

LOCAL LATTICE MODIFICATION OF LONG STRAIGHT SECTION IN THE SPring-8 STORAGE RING

Kouichi Soutome^{#,A)}, Takahiro Fujita^{A)}, Kenji Fukami^{A)}, Kimitaka Kaneki^{A)}, Chikaori Mitsuda^{A)},
Tatsuro Nakanishi^{A)}, Masaya Oishi^{A)}, Yuichi Okayasu^{A)}, Shigeki Sasaki^{A)}, Yoshito Shimosaki^{A)}, Masazumi Shoji^{A)},
Masaru Takao^{A)}, Yukiko Taniuchi^{A)}, Chao Zhang^{A)}, Haruo Ohkuma^{A)}, Makoto Hasegawa^{B)}, Kazuyuki Kajimoto^{B)}

^{A)} JASRI/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

^{B)} SPring-8 Service Co. Ltd. (SES), 1-20-5 Kouto, Shingu-cho, Tatsuno-shi, Hyogo 679-5165

Abstract

In the SPring-8 storage ring there are four magnet-free long straight sections of about 30m. In 2011, we locally modified one of these sections by installing two sets of quadrupole-triplet and divided it into three subsections. The vertical betatron function at the middle of each subsection was lowered to 2.5m so that small gap in-vacuum undulators with a short period can be installed. By this lattice modification the symmetry of the ring was lowered but we could keep sufficient dynamic aperture and momentum acceptance by combining the schemes of betatron-phase matching, local chromaticity correction and mutual cancellation of nonlinear kicks due to sextupoles. The beam commissioning of the new lattice has successfully been finished and it is used in user operation.

SPring-8 蓄積リングの局所的な長直線部ラティス改造

1. はじめに

SPring-8 蓄積リング (エネルギー 8GeV、周長 1436m) には、長さ約 30m の長直線部が 4 カ所あり、そのうち 1 カ所に、真空封止型短周期アンジュレータを設置してビームラインを建設する計画が提案された [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、アンジュレータの許容最小ギャップ値を 6mm 以下にする必要があった。しかし、例えば別の長直線部に既設の真空封止型長尺アンジュレータ (磁石列長さ 25m) 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 12mm に制限している。従って、単に長尺の短周期アンジュレータを設置しただけでは、6mm 以下のギャップ値が実現できない。

そこで 30m 長直線部を 3つの直線部に分割し、各直線部の間にそれぞれ 3 台の 4 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 [2, 3]。改造後のラティスでは、3カ所の直線部のそれぞれに 5m の短周期アンジュレータを設置することができる (合計 15m)。また垂直方向のベータトロン関数を、直線部中心で 2.5m にまで下げることで、要求される 6mm 以下の最小ギャップ値を実現できる。

このラティス改造は局所的であり、ベータトロン関数とディスパージョン関数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への影響はほとんど無い。(エミッタンスが 2%程増加する。) 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。我々はこ

の問題を克服するために、「ベータトロン位相マッチング」、「局所クロマチシティ補正」、「6 極電磁石に起因する非線形キックの相殺」という 3つの処方を組み合わせて、これを局所的長直線部ラティス改造の指針とした。

電磁石の追加設置 [4] や真空チェンバーの改造などは 2011 年 3 月に行われ、その後のビーム調整を経て、2011 年 9 月以降のユーザー運転は新しいオプティクスで行われている [5]。以下、今回実施した局所的長直線部ラティス改造について、ビーム調整の結果も交えて報告する。

2. 改造前の長直線部ラティス

2.1 長直線部の構築

SPring-8 蓄積リング設計当初のラティス構造は、長さ約 30m の double-bend セルを 48 回繰り返して、12 セルごとに偏向電磁石を抜いてこれを missing-bend セルにする、というものであった [6]。リングの対称性を保つため、この missing-bend セルにおいても 4 極および 6 極電磁石がノーマルセルと同様に設置されていた。このラティスは、1997 年のコミッション開始からおよそ 3 年間にわたって使用された [7]。

その後 2000 年に、missing-bend セルを電磁石フリーな長直線部に変換するために、4 極および 6 極電磁石の再配置が行われた [8]。再配置後の長直線部の典型的なオプティクスを図 1 に、またリング全体のベータトロン関数を図 2 に示す。この再配置の際には、missing-bend セルを含む 3 セル分をマッチングセクションとして扱い、「ベータトロン位相マッチング」と「局所クロマチシティ補正」の 2つの処方を組み合わせてラティスを設計した [9]。

