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

1-1 加速器の運転

図1にユーザー運転開始以来の運転時間の推移を示す (脚注)。2009年のSPring-8加速器総運転時間は5025.9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。2009年の蓄積リ ングの運転時間は4990.4時間、ユーザータイムは3967.9時 間であった。

2009年のユーザータイムは蓄積リング運転時間の79.5%、 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 った時間は計画ユーザータイムの0.87%に当たる34.4時間 であり、ユーザータイム達成率は計画ユーザータイムに対 しては99%以上の高い値を達成した。また、トラブルとし て、32回のビームアボートあるいは計画外のビーム廃棄が 発生している。最も長い中断時間は蓄積リングの四極電磁 石補助電源のトラブルによるもので4時間31分、ほとんど のものが1時間以内にユーザータイム再開を果たしてい る。ユーザータイム中断には至らないが、トップアップ入 射の中断が28回発生した。入射系のトラブルに起因するも のがほとんどであるが、地道な対策を施しており、トップ アップ中断の減少に努力をしている。また、加速器および ビームラインの調整は1023.6時間であった。

以前より減少傾向にあるマルチバンチモードの運転の割 合は、2009年は更に減少してユーザータイムの14.3% (2008 年は18.7%)となった。セベラルバンチモードでの運転の 割合は40.2%で、2008年の44.2%より多少減少した。セベラ ルバンチモードの中では、例年、際だって多い203バンチモ ードでの運転がユーザータイムの23.9% (2008年は24.1%) とほぼ同様であった。マルチバンチモードとセベラルバン チモードが共存するハイブリッドモードは45.5% (2008年 は37.1%)と更に増加した。マルチバンチモードの運転時 間の減少の原因は、2004年以来のトップアップ運転の導入 により、高電流バンチの短いビーム寿命を気にする必要が 無くなったために、パルス放射光利用実験がいつでも実施 できる様になったためである。この傾向は今後も続くと思 われる。2009年は、7つのフィリングモードでの運転が実 施されている。前述した均等203バンチ(1バンチ当たり の電子数1.5×1010:電流換算0.5 mA)、11バンチトレイン を全周に均等に29配置したモード(1つのバンチには

脚注:SPring-8年報は年度ごとのまとめであるが、運転統 計は従来通り1月~12月で集計する。 9.5×109:電流換算0.3 mA)等が実施された。 表1に、蓄積リングの主要なパラメーターを示す。

(大熊)



図1 1997年の供用開始以来の運転時間の推移

表1 蓄積リングの主要パラメータ

Table I. Beam parameters of SPring-8 storage ring

	Energy [GeV]	8		
	Number of buckets	2436		
	Tunes (1/ 1/ 18.35 / 18.35			
	Current [mA]:			
	single bunch	12		
	multi bunch	100		
	Bunch length (0) [psec]	13		
	Horizontal emittance [nm·rad]	3.4 ^{\$1}		
	Vertical emittance [pm·rad]	6.8 ^{\$1}		
	Coupling [%]	0.2		
	RF voltage [MV]	16		
	Momentum acceptance [%]	±3 (±240 MeV)		
	Beam size $(\alpha / \alpha)^{s1}$ [µm]			
	Long ID section	294 / 10		
	ID section	301 / 6		
	BM section	107 / 13		
	Beam divergence $(\alpha' / \alpha')^{s1}$ [µrad]			
	Long ID section	13 / 0.7		
	ID section	12 / 1.1		
	BM section	56 / 0.6		
	Operational chromaticities ($\boldsymbol{\xi} / \boldsymbol{\xi}$)	$+2/+6^{82}$		
	Lifetime [hr]:			
	100mA (multi bunch)	~200		
	1mA (single bunch)	~20		
	Horizontal dispersion [m]:			
	Long ID section	0.103		
	ID section	0.107		
	BM section	0.032		
Fast orbit stability (0.1 – 200Hz) [µm]:				
	horizontal (rms)	~4		
	vertical (rms)	~1		

^{\$1} Assuming 0.2% coupling for "Low Emittance Optics" ^{\$2} With bunch-by-bunch feedback

1-2 蓄積リングのスキュー四極電磁石増設

放射光リングにおいて、高輝度を得るためには垂直ビーム拡がりは重要なパラメーターである。本来、電子蓄積リングでは垂直方向にビーム拡がりを持たないが、誤差磁場による線形結合(水平方向振動と垂直方向振動の結合)共鳴や垂直ディスパージョンによって垂直ビーム拡がりが生じる。蓄積電子ビームは不可避的にエネルギー拡がりを持っている(SPring-8蓄積リングの場合0.11%)ので、垂直ディスパージョンがあるとそれだけ垂直方向に広がることになる。線形結合共鳴、垂直ディスパージョンとも、スキュー四極電磁石を用いて補正することができ、SPring-8蓄積リングでも実際にこれを実施している。

垂直ディスパージョン補正は、主に水平ディスパージョ ンの大きな通常セルアーク部に設置されたスキュー四極電 磁石を用いて行われる。この補正ではスキュー四極電磁石 によって水平ディスパージョンを垂直方向に回転すること により垂直ディスパージョンを相殺しているが、この時に 線形結合共鳴を励起しないよう条件を課している。線形結 合共鳴補正は、垂直ディスパージョン補正に先行して、垂 直ビーム拡がりの応答を見ながらスキュー四極電磁石設定 を最適化することにより実施している。

SPring-8蓄積リングでは1999年秋以降、偶数セルアーク 部に設置された20台のスキュー四極電磁石で、垂直ディス パージョン補正のみを行っていた。近年、線形結合共鳴が 悪化してきたので、2007年度からは4ヶ所の長直線部両端 にスキュー四極電磁石計8台を増設して、線形結合補正も 行っている。補正対象が増えた結果として自由度が減り、 垂直ディスパージョン補正性能が低下してきたので、2008 年度から2009年度に渡って奇数セルアーク部に20台のスキ ュー四極電磁石を増設した。図2は、ビーム位置モニタで 測定した垂直ディスパージョンを表す。無補正(赤丸印) では、R.M.S. (Root Mean Square; 二乗平均平方根)で 3.5 mm、ピークでは10 mmを超えている。奇数セルアー ク部スキュー四極電磁石増設前(緑丸印)は、これを 2.0 mm R.M.S.までしか補正することができなかったが、 増設後(青丸印)これが改善されて1.2 mm R.M.S.まで補



正できるようになった。

図3に加速器診断ラインIに設置されたX線ビームプロファイルモニタを用いて観測した電子ビームプロファイル を示す。左図は無補正のもので、垂直ビームサイズ (2s) は0.06 mmであった。これが、スキュー四極電磁石による 補正後は0.03 mmとなっている (右図)。これら垂直ビー ム拡がりに関する補正により、最終的にエミッタンス結合 比0.2%を達成しており、蓄積リング運転開始当初の性能を 回復している。

(高雄)

1-3 長直線部のラティス変更

蓄積リングには長さ30 mの長直線部が4カ所あり、そ のうち2カ所には、既に挿入光源が設置され放射光利用に 供されている。残り2カ所のうちの1カ所に、短周期型長 尺アンジュレータ(真空封止型)を設置し、ビームライン (BL43LXU)を建設する計画が進められている^[1]。このビ ームラインでは、十分な放射光フラックスと輝度を、必要 な光子エネルギー領域で得るために、アンジュレータのギ ャップ値を6 mm まで小さくする必要がある。しかし、 例えば既設の真空封止型長尺アンジュレータでは、入射効 率の低下やビーム寿命の悪化など、ビーム性能に対する影 響を考慮して最小ギャップ値を12 mm に制限しており、 単に長尺アンジュレータを設置するだけでは6 mm のギ ャップ値を実現できない。そこで 30 m長直線部を3 つの



