

トピックス:「SPring-8 30 m 長直線部ビームライン」

蓄積リングの改造とビーム性能

大熊 春夫, 米原 博人

(株)高輝度光科学研究センター 放射光研究所 加速器部門*

Upgrade of SPring-8 Storage Ring with Magnet-Free Long Straight Sections and It's Beam Performance

Haruo OHKUMA and Hiroto YONEHARA

Accelerator Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute, SPring-8

The upgraded SPring-8 storage ring with four magnet-free long straight sections was realized for installing a long undulator during the summer shutdown of 2000. Magnets were rearranged and new designed vacuum chambers were installed at the long straight sections. The beam commissioning of the phase-2 lattice was successfully completed with the achievement of target specifications of beam performance.

1. はじめに

SPring-8 蓄積リングは1997年3月に運転を開始したエネルギー8 GeV, 周長1436 mの第3世代放射光専用施設である。1997年秋からは、偏向電磁石あるいは直線部に設置した挿入光源から発生した放射光をユーザーに供給している。

蓄積リングの基本ラティス構造はChasman-Green (CG)であり、一周48セルで構成されている。この48セルの内、リングの1/4周(11セル)毎の4箇所対称位置に4極電磁石と6極電磁石のみを設置し、通常のCGセルから偏向電磁石が取り除かれた長直線セルが、設計の段階から導入されていた¹⁾。通常のCGセルの直線部は4極電磁石の磁極間距離が6.65 mであり、磁石長4.5 m程度の挿入光源が設置されている。これに対して、長直線セルは電磁石の再配置を行うことにより、約30 mの電磁石フリーの長直線部が実現でき、磁石長25 m程度の挿入光源が設置可能となるように考えられていた。この計画に従って建設された蓄積リングのラティスをPhase-1 ラティスと呼ぶ。このラティスは、低エミッタンスで安定な高品位電子ビームからの放射光が短期間で実験に利用できるように蓄積リングの立ち上げを短期間でスムーズに行うために、ビーム動力学の観点から対称性が高く、安定なオプティク

スを実現できるものである。蓄積リングの運転開始から2000年6月まではこの状態で運転が続けられてきたが、2000年の夏期運転停止期間に4箇所の長直線部の電磁石を取り除き、両端に4極電磁石を集中配置し、電磁石フリー長直線部を実現するための改造工事が行われた。

本稿では、電磁石フリー長直線部導入のためのPhase-2 ラティスの検討、電磁石の再配置、新規製作の真空チェンバの設置などの蓄積リングの改造、電磁石フリー長直線部を導入したPhase-2 ラティスの蓄積リングのビーム調整、性能について述べる。

2. Phase-2 ラティス²⁾

2.1 Phase-2 ラティスの検討

Phase-1 ラティスによるユーザー運転は約3年半に渡り順調に続けられてきた。Phase-1 ラティスでは、1997年のSPring-8蓄積リングの運転開始から最初の約2年3ヶ月は挿入光源設置直線部でのベータatron関数が交互に変わる24回対称のHybrid Opticsが運転に用いられてきた。その後、HHLV (High Horizontal and Low Vertical betatron functions) Opticsと呼ばれる「全ての挿入光源設置のための直線部でのベータatron関数を等しくしたOptics」が用いられるようになった。Figure 1に Hybrid

* (株)高輝度光科学研究センター 放射光研究所 加速器部門 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1
TEL: 0791-58-0858 FAX: 0791-58-0850 E-mail: ohkuma@spring8.or.jp

Optics および HHLV Optics を示す。HHLV Optics は、それ以前の Hybrid Optics に比べて、挿入光源の輝度という面で優位であるだけでなく、ビーム寿命に関する運動量アクセプタンスが大きいという利点がある。Phase-2 ラティスの設計の当たっては、HHLV Optics の特徴を引き継がれるように、通常の挿入光源設置直線部のベータatron関数等に電磁石フリー長直線部の導入前後で大きな変更がないように考慮された。

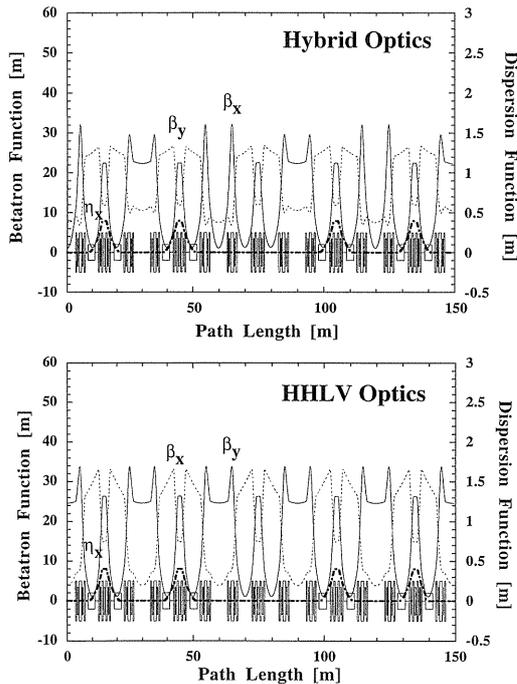


Figure 1. Hybrid optics and HHLV optics for the original version of lattice (phase-1 lattice).

