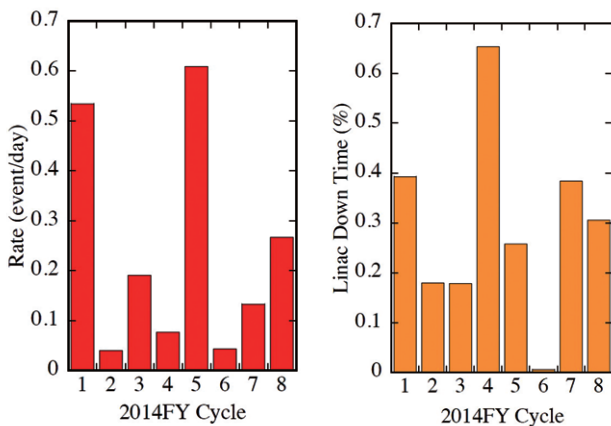


図2 2014年度インターロックフォールトの頻度（左）とダウンタイム（右）

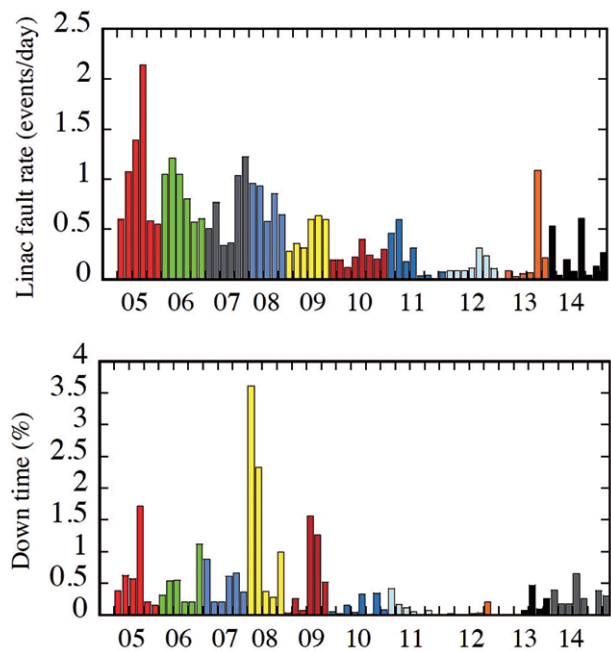


図3 2005-2014年度インターロックフォールトの頻度（上）とダウンタイム（下）

統計を示す。左のグラフは1日あたりのフォールト回数で、第5サイクルにおいて大きな値になっているが、年平均では0.25回/日であった。右のグラフがトップアップ運転の中断時間の比率であり、2014年度は0.264%となっている。2005年度から2014年度までのフォールト回数と中断時間を図3に示す。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。装置の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）

2-2 線型加速器バンチャー部RF位相の精密設定

線型加速器は、加速電圧200 kVの熱カソード電子銃の直後に、電子バンチ形成のためのプリバンチャー2台とバンチャー1台を有している。バンチングを効率良く行うためには、電子ビームが各プリバンチャーを通過する際に、最終的にバンチャーで電子が集群されることとなる点（バンチング中心）が、プリバンチャーRFのゼロクロスに一致するように設定する必要がある。したがって、各プリバンチャー、バンチャー相互間のRF位相設定は極めて重要である。一方で、この部分のビームは低エネルギーであり輸送が難しいため、ビームモニタ装置を極力排除して低エネルギー部分を短くする設計を行っており、ゼロクロスに一致していることを直接にはモニタできない。このため、これまではバンチャー出口でのビーム電流が最大となるように、バンチャー、プリバンチャー相互の位相を調整していた。これに関して詳細なシミュレーションを行ったところ、バンチャー出口で電流が最大となる条件が、必ずしもプリバンチャーでのRF位相ゼロクロスに対応しないことが分かってきた。このため、ビーム調整に新たな相互位相設定法を適用することにした。