図3 垂直ディスパージョン補正前(左)後(右)のビームプロファイル



図4 ラティス改造前後での長直線部オプティクスの比較。改造前(図4(a))と改造後(図4(b))の水平ベータトロン関数(β_x)、 垂直ベータトロン関数(β_y)、水平ディスパージョン関数(η_x)を示す。図の下部には主電磁石配置を四角で示した(青色: 偏向電磁石、緑色:四極電磁石、橙色:六極電磁石)

直線部に分割し、各直線部の間にそれぞれ3台の四極電磁 石を設置して、長直線部のラティスを局所的に改造する案 を検討した。改造前後でのオプティクス関数を図4(a)と 図4(b)に示す。改造後のラティスでは、3カ所の直線部 のそれぞれに5mのアンジュレータを設置することができ る。また垂直方向のベータトロン関数を下げてビームを絞 り、許容最小ギャップ値6mm(ビーム性能への影響だけ を考慮するなら5.2mm)を実現させる。直線部中心での 垂直ベータトロン関数は2.5mである。

この改造は局所的であり、ベータトロン関数およびチュ ーンのマッチング条件を保ったまま行うため、他のビーム ラインにおける光源パラメーターへの影響は無く、またエ ミッタンスもほとんど変化しない。しかし一般には、この ようなラティスの改造を局所的に行うと、リング全体の対 称性が低下してビームの動的安定領域が狭くなり、入射効 率やビーム寿命に悪影響を及ぼす。SPring-8蓄積リングで は、長直線マッチング部にある局所クロマティシティ補正 用六極電磁石(図4(a)のSF)が、六極磁場分布の対称 性を低下させる主原因となる。改造前のラティスでは、こ の SF で発生する非線形キックを打ち消すためにカウンタ ー六極電磁石(図4(a)のSCT)を設置し、動的安定領域 を広げていた^[2]。改造後のラティスにおいてもこのスキ ームを保持するため、ベータトロン位相を考慮した位置に SCT を移設する (図4(b) 参照)。これにより、今回のラ ティス改造に伴う動的安定領域の狭小化を最小限に抑える ことができる。事前の計算機シミュレーションによれば、 動的安定領域は多少狭くなるものの、入射効率に顕著な悪 化は見られず、ユーザー運転に支障を来すほどの影響は無 いと予測されている。実際の蓄積リングの改造とアンジュ レータの設置は、2010年度以降、順次行われる予定である。 (早乙女)

1-4 水平キッカー電磁石による蓄積ビームの入射振動抑制 蓄積リングへのビーム入射時には4台のバンプ電磁石が パルス励磁され、バンプ軌道が水平面内に生成される。こ のバンプ軌道が閉じていないと、例えばトップアップ入射 時に蓄積ビームが振動してしまうなど、ユーザー運転に悪 影響を及ぼす。現在、バンプ電磁石の磁場の立ち上がり付 近では、磁場波形や励磁タイミングを完全に調整すること が難しく、スパイク的なビーム振動が発生している。この 振動を打ち消すために、速いキッカー電磁石の開発を行っ ている。

2008年度には、試験用に製作した電磁石と電源を用いて ビーム試験を行った。この試験結果をもとに、2009年度に は、磁場精度の高い実機電磁石と立ち上がりの早い大電流 電源の開発を進めた。また電磁石の設置場所の検討も行い、 補正効率を高めるために、水平ベータトロン関数の大きな 場所としてセル36直線部上流を選定した。これにより、必 要蹴り角は0.8 µsのパルス幅にて30 µrad(3.2 mT磁場相 当)となり、目標仕様値を緩和できた。また渦電流による 減磁を防ぐために、厚さ5 µmのTi-Moで表面コートしたセ ラミックチェンバーを製作・設置した。

まず実機電磁石の開発であるが、早い立ち上がりの磁場 を実現するため、磁石タイプとして1ターン空芯コイルの ダイポール型を採用した。中心磁場及び設置スペースに対 して最適化された磁場形状を保持するため、ベークライト 製の冶具(軽量にも拘わらず硬質で、耐放射線性と熱特性 に優れる)にて、セラミックチェンバーを抱え込みながら コイルと一体型で保持する構造とした。ビームロードによ る発熱に対処するため、ファンによる強制空冷システムを 導入している。また磁石内側にはサーチコイルを挿入して、 リアルタイムで磁場波形をモニターできるようにした。図5 に実機電磁石の外観を示す。

電源に関しては、「速い立ち上がり」と「大電流」を同時に 実現するため、電磁石の1コイルごとに1台の電源を接続



図5 水平キッカー電磁石

し、駆動電源を出来るだけ小型化して電磁石近傍に設置し、 インダクタンスの低下を図った。更に、大電流かつコンパク ト電源の条件を満たすため、小型スイッチング素子である 900V高耐圧MOSFETを4個並列に使用した。コンパクト電 源の低インダクタンス特性とあわせて、試験機の4倍以上 にものぼる、飛躍的に改善した短パルス大電流の生成を可 能にした。出力電流は0.8 µsパルス幅にて164 A/coilを達成 した。これは、中心磁場にて2.52 mT相当であり、17.6 µrad のキックをビームに与えることが出来る。

開発した電磁石と電源を用いてビーム試験を行い、励磁 タイミングの調整や、パルス幅を合わせるための回路素子 の調整などを実施した。図6は、実際にビーム振動を抑制 した結果である。振動の位相を考慮し、バンプ電磁石がパ ルス励磁してから3ターン後に、水平キッカーを励磁して いる。水平振動のピーク幅に見合ったカウンターキックを 与えることに成功し、50%の振動抑制に成功した。今後は、 短パルス特性を保持しながら、さらなる大電流化を目指し て、抑制効果の向上を図る予定である。

(満田、早乙女)





1-5 垂直キッカー電磁石を使った短パルスX線の生成

蓄積ビームに垂直パルスキックを与えてバンチを傾け、 短パルスX線を生成するスキーム^[3]を検討している。こ の方法は、垂直クロマティシティが0でない場合にバンチ にヘッド・テール振動が誘起され、シンクロトロン振動の 半周期後にはその傾きが最大となることを利用する。2007 年度より技術開発を進め、蓄積ビームでの実証試験を重ね ている。

短パルスX線生成のためには、0.1 mrad程度のキックを 8 GeV電子ビームに与え、振幅1 mm程度以上の垂直振動 をビームに誘起する必要がある。また将来の実用化を視野 に、短パルス光ユーザーと通常の放射光ユーザーを共存さ せるため、短パルス光ユーザー用の1 mAシングルバンチ と通常ユーザー用のバンチトレイン(半周分)を含むハイ ブリッドフィリングでの適用も検討している。このため、 ビーム周回時間の半分の2.4 µs以下という短いパルス幅 で、9.3 mTの強磁場を発生させる必要がある。

2008年度までに小型空芯コイルを用いた垂直キッカーと 短パルス大電流ドライブ電源の試験機を製作し、蓄積ビー ムを用いて性能評価試験を行った。これをもとに、2009年 度には、大電流ドライブ電源の出力増強のための技術開発 とキッカーの改造を進めた。その結果、2.5 µsのパルス幅 にて最大440A/coilの出力に成功し、実ビームで2.1 mmの 垂直振動を励起することに成功した(0.08 mradの垂直キ ックに相当)。

ビーム試験では、バンチの通過に合わせて1 Hzの繰り 返しでビームを蹴り、加速器診断 I (BL38B2)の可視光 ストリークカメラで、ビーム進行軸方向のプロファイルの 観測を行った。ビームチルトを決めるパラメーターには、 キック量、垂直クロマティシティ値、キック後の観測周回 数の3つがある。試験では、最大チルトを得るための、こ られの最適な組合せを探索した。図7に、垂直クロマティ シティが+2、+6、+10の各場合に観測された、可視光ス トリークカメラでのビームプロファイル像を示す。垂直ク ロマティシティが+2 の場合、シンクロトロン振動の半周



図7 垂直クロマティシティが+2,+6,+10の各場合について、キック後52~72ターンの間ビー ムプロファイルを左図に、20~30ターン間のビームプロファイルを右図に示す。

