

PRESENT STATUS OF LOW-ENERGY TEST OPERATION AT SPring-8

Kouichi Soutome^{1,A)}, Tsuyoshi Aoki^{A)}, Schin Date^{A)}, Hiroyasu Ego^{A)}, Kenji Fukami^{A)}, Toru Fukui^{A)},
Naoyasu Hosoda^{A)}, Noritaka Kumagai^{A)}, Mitsuhiro Masaki^{A)}, Takeshi Nakamura^{A)}, Haruo Ohkuma^{A)},
Takashi Ohshima^{A)}, Jun Schimizu^{A, B)}, Masazumi Shoji^{A)}, Shiro Takano^{A)}, Masaru Takao^{A)}, Hideki Takebe^{A)},
Kazuhiro Tamura^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)}, Koji Tsumaki^{A)}, Hiroto Yonehara^{A)}

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

^{B)} The Japan Research Institute, Ltd., 1-6-3 Shin-machi, Nishi-ku, Osaka-shi, Osaka, 550-0013

Abstract

The status of low-energy test operation at SPring-8 is reported. At the energy of 4GeV the beam current of 100mA can be stored in multi-bunch filling mode, and the emittance of about 0.85nmrad seems to be achieved with low beam currents. Beam size and bunch length at 4GeV and 8GeV are compared, paying attention to the intrabeam scattering effects. Injection efficiency, beam lifetime, beam instability, etc. are also discussed.

SPring-8 における低エネルギー試験運転の現状

1. はじめに

SPring-8 加速器施設の潜在的な能力を最大限に活用する、という方針のもと、蓄積リングの低エネルギー運転が試験的に続けられてきた。バンチ内電子-電子散乱の影響が無視できれば、ビームのエネルギーを通常の 8GeV から下げることによって、自然エミッタンスを 1nm rad 以下に低減させることができる。また相対エネルギー幅よりもエネルギーに比例して小さくなり、RF 電圧によってはバンチ長も短くできる。このように位相空間体積の小さなビームを実現することで、従来の放射光実験に課せられていた枠をさらに拡大できる可能性がある。

現状では、エネルギー 4GeV の時、マルチバンチモードで 100mA、シングルバンチモードで 1.5mA のビーム蓄積が達成できている。ここでは、蓄積リング低エネルギー運転時のビーム・パラメータや、加速器調整にまつわる問題点、およびその対策などについて報告する。

2. 放射光スペクトル

まず、蓄積リングを 4GeV で運転した場合のアンジュレータ放射光の輝度の計算値^[1]を、8GeV の場合と比較して図 1 に示す。ただし、バンチ内電子-電子散乱の影響は含んでいない。例として、標準型真空封止アンジュレータ ID47 と軟X線ビームライン用 Figure-8 アンジュレータ ID27、および長尺アンジュレータ ID19 の場合を示した。4GeV 時に、ID47 と ID19 からの放射光はエネルギーが数 keV 程度の軟X線領域をカバーしている。またその輝度は、8GeV 時の ID27 からの放射光の輝度を上回っている。SPring-8 のビームラインは、現状、挿入光源や分光器などがすべて 8GeV 用に設計されている。従って、リングのエネルギーを下げたからといって、

直ちにこのような放射光が利用できるわけではないが、潜在的にこのような利用方法も可能であることを示す例である。目的とする波長領域の輝度を向上させるためには、低エネルギー運転用に最適化されたアンジュレータを設計する必要がある。また現在、通常の 8GeV 運転時には 100mA までの放射光利用が許可されているが、エネルギーを下げることによって、より高い電流値でも利用できる可能性が出てくる。