各プリバンチャーへのRF供給用導波管には、図4に示すように位相器と減衰器を設置している。プリバンチャー1のゼロクロス位相を求める際は、減衰器を用いてプリ

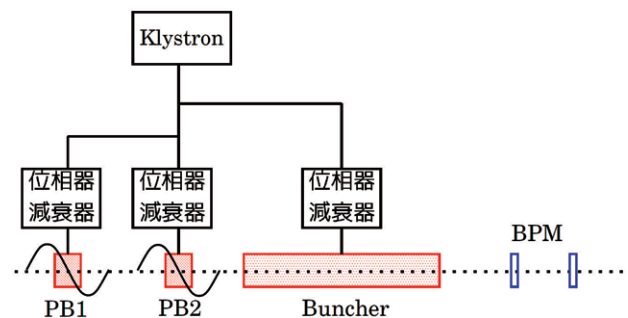


図4 バンチャー部概略図

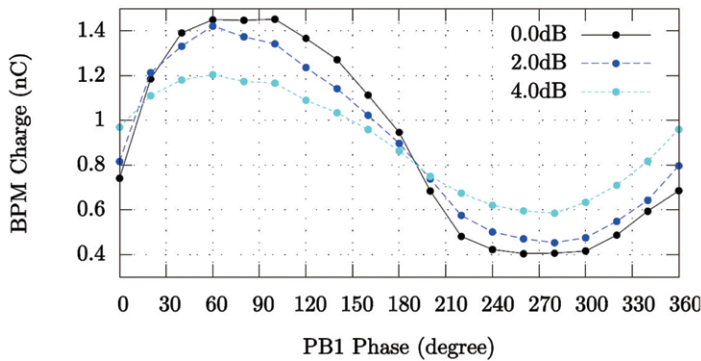


図5 ビーム電流値のPB1位相依存性

バンチャー2へのRFパワーを最小にしておく。バンチャーへは通常のRFパワーを入力する。この状態でプリバンチャー1の位相を360°スキャンしてバンチャー出口のビーム電流値を測定しプロットすると、例えば図5のようになる。図5のグラフは完全な正弦波ではないが、ビームトラッキングコードでシミュレーションすると正弦波となる。したがって、プロットされた実測値ではビームが通過する機器の内径等で制限されてビーム損失が生じているものと考えられる。図5の複数プロットはプリバンチャー1へのRF減衰量を変化させた時のものであるが、2点の交差点ではすべてのプロットが一致している。交差点はRFパワーに無関係な点、すなわちバンチングもデバンチングもされていない点であり、これに対し最大値が求めるゼロクロス点を示している。このように複数プロットの交点が一致することが重要であり、この意味において、図5を正弦波でフィッティングし、その波形が最大値を示す位相をゼロクロス位相と考えて差し支えない。プリバンチャー2にも同様の方法を適用し、ゼロクロス位相を求める。ここで求めたゼロクロス位相は、バンチャー部の幾何学的配置により決定されるものである。温度変化による導波管伸長に起因する位相変動はあるものの、導波管長が短いためにほぼ無視できる。したがって、一度測定して位相を設定すれば、再調整は不要である。

2014年4月より、線型加速器のビーム調整に本手法の適用を開始した。以前の調整ではビームが正しくゼロクロスに設定できていなかったために、各プリバンチャーを通過する毎にバンチング中心部が加速あるいは減速される。このために、プリバンチャーで起きている僅かな位相及びパワー変動が、バンチング中心部のエネルギーをわずかに変化させ、その結果続くバンチャー内でバンチング中心部が乗るRF位相にも変化が生じ、最終的にバンチャー出口ビーム電流値に大きな影響を与えやすい状況であったと考えられる。これに対し、本調整法を適用すると、プリバンチャーを通過したビームのバンチング中心のエネルギーは、電子銃の加速エネルギーのまま変化しないため、僅かなRF変動がビームに与える影響は極

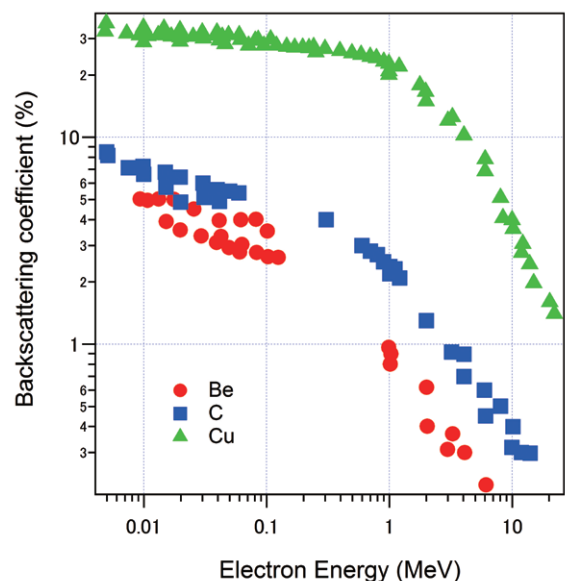
めて小さい。このためと考えられるが、運転サイクル毎のビーム電流値再現性が大幅に向上すると同時に、必要十分な電流値を確保することが可能となった。

(水野 明彦)

2-3 電子銃カソード暗電流測定装置の開発

近年SPring-8線型加速器では、短寿命のフィリングパターン運転への対応等を目的とし、最大出射電荷量がより大きく、暗電流がより少ない電子銃カソードアセンブリの新規開発を行ってきた。2013年度の前半には、実機にて試作機の試験運用を実施したが、暗電流が高く実用に至らなかった。2015年3月には従来型の電子銃カソードアセンブリを使用しても、これまでの寿命を大幅に下回る期間で暗電流が増加し、加速器の運転に支障をきたす場合があることが発覚した。