期(50ターン)にほぼ近い54ターン後に、ヘッド・テール 間にて3.6 mm程度の偏差に相当する最大ビーム傾きを観 測した。垂直クロマティシティが +6、+10においては、 キック後20ターンでそれぞれ3.4 mm、3.0 mmのビームチ ルトを観測した。垂直クロマティシティが高い場合、キッ ク後の早い周回数で最大チルトを励起することができる が、低クロマティシティの場合よりもチルトが若干小さく なる。早い周回数で最大チルトを得られるというメリット はあるが、チルトが十分に成長しておらず、逆に遅い周回 数ではS字のような歪んだプロファイルになりがちであ る。また垂直方向のビームサイズについても、クロマティ シティ+2の場合に比較して、太る傾向があることがわか った。最大ビームチルトを引き出すためには、大きなキッ ク量と低い垂直クロマティシティ値にて、ビームチルトを ゆっくりと成長させる必要がある。取得した画像データか ら求めたバンチのプロファイルを図8に示す。

今後は、さらなる電源出力の増強と最大チルトの生成を 目指し、スリットによる短パルス光の切り出しとX線スト リークカメラによるプロファイル観測などを行う。また、 X線光学系の最適化や切り出された放射光の試験利用、レ ーザー光ポンププローブ実験を視野に入れた電源の高繰り 返し化(100 Hz化)も検討する予定である。

1-6 ビームロスモニターの開発

2003年、SPring-8蓄積リングにおいて、アボートされた 周回電子ビームが真空チェンバーに衝突し、チェンバーの 損傷により真空漏れを引き起こした^[4]。また、蓄積リン グ内を周回している電子ビームが真空封止型挿入光源の永 久磁石に衝突するとそれを減磁し、挿入光源から発生する 光の特性が変わる可能性がある^[5]。ビームロスによるこ れら照射ダメージを監視・抑制する為に、PINフォトダイ オードによる安価でメンテナンスフリーなビームロスモニ ターを開発している^[6]。

2009年度は、ID05などへのビームロスモニターの新規 インストール、光信号を用いた全ロスモニター共通のタイ ミングシステムの導入など、モニター及びデータ収集系の 増強・整備を行った。タイミングシステムの導入により、 蓄積リング各点で同期したビームロスの観測が可能となっ たので、ロスモニターを用いたビーム挙動調査の一環とし て、ユーザー運転時の通常廃棄時及びビームアボート時の ビームロス分布を測定した(図9)。図9においてビームロ ス信号の最大値が1.2 Vとなっているのは、ビームロスモ ニター出力が飽和している事を意味している。

蓄積リングでは、状況に応じ2種類のビーム廃棄方式、 すなわち「通常廃棄」と「ビームアボート」が使い分けら れる。通常廃棄は、フィリング変更時などに計画的に行わ



(満田、早乙女)

図8 キック後54ターン (垂直クロマティシティ (ξ_y)+2の場合の最適ターン数) でのビームチルトを左図に、またキック 後20ターン (垂直クロマティシティ+6, +10の場合の最適ターン数) でのビームチルトを右図に示す。

れるもので、真空チェンバーへのダメージを抑える為に、 パルス磁石により入射点近傍鉛直方向にローカルバンプ軌 道を生成し、ビームをゆっくりと削りながら廃棄する。一 方、ビームアボートは機器インターロック発生時などに緊 急に行われるもので、RF電圧を0 Vにすることで瞬時にビ ームは廃棄される。

図9の通常廃棄の場合、ローカルバンプが生成される入 射部近傍(入射点、廃棄点、セル2-B2など)、およびoutvacuum型の挿入光源(ID05、ID07、ID08)でビームロス信 号が観測され、真空封止型挿入光源では有意なビームロス は観測されなかった。一方、ビームアボートの場合、入射 点およびSS48に主に集中してビームロスを生じるという 結果となった。今後も継続してビームロスを監視する共に、 必要に応じてビームロスモニターを増強する予定である。 (下崎)



図9 通常廃棄時およびビームアボート時のビームロス分布

1-7 不安定性抑制

10 mA/bunchを超える大電流シングルバンチと、現状 のマルチバンチ相当の低電流バンチ0.06 mA/bunchからな るトレイン部を持つハイブリッドフィリング(図10) は、 時間分解測定の利用と高デューティーでの利用を両立させ ることができるフィリングであるが、それを実現するため には、シングルバンチ部の発生する強いビーム不安定性を 抑制すると同時に、トレイン部の発生するマルチバンチ不 安定性を抑制する必要がある。前年度までに、入射時に発 生する大振幅振動に打ち勝って、大電流シングルバンチの 不安定性を抑制するための、水平用フィードバック用高効 率キッカーの開発・設置、およびそれを駆動するパワーア ンプの増強を行ってきた。しかしながら、シングルバンチ 部とトレイン部のバンチ電流の違いは 170倍であり、その ままではシングルバンチ部のフィードバックシステムへの Hybrid filling : 10mA singlet + 4/7 fill (1392bunches)



図10 10 mA/bunch を伴うハイブリッドフィリングの概念図

入力信号強度が非常に大きく、フィードバックが飽和し不 安定性の抑制が不可能となる。現在、入力部にはこれまで に開発されたバンチ電流感応型アッテネータが設置されて いるが、切替速度は12 ns と十分に高速であるが、その減 衰量は12 dB程度であり、170倍(45 dB)の信号の減衰は 不可能である。

2009年度は、この減衰量を達成するため、電圧制御可変 アッテネータとデジタル制御の可変アッテネータを組合せ た、より高度化したバンチ電流感応型アッテネータ(可変 範囲:0~45 dB(1 dB/step)、切替速度:50 ns~200 ns) を開発した。これにより、運転条件に制限はあるが、目的 としたフィリングでの蓄積に成功した。今後は利用運転に 提供可能な安定した運転と、種々の要求されるフィリング に柔軟に対応するため、これらのアッテネータに対する電 圧及びデジタルの制御回路を、SPring-8 で開発されたフィ ードバック用信号処理装置のプログラムを組み替えること により製作し、システムとして完成させていく予定である。 (中村、小林 和)

1-8 垂直ビームスクレーパー

ビームの垂直方向の運動の解析は、挿入光源へのビーム の衝突を制御し、入射効率の向上や、ビーム衝突による挿 入光源の劣化を低減するするために必須である。入射ビー ムでは入射時の多重散乱、蓄積ビームではバンチ内部での 電子 - 電子衝突により、電子がビームのコアから漂い出し コアの周りにハローを形成するが、これが挿入光源など、 垂直方向のビームパイプのギャップが小さいところに衝突 し、入射効率の低下や挿入光源の劣化を引き起こすと考え られている。この現象の詳細な調査、ならびに、挿入光源 に衝突する前にハローを除去するために、今回、ビームの 垂直方向のギャップをこれまで以上に制限することができ る垂直方向ビームスクレーパーを製作した(図11)。

垂直方向に可動な2つのブロックを設置し、これを上下 させることにより必要なギャップを設定し、たとえば、蓄 積ビームの寿命や入射効率のギャップに対する変化を観測 することによりハローの垂直方向の運動の情報を得ること が可能となる。ブロックに衝突した電子が強く相互作用し

て高確率で電子が除去されるようにブロックのビーム側表 面にはタングステンを用いており、挿入光源に衝突する前 にスクレーパーによりハローを除去することを目指してい る。また、ギャップが小さいので、ビームに対するウェー ク場の影響が大きいため、これを低減するために、ビーム にそって滑らかに変化するテーパー形状となっている。 (中村)



図11 垂直ビームクレーパー

1-9 加速器診断

加速器診断 I バンチ純度モニターの自動測定用プログラ ムを改良し、測定器との通信エラーによる測定中断の問題 を解決し常時監視の安定性を更に向上させた。シンクロト ロンの高純度単バンチビーム生成RFKOシステムの不調に よる純度悪化、純度モニター信号処理回路の不調による測 定感度悪化が一時的に見られるが、年度を通じて概ね10⁹台 以下のバンチ純度を達成し安定に維持することに貢献した。

