

[12B-01]

Recent Results of the Commissioning for the KEKB Injector Linac

T. Matsumoto, Linac Commissioning Group¹

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

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. In this report, recent results of the beam commissioning are described.

KEKB 入射器におけるコミッショニングの現状

1.はじめに

KEKB 計画[1]において加速器は、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となる。KEKB 入射リアック[2](以下入射器)は、この要求に沿ってビームを安定かつ短時間で蓄積リングへ入射する必要がある。入射ビームとしては、単バンチ 8GeV 電子ビーム (1.28nC/bunch) 及び 3.5GeV 陽電子ビーム (0.64nC/bunch)をビーム輸送路(BT ライン)を経て、直接蓄積リングへ入射を行う。入射器のコミッショニングは 97 年 10 月から始まり、順調に進展してきた[3]。

昨年 6 月より KEKB 実験が始まり、夏期シャットダウンの後、10 月から運転を再開した。夏期シャットダウン期間にビーム安定化へ向けての改善、加速ユニットの増強(5-8 ユニット新設)が行われ、そして秋以降フィードバック系や軌道補正を行うソフトウェアの整備がなされ、ビームコミッショニングに威力を発揮した。また今年の春には、陽電子生成用1次電子ビーム(以下 1 次電子ビーム)発生部及び陽電子生成部のrf系立体回路の変更が行われた[4]。本報告では、入射器コミッショニングの現状について報告する。

2.入射ビームの現状

入射器は 2.5GeV、3.5GeV、8GeV のエネルギーで KEKB、PF、AR に 4 ビームを入射している(図 1、表 1)。各ビームの切替えにあたり、電磁石、rf位相、加速モード等のパラメータ、陽電子発生装置等の切替え等は、ソフトウェアで行っている[5]。信頼性向上及び切替え時間短縮のために切替え点数を必要最小限にし、再現性を高めるために Q 電磁石の簡易初期化等の工夫を試みている。また、操作性を向上させるために、同一

パネルで切替えが行えるようになっており、パラメータの変更や設定値と機器からの戻り値で差があった場合には表示されるようになっている。

図 1. KEKB 入射器レイアウト図

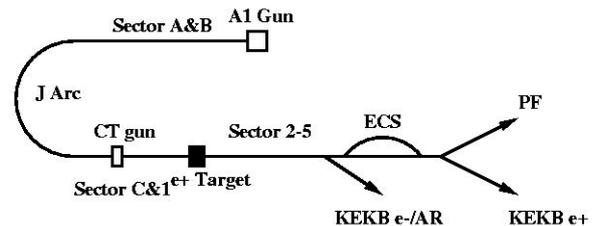


表 1. 入射器が供給しているビーム一覧

	KEKB e ⁻	KEKB e ⁺	PF e ⁻	PF-AR e ⁻
電荷量	1.2nC	0.64nC (10nC)*	0.2nC	0.2nC
Energy	8.0GeV	3.5GeV (3.4GeV)*	2.5GeV	2.5GeV
入射頻度 (1 日)	約 20 回	約 20 回	1 回	約 12 回
入射時間	1-2 分	5-10 分	3-5 分	3-5 分

*:1 次電子ビーム陽電子生成標的

3.ビーム安定化

安定化なビーム運転のためには、入射部(バンチャ、プレバンチャ、及び A-1)の安定化は重要である。特に 1 次電子ビームの軌道変化によるエミッタンス劣化及び電荷量の減少は、陽電子発生量に直接影響する。入射部直後のビーム軌道安定化のため、夏のシャットダウン期間中に以下の変更が行われた(図 2)[3]。

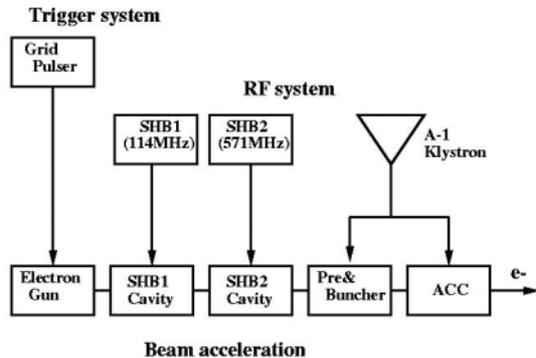
- 571MHzサブハーモニックバンチャ(以下 SHB2)に続いて、

¹ 赤坂展昌、飯田直子、家入孝夫、榎本収志、生出勝宣、大西幸喜、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、松本利広