[#] soutome@spring8.or.jp

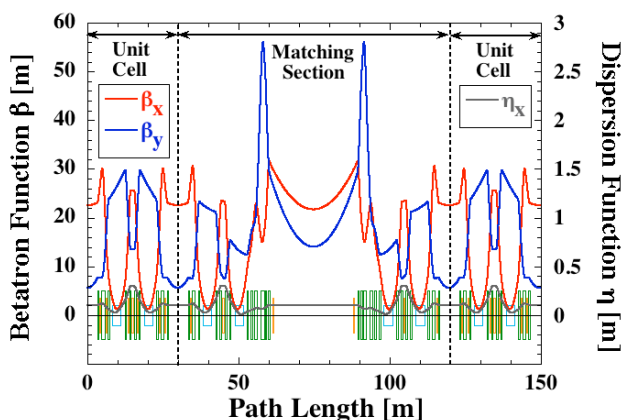


図 1：ラティス改造前の長直線部オプティクス。水平／垂直ベータトロン関数 (β_x / β_y) および水平ディスペーション関数 (η_x) を示す。図の下部には主電磁石配置を四角で示した (青色：偏向電磁石、緑色：4 極電磁石、橙色：6 極電磁石)。マッチングセクション内の 6 極電磁石の配置は今回のラティス改造直前のもので、2000 年の電磁石再配置直後とは異なる (“カウンター 6 極”が追加されている：本文参照)。

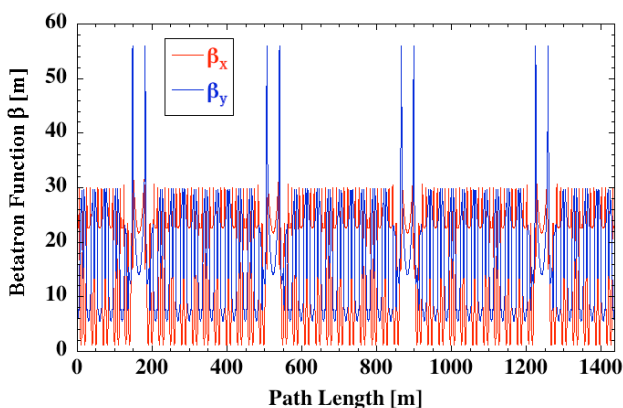


図 2：ラティス改造前のリング全体のベータトロン関数。

「ベータトロン位相マッチング」は、マッチングセクションのベータトロン位相進みを水平・垂直ともに 2π の整数倍に合わせるもので [10]、on-momentum 電子に対するダイナミックアパーチャーを確保し、入射効率の低下を防ぐ効果がある。

リングの対称性を高く保つという観点からは、マッチングセクションには 6 極電磁石を持ち込まず、線形要素のみでオプティクスをつなぐことが望ましい。しかし、マッチングセクション内にある 4 極電磁石の強い収束力 (これは低エミッタンス条件の保持に必要) に起因する局所クロマチシティが無視できず、これを補正しなければ off-momentum 電子に対するベータトロン位相のマッチングが大きく崩れ、運動量アクセプタンスが狭くなる。そこで、マッチングセクションのアーキ部 6 極を弱く (ノ-

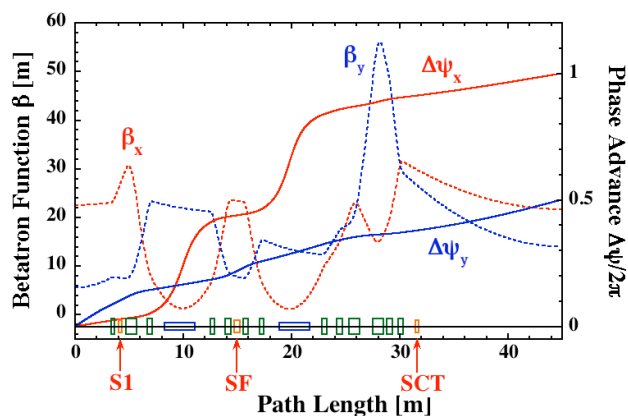


図 3：ラティス改造前のマッチングセクション (半分) のオプティクス。ベータトロン関数 (β_x / β_y) およびベータトロン位相進み ($\Delta\psi_x / \Delta\psi_y$) を主電磁石配置とともに示す。

