

[07-P02]

## RECENT RESULTS OF THE COMMISSIONING FOR THE KEKB INJECTOR LINAC

T. SUWADA, Linac Commissioning Group<sup>1</sup>

Accelerator Laboratory  
KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 Japan

### KEKB入射器におけるコミッショニングの現状

#### Abstract

The beam commissioning of the KEKB Injector Linac has been intensively continued in order to accomplish a stable injection of single-bunch 8-GeV electron and 3.5-GeV positron beams into the KEKB rings. The full commissioning of the linac started in November 1998, and the first beam injection started in December 1998. In this report recent results of the beam commissioning are described.

#### 1. 序

KEKB ファクトリー計画[1]における加速器は、いわゆるルミノシティマシンと呼ばれ、最大ルミノシティを安定に長時間保持することが重要な課題である。KEKB入射リニアック[2]（以下入射器）は、この要求に沿ってビームを安定に蓄積リングへ入射することが最大の使命である。入射ビームとしては、単バンチ8-GeV電子ビーム（1.28 nC/bunch）及び3.5-GeV陽電子ビーム（0.64 nC/bunch）をビーム輸送路（BTライン）を経て直接蓄積リングに入射する。昨年の夏期シャットダウンの後、11月にコミッショニングを再開し、12月から蓄積リングへの入射を開始した。その間、モニタ系及びフィードバック系が、順次整備かつテストされ、ビームコミッショニングにその威力を発揮した。本報告では、特に、ビーム安定化に重要な役割を果たすモニタ系、ビーム制御系を中心に入射器コミッショニングの現状とその実験結果について報告する。

#### 2. モニタ系

##### 2.1 RFモニタ

RFモニタは、大電力クライストロン（59台）及びサブブースタ（8台）の位相及び出力パワーをモニタする。全ての高周波源は、分散配置された31台のVXI/HP-UXシステム[3]をデータ収集系として、その時間変化をモニタする。1998年9月よりセクタA、Bにおいて整備が開始され、その性能がチェックされた。その結果、位相計測分解能は0.2度、パワー計測分解能は0.2%を達成した。今年の4月までに、セクタ1~5において整備され、現在その調整が行われている。現在のところ、主に、入射部（バンチャー、プレバンチャー及びA1）の位相及びパワー変動のモニタとして、威力を発揮している。

##### 2.2 電磁石モニタ

電磁石モニタは、四重極電磁石（Q）、偏向電磁石、偏向電磁石用補助コイル、ステアリング電磁石及び六極電磁石用のDC電源の出力電流値をモニタする。制御システムは、現在、旧システム（8ビットシングルボードコンピュータ6800系）から新システム（PLC（Programmable Logic Controller））[4]へ移行しており、全体の約1/2が新システムになった。今年の夏のシ

ャットダウン時には、全て新システムへ移行する予定である。また、入射器のビームエネルギーは、入射器終端ビーム振分け部（第3スイッチヤード（SY））にある偏向電磁石の値により決まっているが、KEKB入射から放射光リング（PF, AR）へ、またその逆のモード切替え後のビームエネルギー値の再現性を確保するには、ビーム振分け偏向電磁石の絶対磁場強度が精度よく測定され、常時モニタできるようになっていることが重要である。このために、NMRを用いた高精度磁場モニタを開発中である。

##### 2.3 真空モニタ

真空モニタは、コールドカソードゲージ及びイオンポンプからのアナログ出力を17個所に分散配置されたPLCシステム[5]により計測を行う。PLCで計測された真空データは、入射器ネットワークを経由してホスト計算機により全真空データが収集される。制御室のX端末が、リアルタイムにその時間変化を表示する。また、各クライストロンモジュールにもモニタ情報が送られる。現在全てのシステムは、試験調整され安定に動作している。クライストロンの自動エージング運転時には、このシステムを用いて、真空が常時モニタされるので、安全な自動復帰がなされ、クライストロンの早期立ち上げに役立っている。

##### 2.4 ビームモニタ

###### (1) 電流モニタ

単バンチビーム電流計測用モニタとして、壁電流モニタ[6]が準備され、ビームラインに70台設置された。コミッショニング立ち上げ当初は、このモニタを使用してビーム調整を行ったが、位置モニタが整備され、電流モニタとしても校正されて使用できるようになった後では、位置モニタによる計測と補完的役割を担っている。なお、電流絶対値は、ファラデーカップを用いたビームテストにより較正された（絶対精度±2%）[7]。