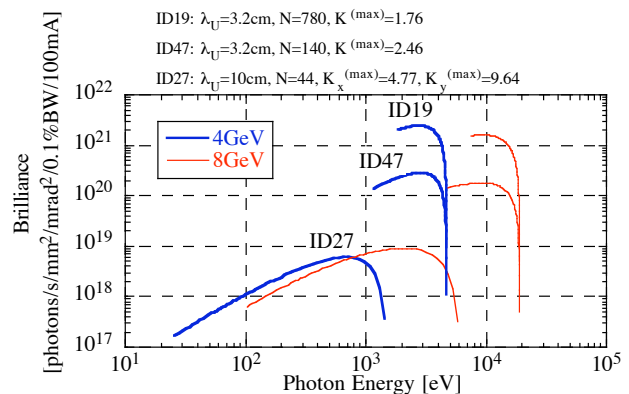


図 1 : アンジュレータ放射光の輝度 (計算)。

3. 低エネルギー試験運転

3.1 試験運転の経緯

蓄積リングを低エネルギー運転用に調整する上で、我々はまず 8GeV から 4GeV までのランプダウン試験を行い、蓄積ビームの挙動を観測した。2次元放射光干渉計^[2]によるビームサイズ測定、ストリークカメラによるバンチ長測定などを行い、2 μA 程度の低バンチ電流値ではバンチ内電子-電子散乱の影響

¹ E-mail: soutome@spring8.or.jp

は無視でき、ビームパラメータはほぼ計算通りの振る舞いをする、との結果を得た。

次に、入射器（シンクロトロン）の低エネルギー出射調整を行い、蓄積リングに入射した。エネルギー設定値は 4GeV とした。この値は、主にバンチ内電子-電子散乱の影響、入射器の出射電磁石電源の定格下限値、放射光スペクトルを考慮して決めたが、今後、必要に応じてさらに下げる（または上げる）ことも検討している。

低エネルギー入射・蓄積を行う際の主な問題点は、入射効率低下、短ビーム寿命、ビーム不安定性である。以下、これらについても述べる。

3.2 バンチ内電子-電子散乱

エネルギーが 8GeV の場合、バンチ内電子-電子散乱の影響^[3]は無視できる。しかしエネルギーを下げるに従って、この効果が効き始める。低エネルギー試験運転に先立ち、これを事前に評価した結果、バンチ内電子-電子散乱の影響は 4GeV 程度から顕著になるとの結論を得た^[4]。前述のように、これをエネルギー設定値を決める際の指針の一つとした。

図 2 (a) にエミッタンス ϵ の計算値を、図 2 (b) に相対エネルギー拡がり σ_δ の計算値を、ビームエネルギー E の関数として示す。図中、 I_b はバンチ電流値、 κ はエミッタンス結合比を示し、**overvoltage factor** を 1.73 に固定して計算した。 $\kappa=0.2\%$ は 8GeV での実績値である。計算は、文献 [5] の "high-energy approximation" の処方に従った。ただし、**potential-well distortion** によるバンチ長の伸びの効果^[6]は含まれていないため、実際には、図 2 に示すよりも影響が緩和されると考えられる。バンチ電流値にもよるが、概ね 4GeV 以下でバンチ内電子-電子散乱の影響が顕著に見ることがわかる。なお、 $I_b=0.05\text{mA}$ は、マルチバンチモードで 100mA 蓄積した場合に相当している。

エネルギー 4GeV におけるバンチ内電子-電子散乱の影響を実験的に確かめるため、シングルバンチモードでビームを蓄積し、バンチ電流値を変えながら、ビームサイズやバンチ長などを測定した。ビームサイズは、X線ビームプロファイルモニタ^[7]を用いて測定した。水平ビームサイズの測定結果を、計算値と合わせて図 3 に示す。4GeV 時の測定値が計算値よりも小さいのは、前述のように、**potential-well distortion** によるバンチ長の伸びの効果によるものと思われる。

4GeV におけるエミッタンスは、計算上 0.85nm rad であり、図 3 のビームサイズ測定の結果などから、低バンチ電流においては、このエミッタンス値にほぼ達したと考えている。

図 4 にバンチ長の測定値を示す。8GeV 時にはバンチ内電子-電子散乱の影響は無視できるが、バンチ長はバンチ電流値とともに伸びていく。これは **potential-well distortion** によるものである^[6]。一方、4GeV 時にはバンチ内電子-電子散乱の影響も無視できない。両者の効果が相まってバンチ長が決まっていると考えられる。ビームサイズの変化も含めて、

今後、これらのデータを矛盾なく解析し、バンチ内電子-電子散乱の効果を調べる予定である。

なお、図 4 には示さなかったが、エネルギー 4GeV、バンチ電流値 0.8mA で RF 電圧を 16MV まで上げた場合のバンチ長は 28ps (FWHM) であった。