マルセルの 1/4 程度に) 励磁して、水平方向の「局所クロマチシティ補正」を行った。図 3 は、図 1 のマッチングセクションの上流側半分を拡大して示したものであり、図中の SF が局所クロマチシティ補正用の 6 極電磁石である。この SF を励磁することにより off-momentum 電子のダイナミックアパーチャーが拡大し、ユーザー運転に必要な Touschek ビーム寿命を確保することができた。

2.2 カウンター 6 極電磁石の導入

このように、マッチングセクションのアーキ部 6 極電磁石 SF を励磁することで、off-momentum 電子のダイナミックアパーチャーが拡大したのであるが、一方ではリング全体 6 極磁場分布の対称性が崩れて on-momentum 電子の安定性が若干損なわれる結果となった。

この状況を改善してリングの状態をより安定なものとするために、(Non-) Interleaved Sextupole Scheme [11-13] と同様に、局所クロマチシティ補正用 6 極電磁石に対してベータトロン位相が π 離れた位置 (一般には π の整数倍でよいが) に適当な強さの 6 極電磁石を設置し、非線形キックを相殺させることを考案した。位相が π 離れた 2 つの 6 極電磁石の強さを λ_1, λ_2 とし、6 極位置でのベータトロン関数を β_1, β_2 とすると、

$$\lambda_1 / \lambda_2 = (\beta_2 / \beta_1)^{3/2}$$

であれば非線形キックが相殺される [14, 15]。しかし一般には、水平、垂直両方向でこのような位相関係を同時に満たす場所を探し、6 極電磁石を設置することは困難である。我々は、局所クロマチシティ補正用 6 極による非線形キックの相殺を、まずは水平面内で考えることにした。これは入射効率と Touschek ビーム寿命を考える上で、水平方向のベータトロン振動が重要だからである。このために、相殺用の 6 極電磁石 (以下、カウンター 6 極電磁石と呼ぶ) の設置場所として、水平ベータトロン位相差が π に近い場所を選ぶことにした。図 3 の SCT

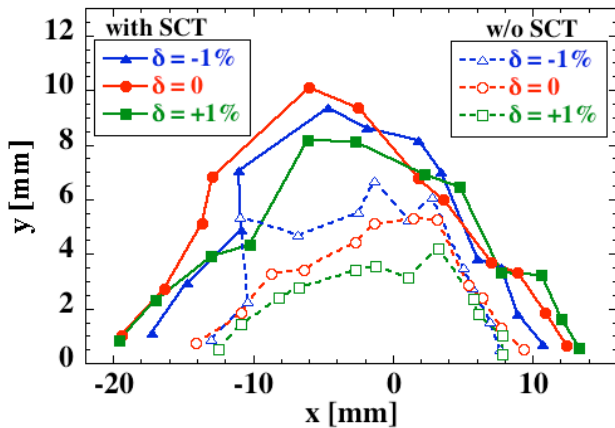


図4：ラティス改造前のリングのダイナミックアパーチャー（入射点での計算値）。 $\delta = \Delta p/p$ は相対運動量偏差。カウンター6極電磁石有りの場合と無しの場合を比較して示す。

がカウンター6極電磁石であり、SF との位相差は 0.95π である。

カウンター6極電磁石の効果をトラッキング計算で確認したところ、水平面付近で周回している電子に対しては確かにダイナミックアパーチャーが広がるが、垂直方向に振幅を持つ電子に対しては効果が見られず、結果としてダイナミックアパーチャーが期待したほど広がらないことがわかった。そこで、6極電磁石の自由度を増やし、垂直方向のベータatron振動も取り入れて最適化を図ることにした。図3の S1 が、このための6極である。SF と SCT 間の水平位相差のみならず、SF と S1 間の水平位相差も π に近い（正確には 0.82π ）ことから、水平方向の非線形キックの相殺条件を近似的に保ちつつ、垂直方向の振動を緩和させることができる。垂直方向に関しては、マッチングセクションに角度0で入射する電子（ $y'_{in} = 0$ ）が、角度0のまま出て行く（ $y'_{out} = 0$ ）という条件を課した。これにより S1、SF、SCT の強さの比が決まり、