114MHzサブハーモニックバンチャ(以下 SHB1)の半導体化

- SHB 用加速空洞の変更
- S-band アンプ(位相補償可能)への交換:A-1 クライストロンドライブ電源

図 2. 入射部レイアウト図



これらSHB1、SHB2、A-1のrf出力は、VXI/HP-UXシステムをデータ収集系[6]として位相及びパワーの変化をモニタするrfモニタで、その時間変化が測定されている。それによると、上記の変更の結果、rf位相、パワーの安定度が改善され、入射部直後のビーム軌道の安定性が向上した。なお、このrfモニタシステムは、シャットダウン期間に全ての大電力クライストロン(59台)、ドライバクライストロン(8台)の位相及びrf出力、及び各セクタ間のリファレンス用CWの位相差をモニタするための整備が終了した。

冬には電子銃のグリッドパルサーに遅延回路を取り付け、タイミング調整をできるようにした。これを用いて以下に述べる電子銃タイミング(遅延時間)のフィードバックを導入した結果、入射部の特性がさらに向上した。なお電子銃、SHB1とSHB2のタイミング関係は常にモニタされている。

入射部、ビームエネルギー及び軌道の安定化のためにフィードバック系(PID制御方式)が導入されている[5]。入射部フィードバックでは、電子銃の高電圧及びタイミング、SHB1、2のパワーと位相について、出力を安定にするためにフィードバックが動作している。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2箇所(Jアーク部、第3SY)、陽電子ビームには3箇所(Jアーク部、第3SY、ECS部)にフィードバックが動作している。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、上流のステアリング磁石を用いて設定した場所でのビーム位置の安定化を計る。電子ビームには9箇所、陽電子ビームには10箇所に軌道フィードバックが動作している。これらのフィードバックは、1つのパネル上で正常に動作しているのか確認できるようになっている。

機器の安定化及びフィードバック等ソフトウェアの整備により、

現在到達しているビーム性能を表2に示す。

表 2. 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(1.5)	0.75(0.6)
バンチ長 (ps) @FWHM	8(5)	10(16)
エネルギー (GeV)	8	3.5
エネルギー安定度(%) @p-p ²		0.1(<0.2)
エネルギー幅(%) @σ ³	±0.05(±0.15)	±0.15(±0.125)
規格化エミッタンス @1σ		
Bセクタ終端(10 ⁻⁶ m) ⁴	x:170(1200) y:170(570)	x:1700(1200) y:830(570)
BT直線部(10 ⁻⁶ m)	x:310 y:310 (250)	x:2700 y:1700 (1500)
軌道安定度 (mm) @rms	<0.1(<0.1)	±0.2(<0.1)

カッコ内は仕様値を示す。

1. 入射器終端での電荷量
2. 1次電子ビームJアーク直前
3. 陽電子ECS通過後
4. 1次電子ビームの値(陽電子)

ビームの安定化のためには、ビーム状態の常時把握を行うこともまた重要となる。ビーム状態の常時把握そしてビーム診断を目的として、SRモニタとエミッタンスモニタ(ワイヤスキャナ)が活用されている。Jアーク部に設置されたSRモニタで常時ビームのプロファイルを観測し、またJアーク部入口、入射器終端、及びBTライン直線部に設置された4台1組のワイヤスキャナを用いて1日に1度、エミッタンスとtwissパラメータの測定を行っている。通常、各パラメータに大きな変化は見られないが、変化が大きい場合には、マッチングをとるなどの調整を行う。

また安定な入射維持のためには、クライストロンダウン頻度を少なくする必要がある。加速管内での放電による投入rf反射が原因のクライストロンのダウンが多発する場合には、印加電圧を下げる、もしくは加速モードからスタンバイモードに変更してrfエージングする、といった対処を行い、rfダウンによるビームロス時間を最小にしている。

以上に述べたように、ビーム安定化、特に陽電子を生成するための1次電子ビーム安定維持は入射器にとって重要な課題である。これまで、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が、調整直後の状態を長く維持できていなかった。しかし、昨年夏のシャットダウン期間中の改造及びフィードバックの導入などにより、調整後の状態がある程度の期間にわたり維持できるようになった。また各種の常時モニタによってビーム変動が見つかった場合は、軌道自動調整プログラムの実施やrf位相等をモニタで見ながら調整を行うことにより、素早い回復が可能になってきた。

4. 運転安定度係数

ビーム安定化を実現する上で、各種パラメータの許容度を調べておく必要がある。そのために、表3で示す1次電子ビームに対して電子銃タイミング、電子銃高圧、SHB1位相、SHB2位相、A-1クライストロンの位相及び印加電圧、ドライバクライス

トロン位相(A セクタ、B セクタ;以下 SB_A、SB_B) の8パラメータを各々変えながら、運転安定度係数(陽電子生成標的前の電流を 90% 以上に維持するための許容幅)を測定した(表 4)。

表 3. 1 次電子ビーム電流測定場所およびビーム強度

測定場所	ビーム強度
バンチャ出口 (A1_B8)	11.4nC/bunch
J アーク入口 (R0_01)	10.1nC/bunch
J アーク出口 (C1_4)	9.9nC/bunch
セクタ 1 入口 (11_4)	9.4nC/bunch
標的前 (17_C4)	9.4nC/bunch