改造前の Phase-1 ラティスは 4 箇所の長直線部の偏向電磁石が取り除かれているものの、48 回対称のラティス構造と看做することができる。それに対して、Phase-2 ラティスでは完全な 4 回対称となってしまう。対称性が高く周期構造が単純であれば、ラティスの最適化は数少ないパラメータで比較的簡単に行うことができるが、対称性の低い複雑な周期構造になると、問題はとたんに難しくなる。低エミッタンスリングで最も重要な最適化の対称となるのは、強い非線形磁場を持つ 6 極電磁石である。6 極電磁石は、運動量分布を持つ周回電子の運動量の違いによる収束力のズレを補正 (クロマチシティ補正) し、電子ビームを安定に周回させるという役割を担っている。しかしながら、平衡軌道からの変位の 2 乗に比例する非線形磁場を持ち込み、平衡軌道を中心とした電子のベータatron振動の安定領域を振動振幅の小さな範囲に制限してしまう。このダイナミックアパチャーの減少をどのように緩和するかで、達成可能な自然エミッタンスやビーム寿命等が決まる。

通常の CG セルで取りうるベータatron関数の値にある程度の自由度を持たすことが出来るように、特に HHLV Optics の特徴を引き継ぐことが出来るように長直線部両端の 4 極電磁石の台数、配置を決定した。また、長直線部のベータatron関数のピーク値があまり大きな値とならないようにすることも考慮された。このような観点から決定された Phase-2 ラティスは長直線部両端に各々 6 台 (6 ファミリー) の 4 極電磁石を集中配置したものとなった。Figure 2 に長直線部の磁石配列および真空チェンバ等の配置の改造前と改造後の図を示す。両端の 6 台の 4 極電磁石の集中設置部は拡大した図も示した。

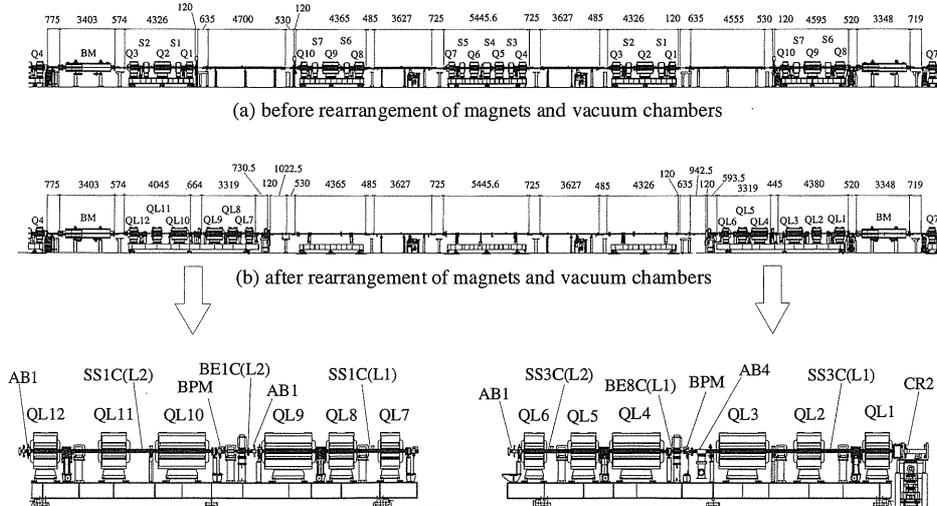


Figure 2. A layout of magnets and vacuum chambers at the long straight section. (a): before rearrangement of magnets. (b) after rearrangement of magnets and installation of new designed vacuum chambers to realize magnet-free long straight section.

2.2 6極電磁石の周期性

当初、6ファミリーの4極電磁石のみで長尺挿入光源設置可能なフリースペースを有したPhase-2ラティスのオプティックスを実現することを検討した。Figure 3にこ

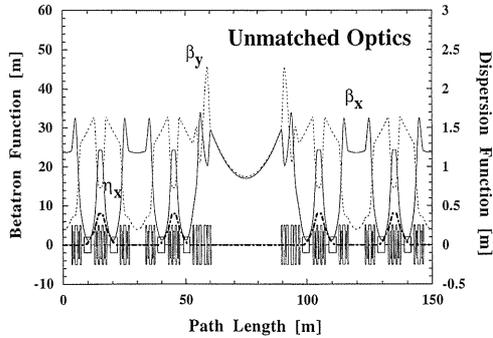


Figure 3. Unmatched optics for an upgraded lattice with magnet-free long straight sections (phase-2 lattice).

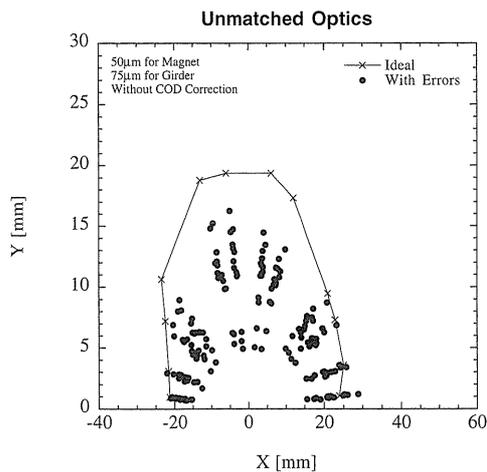


Figure 4. Dynamic aperture of unmatched optics for phase-2 lattice with random errors of magnet alignments.