3.3 入射効率

SPring-8 蓄積リングでは、入射セプタム電磁石を挟んでリング側とビーム輸送系側の真空が切れており、この仕切窓 (Be 0.5mm, Al 0.1mm, Kapton

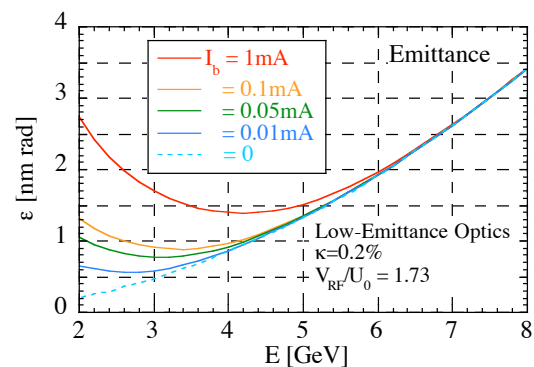


図 2 (a) : バンチ内電子-電子散乱によるエミッタンス増大 (計算)。

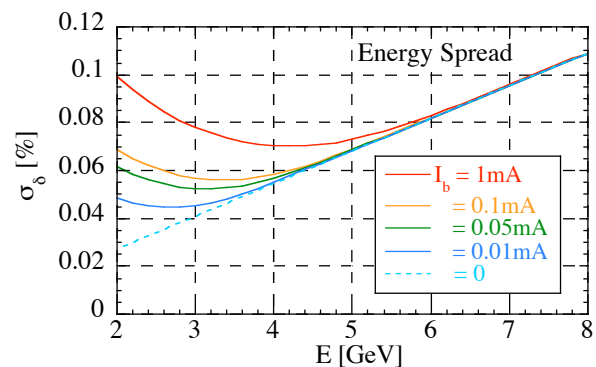


図 2 (b) : 相対エネルギー拡がり (計算)。

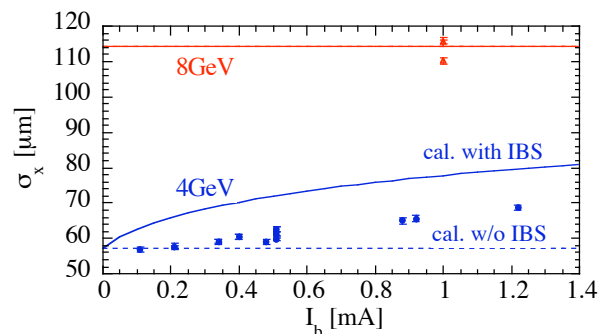


図 3 : 水平ビームサイズの測定値と計算値。実線はバンチ内電子-電子散乱 (IBS) の効果を取り入れた計算で、破線はこれを無視した場合。

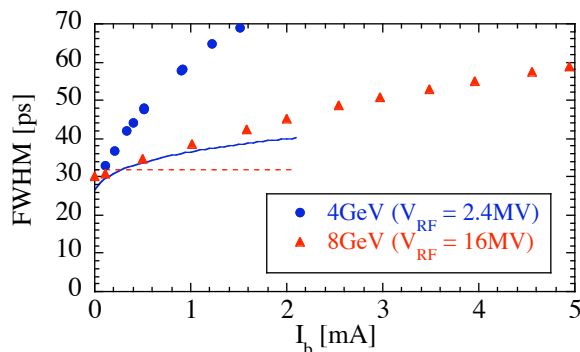


図4：バンチ長の測定値と計算値。実線と破線はそれぞれ4GeVと8GeV時の計算でIBSの効果は含むが、potential-well distortionは取り入れていない。

0.1mm)によって入射ビームの角度拡がりが増大する。また入射セプト電磁石は、およそ1.5mのヘリウムガス雰囲気中に設置されており、ヘリウムガス置換率によっても入射ビームの角度拡がりが増大を受ける。多重クーロン散乱による角度拡がりを見積もると(表1)、8GeV入射時にはこの影響は小さいが、エネルギーを下げるほど角度拡がりが増し、4GeVではこれを無視できないことがわかった。