これらの事象を契機に電子銃の暗電流対策が最優先事項となったが、我々が所有する電子銃試験装置は、1) 銅製ファラデーカップによる電子ビーム電荷量測定において、ファラデーカップ内壁での後方散乱による電子の入口からの脱出を原因とする電荷損失が大きく、さらにノイズ対策も乏しいために、電荷量測定精度が悪い、2) 実機と同型の電子銃を使用しており、実機の環境を再現することはできるものの、電子銃部に由来する暗電流の発生源が、カソードアセンブリなのか、それ以外の部分(ウェネルト電極等)なのかを切り分けできないという欠点があった。このような不具合を解消することを目的に1) 電子銃試験装置に各種のノイズ対策を施すと同時に、電子の後方散乱係数が5%以下と低いカーボン(図6

図6 銅、カーボン、ベリリウムの電子後方散乱係数^[1]

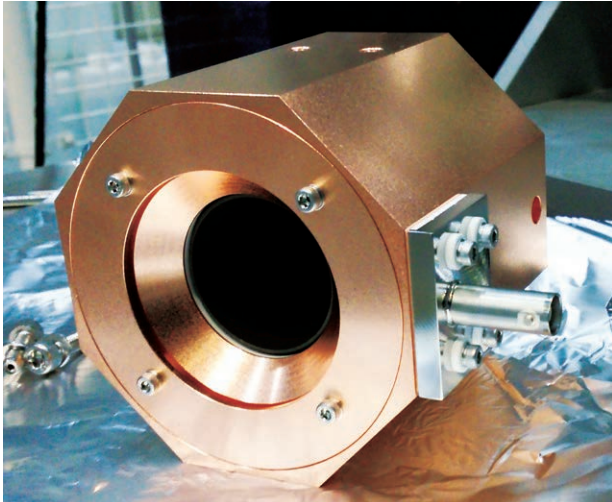


図7 内部の材質をカーボンとしたファラデーカップ

参照)を材質とするファラデーカップを採用して測定精度を大きく向上させる、2)電子銃試験装置とは別に、カソードアセンブリからの暗電流のみを測定するために、円板アノードをその対面に設置した簡便な構造の暗電流測定装置を開発した(図7)。

2015年度はこれらの装置を用いてカソードアセンブリの暗電流測定を精力的に行う予定である。

(馬込 保)

2-4 極短バンチモニター開発テストベンチ

数十fsの電子ビーム(極短バンチビーム)を非破壊で3次元リアルタイム・モニタリングできるEOサンプリング法を用いたバンチモニターの開発が進められており、その開発テストベンチとしてRF電子銃試験装置を利用するため、2012年度からビームエネルギーを30 MeVから65 MeVへ増強するためのRF立体回路及びバンチ圧縮系の設計と各コンポーネント(RFパルス圧縮器、加速管、エネルギー変調管シケイン電磁石等)の製作が行われ、2013年度にはRF電子銃からの出射ビームエネルギーを6 MeVに上げるためRF電子銃空洞を独立2空洞式に置き替えるとともに、2012年度に製作した各コンポーネントを設置し、RFコンディショニングを経て60 MeVのビームエネルギーが確認された。

2014年度はバンチ圧縮系のシケイン部(図8)改造(軌道変更及び6極電磁石設置)を行うとともにRF電子銃空洞及び加速管のRFコンディショニングを進め、85 MeVのビームエネルギーを達成した。この時の加速管及びエネルギー変調管における平均加速勾配は37.6 MV/mに達している。また、RF電子銃のビームエネルギーを10 MeV程度まで上げるとバンチ伸張をさらに抑えられるとのシミュレーション結果を受けて新規設計・製作した2.7セルRF電子銃空洞の大電力試験の準備作業(SiCダミーロー

ドのRFコンディショニング等)を進めた。2015年度はさらにRFコンディショニング及び機器調整を進めてビームエネルギー100 MeVの達成を目指すとともに、極短バンチ発生のためのビーム調整、EOモニタによるバンチ長計測実験を行う予定である。

(谷内 努)

3. 加速器第IIグループ

3-1 ブースター・シンクロトロン及び蓄積リングの概況

ブースター・シンクロトロン及び蓄積リングは1997年の供用開始以来17年を経過しており、機器によっては導入から20年に達するものもある。このため、老朽化対策などが維持・管理業務の主なものとなる。