のオプティックスの例 (Unmatched Optics) を示す。

Figure 4に示すように、対称性の減少によりこのままではダイナミックアパーチャが制限されることが予測された。Figure 4は運動量偏差のない粒子に対して計算したものであるが、電磁石にランダムエラーを与えた場合に垂直方向のアパーチャが減少するのは当然としても、水平方向のアパーチャがエラーがない場合でもかなり小さいのが分かるであろう。数値シミュレーションによる検討の結果、大きな非線形効果を持つ6極電磁石に対する周期性を回復すれば、大振幅でのベータトロン振動がある程度安定化でき、ダイナミックアパーチャが回復されることが確認された。6極電磁石の周期性の回復は、周期性を乱している長直線部のベータトロン振動の位相進みを特定の値 (2π の整数倍) にすることにより実現できる。このような条件にすると、フリー長直線部がないことと等価になり³⁾、設計エネルギーの運動量を持つ粒子に対しては、通常のCGセルが連続して繋がっている場合と同じ安定性が得られ、6極電磁石に対する対称性は36回に回復される。具体的には、目的としている直線部の上下流セルの再配列をしない4極電磁石を通常CGセルの既存電源ファミリーから独立させ、これらを用いて長直線部前後でマッチングを取る。Figure 5は長直線部の1つである5, 6, 7セルの電磁石と電磁石電源の結線を示したものである。セル5のQ1~Q3, セル7のQ8~Q10が該当する4極電磁石であり、これらは長直線部に対して対称に直列接続されている。Figure 6にマッチングを取ったオプティックスの例 (Matched Optics) を示す。

また、次に述べるように運動量のずれた粒子に対する局所クロマチシテイ補正のために、Fig. 5に示す上下流セルの偏向電磁石間の6極電磁石S3~S5も同様に独立したファミリーとなるようにした。さらに、上流セルのS1, S2と下流セルのS6, S7も共鳴励起を抑制し運動量偏差を持った粒子に対する安定性を向上させるために独立したファミリーとすることにした。

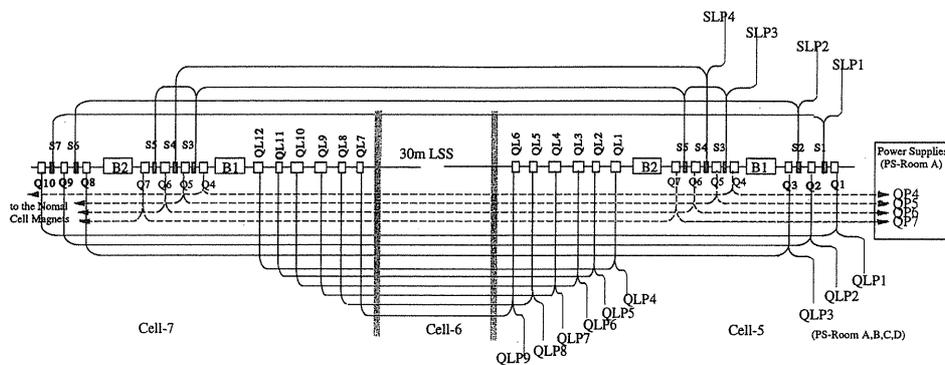


Figure 5. Cable connections of quadrupole and sextupole magnets in the long straight section for phase-2 lattice. Power supplies of the sextet quadrupole magnets at both side of magnet-free section (between B2 of Cell 5 and B1 of Cell7) are operated individually from each magnet families. Power supplies of the magnets in the three cells are tuned separately except for Q4, Q5, Q6 and Q7, which are connected to the original magnet-families respectively.

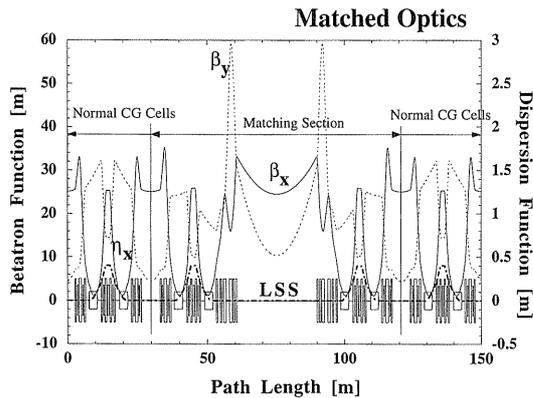


Figure 6. Matched optics for phase-2 lattice.

このように上下流セルを含めてマッチングセクションとして使うことにより、後に示すようにダイナミックアパチャーを回復することが出来る。

2.3 運動量偏差を持った粒子に対する補正

6極電磁石の周期性の回復は、厳密には設計エネルギーの運動量を持った粒子にしか成立しない。長直線部両端のマッチングセクションには2台の偏向電磁石があるため、長直線部でのクロマチシティが大きく、運動量の僅かな違いで上記のマッチング条件は簡単に破れてしまう。設計エネルギーでは大きくなったダイナミックアパチャーが、0.2%程度の運動量偏差で劇的に小さくなってしまふ。特に、水平のアパチャーの減少が際だっている。そこで、通常のCGセルに設置されている6極電磁石の励磁量に比べて非常に弱く偏向電磁石間の6極電磁石(S3~S5)を励磁することにより、マッチングセクションのクロマチシティを補正することを考えた。弱い摂動的な6極電磁石を用いれば、周期性の回復と局所クロマチシティ補正を適当にバランスさせることが可能と考えたからである。

Figure 7にこの考えに基づき運動量偏差-2%の粒子に対して、水平の発散6極電磁石SD (Fig. 5のS3, S5)を励磁しないで、収束6極電磁石SF (Fig. 5のS4)の励磁量を変えたときのダイナミックアパチャーの計算結果を示す。SFの励磁量を増やすと局所クロマチシティが補正され、ダイナミックアパチャーが回復していく様子が分かる。