表1：多重クーロン散乱で生ずる角度発散。

入射ビーム エネルギー	ヘリウムガスの置換率	
	100%	0%
8GeV	0.073mrad	0.122mrad
4GeV	0.147mrad	0.245mrad

またエネルギーを8GeVから4GeVに下げることによって、ダンピング時間が8倍に伸びる。このため、入射後のビームのコヒーレント振動が長く続き、これによっても入射効率が低下する。

入射効率は、8GeV時には80%以上あるが、4GeV時には40%程度に低下する。入射ビームの角度拡がりをシミュレーションコードに取り入れ、入射効率を計算した結果、効率の低下をほぼ説明できることがわかった。

現在、入射効率向上のため、(a)トリム4極補助電源の増設によるオプティクス歪みの補正、(b)6極電磁石追加による動的安定領域の拡大、を計画しており、これらによってリングのアクセプタンスを上げ、入射効率の改善をはかる。これはまた、ビーム寿命の改善にもつながる。

3.4 ビーム寿命

低エネルギー運転時にはバンチの位相空間体積が減少するために、Touschekビーム寿命が支配的となる^[8]。100mAをマルチバンチモードで蓄積した場合、8GeV時には200時間以上あったビーム寿命が、リングの状態にもよるが、4GeV時には10時間前後にまで減少する。

ビーム寿命の低下を補償するには、蓄積電流値をほぼ一定に保つことが出来るトップアップ入射を導

入すればよい。トップアップ入射では、入射に伴う蓄積ビームの振動を極力抑制することが重要である。この対策は既に8GeVユーザー運転に対して取られており、効果をあげている^[9]。同様の対策は、低エネルギー運転時にも有効であり、今後調整を進める予定である。

3.5 ビーム不安定性

エネルギーを下げると、ダンピング時間の増大などによりビーム不安定性発生の閾値が下がる。Transverse方向の不安定性は、bunch-by-bunchフィードバックシステム^[10]により、またlongitudinal方向の不安定性(これは8GeVでは起きていない)は、RF加速電圧に周回周波数の変調をかけることで対処している^[11]。

4. 今後の課題

これまでに述べた問題点の解決のほか、具体的利用の検討、蓄積電流値の増強、などが課題となっている。また蓄積リングを4GeVで運転すると電磁石の温度が下がり、その後8GeVに復帰させても、熱平衡状態に戻るまでの数日間、軌道が垂直方向に最大数10 μ m程度ドリフトしてしまう^[12]。この点も、何らかの解決策を見いだす必要がある。

参考文献

- [1] T. Tanaka and H. Kitamura, J. Synchrotron Rad. **8** (2001) 1221; "SPECTRA": <http://radiant.harima.riken.go.jp/spectra/index.html>
- [2] M. Masaki and S. Takano, J. Synchrotron Rad. **10** (2003) 295; 正木満博、放射光 Vol.1 **8** No.4 (2005) 247.
- [3] A. Piwinski, Preprint DESY 98-179 (1998); J. D. Bjorken and S. K. Mtingwa, Part. Accel. **13** (1983) 115; K. Kubo and K. Oide, Phys. Rev. ST Accel. Beams **4** (2001) 124401.
- [4] H. Tanaka, unpublished note (1997).
- [5] K. L. F. Bane, in Proc. EPAC'02, p.1443; K. L. F. Bane, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **5** (2002) 084403; K. Kubo, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **8** (2005) 081001.
- [6] T. Nakamura, SPring-8 Annual Report 1996, p.170.
- [7] S. Takano, et al., NIM A **556** (2006) 357.
- [8] M. Takao, et al., "Momentum Acceptance in the Low Emittance Optics at the SPring-8 Storage Ring", this conference.
- [9] H. Tanaka, et al., NIM A **539** (2005) 547.
- [10] T. Nakamura, et al., in Proc. EPAC'04, p.2649.
- [11] T. Nakamura, et al., "Cure of Longitudinal Instability by Acceleration Voltage Modulation by Revolution at SPring-8", this conference; T. Nakamura, SPring-8 Annual Report 1996, p.172.
- [12] K. Tsumaki, et al., SPring-8 Annual Report 1998, p.129.