$$\lambda_{S1} : \lambda_{SF} : \lambda_{SCT} = 0.146 : 1 : 0.543$$

となる [15]。これを初期値としてシミュレーションによる最適化を行い、最終的に図4に示すダイナミックアパーチャーを得た。（この際、リング全体の共鳴励起を抑制するため、ノーマルセルのハーモニック6極も調整した。）カウンター6極電磁石の導入により、ダイナミックアパーチャーが広がったことがわかる。最適化後の6極電磁石の比は

$$\lambda_{S1} : \lambda_{SF} : \lambda_{SCT} = 0.139 : 1 : 0.354$$

である。カウンター6極電磁石は、2007年に全ての長直線部に設置され、実際に入射効率とビーム寿命が改善されたことを確認した。

3. 長直線部ラティスの改造

長直線部が電磁石フリーとなったことで、磁石列

長さが25mの真空封止型長尺アンジュレータの設置（BL19LXU [16, 17]）や、水平/垂直 Figure-8 型アンジュレータ8台の設置（BL07LSU [18, 19]）が可能となり、高い光源性能を持つビームラインが実現した。これらに加えて、残る長直線部のうちの1カ所に真空封止型短周期アンジュレータを設置することが提案され（BL43LXU [1]）、これを実現するための加速器改造案を検討した。

この改造案は、前述のように、長直線部を3つの直線部に細分し、各直線部の間にそれぞれ3台の4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というものである。改造の際の指針としては、前節で述べた「ベータatron位相マッチング」、「局所クロマチシティ補正」、「6極電磁石に起因する非線形キックの相殺」という3つの処方を踏襲した。

改造後の長直線部オプティクスを図5に示す。改造前の図1と比べてわかる通り、4極トリプレット2組を追加して30m長直線部を3つの直線部に分割し、各直線部中心で垂直方向のベータatron関数を2.5mにまで低下させた。図6はリング全体のベータatron関数。