ブースター・シンクロトロンでは主電源の主要構成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年度は4極電磁石用パターン電源に関してサイリスタの手配を行っている。その他、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。また、出射キッカー高圧ケーブルの電流導入端子が固着するトラブルが発生したが、これは湿度が高い状態で空気中の水分と窒素が放電により硝酸を生成しそれにより端子部の金属が腐食して固着したと推定されている。

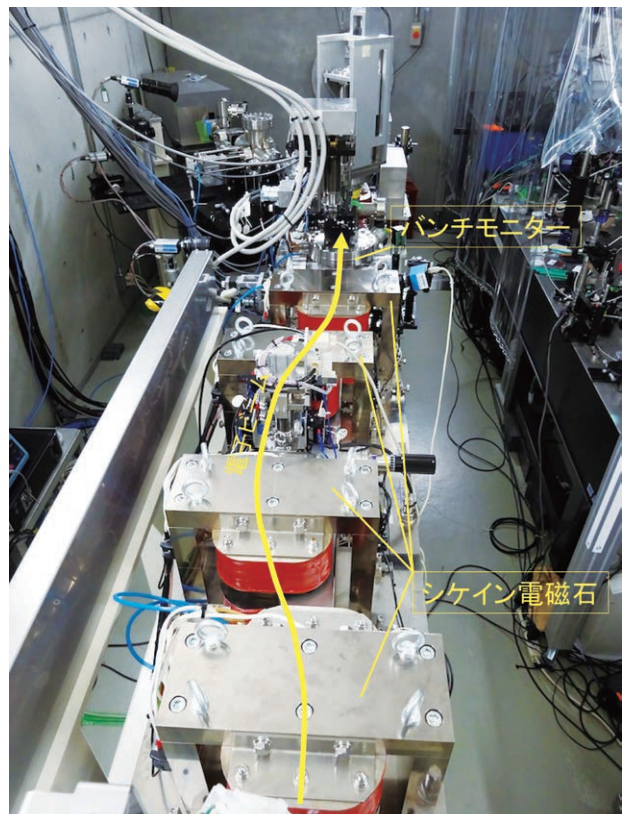


図8 4台の偏向電磁石で構成されるシケイン部

ブースター・シンクロトロンが運転が中断すると、その間蓄積リングのトップアップ運転を中断する必要があるが、その原因として頻度が高かったのは高周波加速空洞における高周波信号の反射異常である。2013年度までにその一因となる真空リーク対策を順次行い頻度は減少傾向にあったが、2014年度にローレベル系ケーブル及び可動チューナー駆動用ステッピング・モーター関連機器の不良により一時的にトップアップ運転の中断頻度が増大した。これらの原因機器の交換により対処し、以降は中断の頻度は十分に低い状態で推移している。

蓄積リングでは、挿入光源ID07のギャップ駆動に伴って生ずる非線形結合に起因する入射効率の低下を抑制す

るためスキュー 8 極電磁石 2 台を増設した。高入射効率を維持することはトップアップ運転継続のために重要である。これらの電磁石の運用は2015年度からを予定している。また、高周波加速空洞に高周波電力を供給するためクライストロンを使用しているが、このクライストロンに 90 kV の高電圧を供給するクライストロン高圧電源の老朽化対策として、電源の更新機を製作した。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台の電源を製作した。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、