###### (2) 位置モニタ

87台のストリップライン型位置モニタ[8]が、ビームラインに整備され、ビーム軌道及び電流量の変動をデジタルオシロ

<sup>1</sup>赤坂展昌, 飯田直子, 家入孝夫, 榎本収志, 生出勝宣, 大沢哲, 小川雄二郎, 紙谷琢哉, 菊池光男, 小磯晴代, 佐藤康太郎, 末武聖明, 諏訪田剛, 中村達郎, 福岡均, 船越義裕, J. Flanagan, 古川和朗, 道園真一郎

スコープを用いて、約1秒に1回シングルパスによる計測を行っている。モニタの位置分解能は、3台の位置モニタを用いたビームテスト[8]により確認され、 $\sigma \sim 0.1$  mmを得ている。また、モニタ中心とQ磁場中心に対する設置誤差(アラインメント)[9]もビームテストにより計測され、データベースに入力された。ビーム軸に対する水平及び垂直軸に対するQ磁場中心からのずれは、 $\sigma \sim 0.3$  mmである。

### (3)パンチ長モニタ

金属板にビームを照射することにより発生する遷移輻射を長時間分解能ストロークカメラ(精度2 ps)で観測してパンチ長を計測する[10]。このモニタは、入射器の4箇所(入射部直後、Jアーク下流、陽電子発生装置直後、第3SY)に設置された。これまでに、入射部の調整に常時用いる他、Jアーク透過ビームの同時性調整に用いられている。

### (4)スクリーンモニタ

フランジ面間距離85 mmのコンパクトなデマルケスト(AF995R)を用いた破壊型のモニタが開発された[11]。すでに、114台のスクリーンモニタが、ビームラインに設置され、CCDカメラを用いてビーム形状の目視観測に使用している。

### (5)エミッタンスモニタ

2種類のモニタを使用してエミッタンス計測を行っている。1つは、デマルケストを100  $\mu$ m厚まで研磨したスクリーンモニタを用いたもので、ビーム形状を画像処理することにより計測する。もう一つは、現在開発中のワイヤスキャナ(WS)[12]である。後者は、現在ビームテスト中で、目下ビームバックグランド対策を検討中である。4台のWSを1組とし、Jアーク部入口、出口及び入射器終端におけるツイスパラメータの常時計測モニタとしての使用が目的である。

## 3. ビーム制御系

1998年12月KEKBリングへの入射が開始され、ビーム安定化に向けた種々のフィードバック系(PID制御方式)が必要となり、順次整備された。以下に述べるようにビームの安定化に威力を発揮している。

### 3.1 入射部フィードバック

入射器のビーム安定化において、入射部の安定化は重要である。特に陽電子発生用1次電子ビーム(以下1次電子ビーム)の軌道変化は、ウエーク場を誘発し、陽電子発生量に直接影響を与え、エミッタンス劣化を引き起こす原因と成りうる。入射部直後のビーム軌道安定性が、特に重要であることがわかり入射部フィードバックが取り入れられ、安定に動作している。フィードバック時定数は、0.03 Hzとしている。表1に、入射部フィードバック動作機器を示す。

表1. 入射部フィードバック動作箇所一覧

機器	種別	モニタ	安定度
電子銃	高電圧出力	モニタ出力	<0.1%
SHB	A1_S1パワー	空洞出力(パワー)	<0.4%
	A1_S8パワー	空洞出力(パワー)	<0.4%
	A1_S8位相	空洞出力(位相)	$\pm 0.5$ 度

### 3.2 エネルギーフィードバック

エネルギーフィードバックは、偏向電磁石直後のビーム位置を計測しビーム位置を設定値に戻すよう上流の2台のクライストロン位相を変化させ(逆のオフクレストに乗せてエネルギー幅を最小にする)ビームエネルギーの安定化を計る。電子ビ

ームに対して2箇所、陽電子ビームに対しては、3箇所のフィードバックが動作している。これらは、電子・1次電子ビームのエネルギーが、Jアーク部で1.7 GeV、第3SYで8 GeV、陽電子は、ECS部(陽電子用エネルギー圧縮装置)で3.5 GeVにフィードバックされる。また、陽電子に対しては、BTラインへの入射エネルギーを安定化するためのフィードバックが追加された。フィードバック時定数は、0.1 Hzである。これは、主に、制御計算機のCPUパワーにより制限されている。表2に、エネルギーフィードバック動作箇所を示す。