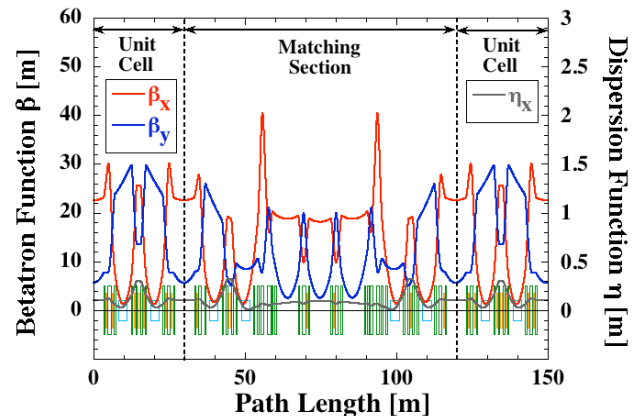


図5：ラティス改造後の長直線部オプティクス。改造は、リングに4カ所ある長直線部のうちの1カ所でのみ実施した。（改造前は図1。）

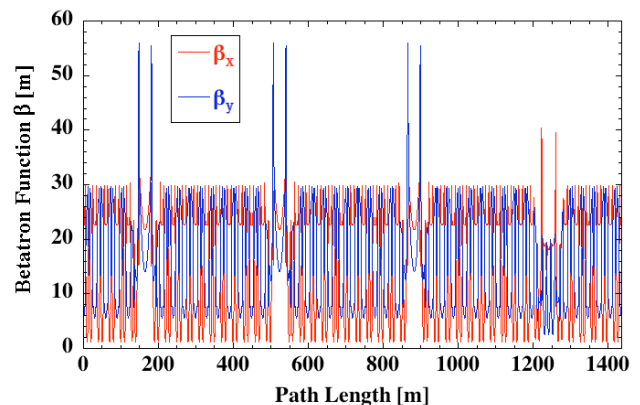


図6：ラティス改造後のリング全体のベータatron関数。横軸1200m～1300m付近がラティス改造を行った部分である。（改造前は図2。）

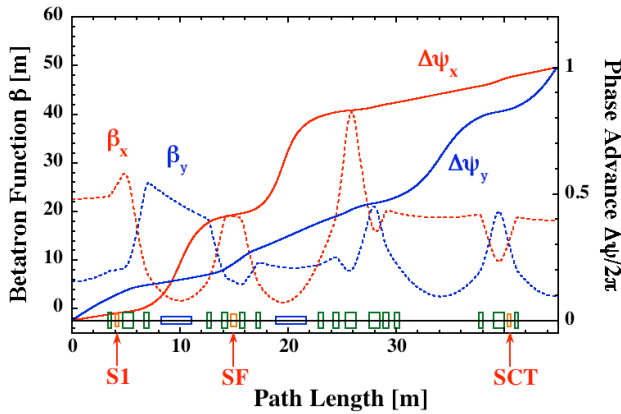


図 7 : ラティス改造後のマッチングセクション。
(改造前は図 3。)

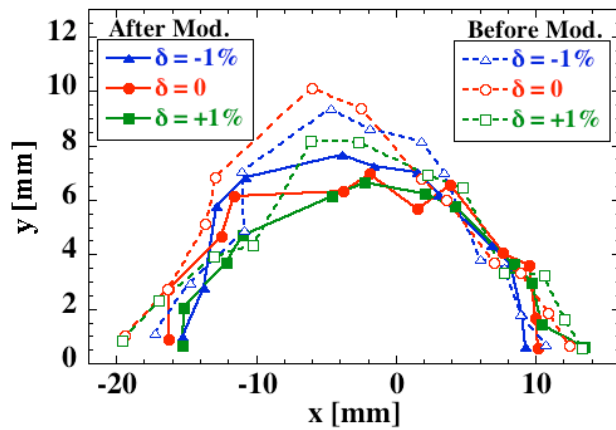


図 8 : ラティス改造前後でのリングのダイナミックアパーチャーの比較 (入射点での計算値)。

タトロン関数であり、改造によってベータトロン関数自体の対称性は 1 回対称となったことがわかる。また図 7 は改造後のマッチングセクションを示したもので、ベータトロン位相が変わるためカウンター 6 極電磁石の位置を変更し、励磁量の最適化を図った。S1、SF、SCT の強さの比は、下記の通りである (ビーム調整後の値) :

$$\lambda_{S1} : \lambda_{SF} : \lambda_{SCT} = 0.139 : 1 : 0.10$$

図 8 に、改造前後でのダイナミックアパーチャーを比較して示す。ベータトロン関数の対称性は低下した (図 6) が、ベータトロン位相のマッチングをとり、カウンター 6 極電磁石で非線形キックの相殺を行うことで (図 7)、運転に必要なダイナミックアパーチャーと運動量アクセプタンスを確保することができる (図 8)。

なお、改造は長直線部 1 カ所に限った局所的なものであり、マッチング条件を保ったまま行うため、他のビームラインでのベータトロン関数とディスパージョン関数は変化しない。またエミッタンスは、マッチングセクションアーク部内のベータトロン関数が多少変化するため 2% 程度増加するが、挿入光

源のギャップ開閉に伴う変化 (放射減衰による) に比べて十分小さく無視できる。

4. ビーム調整

ラティス改造のための主な作業は 2011 年 3 月までに完了した。オプティクスの変更 (図 1 から図 5 への変更およびその逆) は、追加設置した電磁石電源の入/切などにより行うことができ、ユーザー運転適用までの半年間に、ビーム調整とパラメータ測定を実施した。

図 9 は応答関数の解析から求めたベータトロン関数で、改造した長直線部について示してある。ベータトロン関数の歪みは、トリム 4 極電源 49 台を使って補正してある。リング全体での歪みは水平 2.3%、垂直 2.4% であり、改造前と同程度の値である。また図 10 は非線形クロマティシティである。測定結果と計算がよく合っていることがわかる。その他、非線形ディスパージョンについても測定を行