上下流セルのハーモニク6極電磁石 (Fig. 5のS1, S2, S6, S7)は局所ハーモニク補正のために使用される。Figure 8は局所クロマチシティ補正および局所ハーモニク補正を行い、運動量偏差のない粒子に対して、電磁石にランダムエラーを与えた場合のダイナミックアパチャーを計算したものである。ランダムエラーによりアパチャーは減少するが、Fig. 4に示したマッチングを取らない場合に比べて十分なアパチャーが確保されていることが分かる。

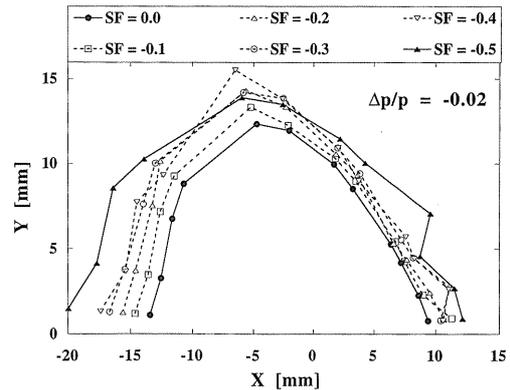


Figure 7. Recovering of dynamic apertures for off-momentum particles. As the horizontal chromaticity becomes corrected, the dynamic aperture becomes larger.

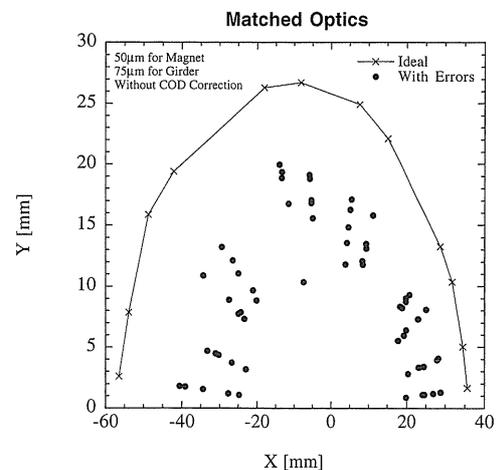


Figure 8. Dynamic aperture of matched optics for phase-2 lattice with random errors of magnet alignments.

3. 電磁石の再配置

3.1 電磁石、共通架台

改造工事のために撤去した電磁石は長直線部1箇所あたり16台の4極電磁石と11台の6極電磁石、蓄積リング全周では4極電磁石64台、6極電磁石44台であった。この内、4極電磁石16台、6極電磁石は44台全て(長直線部1箇所あたり、4極電磁石4台、6極電磁石11台)が不要となった。また、補正電磁石64台、スキュー4極電磁石4台も撤去された。撤去された一部の4極電磁石は電磁石フリーの長直線部の両端に6台ずつ(蓄積リング全周で総数48台)が再配置された。補正電磁石36台、スキュー電磁石8台の再設置も行われた。当初の蓄積リングの据付、アライメントの際にも実施されたことであるが、一連の電磁石を1つの共通架台の上に設置し、共通架台内の電磁石アライメントを精密に行うことにより、蓄積リング全体の据付精度を効果的に向上させることができる⁴⁾。今

回、再配置を行った4極電磁石も両端に設置した共通架台上に設置した。共通架台は全長7.9 m (自重4.2トン) あり、6本の支持台で支える。支持台は床に埋設した金具に固定するが、6本のうち4本は既存の金具に固定、残り2本は新規に埋設した金具に固定した。設計された共通架台に4極電磁石を乗せると、最大で70 μm 撓むことが推測され、この変位自体に問題はないが、床の振動によりこの撓みが振動することが懸念された。蓄積リングの床は、冷却水設備の水ポンプによると思われる29.5 Hz 近辺の振動があり、磁石を乗せた状態の共通架台の振動数もその近辺にあることが予測されたので、支持台の間に4個の振動防止用固定台を増設した。

この共通架台上の磁石のアライメントは25 μm 、架台間は100 μm 、架台のビーム進行方向位置精度500 μm 、水平・垂直軸周りの回転誤差250 μrad 、軌道軸周りの回転誤差200 μrad (いずれも r.m.s.) の据付精度で行った。

電磁石の再配列時には真空チェンバの撤去・設置も伴うため、磁石半割、上半分の吊り上げ・取り外し、真空チェンバ撤去、上半分戻し・組み立て、磁石吊り上げ・移動などの工程を経た後、新設した共通架台上に、解体時とはほぼ逆の工程で4極電磁石を据付けた。これら各段階で望遠鏡・レーザーアライメントシステム・水準器などを使用し磁石の位置を確認する。このあたりの手順・精度等については今までに報告がなされているので参照して頂きたい^{5,6)}。蓄積リングの磁石は4分割された鉄芯をまとめている外枠をボルト締めにより組み上げている。放射光取出用真空チェンバを設置するため、Fig. 9 に示すようにヨークを横に逃がした構造をしている最も変形に弱いと考えられる4極電磁石 (fタイプ) を用いて励磁による変形量を測定した。定格励磁による磁極1つ当たり働く力は2.3トン程度と見積もられるので、磁石の自重2.8トンの吊り下げよりも大きな力が働いていることになる。fタイプ4台の測定結果は最大10 μm であったが、必ずしも測定した磁石に共通した変位ではなく、締め付けボルトの緩みに起因すると推測される事例もあり、このことが直接据え付け精度に顕著に現れるとは考えられない。ただし、今後調査を継続する必要があると考えている。