加速器診断 II では、光学ハッチ2の二結晶分光器から出 射される単色X線を下流側の実験ハッチに導入して利用す るための放射光輸送系を完成させた。この放射光輸送系で用 いるため光学ハッチ2に設置したガンマストッパーと呼ぶ 放射線遮蔽体として、単色X線ビームに対し十分な開口を確 保すると同時に遮蔽上の開口を必要最小限に抑えるために、 新たに遮蔽体自体が真空チェンバーとなるタングステン合 金製ガンマストッパーを開発した(図12)。ヘリウムリーク 量は10¹¹ Pa・m³/sec以下で超高真空での使用が可能であり、 設置後のベーキングにより10⁷ Pa台の圧力に到達した。

加速器診Ⅱフロントエンドのアブソーバ、Xスリット、Y スリットでは、放射光受光体表面からの散乱X線により真

大型放射光施設の現状と高度化

空チェンバーが加熱され一部に200 ℃を超える温度上昇を 生じていた。この対策として本体を無酸素銅で製作した水 冷機構を有するチェンバーを2009年度に設置した。アブソ ーバのチェンバーとYスリットのチェンバーでは、温度上 昇が各々10 ℃以下、30 ℃以下に抑えられ十分な効果が確 認できた。一方、Xスリットチェンバーについては、スリ ット全閉の状態で100 ℃を超える温度上昇を示す箇所が残 っており、今後必要に応じて追加の対策を行う予定である。

加速器診断 II 実験ハッチ内に、挿入光源^[7]の高次光の 空間分布を観測し電子ビームのエネルギー広がりと水平エ ミッタンスとを同時計測する高速光モニターを整備する計 画を進めている。大電流シングルバンチビームなどの安定 性や、XFEL C-band Linac からの高品質入射ビームを診 断し、ビーム性能の向上と運転・調整の効率化に役立てる 計画である。二つに分岐した光路の一方で垂直方向の1次 元プロファイルを結像させエネルギー広がりを、もう一方 で水平方向1次元プロファイルを結像させて水平エミッタ ンスを、電荷を高速でシフトさせるキネティクスモードと 呼ばれる機能を持つ高速CCDカメラを用いることより、 蓄積リング1周回毎に同時に計測することを目指してい る。2009年度は、高速蛍光体や高速CCDカメラなどの特 性や性能を評価する実験を行った。

X線ストリークカメラの時間分解能を評価するために、 入射光量を減少させて一個一個の光子を弁別できる条件の 下で、言わば究極の短パルスX線である単一光子の見かけ の時間広がりを測定する方法を新たに考案した^[8]。取得し た画像データの中から単一X線光子に対応するイベントを 拾い出して時間プロファイルを求め、更に重心を合わせて 多数の光子の時間プロファイルを足し合わせることで、単 ーX線光子の平均的時間プロファイルとその広がりを求め ることが出来る。図13に、ストリークカメラの入射光電面



図12 タングステン合金製ガンマストッパー。タングステン合 金ブロックに矩形の貫通孔(図左下の写真参照)を設け、 二つの開口面の各々に金属Oリングを介してSUS製変換 フランジを取り付けた構造で、隣接する真空チェンバー とICF70フランジで接続される。

に使用したCsIのL吸収端を含むエネルギー領域(4.5 keV ~6 keV)と吸収端から離れたエネルギーとで測定した結 果を示す。L吸収端を含む領域では、X線エネルギーの増 加とともに時間広がり(FWHM)が増える傾向が見られた。 (高野)



図13 X線ストリークカメラで測定した単一X線光子の見かけ の時間広がり。多数のX線光子の時間プロファイルを重 心を合わせて足し合わせ、平均的な広がり(FWHM) を求めた。

1-10 アップグレード計画のための極低エミッタンスラテ ィスの検討

SPring-8 アップグレード計画ワーキンググループが 2008年に発足し、放射光利用の高度化に向けた議論が活発 に行われている。この計画において、加速器側の基本とな るものが、蓄積リングの改造である。放射光の輝度を飛躍 的に向上させるため、蓄積リングのラティス構造を、現在 の Double-Bend (DB)型から Multi-Bend 型へと変更し、 エミッタンスを低減させる。Multi-Bend ラティスの設計 に際して考慮すべき条件は、次の通りである: (i)平均輝 度の飛躍的な向上を目指すこと。(ii) 100 keV 程度まで の硬X線が利用できること。(iii)現在の蓄積リングトン ネルを再利用すること。(iv)挿入光源用ドリフト空間の 数と位置は変えないこと。(v)エミッタンスは極力小さ くし、究極の目標値である「回折限界」(10 keV光子に対 して 10 pm・rad)を目指すこと。

条件(iii)と(iv)を満たすには、ユニットセル内の電 磁石の配置が、今とほぼ同じスペースに収まらなければな らない。極低エミッタンスのMulti-Bend ラティスを組む ためには、このスペースに設置する偏向電磁石の数(現状 2台)を増やして、ビームを水平方向に強く絞る必要があ る。より短い距離でビームの収束・発散を繰り返させるた め、強い四極電磁石が必要となり、クロマティシティ補正 用六極電磁石もまた強くなる。一般に Multi-Bend 化を進 めていくと、このような傾向が次第に顕著になり、ビーム が安定に周回できる動的安定領域が狭くなる。

そこで Multi-Bend 化を進める際の問題点を洗い出し、そ の影響を定量的に評価するために、現状の DB ラティスか ら Triple-Bend (TB) ラティス、Quadruple-Bend (QB) ラテ ィスへと、セル内の偏向電磁石の数を1台ずつ増やしなが ら順次、検討を進めた。動的安定領域を拡張するための非 線形磁場の最適化手法を開発し、例えば QB ラティスに対 しては、水平方向に3~5 mm (片側) 程度を確保できるとの 計算結果を得た。検討の際、ビームエネルギーは 6 GeV に 設定した。これは低エネルギー化によって、ビームのエミ ッタンスとエネルギー広がりが低減できること、電磁石の 強さを弱められること、熱負荷が軽減されること、電流値 の増強が見込めること、などを考慮してのことである。硬X 線領域の放射光発生には、挿入光源の短周期化で対応する。

今回検討した TB、QB ラティスの自然エミッタンスは、 6 GeV の時、それぞれ0.43 nm・radと0.16 nm・rad である。 これは DB ラティスに対する1.9 nm・rad に比べてかなり 低減されてはいるものの、「回折限界」には届いていない。 エミッタンスをさらに低減できる 6-Bend ラティスなどに ついて今後検討を進めることにより、「回折限界」を達成 する事が可能であると考えている。またラティス以外に、 ダンピングウィグラーによるエミッタンスの低減、動的安 定領域が狭いリングへの入射方法、短バンチ生成の可能性、 バンチ長の制御などについても検討が進められている。

(早乙女)

参考文献

- [1] A.Q.R. Baron、SPring-8利用者情報 Vol.151 (2010) 14.
- [2] K. Soutome, et al.: Proc. of EPAC08, Genoa, Italy (2008) 3149.
- [3] W. Guo et al.: Phys. Rev. ST Accel. Beams **10** (2007) 020701.
- [4] M. Shoji et al.: Vacuum **84** (2009) 738-742.
- [5] T. Bizen, Nucl. Instr. and Meth. A 574 (2006) 401.
- [6] SPring-8年報、2008年度、p.19.
- [7] 正木、他、第6回日本加速器学会年会(東海村)、2009 年8月、p.177.
- [8] 持箸、他、第6回日本加速器学会年会(東海村)、2009 年8月、p.329.