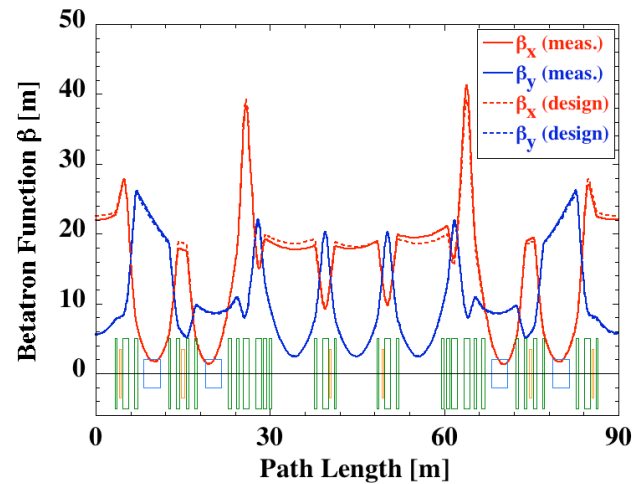


図 9 : 改造した長直線部のベータトロン関数。応答関数解析による測定値と設計値の比較。

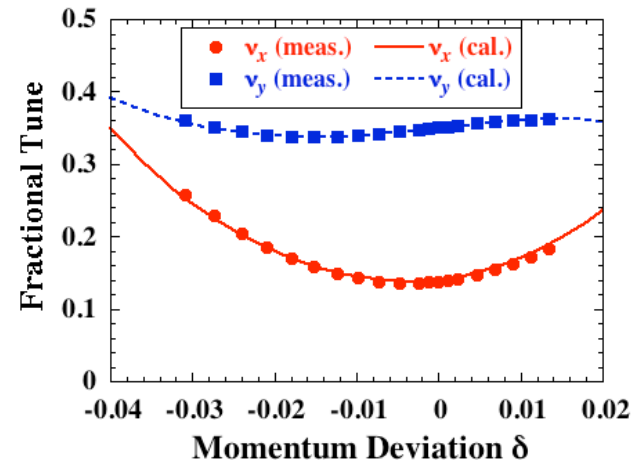


図 10 : 非線形クロマティシティの測定値と計算値の比較。

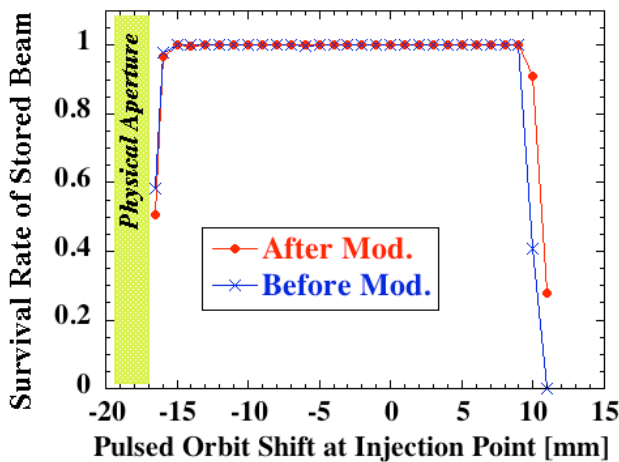


図 1 1 : バンプ電磁石を用いた入射点での水平方向ダイナミックアパーチャーの測定。横軸 -18mm 付近には、ダイナミックアパーチャーより内側にセプタム壁 (物理障壁) がある。

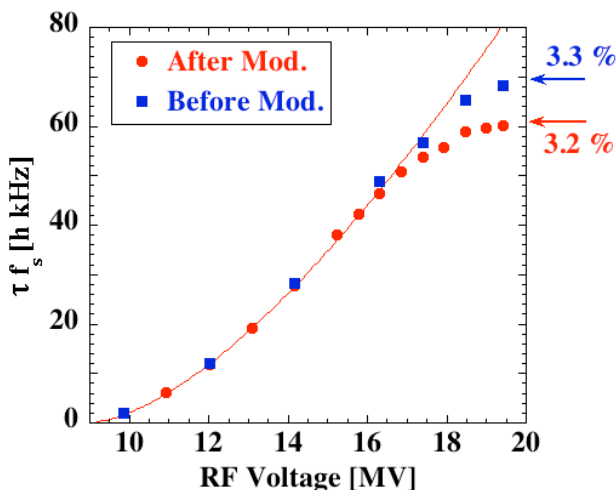


図 1 2 : 運動量アクセプタンスの測定。バンチ長依存性を除くため、Touschek ビーム寿命 (バンチ電流値 1mA 時) とシンクロトロン振動数の積を縦軸にプロットしている。横軸は RF 加速電圧。