表2. エネルギーフィードバック動作箇所一覧

ビーム	E(GeV)	場所	モニタ	KLY位相
陽電子	1.7	Jアーク部	SP_R0_32	KL_B5&B6
	3.5	ECS部	SP_61_3	KL_51&52
	3.5	BT入口	QXF2P	KL_61
電子	1.7	Jアーク部	SP_R0_32	KL_B5&B6
	8.0	第3SY	SP_61_H1	KL_51&52

### 3.3 軌道フィードバック

軌道フィードバックは、位置モニタからのビーム位置情報を基に、上流の1台のステアリング磁石を用いて設定した場所におけるビーム位置の安定化を計る。現在は、入射部出口、陽電子発生ターゲット前パンチ圧縮システム(BCS部)、セクタ5及びECS部において安定に動作している。フィードバック時定数は、0.05 Hzである。表3に、軌道フィードバック動作箇所を示す。

表3. 軌道フィードバック動作箇所一覧

ビーム	場所	モニタ	ステアリング磁石
陽電子	A1	SP_A2_2	SX(Y)_A1_B8
	BCS部	SP_17_C4	BS_17_C1/4
	セクタ5	SP_56_4	SX_47_1
		SP_58_3	SX_57_3
電子	A1	SP_A2_2	SX(Y)_A1_B8
	セクタ5	SP_54_4	SX_41_1
		SP_58_3	SX_55_3

### 3.4 自動軌道調整及びRF位相調整

自動軌道調整には、位置モニタ1台に対し、1台のステアリング磁石を対応させて、逐次的に軌道を補正してゆく方法(one-by-one method)が現在のところ用いられている。補正時間は、位置モニタのデータ収集系の改良により、 $\sim 3$ 分/セクタまで時間短縮が可能となった。一方、さらに発展させた方法として、オプティクスの特ランスファー行列を用いて、一度に複数のビーム位置情報から複数のステアリング磁石の設定を行う方法(グローバル軌道補正)も開発中で、常時軌道補正用フィードバックとして使用される予定である。

クライストロンのクレスト位相を検出する方法(フェージング)として、位相を変化させたときの偏向電磁石直後の位置モニタによる位置の変化を計測をして、クレスト位相を決める方法が確立している。セクタ1~5のクライストロンに対しては、第3SY偏向電磁石を用いて、一方、セクタA,Bのクライストロンに対しては、Jアーク部の偏向電磁石を用いてフェージングを行う。計測時間は、クライストロン1台当たり約1分である。

#### 4. 入射ビームの現状と今後の課題

表 4 に示すように、これまでの試運転を通じて、建設が完了した入射器が建設当初掲げたビーム性能を発揮することを証明した。基本課題の一つであるエネルギーに関しては、加速ユニットが建設計画に対して1本半(#C7ユニットのPF/AR 仮入射部への流用, #58ユニットのECS への流用)不足していること、及び、放電の多い不良ユニットが2~3あることにより、余裕が十分とは言えないが、2台程度の待機ユニットにより、8 GeV 運転を続けている。もう一つの重要課題である陽電子ビームの増強に関しては、電流値は目標を満たしており、エネルギー幅、エミッタンスは仕様値より若干大きい、現状で実際に問題となっているのは、入射器とリングまでのビーム輸送系のエミッタンス整合のずれや運動量収差の漏れによる実エミッタンスの増大によるビーム損失である。以上のようなビーム試運転の成果を基礎に、昨年(1998年)12月のKEKBリング試運転開始以来、正月休みと4月19日から5月24日までのKEKB測定器(Belle)ロールインの期間を除いて、8 GeV 電子ビームと3.5 GeV 陽電子ビームの入射運転を続けている。また、入射運転が始まった現在、最も重要な課題となっているのは、入射器現状報告[13]にもあるように、いかに安定な入射ビームを維持するかということである。これに関して、以下に、今後の課題となる重要な視点を整理する。