3.2 磁気遮蔽

電磁石の再配置によりできた長直線部のうち、ただちに挿入光源が設置されたのは1箇所だけであり、その他の3箇所には今回は挿入光源等は設置されなかった。この部分は電磁石が全くないフリースペースで、地磁気や他の機器からの漏れ磁場 (環境磁場) によるビーム軌道への影響は、長直線部の端で2~3 mm の変位となる。補正電磁石により補正可能な変位であるが、ビーム運転再開当初からビームが蓄積されるようにすること、ビームが蓄積されれば軌道補正は容易であることなどを考慮して、磁気遮蔽による磁場強度の減衰、取付方法の検討を行った。遮蔽厚

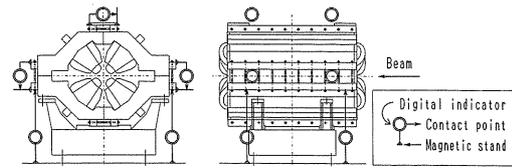


Figure 9. Structure of quadrupole magnet (f-type). The magnet yoke extends toward outside to allow the photon extraction duct.

さは軽微でも充分効果が期待できそうなので、実際には、磁気シールド材 (Fe系アモルファス箔、厚さ25 μm 、比透磁率45,000) を真空チェンバに3重に巻くことにした。

3.3 電磁石電源⁷⁾

磁石再配置に伴い1長直線部あたり4極電磁石電源 (定格出力580 A) 9台 (全周36台)、6極電磁石電源 (定格出力300 A) 4台 (全周16台) を新設し、各長直線部近くに設けられている電磁石電源室に設置した。これらの電磁石と電源の結線は Fig. 5 に示されている。各電源とも、リップル 2×10^{-5} 以下、24時間安定度 2×10^{-5} 以下を満足している。Matched Optics の局所クロマチシティの補正に用いる6極電磁石は、最大で定格値の20%程度の励磁量でしか用いないが、調整領域を最大限確保し Unmatched Optics も試みられるようにするために、これら電磁石電源は各電磁石の定格電流値を定格出力値とした。

通常 CG セルの4極電磁石や6極電磁石にシリーズに接続されている電源は、接続している電磁石の台数が、最大で25%減少するため、リップル低減等の電源性能の向上も兼ねてトランスなどの追加および再調整が行われた。

4. 真空チェンバ

4.1 新規製作した真空チェンバの配置

長直線部の電磁石の再配置に伴い、長直線部1箇所あたり3セル全長約90 m に渡る真空チェンバを大気状態に戻し、長直線部およびその上下流セルの一部のチェンバの撤去、再設置、新規製作のチェンバの設置が行われた。電磁石フリー長直線部の両端の共通架台上に設置された4極電磁石部には、新規に設計、製作された真空チェンバが4極電磁石と共に設置された。フリー長直線部の1箇所には全長約25 m の長尺アンジュレータが設置され、その他の3箇所には電磁石が撤去された後に改造前から使われていた真空チェンバのみが戻された (Fig. 2 参照)。

SPring-8 蓄積リングの真空チェンバは、材質として主にアルミニウム合金 (A6063-T5) を用いたアンテチェンバ構造を採用している。偏向電磁石部で発生する放射光をクロッチ (CR) とアブソーバ (AB) により局所的に吸収し、光脱離による多量の放出ガスを集中型 NEG ポンプとスパッタイオンポンプ (SIP) により排気する。また、通常の熱的放出ガスを排気するために直線部チェンバ

(SSC), 偏向電磁石部チェンバ (BMC) などの内部には分布型 NEG ポンプが, さらに BMC には分布型イオンポンプも組み込まれている。今回の改造に伴って新規に作成したチェンバも, 基本的には従来の考え方に基づいて設計, 製作が行われたが, スペースなどの制限から排気系の仕様などを変更せざるを得なかった。

通常の CG セルの 4 極, 6 極電磁石が設置されている共通架台部に用いられている SSC は 1 本のチェンバ (最長の SS3C で, 全長 5.7 m) で構成されているが, 今回は以下の理由で SSC を 2 本のチェンバに分けることとした。

- (1) 今回の 4 極電磁石 6 台を設置した共通架台部のチェンバを 1 本のチェンバで製作すると, 全長約 8 m となり, 製作精度の確保, 運搬, 取扱が困難である。また, 従来の SSC では, チェンバ端部の比較的, 支持装置に近いところに配置されていたアブソーバをチェンバの中間点に配置する必要がある, 支持装置の構造が複雑になる。
- (2) 従来の SSC のようにビーム位置モニタ (BPM) のボタン電極を直接 SSC に取り付けた場合, 固定点としなければならない BPM の位置に理想的に支持装置を配置することが難しく, 同様に固定点としなければならないアブソーバ部の支持装置との取り合いに良い解が見いだせない。

2 本に分けた SSC の間にはフランジ接続で分離したベローズ部チェンバ (BEC) を配置し, BPM 電極はこの BEC に取り付けることとした。端部に配置した BEC にも同様の BPM 電極が取り付けられている。蓄積リングで用いている従来の BPM 電極はアルミ合金製であるが, 今回用いた BPM は SUS, Ti の非磁性仕様のものである。長直線部上流部のチェンバ配置は上流から SS3C(L1)-BE8C(L1)-SS3C(L2)-BE8C(L2), 長直線部下流の配置は上流から BE1C(L1)-SS1C(L1)-BE1C(L2)-SS1C(L2) となる (Fig. 2 参照)。