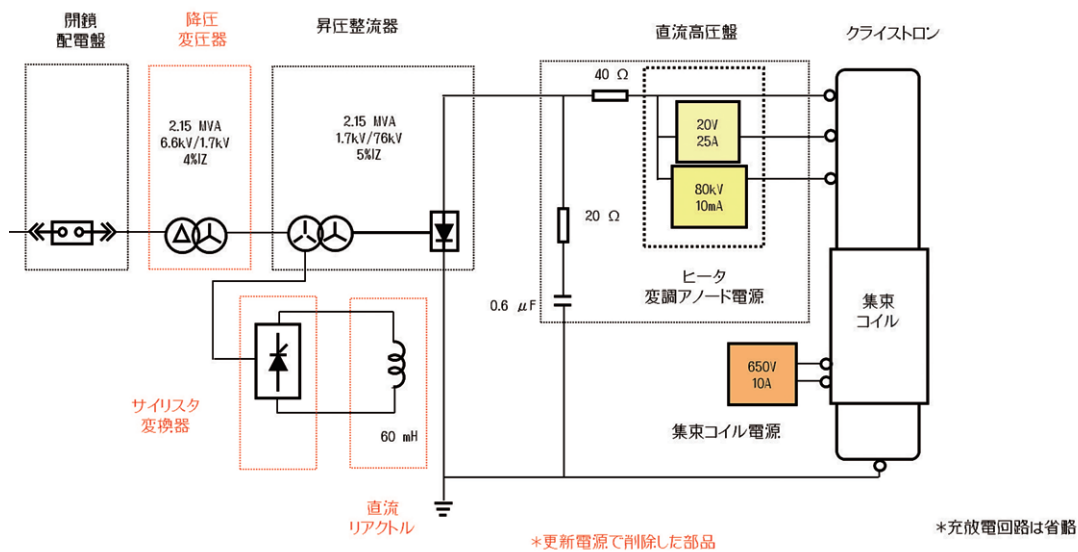


図9 更新前のB、Cステーション高圧電源の構成

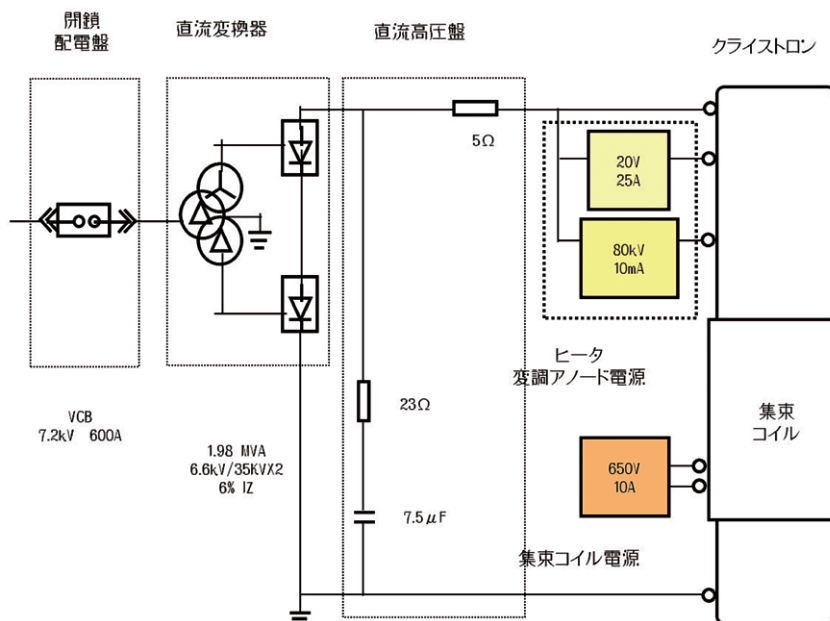


図10 更新高圧電源の構成

2014年度末で15年を経過する。また、設置時期だけでなく電源の構成として、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。

今回の更新では、整流方式を現在のサイリスタ・チョップ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、すべて変調アノード変調電源を備える構成とした(図9、10参照)。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。

製作した電源の設置はC、Dステーションについては2015年度に、A、Bステーションについては2016年度以降に予定している。

(佐々木 茂樹)

3-2 狭小ギャップを目指すセラミックチェンバー 一体型パルスマグネットの開発

SPring-8では、セラミックチェンバーとマグネットコイルを一体化させたパルスマグネット(Ceramic Chamber Integrated Pulsed-Magnet、以下CCIPM、図11を参照)を提案し^[2]、狭小ギャップをもったパルスマグネットの実現を目指している。提案する構造は、1ターンの空芯コイルを円筒セラミックチェンバーの肉厚5 mmに長手方向に渡り埋め込むものである。

セラミックはマグネットコイル構造支持体と電気絶縁体の2つの機能を持ち、コイル自身は円筒内外を隔てる真空隔壁の役目を果たす。この構造により、マグネットコイルは、セラミック内表面から突出することなく、滑らかな円筒内面を保持したまま、磁極を円筒内径までビームに近づけることができる。

この構造によるパルス電磁石が実用化できれば、コイルに流す電流値が同じ場合、極小ギャップ化のためビーム軌道上の磁場が増強でき、そのため同一積分磁場を得るための磁石長つまりコイル長を短くできる。コイルの短長化は電源負荷の主要因であるコイルインダクタンス