その第一は入射器の故障を少なくすることである。当たり前のことであり、建設当初から対策してきたことであるが、高周波パルスエネルギーが2倍、繰り返しが25 Hz から 50 Hz になり、平均電力が4倍に増えたこと、加速電界も8 MeV/m から20 MeV/m に増えたこと等により、1996年度まで1%以下に抑えていた故障率が、1997年度に3%、1998年度7%と増えている。これは、1987年度からトリスタン実験が始まった当初と事情が類似している。

第二は入射器がサービスしなければならないビームが従来から多様になっていることであり、その切り替え再現性という新たな課題を克服することである。従来は、エネルギーは2.5 GeVのみであったが、現在は、2.5 GeV, 3.5 GeV, 8 GeVの3種類のエネルギーで、KEKB, PF, ARに4ビームを入射している。電磁石、RF位相、加速モード等のパラメータ切り替え、陽電子発生装置等の切り替えなどをソフトウェアで行っているが、モニタ値のチェック等の面で信頼性を更に高める必要がある。また、切り替えを少なくするための工夫も検討されている。

第三はビームの安定度の向上である。特に、陽電子を生成するための大電流一次電子ビームの維持はかなりの努力を要する問題である。陽電子ビームは調整によって目標とした電流を加速できることがわかったが、調整直後の状態を長く維持することができない現状である。その原因の重要な部分は入射部(電子銃及びバンチャ)にあり、その直後から軌道変動が発生することが多い。RFモニタ、加速電流の調整等により安定する解が存在することがわかったが、まだ完全に克服するにいたっていない。

表4. ビーム性能達成度一覧

項目	電子	陽電子
電荷量 (nC/bunch)	1 (1.2)	0.7 (0.6)
バンチ長 <sup>+</sup> (ps) @FWHM	10 (10)	10* (10)
エネルギー (GeV)	8	3.5
エネルギー安定度 (%) @pk-to-pk	0.05	0.05
エネルギー幅 (%) @FWHM	~0.5 (0.5)	0.47 (0.5)
規格化エミッタンス@1 $\sigma$	(250)	(1500)
$\gamma E_x$ (10 <sup>6</sup> m)	1100	2600
$\gamma E_y$ (10 <sup>6</sup> m)	960	2500
軌道安定度 (mm) @第3SY	<1	<1

\*1次電子の入射部直後のバンチ長を表す。なお、カッコ内は仕様値を示す。

+バンチ長計測は、1次電子に対しては、10パルス積算計測結果を、電子に対しては、40パルス積算計測による結果を示す。

#### 5. まとめ

入射器コミッショニングは、1998年11月に再開し、12月からは、KEKBリングへの入射を開始した。入射ビームとしての性能は、ほぼ満足な結果が得られているが、さらにビーム安定化に向けたスタディを続けている。これには、不安定原因機器特定のためのビームと機器の同時相関測定が必要で、現在測定系の準備を行っている。

#### 参考文献

- [1] S. Kurokawa, *et al.*, KEK Report 90-24 (1991).
- [2] I. Sato, *et al.*, KEK Report 95-18 (1996).
- [3] H. Katagiri, *et al.*, *Procs. the APAC'98*, KEK, Tsukuba, 1998, p.142.
- [4] A. Shirakawa, *et al.*, 平成10年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会, KEK, 3月4-5日, 1999.
- [5] A. Shirakawa, *et al.*, *Procs. the 21th Linear Acc. Meeting in Japan*, Nihon University, Tokyo, 1996, p.168.
- [6] T. Suwada, *et al.*, *Nucl. Instrum. and Meth.* A396 (1997) 1.
- [7] T. Suwada, *et al.*, to be published in *Procs. the PAC'99*, New York City, U.S.A., 1999.
- [8] T. Suwada, *et al.*, *AIP Procs. 451 (Procs. the BIW'98*, SLAC, Stanford, California, U.S.A.), 1998, p.340.
- [9] T. Suwada and N. Akasaka, in these proceedings.
- [10] Y. Ogawa, *et al.*, *Procs. the APAC'96*, KEK, Tsukuba, 1999, p.534.
- [11] T. Suwada, *et al.*, *Procs. the 22th Linear Acc. Meeting in Japan*, Sendai, Japan, 1997, p.329.
- [12] N. Iida, *et al.*, to be published in *Procs. the PAC'99*, New York City, U.S.A., 1999.
- [13] H. Kobayashi, in these proceedings.