4.2 アブソーバ, 排気系

上流セルの AB4 部の排気系は, スペースの関係から従来の通常 CG セルでは集中型 NEG ポンプと共に設置していた 60 L/s の SIP を設置しなかった。また, NEG ポンプは従来型の NEG モジュール 4 本を組み込んだもの (CO に対する実測排気速度 1460 L/s)⁸⁾ から小型なサエスゲッターズ社製の規格品 GP500 カートリッジタイプ (CO に対するカタログ値の排気速度 500 L/s) のものとした。SIP を設置しなくても良いであろうと判断した理由の 1 つは, 通常セルの AB4 部にある 60 L/s の SIP を停止しても顕著な圧力変化が見られなかったためである。

Phase-2 ラティスによるビーム運転再開初期の光脱離による多量の放出ガスを効果的に排気して, なるべく早くビーム寿命を回復させるために, 排気速度 250 L/s のターボ分子ポンプを 2 台タンデム接続して, 各長直線部上流セ

ルの SS3C(L1) 端部にある AB4 部の排気ポートに接続した。また, 29セルの長直線部上流部の偏向電磁石下流に設置されているクロッチアブソーバは今回の改造で偏向電磁石からの放射光取り出しの角度を変更せざるを得ないため, 新規に作成したクロッチアブソーバを取り付けた。ここにも同様のターボ分子ポンプ排気系を配置した。

4.3 圧力の変化

SPring-8 蓄積リングの真空チェンバは, チェンバの加速器収納部への据付の前に, 1 台 1 台のチェンバの真空性能の確認と溶接歪みの開放を目的として, 据付後の真空立ち上げをスムーズに行うためにプリベークングを実施している。今回, 新規製作したチェンバについても同様のプリベークングを行ったが, 蓄積リング建設時のプリベークングの時に比べて, 平均到達圧力が 1.6 倍程高かった。質量分析のデータには, 水のピークが高く出ており, プリベークングの不足が考えられる。また, 今回のチェンバ製作では建設時に行った Ar+O₂ 雰囲気中でチェンバを押し成型する手法が実施できず, 大気雰囲気中で押し成型し, 押し成型後にチェンバ内面を化学研磨する手法を用いたため, 内面の酸化層の状態が異なるために脱ガス特性が悪くなっている可能性もある。チェンバの据付後にもセル毎にベークングを行い, 真空立ち上げを実施した。据付後の到達圧力も建設時の実績と比較すると高いものが多かった。

ベース圧力に対する圧力増加を蓄積電流で規格化した値のビーム運転再開後の変化の例を Fig. 10 に示す。横軸の積分電流は電磁石フリー長直線部導入後のビーム運転再開時を起点としたものである。規格化増加圧力を $\Delta P/I$, 積分電流を D_i とすると $\Delta P/I = D_i^x$ ($x < 0$) と書くことが出来る。光脱離係数も同様の関数で表すことが出来, 減少勾配を示す x の値を比較することができる。Figure 10 では $x = -0.67 \sim -0.74$ であり, 一般に知られているアブソーバの材質である銅の光脱離係数の減少傾きとほぼ同様の値である⁹⁾。しかしながら, 質量分析の結果では放射光照射により CO と共に CH₄ が多く検出されている。これは, NEG カートリッジポンプのところに SIP を設置しなかったために CH₄ が排気出来ないためと考えられるが, CH₄ の起源については明らかでない。このため, AB4 等に設置したターボ分子ポンプは, 当初の考えでは初期の多量の脱ガスが収まった時に取り外す予定であったが, 冬期の運転停止までの約 4 ヶ月の連続運転となってしまった。今後, NEG の再活性化, 排気系の増強を考えるつもりである。Figure 10 には, 積分電流に対する蓄積電流とビーム寿命の積も同時に示している。ここでは詳しく述べないが, 1997 年の蓄積リング運転開始時のデータと比べると早いビーム寿命の増加が見られている。

5. ビーム調整

夏期運転停止が終了し, 2000 年 8 月末から「新たな加

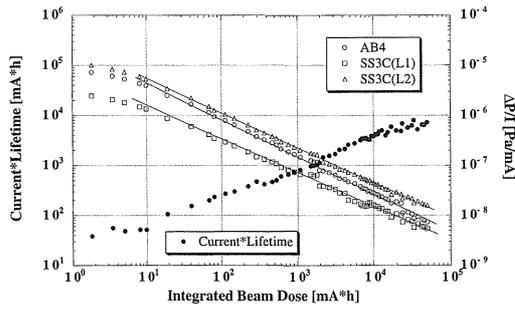


Figure 10. Pressure differences normalized by stored beam current at the long straight section versus the integrated beam dose from restart of storage ring operation.

速器になった」とも言える蓄積リングのビーム調整運転が始まった。ビーム調整の手順は1997年の蓄積リングの立ち上げ時の経験を生かして決められた。最初の入射は中心軌道に入射ビーム軌道を合わせる on-axis で行った。オプティックスは Matched Optics を用い、動作点は設定値で水平40.25, 垂直19.28とした。ビーム蓄積は比較的簡単に実現できた。ビーム調整初日から夜間は真空改善のために放射光照射による焼き出し運転を行った。圧力の許容上限値を 1×10^{-5} Pa とした時に可能な蓄積電流は1.2 mA 程度で、その時のビーム寿命は35時間程度であった。on-axis 入射で蓄積されたビームを用いて、設計したオプティックスに大きな問題が無いことを確認した後に、入射は通常の off-axis とした。