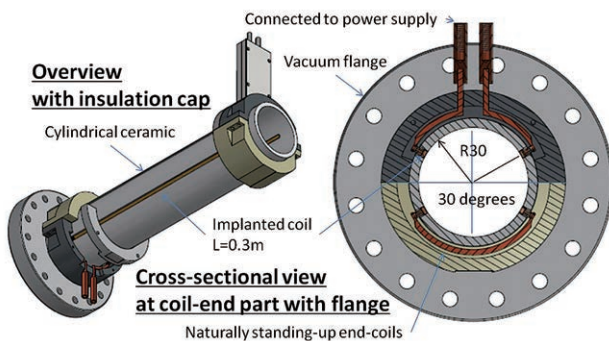


図11 CCIPM デザイン

の低減を意味し、高繰り返し可能な短パルス電磁石の実装が可能となる。

狭小ギャップ・短磁石長という優位性は、SPring-8-IIを含めた次世代放射光リングにおいて、極低ビームエミッタンスを目指すため、多極電磁石を多数高密度に配置し磁石間スペースが狭小化する場合、及び多極電磁石での高磁場勾配実現のためボア径が狭小化しビームパイプ径が極端に小さくなる場合に有利に働く。つまり、リング全体のビームパイプ径が小さいため極小ギャップ・パルス電磁石との整合性がよく、磁石長が短いため磁石間の設置可能箇所の制限が厳しいリングでも設置可能である。また、高繰り返し可能な短パルス電磁石という特徴は、短周長リングへの適用や、Bunch-by-bunch, Turn-by-turnなどの高度なビーム制御を可能にするものである。

現在開発を進めているCCIPMの開発で困難な課題は、セラミックダクトに長手方向に貫通した溝にコイルを埋め込み800°Cの高温銀ろう付けで接合する際に、セラミックと銅コイルの大きな熱膨張差をどのように制御・抑え込み、接合後の真空気密度を確保するかである。図12に開発に成功した、磁極長0.3 m、ボア半径30 mmの試作機のマグネットコイルが埋め込まれたチェンバー内表面の写真を示す。この試作機を用いて加速器実装向け長期コンディショニング試験を以下の条件で実施し200日を超える期間無故障で完了している：パルス高20 kV/7.7 kA、パルス幅4 μ s、繰り返し1 Hzのパルス電流印加、 10^{-6} Paの真空排気、ビームヒートロードを模擬した27～80°Cの1日3回のサーマルサイクル。コンディショニング試験後も 1.3×10^{-6} Pa・m³/sの真空気密度を維持している。図13にコンディショニングのセットアップの様子を示す。

CCIPMの加速器実装への取り組みは開始したばかりで、 ϕ 60 mm試作機から更なるボア径狭小化、チェンバー内表面メタルコーティング、多極埋め込みによる多極パ

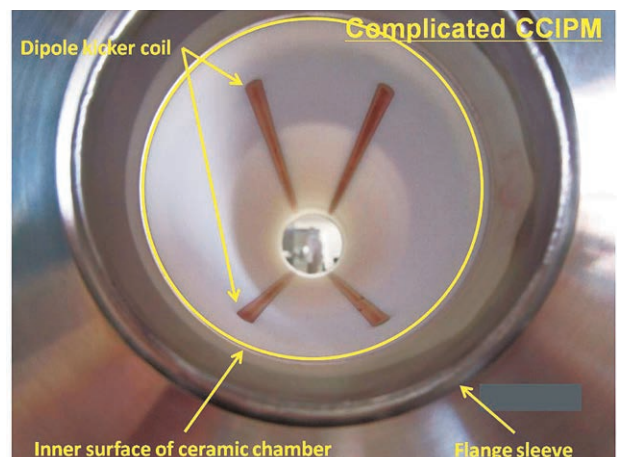


図12 CCIPM内表面様相

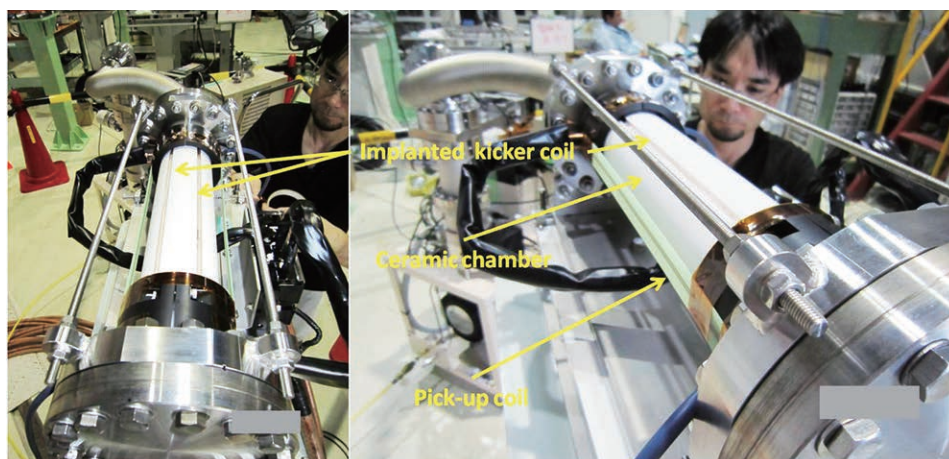


図13 CCIPM試作機コンディショニングセットアップ

ルスマグネットへの展開など重要な課題へと引き続き開発を進めていく。

(満田 史織)