加速器部門 運転・軌道解析グループ 大熊 春夫

2. 加速器第1グループ

2-1 線型加速器の運転状況

SPring-8 蓄積リングトップアップ運転へのビーム入射 は、電流値が設定を下回ったときに入射を行う電流値優先

モードで運転しており、蓄積リングのフィリングによって も異なるが、約15秒~5分に1回である。また、蓄積リン グの蓄積電流の安定度は0.03%p-pである。同時に入射を行 っているNewSUBARUには6、7秒に一度の入射(トッ プアップによる)を行っている。

2009年における線型加速器総運転時間は、5026時間であ った。図1に2009年度のサイクル毎のインターロックフォ ールト統計を示す。図1左のグラフは1日あたりの回数で、 平均すれば1日0.5回以下となっており、これまでで一番 少ない年間フォールトレートになっている。フォールトの 原因のほとんどはクライストロンモジュレータによるもの であるが、13台のモジュレータで2日に1回程度まで下が っている。2008年夏にサイラトロンスタンドの更新を行っ たためモジュレータ筐体内での放電がなくなり、そうした 放電によるノイズが誘発していたと思われるフォールトが 減ってはいるが、交換したスタンドについているサイラト ロン冷却用ファンの電源がノイズによりダウンすることが あり、今後更に全サイラトロンスタンドについての一斉改 修を予定している。

図1右のグラフは線型加速器のフォールトを原因とする トップアップ運転の中断時間の比率である。前半のサイク ルでは大きなトラブルはなかったが、後半のサイクルでは 前述のサイラトロン冷却用ファンの故障が発生したため、 当該のサイラトロンスタンドについての交換作業が伴った ため、長いダウンタイムとなった。通年で平均したダウン タイムは、ほぼ例年並みである。



2-2 加速器の改良

2-2-1 電子銃システムの二重化

電子銃カソードの交換には、真空排気作業、カソード活 性化などを含め、約3日運転を停止しなければならなかっ た。この時間を大幅に短縮するために、電子銃システムの 二重化を進めてきた。

図2は第二電子銃用の高圧ステージ (パルストランスタン



図2 第二電子銃とその電源。奥に見えるのが第一電子銃

クと高圧デッキ)の電子銃部の写真である。第二電子銃から のビームは90度偏向磁石(青色のヨークのみが少し見えて いる)により手前に曲げられて、バンチャ部に入射される。

電子銃本体は2007年春に機器の製作を完了し、2007年の 夏期点検調整期間に設置を行った。2008年の中間点検調整 期間にシンクロトロンへのビーム輸送も確認された。

2008年度は、第一電子銃のトラブル時は、第一電子銃用 のモジュレータ及び高圧デッキを第二電子銃につなぎ替え て使用していたが、2008年度に第二電子銃専用の電源や高 圧デッキを製作し、2009年度に設置、調整を行い、リモー トでの運用が可能となった。インターロック信号など手動 切替部分が残っているが、システム二重化がほぼ完成した と言える。2010年夏には完了する予定である。

2-2-2 モジュレータPLCの更新

線型加速器のクライストロンモジュレータのローカル制 御には(株)東芝製のPLCが用いられている。このPLCは 既に製造中止となり、メンテナンスに問題を生じる恐れが 出てきた。そこで、PLCを横河電機(株)製FA-M3に交換 し、内部プログラムも更新することとした。これにより、

- 1. 上位との通信がイーサネット経由となり高速化
- 2. 変調器出力電圧の安定化
- 3. 電圧安定化回路保守作業の一部自動化
- 4. モニタする電圧信号の分解能向上
- 5. ビームに同期した電圧モニタ

などの改善が達成される。

2009年夏にM6モジュレータでPLCの交換、プログラム の更新を行い、試験運用を開始した。その結果、問題ない ことが分かり2010年夏に全数交換することとした。

2-2-3 BPM信号処理回路の改良

BPMの信号処理回路では、検出器からの2856 MHzの信号をLOG検波方式を用いて処理しており、今まではICに

(花木)

AD8313(アナログ・デバイセズ社製)を用いていた。こ のIC は0.1~2.5 GHz(公称値)の帯域を持っている。蓄 積リングの入射ビーム電流の要請はマルチバンチ入射用の 大電流からトップアップ運転用の微少電流まで広いレンジ にあり、BPM信号処理回路はこのレンジをカバーしてい た。しかし、トップアップ運転でバンチ電流のばらつきを なくすためにさらに微少な電流での入射を考えたときに は、厳しい状況であった。

そこでLOG検波ICをさらに広い (0.001~4 GHz) 帯域を 持つADL5513 (アナログ・デバイセズ社製) に交換した回 路の試作を行い、試験を行った。その結果、図3のように 測定のダイナミックレンジが10倍向上し、いままで0.1~ 10 nCであった測定レンジが0.015~15 nCに拡げることが 出来た。これは今後の運転の拡張にも耐えるものである。

今後順次更新、交換を行って行く予定である。



2-2-4 リファレンスラインの安定化

各加速管に供給する大電力RFの位相は、RFリファレン スラインと比較することによりモニターされている。各ク ライストロン毎のRF位相を比較することにより、個々の クライストロンの変動か、H0クライストロンより上流側 の励振系の問題かを切り分けることができる。

2009年夏までは励振系の位相が大きく変動しているよう に観測されていた。図4上段に示すように、当時は低電力 励振回路の終端でリファレンスラインとH0励振用アンプ に分岐され、各々の系統にアンプが設置されていた。従っ て、いずれのアンプでRF位相が変動しているのかが分か りにくかった。

そこで、図4下段にあるようにリファレンスラインからア ンプを取り除く回路構成とした。その結果、依然として位 相変動が見られたため、H0クライストロンの励振用1 kW アンプの変動であることが明白となり、これに対するPLL 回路を設置して安定化を図った。







図4 RFリファレンスライン前段部の回路

2-2-5 低エミッタンスビームモニターの開発

線型加速器において、電子銃から出たビームを入射部に おいてきれいに成形することは、後段でのビームロスを減 らすために重要なことである。第二電子銃が設置され、入 射部でのビーム輸送が以前より困難になり、熟練を要する ようになってきた。そのため、エネルギーが低い段階で適 正な調整を行えるよう、低エネルギービームでも正確にビ ーム形状を測定できるモニターが必要となってきている。

ビーム形状を非破壊に測定できるモニターとして8電極のBPMを開発中であり、2009年に試作を行った(図5参照)。 また、そのビームサイズを正確に評価するために薄膜ルビ ー蛍光板モニターの開発も行った。この蛍光板はアルミナ の上にルビーを成長させたもので、数µmの分解能が期待 される。この蛍光板はRF電子銃の電子ビームで発光を確 認済みである。



図5 8 電極型BPM

これらのモニターは2010年夏に、入射部最上流のH0加 速管の下流に設置する予定である。

(花木)

2-3 フォトカソードRF電子銃のためのレーザーパルス同 期RF発信器の開発

フォトカソードRF電子銃においては、フォトカソード に入射するレーザーパルスと、RF空洞内に励振されるRF 信号を1ps以下に同期させることが、低エミッタンスビ ームの安定な生成に不可欠である。

RFとレーザーを低ジッターで同期させるために、レー ザー発振器をRF信号に対してPLLをかけることが一般的 であるが、この方法ではPLLで用いているピエゾミラーの 応答周波数の制限があり、極限の同期性能を得ることは難 しい。そこで、これまでSPring-8では、レーザーに同期し たRF信号を生成するために、89.25 MHzのチタンサファ イアレーザー発振器からのレーザーパルスを高速なフォト ディテクターで検出し、そこで得られた89.25 MHzのパル ス列から2856 MHzRF信号をバンドパスフィルターを用い て生成していた。この場合出力RFの振幅はレーザーのパ ワーに依存するため、レーザーのパワーとともにRFパワ ーが変動し、またパルス毎のパワー変動に対して時間ジッ ターが生じるという問題があった。これらの問題を解決す るために、リミッターアンプを用いたレーザーパルス同期 RF発振器を開発した^[1]。