SPring-8 蓄積リングでは、COD 補正の基準となる軌道に「BPM オフセット」と呼ばれる中心軌道からの BPM のずれを差し引いたものを用いている。BPM オフセットは、位相進みが小さい Low Tune Optics (設計のチューンは水平17.36, 垂直14.42) と呼ばれるオプティックスを用いて、補正ダイポール電磁石をほとんど使わない状態でリングにビームを蓄積し測定された COD の解析から得られる。この手法は、位相の進みが小さい場合には隣り合った BPM はほぼ同じビーム位置を示すはずであり、COD のフーリエ成分には高い周波数成分はないはずであるという考えに基づいている。この手法については、参考文献¹⁰⁾に詳しく書かれているので参照して頂きたい。Phase-2 ラティスでの測定で得られた BPM オフセットは、r.m.s. 値で水平150 μm , 垂直250 μm であった。Phase-1 ラティスのときから用いている手法であるが、Phase-2 ラティスでもこの手法を使うことが出来るように Phase-2 ラティスに対応した Low Tune Optics が用意されていた。長直線部の BPM について、BPM 近傍の4極電磁石と適当な補正ダイポール電磁石を用いてビームの応答関数から直接測定 (beam-based measurement) した BPM の位置と上記の BPM オフセットの測定から得られたものを比較した結果、非常に良く一致している事が確認された。得られた BPM オフセットを用いて COD 補正を行った。

COD 補正は段階的に行われたが、最終的には水平、垂直とも COD の残差は数10 μm 程度になっていると推定している。

ビーム調整の開始時には垂直チューンの整数部を19としたが、精密な調整を続けても垂直方向のビームサイズが思ったように小さくならないために、整数部を18に下げた。ビーム調整に用いた Matched Optics は2.2で述べたように6極電磁石の周期性を36回に回復させたものであるが、4極電磁石で決まるベータトロン関数は4回対称である。この対称性の低さのためにベータトロン関数の歪みが生じやすくなっており、このベータトロン関数の歪みと結合して低次の共鳴が励起されやすくなっている。さらに、Phase-2 ラティスでは Phase-1 ラティスに比べて共鳴線の分布密度が高くなっている。そのため、動作点の選択は重要である。チューンサーベイを行った結果、入射時の振幅依存チューンシフトで水平チューンが大きく増加しても入射に影響がないように、また大振幅時に $\nu_x + \nu_y = 59$ の共鳴により垂直方向でビームが失われないように、さらに整数、半整数、 $3\nu_x = 121$ から十分離れていることを考慮し、動作点を ($\nu_x = 40.11, \nu_y = 18.36$) に設定した。その後、水平チューンが整数に近すぎるためにチューンの揺らぎによって軌道の安定性が失われるため、動作点を若干ずらし ($\nu_x = 40.15, \nu_y = 18.36$) に変更した。

通常 CG セルのハーモニック補正用6極電磁石は、主に入射効率が上がるように調整した。長直線部の局所ハーモニック補正のための6極電磁石を同様に調整し、最終的には約80%の入射効率が得られている。長直線部の局所クロマティシティ用の6極電磁石の調整も行ったが、精密な調整は時間が足らず完了することが出来なかった。

Table 1 に Phase-1 ラティスの Hybrid Optics, HHLV Optics と共に、得られた Phase-2 ラティスの Matched Optics のビーム性能に関するパラメータを示す。調整の結果、Phase-2 ラティスの性能は、概ね Phase-1 ラティスのものと変わらないものとする事が出来た。また、Unmatched Optics も試みたが、ビーム蓄積には大きな問題がなかったが、多くの共鳴線で蓄積ビームが失われるなど調整が難しく、今後、機会があれば詳細に調べてみたいと思っている。

ここまで述べたように、電磁石フリー長直線部を導入した Phase-2 ラティスのビーム調整はスムーズに進めることが出来た。しかしながら、いくつかの問題は残っている。長直線部の1箇所を設置した長尺アンジュレータのギャップを狭くすると、長直線部の垂直ベータトロン関数が大きいためにビーム寿命が30%程低下する減少が見られている。4. で述べたように、現状では長直線部に取り付けたターボ分子ポンプを取り外せない状況であり、真空の改善も不可欠であろう。圧力が高いことに関係していると思われる不安定性が見られており、電磁石フリー長直線部導入前に行っていた多パンチ運転時のビームフィリ