3-3 蓄積リング入射バンプパルス幅精密調整と監視システム

SPring-8蓄積リングでは、パルス・バンプ電磁石4台を用いた入射方式を採用している。バンプ電磁石は独立した4台の電源で駆動しており、各々にタイミング及び磁場出力強度調整ノブが存在することで、SPring-8における高精度トップアップ入射を可能にしている。

蓄積ビームのバンプ出力波形のピークにおける軌道では4台のバンプ電磁石間の誤差キックがないほぼ完全な閉軌道を実現できている。しかしながらトップアップ入射時、蓄積ビームはバンプ出力波形のピークだけでなく、波形の立ち上がり、立ち下がり領域においても存在するため、この領域における蓄積ビームに作用するキックに4台のバンプ電磁石間で差異がある場合、トップアップ入射時の蓄積ビームの水平振動につながり、放射光の安定供給が失われることになる^[3]。この立ち上がり、立

下がり領域における蹴り角の誤差は、波形のスロープのどの点にビームが乗っているかどうかで大きくなるため、バンプ出力波形のパルス幅など波形の相似性が、トップアップ入射時蓄積ビーム水平振動の抑制の上で重要で、中でもパルス幅の統一は相似性の確保の根幹である。ビームへの作用は磁場であるため、パルス幅の調整は磁場出力波形の相似性を確保するために、電磁石を含めた回路定数の調整をしなければならない。ある一台（BP4）を基準にパルス幅の差分を算出し、その基準値にパルス幅を統一するよう調整を行う。パルス幅の調整には、電磁石直近のインダクタンスと抵抗より成る定数調整回路のケーブル長などを含めた調整を行う必要がある。また、調整後その相似性が崩れないよう監視する必要がある。

設置した相似性を監視するパルス幅監視システムでは、特注サーチコイルを電磁石ギャップ間に挿入し、磁場の時間微分に比例する信号をピックアップしてオシロスコープに取り込み、波形を積分して正弦半波の磁場波形に焼き直し、パルス幅、相似性を確認する。図14にサーチコイルを設置した様子及び実際の信号を示す。表1にパルス幅調整により実現した統一パルス幅を示す。調整

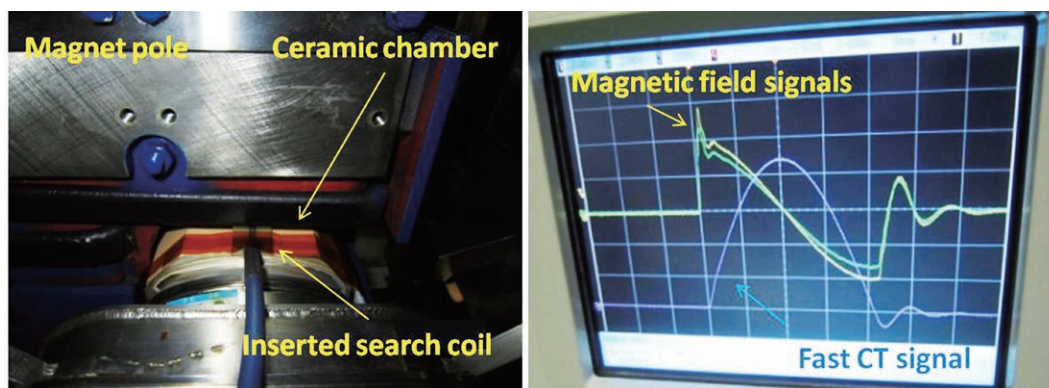


図14 左：バンプ電磁石ギャップにサーチコイル挿入の様子。

右：サーチコイルからの信号及びFast CTによる電流波形信号のオシロスコープによる計測。

表1 パルス幅調整結果

Before/After	Bp1	Bp2	Bp3	Bp4
Before tuning	8.0791e-6	8.0855e-6	8.0918e-6	8.1048e-6
Difference from BP4 (ns)	-25.69	-19.33	-13.03	—
After tuning	8.1036e-6	8.1049e-6	8.1039e-6	8.1040e-6
Difference from BP4 (ns)	-0.4	+0.9	-0.1	—

前にBP4を基準としてパルス幅は最大26 nsの差があった。10 nsのずれが、10 μ radのキック誤差を生み出す。調整後は1 ns以下の差に統一することができている。この測定精度は ± 0.24 nsである。図15に調整前後の波形ピーク値で規格化したバンプパルス出力波形の比較を示す。図16に調整後の立ち上がり点、立ち下がり点の拡大した様子を示す。各バンプのパルス幅は立ち下がり立ち上がり0.5%点でおおよそ20 ps以内の相違に収められており、精密にパルス幅が調整されていることを示している。