開発したRF発振器の基本構成を図6に示す。この回路で は、(1) レーザーパワーの変動の影響を抑制するためリミ ッターアンプ(GigOptix社 iT3011E)を使用しているこ と、(2) 高調波の発生に低ジッターのコムジェネレータ (HEROTEK GC100)を用いていることなどが特徴である。 性能を評価した結果、従来の方法と比較して、(1)短時間 のRFパワーの安定度(RMS値)が0.27%から0.20%まで 低減できた、(2) RFとレーザーパルスの時間ジッターが 270 fsから160 fsまで減少した、(3) レーザーパルスのパ ワーが10 dB低下した場合においても、RFパワーはほぼ一 定であり、また光パルスとの時間ジッターもほぼ170 fs以 下を保つことができる(図7参照)等の優れた性能を示す ことがわかった。この新しいRF発振器はその優れた同期 性能を生かして、フォトカソードRF電子銃の位相、ビー ムエネルギー等をさらに安定化し、低エミッタンスビーム の安定な発生に寄与すると期待できる。

(出羽)



図7 89.25 MHz基準パルスの信号強度を変化させて測定した、 RF発振器とRFパルス間のタイミングジッター

2-4 フェムト秒パルスX線の生成

フェムト秒パルスX線生成のためには超伝導クラブ空洞 を使用し、電子ビームを偏向する高周波電磁場の位相を高 精度で制御する必要がある。これまでその実現に向けた要 素技術の開発を続けてきたので、その集大成として開発し た高精度移相器や高剛性チューナを高エネルギー加速器研



図6 レーザーパルス同期RF発振器のブロックダイアグラム

究機構(KEK)の超伝導クラブ空洞に取り付けて位相安 定化の実証試験の準備を進めてきた。一方、2009年度に Super KEK-Bの補正予算が認められ、その建設のために KEK-Bが長期停止する見込みとなった。このためKEKの ヘリウム冷凍機も長期停止状態になり、KEKにおける実 証試験は暫く不可能な状況に陥った。

このため、実証試験を行うこれまでの方針を変更し、 2009年度はCバンド超伝導空洞(以下、Cバンド空洞)の性 能測定の準備を行うことにした。この空洞は小型で、大規 模な表面処理設備やヘリウム液化機が不要であるため、性 能測定が安価に行なうことができる。これはSPring-8にお いては超伝導空洞の表面処理や性能測定などの実績がなか ったため、Cバンド空洞の性能測定を通して超伝導高周波 技術のノウハウをSPring-8に定着させるのがこの目的であ る。これと並行して、高精度移相器の電源の試験を行った。

2-4-1 Cバンド空洞の表面処理と性能測定準備

1980年ごろにKEKで超伝導空洞の開発研究に使用された Cバンド空洞(単一空洞)1台を借用した。この空洞は長期 間大気圧状態に置かれ表面状態が悪化しており、化学研磨 (表面処理)を行う必要があった。化学研磨はフッ化水素酸 と硝酸の混合液を使用するため、テフロン容器や作業安全 のための防護衣などを準備した。表面処理後、短時間の間 に真空排気をする必要があるので、真空排気設備を準備し た。性能測定のために空洞を極低温に保つためのクライオ スタットやヘリウム液面計、高周波特性を測定するための RF増幅器やRF部品を準備した。2009年度は準備のみとし、 表面処理や性能測定は2010年度に行う予定である。

2-4-2 高精度移相器用電源の性能測定

高精度移相器は空洞に入力される大電力RF(300 kW CW)の位相を高速(DC~1 kHz)かつ高精度で調整する。 この移相器の駆動電源(図8)を移相器に相当する模擬負



図8 高精度移相器用電源。中央3台が電源、右側は模擬負荷

荷(50 μH)に接続して周波数特性測定を測定した結果、 周波数範囲DC~3 kHzでほぼ平坦な周波数特性(図9)が 得られた。しかし、使用条件によって平坦特性から外れた り不安定な動作をしたりする場合が見られ、改善が必要で あることが判明した。また、MOS FETスイッチ基板の故 障が発生したことから、スイッチングのタイミング等の改 良が必要である。

(中里、藤田)

参考文献

 H.Dewa et. al.: Proc. of FEL2009, Liverpool, UK, (2009) 678-681.

> 加速器部門 加速器第1グループ 花木 博文



図9 高精度移相器用電源の周波数特性の例。入力振動の振幅を一定にして周波数掃引した場合の出力電流の(a)振幅と(b)位相。 再現性確認のために同じ測定を3回繰り返した

3. 加速器第2グループ

3-1 ブースターシンクロトロンの省電力運転

トップアップ運転時の蓄積リングへのビーム入射は20秒 ~1分間隔で行われる。ブースターシンクロトロンでは使 用電力の削減を目的とし、蓄積リングへのビーム入射時以 外には電磁石の1~8 GeVパターン励磁を停止する運転方 法(間欠運転)の実現を目指してきた。間欠運転の実施に より、トップアップ運転時のブースターでの使用電力量は 従来の約1/5と大幅に削減できることが期待できる。ただ し、間欠運転をユーザー運転に適用するには次のような問 題をクリアする必要があった。

加速器調整運転時や100 mAまでの蓄積電流の積み上げ 入射時の連続運転からトップアップ運転時の間欠運転へモ ード変更することにより、電磁石の通電時間が変わり、電 磁石のコイル温度や電磁石電源の内部温度が変化する。そ の影響で励磁電流が変動し四極電磁石の収束力によって決 まるベータトロンチューン値が変化する。蓄積リングでの 高いバンチ純度を達成するために、ブースターではベータ トロンチューンにあわせた周波数の高周波を用いて不要な バンチの除去(RFKOによる)を行っており、ベータトロ ンチューンの変動はRFKOの効率を低下させ、バンチ純度 を悪化させてしまう。従って、これまで間欠運転は高いバ ンチ純度を必要とするフィリングには適用できなかった。

そこで、2008年度に連続・間欠の運転形態に影響される ことなく励磁電流を安定化する対策の一つとして、電磁 石・電磁石電源系の冷却水温度を一定に保つ冷却設備温度 調整システムを導入した。冷却塔で熱除去を行う二次冷却 系の熱交換器の流入量とバイパス流量を制御して、電磁 石・電磁石電源(一次系)の冷却水温度を一定に保つシステ ムである。これにより、連続/間欠運転の切り替えによる 偏向電磁石、四極電磁石の励磁電流値の変化量はシステム 導入前と比較して半分以下となることが確認されている。

2009年度は、冷却水温度調整システムのフィードバック 用パラメーターを最適化し、マシンスタディで間欠運転時 のバンチ純度の変化を観測した。その結果、約30時間のス タディの間、全くバンチ純度の悪化が生じないことが確認 され、孤立バンチを有するフィリングパターンにおいても 間欠運転が適用可能と判断した。図1に間欠運転を開始し た2009年9月から2010年2月までのユーザー運転時のバン チ不純度(メインバンチに対する不要なバンチの電子数の 割合)の変化の様子を示す。赤が孤立バンチの前方、緑が 後方の不純度を示す。段差状に不純度が変化しているのは フィリングパターンの変更でメインバンチの電子数が変化 したため、計数率が変化した事によるものである。この期 間、バンチ純度の悪化は全く生じていないことがわかる。 間欠運転適用前後の同一月の電力比較のため図2に偏向電 磁石電源と四極電磁石電源の10月の電力量(1時間当たり の平均値)の変化の様子を示す。間欠運転を適用していな い2008年を青線、適用後の2009年を赤線で示す。2009年の 電力量の最大値とスパイク状の上昇はビーム調整やビーム 積み上げ入射を行う際の連続運転によるものであり、間欠 運転の適用時には最大で約1/6まで低下していることがわ かる。以上の結果より、ブースターではユーザー運転中の バンチ純度を悪化させることなく省電力運転を行う事が可 能となり、1ヶ月間の平均使用電力は1/2~1/3程度に削減 できるようになった。

(青木)