い、計算と良い一致を示すことを確認している。これらの結果から、線形および非線形オブティクスがほぼ設計通りに実現されていることがわかった。

さらに、入射効率と Touschek ビーム寿命が改造前と比べて極端に変化していないことから、カウンター 6 極による安定領域拡大のスキームは有効に働いたものと判断される。これを直接確認するために、水平方向ダイナミックアパーチャーと運動量アクセプタンスの測定を実施した。図 1 1 はバンプ電磁石を用いた水平方向ダイナミックアパーチャーの測定結果である。入射点を挟んで設置されているバンプ電磁石 4 台のうち、上流 2 台または下流 2 台を励磁して蓄積ビームを水平方向に振動させ、その振幅を変えながらビームの生存率を測定した。改造前後で

極端な変化は見られない。また図 1 2 は、RF 加速電圧を変えながら Touschek ビーム寿命を測定し、そこから運動量アクセプタンスを評価した結果である。改造前の 3.3% に比べて、改造後は 3.2% とやや下がってはいるが、運転上の支障はない。

5. まとめ

SPring-8 蓄積リングの 30m 長直線部のうちの 1 カ所を、3 つの直線部に細分する改造案を検討し、実施した。この際、「ベータトロン位相マッチング」、「局所クロマチシティ補正」、「6 極電磁石に起因する非線形キックの相殺」という 3 つの処方を組み合わせて、改造の指針とした。ラティス改造のための主な作業は 2011 年 3 月までに完了し、その後のビーム調整を経て、ほぼ設計通りのビームパラメータが確認された。2011 年 9 月以降のユーザー運転は新しいオブティクスで行われており、ラティス改造に伴うビーム性能の劣化は、ユーザー運転時には認められていない。

改造後の長直線部においては、3 分割した中央に長さ 5m の真空封止型短周期アンジュレータ 1 台が設置され、すでに放射光利用に供されている。残る 2 台のアンジュレータは 2012 年度内に設置される予定で、放射光輝度およびフラックスの増強が期待されている。

参考文献

- [1] A.Q.R. Baron, SPring-8 利用者情報 Vol.15 No.1 (2010) p.14.
<http://user.spring8.or.jp/sp8info/>
- [2] SPring-8 Research Frontiers 2009, p.153.
http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/publications/research_frontiers/
- [3] K. Soutome, *et al.*, in Proc. of IPAC2010, Kyoto, p. 4497.
- [4] T. Nakanishi, *et al.*, "Comparison of magnetic characteristics between laminated type and massive type of quadrupole magnet in the SPring-8 storage ring", in Proc. of 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, 2012.
- [5] K. Soutome, *et al.*, in Proc. of IPAC2012, New Orleans, p. 1188.
- [6] H. Kamitsubo, NIM **A303** (1991) 421.
- [7] H. Ohkuma, *et al.*, in Proc. of PAC1999, New York, p. 2346.
- [8] H. Tanaka, *et al.*, NIM **A486** (2002) 521.
- [9] H. Tanaka, *et al.*, in Proc. of EPAC2000, Vienna, p. 1086.
- [10] 長直線部のベータトロン位相に関しては「東京大学高輝度光源計画 加速器設計資料 (平成 13 年 4 月)」でも同様の指針が述べられている。
K. Harada, *et al.*, NIM **A467-468** (2001) 63.
- [11] K.L. Brown, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26 (1979) 3490.
- [12] L. Emery, in Proc. of PAC1989, Chicago, p.1225.
- [13] K. Oide and H. Koiso, Phys. Rev. **E47** (1993) 2010.
- [14] S.Y. Lee, "Accelerator Physics (2ns ed.)", Chap. 2, Sec.VII.
- [15] K. Soutome, *et al.*, in Proc. of EPAC08, Genoa, p.3149.
- [16] H. Kitamura, *et al.*, NIM **A467-468** (2001) 110.
- [17] T. Tanaka, *et al.*, NIM **A467-468** (2001) 149.
- [18] Y. Senba, *et al.*, NIM **A649** (2011) 58.
- [19] 松田巖, SPring-8 利用者情報 Vol.15 No.1 (2010) p.27.
<http://user.spring8.or.jp/sp8info/>