表 4. 標的前の電流を 90%以上に維持する許容幅

パラメータ	許容幅
電子銃 高電圧	±0.38%
電子銃 タイミング	±45 ps
SHB1 位相	±1.1 deg
SHB2 位相	±1.3 deg
A-1 クライストロン 位相	±1.7 deg
A-1 クライストロン 高電圧	±0.47%
SB_A 位相	±3.5 deg
SB_B 位相	±4.0 deg

表 4 により、測定時のビーム状態においては、1 次電子ビームの安定のために要求される許容幅が、電子銃、SHB や A-1 クライストロンの位相では狭い(約±1deg.)ことが分かった。また許容幅は入射部のビーム調整に依存するため、より幅の広い解を見つける必要があると考えられる。

SHB1、SHB2 及び A-1 クライストロンの位相は、位相検出器での測定の結果、1 週間で約±0.5deg.程度の位相ドリフトが見られるときがある。表 4 の許容値内の変化であっても、ビーム電流が減少した場合に、これらの位相を調整することにより、電流が回復することがある。このため今後も、安定な入射を確立するために許容幅を広げるべくパラメータ調整を行っていくと共に、ビーム不安定化の原因を調査する必要がある。

現在、ビームと機器の同時相関測定によって不安定の原因となっている機器およびパラメータを特定するための実験準備を進めている[7]。

5.トラブル及び対処

3 月には、バンチャ用加速管下流側数セル(カプラを含む)からの放電による投入rfの反射により A-1 クライストロンのダウンが多発(180回/week)し、入射器の運転に支障をきたした。このため、マイクロ波のパルス幅を決めているバンチャ下流にある 2 本の 2m加速管のrf接続を直列接続から並列接続へ立体回路の変更を行い、rfパルス幅を狭めた(1μs→500ns)。これにより、A-1 クライストロンの加速管放電によるダウン頻度は、1.3回/day にまで減少した。

同時期、陽電子生成標的直後にある 1m 加速管で放電が原因の投入rf反射による 2-1 クライストロンのダウンが多発し(400

回/day)、陽電子の安定な入射を妨げる事態が起きた。このため加速管を昨年夏まで使用していたものと交換をし、また、2-1 クライストロンは 1m 加速管のみに使用するようにして、それまで 2-1 クライストロンでパワーを供給していた 2m 加速管(1m 加速管下流側)に対して、新たに設置した 1-8 でパワーを供給するように立体回路の構成を変更した。4 月以降、加速管内放電が原因の反射によるダウン頻度は激減し、2-1、1-8 クライストロンのダウン頻度は各々約 1 回/month、0.3 回/day となっており、陽電子生成に問題はなくなってきている。

4 月には陽電子生成部直後の 2-3 のクライストロンが内部真空悪化によるダウンを繰り返した。設置場所が陽電子生成部直後ということもあり、運転を続けるためrfパワーを停めること(クライストロン交換)も出来なかった。このためクライストロンへの印加電圧を少しずつ下げていき(rf出力は 39MW→21MW と減少)、その都度、クライストロンの位相調整を行った。2-3 クライストロンの交換をするために、このクライストロンが使用できなくなった場合のオブティックスを計算、設定を行い、蓄積リングへの入射試験を実施した。具体的には、KL_23 以降のk値を現状の設定値と同じにするように Q 電磁石を設定した。その結果、陽電子ビームは現状の 80%程度(電荷量、入射率など)を維持できることがわかった。そこでKEKB蓄積リングの短期シャットダウン時に 2-3 クライストロンの交換を、余裕を持って行うことができた。現在、rfコンディショニングも終了し、運転に復帰している。

6.まとめ

昨年夏のシャットダウン期間での改造以降、入射器コミッショニングは順調に進展し、安定運転に向けて、ほぼ満足な結果が得られている。また、各種のトラブルが 3~4 月に集中して起きたが、これまでのハードウェアの安定化やビーム制御のためのツールの整備をしてきた結果、トラブルに対して迅速に対応し、ビームの回復をすることができた。しかし、さらなる安定運転実現へ向けてのスタディを続けると同時に、陽電子を倍増させる 2 バンチャ加速等のアップグレードへ向けて準備を進めている。

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] T. Kamitani, et al., Proc. the 23rd Linear Acc. Meeting in Japan, Tsukuba, Japan, 1998, p7.;
T. Suwada, et al., Proc. the 24th Linear Acc. Meeting in Japan, Sapporo, Japan, 1999, p22.
- [4] H. Kobayashi, et al., Proceedings of this meeting.
- [5] K. Furukawa, et al., Proceedings of this meeting.
- [6] H. Katagiri, et al., Proc. the APAC'98, KEK, Tsukuba, 1998, p.142.
- [7] T. Suwada, et al., Proceedings of this meeting.