図2 連続・間欠運転切り替えによる電磁石電源の使用電力量の変化 [左:偏向電磁石電源 右:四極電磁石電源]

3-2 RFKOシステムの二重化

蓄積リングでの高いバンチ純度を維持するために、バン チ純化を行っているRFKOシステムを二重化した。既存の RFKOシステムとは別系統の第2システムを稼動させビー ム純化を二重に行うことにより、機器の故障等によるバン チ純度悪化の事例を減少させるとともに、ユーザー運転を 中断することなく機器の修理を可能とする事が目的であ る。第2システムでは不純バンチ除去の高効率化と高周波 アンプの低出力化のため、垂直方向へのビームのキックに 特化したRFKO用キッカー・ストリップライン電極を設 計・製作した。長さ1 mの上下2 電極タイプとし、電極間 隔を30 mmとした。これにより従来と同等なキック力が 1/4程度の出力で得られるようになり、コンパクトで安価 な高周波アンプを採用することが可能となった。また、故 障発生時の交換も容易になった。図3にRFKO第2システ ムに用いるトンネル内のRFKO第2セクションの機器配置 図を示す。第2システムは出射部の上流側に配置される。 なお、従来のRFKO第1システムは高周波加速空洞上流部 に配置されている。

マシンスタディにて、RFKO第2システムの単独運用、 さらに第1、第2システムの同時運用を行ってもバンチ純 度の悪化が生じないことを確認したうで、9月のユーザー 運転より二重化したシステムの運用を開始した。これまで に2回第1システムがダウンしたが、バンチ純度は悪化し ていない。二重化のアドバンテージが確認される結果とな った。





今後の計画として、チューンの変化に追随してRFKOの 周波数を変えることができるシステムの導入を検討中であ る。これは蓄積リングで使用しているバンチ・バイ・バン チ・フィードバックシステムの技術を適用して実現する。 チューンの変化に追随してRFKOの周波数を変えることで バンチ純化の効率を向上させることができる。今後はスタ ディの結果を基にRFKO第2システムにてRFKO周波数フ ィードバックシステムの構築を行う予定である。

(青木)

3-3 チューナーコントローラーの更新

ブースターシンクロトロンでは以前から高周波加速空洞 の電力反射異常が2~3日に1度の頻度で発生しており、 空洞のパワーが復旧するまでの約15分程度は蓄積リングへ のトップアップ入射を中断しなければならなかった。この 電力反射異常の発生頻度を下げることができるか調べるた めに、異常調査を行った。その結果、異常発生のある割合 (5回に1回あるいはそれ以下)は、空洞の共振周波数を 維持するための可動チューナー用コントローラーの異常動 作によるものと確認された。

図4左に可動チューナー用コントローラーの異常動作に よる場合の空洞反射発生時の検出位相差と反射電力の変化 を示す。RFの位相ドリフトに対しチューナーが逆方向に 動いてしまうために反射過多が起きている。つまり位相の ドリフト(青線)に対して、フィードバックがかかるので はなく、約900 msの間にむしろ位相が積極的にずらされ ている。

その他の場合の異常では図4右のように20 µs以下の一瞬 のうちに反射電力が増加する傾向にあり、空洞内の放電 (マルチパクティング)によるものであろうと考えられる。

こういった詳細な調査を受け、PLCベースの新たなチュ ーナーコントローラーの製作を行った。新規チューナーコ ントローラーでは従来のコントローラーの入出力端子がそ のまま使用可能であり、かつ同等の機能を有することを基 本設計方針とした。またPLCベースであるため、納品後も ソフトウェアの変更が可能であり、機能に柔軟性がある。 さらに、以下のような新規機能の追加を行い操作性の向上 を図った。

- (1) チューナーの移動速度が位相差に応じた関数となる よう変更可能。位相差が大きい時は移動速度を速く し、0度付近ではゆっくりとする。
- (2) 5 連空洞の各セルのチューナー位置が個別に制御可 能とする。セル毎のパワーバランスを調整可能とする。
- (3) より多くの遠隔操作・データ取得を行うため、FL-Netを介して遠隔機能を拡充できるものとする。また、現状でD-subで行っている通信全てをFL-Netでも可能とする。
- (4) フロントパネルをタッチパネルとし、視認性と操作性を向上させる。

(5) ローパスフィルタをデジタルフィルタに置き換える。 2009年度中に試作機を1台製作し動作試験を行った。テ スト導入後、ソフトウェアの改良を重ね、実運転に導入され た。現在まで問題なく動作し、上述のような異常動作に起因 するトラブルは今のところ発生していない。2010年度に量 産機を製作し8台全数のリプレースを行う予定である。 (渡部/青木)

3-4 SSBT系偏向および四極電磁石電源の更新

SSBT系の偏向電磁石電源と四極電磁石電源を全数新規 のものに入れ替えた。劣化が著しく故障頻度が高いので、 長期の停止につながる重大な故障を起こす可能性があった こと、メンテナンス性が悪いこと、出力変動が大きいなど の問題があったためである。また、電源制御用ボードが生 産中止となり故障時に対応がとれない可能性があり、また、



図4 反射と位相 [横軸は各サンプリングがわかる程度まで拡大してあるので注意]

		偏向電磁石電源	四極電磁石電源	電源総数
てわ共う曲	SSBT1 電源室	2	10	31
入れ皆ん削	SSBT2 電源室	4	15	
てわ共う公	SSBT1 電源室	3(2+予備1)	13 (10+調整 2+予備 1)	4.4
八和音ん彼	SSBT1 電源室	5(4+予備1)	23 (15+調整 7+予備 1)	44

表1 入れ替え前後の電磁石電源の台数

このボードは製造会社独自の規格のボードであるため、メ ンテナンス性が非常に悪いものであったことも理由であ る。入れ替え前後の電源の台数を表1にまとめた。

主な変更点は以下の通りである。1)外形寸法のコンパ クト化、2)恒温器のラックへの組み込み、3)整流方式 の変更、4)冷却方式の変更、5)電源制御用ボードの変 更、6)定格の統一、7)直列励磁四極電磁石に対する個 別調整用電源の追加、8)予備電源の追加。

旧システムの偏向、四極電磁石電源システムのうち、 SSBT2 電源室分について図5(上)に示す。電源は19イ ンチラックに収納されており、右側の6列が偏向電磁石電 源であり、1電源で1~2ラックを占有していた。左側の 8列が四極電磁石電源であり、2電源で1ラックを占有し ていた。冷却方式は全て水冷なので、全ラックに冷却配管 が設置されていた。旧システムでは予備電源が無かったた め、電源が故障した場合には修理の間ビーム運転ができな かった。また、電源定格が個々に異なっていたこともメン テナンス性を悪くしていた。

新システムでは偏向電磁石電源は1つの定格に統一し、

四極電磁石電源は4つの定格に統一した。故障時のビーム 運転停止時間を短くするため、偏向、四極電磁石電源の最 大定格に合わせた予備電源を2箇所の電源室に配備するた めに各1台、合計4台製作した。さらに、旧システムでは 多数の四極電磁石電源において1電源で複数の四極電磁石 を直列励磁していたので、四極電磁石個別の調整ができな かった。そこで、調整用電源を新たに9台追加した。

新システムのうち、SSBT2 電源室分について図5(下) に示す。旧システムと同じスペースを使用し電源台数を増 設するため、電源寸法をコンパクトにして偏向電磁石電源 では1電源で1ラック、四極電磁石電源では4~5電源で 1ラックとした。整流方式をトランジスタドロッパからス イッチングに変えたので変換効率が向上した。四極電磁石 電源については故障のリスクの低い強制空冷方式とし、冷 却配管を全て撤去した。旧システムでは電源の出力精度を 決めるフィードバック用電流検出器のバーデン抵抗の周囲 温度を安定化するため、電源背面側に別途用意した恒温器 内に収納していた。新システムではこれらの機器も列盤内 に収納することができた(図5、下)。バーデン抵抗を収納