現在、トップアップ運転時に残留する主たる入射時水平振動は、このわずかな差で見られる波形の相違が原因

となっている。電源固有の出力波形の差異はパルス幅の調整で合わせ切ることとはできないため、別途設置した高速補正キッカーによりカウンターキックを与える補正により残留振動を低減させている^[4]。パルス幅・波形の相似性監視システムの運用は2015年度より開始する予定である。

(満田 史織)

参考文献

- [1] 桐原陽一："電子・光子輸送計算コードEGS5の高エネルギーと低エネルギーへの拡張に関する研究", 博

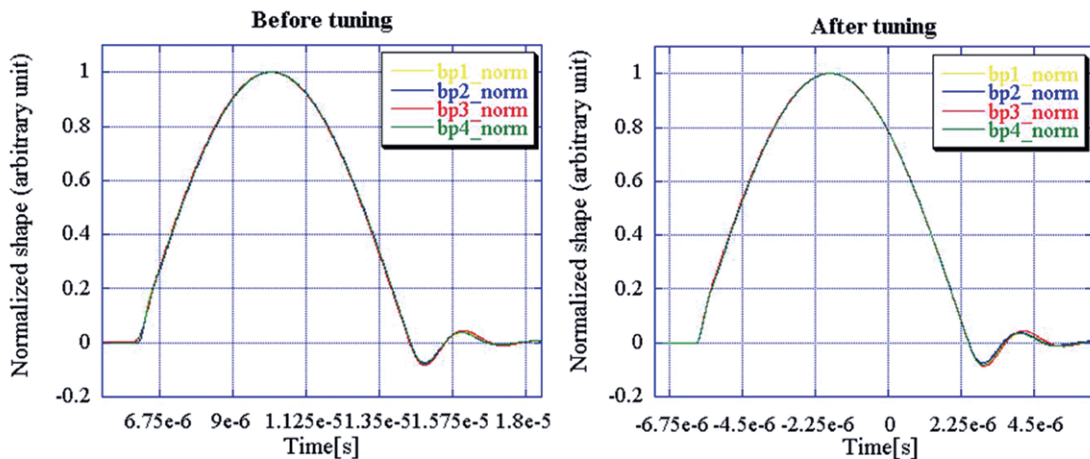


図15 パルス幅調整前後における各バンプ電磁石の磁場出力波形の積分波形比較。

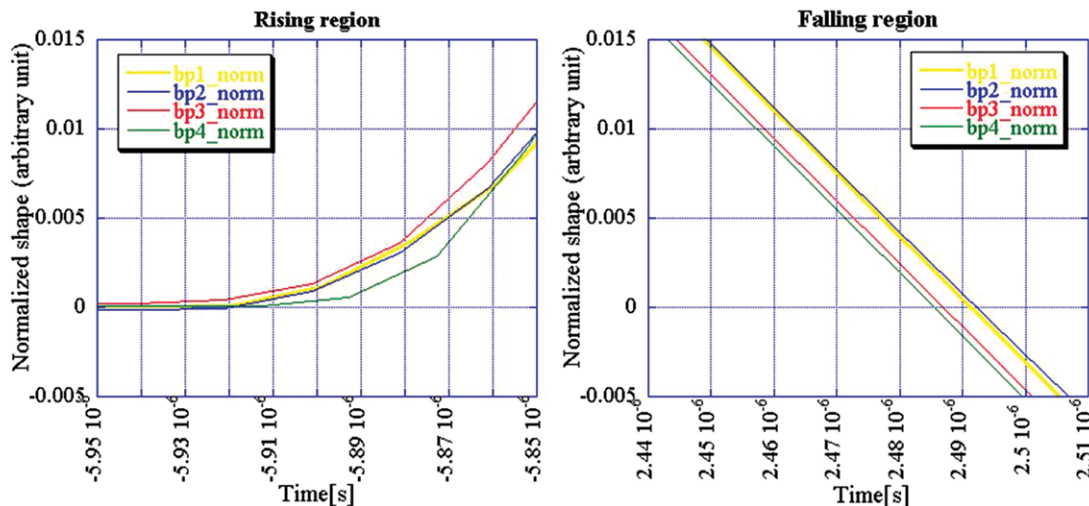


図16 パルス幅調整後、各バンプ電磁石の磁場出力波形の積分波形立ち上がり、立ち下がり領域における波形拡大比較。

士論文 (総研大), (2009).

- [2] C. Mitsuda, et al.: "Development of the Ceramic Chamber Integrated Pulsed Magnet Fitting for a Narrow Gap", Proc. of the 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC15), WEPMA049, Richmond, (2015).
- [3] T. Ohshima, et al.: proc. of EPAC'04, Lucerne, Switzerland, (2004) p414.
- [4] C. Mitsuda, et al.: Proc. of the 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC14), Dresden, Germany, (2014) p280.

加速器部門
後藤 俊治