Table 1. Beam parameters of SPring-8 storage ring

	Designed value	Achieved value		
	Hybrid/HHLV/ 30 m-LSS	Phase-I Lattice		Phase-II Lattice New Optics with 30 m LSS's
		Hybrid	HHLV	
Energy	8 GeV	8 GeV	8 GeV	8 GeV
Circumference	1436 m	—	—	—
Number of bucket	2436	—	—	—
Revolution time	4.79 μ s	—	—	—
Symmetry	24/48/4	24	48	4
(β_x/β_y), at ID section		(24/10), 81/8)	25/4	(24.35/5.77)/ (23.42/14.44)
Current: single bunch	5 mA	16 mA		
multi bunch	100 mA	100 mA	100 mA	100 mA
Bunch length (FWHM)	36 ps	36 ps ⁵¹	32 ps ⁵²	—
Emittance	6.99/6.3/6.6 nmrad	6.8 \pm 0.5 nmrad ⁵³	6 nmrad ⁵³	5.9 nmrad ⁵³
Tunes (ν_x/ν_y)		51.16/16.36	43.16/21.36	40.15/18.35
Chromaticities (ξ_x/ξ_y): natural	(-115.9/-40.0)/ (-105.9/-51.2)/ (-90.3/-40.7)			
operation		3.2/3.9	7.0/4.0	7.0/6.0
Momentum acceptane	\sim 2% ⁵¹	1.3% ⁵¹	1.9% ⁵¹ (2.8% ⁵²)	2.0% ⁵²
Energy spread ($\Delta E/E$)	0.0011	0.0012	0.0011	0.0011
Coupling	less than 10%	\leq 0.06%	\leq 0.04%	\sim 0.06%
Lifetime: 100 mA (mult bunch)	24 hr	\sim 70 hr ⁵⁴	\sim 140 hr ⁵⁵	\sim 100 hr ⁵⁵
1 mA (single bunch)	—	\sim 5 hr ⁵¹	\sim 11 hr ⁵¹ (\sim 25 hr ⁵²)	\sim 22 hr ⁵²
COD: horizontal (rms)	—	<0.1 mm	<0.1 mm	<0.1 mm
vertical (rms)	—	<0.1 mm	<0.1 mm	<0.1 mm
Beam size at ID section: horizontal (rms)	—	400 μ m/86 μ m	390 μ m	380 μ m
vertical (rms)	—	6.7 μ m/6 μ m	3 μ m	4.5 μ m
Residual dispersion at non-dispersive section:				
horizontal (rms)	0	9.8 mm	7.0 mm	4.4 mm
vertical (rms)	0	2.7 mm	4.5 mm (1.1 mm ⁵⁶)	1.3 mm ⁵⁶
Orbit stability (tune harmonics)				
horizontal (standard deviation)	—	1.1 μ m	0.7 μ m	1.3 μ m
vertical (standard deviation)	—	0.7 μ m	0.35 μ m	0.35 μ m

⁵¹Vrf=12 MV ⁵²Vrf=16 MV ⁵³calculated by using designed β -function ⁵⁴2/3-filling, Vrf=12 MN ⁵⁵24/29-filling, Vrf=16 MV

⁵⁶with correction by 24 skew Q's

ングパターン (24/29-filling) が現状ではユーザー運転に使用できない状況である。セベラルバンチ運転時のフィリングパターンも以前に比べて選択の範囲を制限せざるを得ない状況である。

これらの状況を改善するために、今後も機会を捉えて調整を続けていく必要があると考えている。

謝辞

改造工事期間およびその前後を通じて、加速器部門に限らず、基幹チャンネルグループ、挿入光源グループ、施設管理部門、計画管理、安全管理室など全所的な協力のもとに、予定した期間内に工事を終了することができ、関係者各位に感謝します。本工事を直接担当した石川島播磨重工業(株)、ニチコン(株)を初め、同時期に他の工事を実施した各社にも、工程・作業域などの調整に多大なる協力を得る

ことができ、収納部内の狭い作業場所で錯綜する作業も多々あったが、作業者の怪我もなく、機器損傷も起こらずに無事に終了することができ感謝しています。

電磁石の据付、アライメント、電磁石電源の製作は、妻木孝治氏、武部英樹氏、熊谷桂子氏、中里俊晴氏、松井佐久夫氏、張超氏によって行われたものであり、本稿を書くに当たって様々な情報を提供していただいた。同様に、真空機器に関しては、大石真也氏、馬込保氏から同様の情報提供をいただいた。また、電磁石フリー長直線部を有した蓄積リングは、加速器部門長の熊谷教孝氏を中心に、全員の協力のもとに実現されたものであることを記しておきたいと思います。特に、Phase-2 ラティスの設計に関する計算は、田中均氏を中心に早乙女光一氏、清水純氏によって精力的に行われたものである事を附記します。

参考文献

- 1) H. Tanaka, K. Soutome and M. Hara: *J. Synchrotron Rad.* **4**, 47 (1997).
- 2) H. Tanaka, K. Kumagai, N. Kumagai, H. Ohkuma, K. Soutome, M. Takao and J. Schimizu: *Proc. of EPAC2000*, Vienna, Austria, 2000.
- 3) 神谷幸秀, 中村典雄: *放射光* **12**, 36 (1999).
- 4) H. Tanaka, N. Kumagai and K. Tsumaki: *Nucl. Instrum. Meth.* **A313**, 529 (1992).
- 5) S. Matsui, C. Zhang, J. Ohnishi, Y. Chida, K. Hasegawa, K. Tsumaki, Y. Sasaki, X. Ouyang, Y. Okada, M. Kawakami and K. Nakashima: *Proc. of the 4th International Workshop on Accelerator Alignment*, 1995, KEK, Japan., 174 (1996).
- 6) Y. Chida, S. Matsui and J. Ohnishi: *Proc. of the 4th International Workshop on Accelerator Alignment*, 1995, KEK, Japan., 194 (1996).
- 7) H. Takebe, K. Tsumaki, H. Tanaka, K. Soutome, K. Kumagai, H. Yonehara and N. Kumagai: *Proc. of the 12th Symp. on Acc. Sci. Tech.*, 316 (1999), Wako, Japan.
- 8) 山野義之, 杉井一生, 木本義弘, 大林哲郎, 横内 茂, 藤原誠士, 柳 義彦, 伊藤 裕, 坂上裕之, 大熊春夫, 渡邊剛, 佐伯 宏, べい碩喜: *Proc. of the 9th Meeting on Ultra High Vacuum Techniques for Accelerators and Storage Rings*, 217 (1994), KEK, Japan.
- 9) 渡邊 剛, 佐伯 宏, 正木満博, 鈴木康明, 谷内友希子, 野田 隆, 前野理生, べい碩喜, 大熊春夫: *真空* **42**, 535 (1999).
- 10) K. Soutome, H. Tanaka, M. Takao, H. Ohkuma and N. Kumagai: submitted to *Nucl. Instrum. Meth.* (in press).