図5 SSBT2 電源室の電磁石電源列盤。左が四極電磁石電源、右が偏向電磁石電源 を示す。上が旧システム、下が新システムである。青実線が増設した調整用 電源、青点線が予備電源を示す。黄色矢印で示したラックにバーデン抵抗と 制御用機器が設置されており、ラック全体が温度制御されている

	Temp.	0.2% proof stress	Tensile strength	Elongation
		(N/mm^2)	(N/mm^2)	(%)
A5052-EBM	RT	352	470	0.7
A2219-T852	RT	339	439	8.7
A5052-EBM	150°C	307	444	1.3
A2219-T852	150°C	301	339	18.0

表2 A5052-EBMとA2219-T852の機械強度

したラックはラック専用温度コントローラーを取り付けて 温度の安定化を図っている。

電源制御用ボードは発売中止品である MTC ボードか ら光伝送ボードに置き換えた。光伝送ボードは電磁石電源 をはじめ、その他の機器の制御にも多く適用されており、 故障時には速やかに交換可能である。制御用機器も列盤内 に収納することができた。システムをコンパクトにできた ため、列盤にはさらに機器を設置可能である。将来計画を 含めた、今後の SSBT 系の高度化にも十分対応可能である。 (深見)

3-5 大型アルミニウムフランジ

蓄積リング真空系ではアルミ製ICFフランジを大量に使 用している。フランジ素材としてアルミニウムA2219-T852を使用し、更にシールエッジ部にイオンプレーティ ングを施すという工程が必要なために入手性が良くない。 そこで、シールエッジ部を電子ビーム照射により改質した アルミフランジ(以下、EBMフランジ)の使用可能性を 検討した^[1]。

EBMフランジは、フランジ素材にA5052を使用する。 素材のシールを形成する部分に電子ビーム溶接で銅を溶か し込み、材料を改質する。その後、機械加工でシールエッ ジを加工しフランジを製作する。

ICF375EBMフランジを試作し、フランジ締結の繰り返 しを10回、150 ℃、1時間保持のベーキングを3回実施す る耐久試験を行った。シール性能と耐久試験前後のシール エッジ部の形状を投影機で調査した。結果、形状変化など の劣化は認められず、Heリーク量は1×10⁻¹¹ Pa・m³/sec 以下で問題なかった。

更に電子ビーム改質部 (A5052-EBM)の成分分析、機械 強度、クリープ強度を調査した。改質部は銅が約20 wt% と多く含まれて、デンドライト組織となっていた。硬さは 約180 Hvであり、従来のA2219-T852製フランジ(約137 Hv) に比べ硬い。機械強度測定結果を表2に、クリープ試験結 果を図6に従来フランジと比較して示す。EBMフランジは 強度が高いが、伸びが小さく、鋳造品に似ている。クリー プ強度は従来フランジより強い。

EBMフランジは、従来フランジ相当の強度を有することが確認できた。今後、スクラッチ試験、耐食性試験など



図6 A5052-EBMとA2219-T852の150 °Cにおけるクリープ強度

を行って、更に検討を進める予定である。

(大石)

3-6 蓄積ビームによるゲート弁の発熱機構の調査

SPring-8蓄積リングでは、種々のフィリングパターンで の運転モードが採用されている。運転モードに対する制限 は、主にゲートバルブのRFシールドの発熱である。RFシ ールドの材料であるベリリウム銅のクリープを考慮し、ゲ ートバルブの温度が100 ℃以下となるような運転モードに 制限している。しかし、今後、バンチ電流の増大、短パル ス電子ビーム運転などが検討されており、それらの運転条 件に対応できるように、ゲートバルブの温度上昇を抑える 必要がある。そこで、ゲートバルブの発熱について調査を 行った^[2]。

まず、RFシールドの発熱を抑えるように、ベリリウム 銅に電気伝導率の大きな銀メッキを施したゲートバルブを 蓄積リングに据え付け、温度を測定したが、差異はほとん どなく、銀メッキの効果は確認できなかった。

そこで、ゲートバルブのRFシールドの発熱が外部に放 熱されるか、ベンチテストで試験を行った。図7にゲート バルブの断面構造(ゲート「開」状態)を示す。両端の ICF152フランジ(1)に、SUS製の部品(2)をネジで固定し ている。一方、ベリリウム銅製のRFシールド(3)は、 SUS製の部品(4)と(5)に挟まれて固定されている。ゲー トが「開」状態ではカム機構で部品(5)は部品(2)に押し つけられる。ゲートが「閉」では(2)と(5)は離れる。ここ で懸念されたのは、(2)と(5)の接触熱抵抗である。

片側のフランジ部にヒータを取り付け、(2)と(5)を離 した状態で(2)を約55 ℃に加熱し、その後(2)と(5)を接 触させた。接触させた時間からの(2)と(4)の温度変化を 測定し、その結果から(2)と(4)の接触熱抵抗を計算した。





図8 ゲート弁内部の温度変化[(2)に(5)を接触させてからの(2)と(4)の温度変化を示す]

実験結果を図8の黒マークで示す。図8の温度変化から計 算された接触熱抵抗は31.3K/Wであった。部品の熱抵抗は 1.9 K/Wであり接触熱抵抗に比べ十分小さい。この結果か ら、接触熱抵抗が非常に大きいため熱が外部に逃げず、 RFシールドが温度上昇することが原因であることがわか った。

なお、(2)と(5)の部品の接触を良く改造したものをテ ストした結果(図9の赤)、接触熱抵抗は0.9~1.4 K/Wと 1/20に改善することができ、また、これを蓄積リングに入 れて温度を測定したところ、最大10℃の温度上昇に抑える ことができた。

SPring-8蓄積のゲートバルブは、RFシールドからの熱 放出が悪いことが発熱原因であることがわかった。この結 果を反映し、新型のバルブを製作している。

(大石)

3-6 カップラー・エージング専用空洞

SPring-8蓄積リング及びブースターシンクロトロンでは 508.58 MHzで共振する定在波型空洞を用いてビーム加速 を行っており、これらの空洞へ最大で300 kWの高周波電 力を投入するために、高周波入力カップラーと呼ばれる特 殊アンテナを使用する。最大300 kWの大電力まで安定し た運転を行うには、空洞実機に取付ける前にカップラー単 体の大電力透過試験によるエージング(慣らし運転)を行 い、性能確認をしなければならない。このエージングを効 率よく行えるようにするため、高エネルギー加速器研究機 構で用いられた手法^[3]を参考にしてエージング専用の空 洞を開発した(図9)。

この空洞は直径146 mm、全長427 mmのコンパクトな 円筒型無酸素銅製で、2台のカップラーを同時に空洞へ取 り付けて大電力透過試験(エージング)を行うことができ る。上流側カップラーから入力された高周波は、カップラ ー先端にあるループで空洞内部に接合したスタブと呼ばれ



図9 組立後の高周波入力カップラーエージング専用空洞

る突起物と磁気結合を行い、下流側カップラーへ伝達され る。カップラーと空洞は強く結合しているため、空洞透過 時の電力損失や反射電力は小さく、効率の良い空洞となっ ている。空洞にはチューナーを設けており、カップラーの 製作誤差や空洞への組付け状態に起因する周波数ずれを補 正し、空洞共振を最適状態に保つことができるようになっ ている。

製作した空洞は、最大定格のエージングに十分な300 kW 透過試験に成功した。また、空洞からの放射線漏洩は規制 値より小さく、専用シールを必要としない。これにより取 扱が容易となるため、カップラー大電力試験(エージング) の効率化に寄与する。

(恵郷)

参考文献

- [1] M. Oishi, et al.: J. Vac. Soc. Jpn. **53** (2010) 140.
- [2] 大石、他、第6回加速器学会年会(東海村)、2009年8 月、p.1008.
- [3] F. Naito, et al.: Proc. of EPAC96, Barcelona, Spain (1996) 2014.

加速器部門 加速器第2グループ 米原 博人 佐々木 茂樹