

PRESENT STATUS OF THE PF INJECTOR

Satoshi OHSAWA and the PF Injector Group
 National Laboratory for High Energy Physics (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305

ABSTRACT

After construction of the PF 2.5-GeV linac and the Positron Generator Linac, continuous efforts have been made to improve performance of both linacs. The KEK B-Factory is presently under consideration as the TRISTAN phase-II future project. It requires 8-GeV electrons and 3.5-GeV positrons. The pre-injector has been upgraded in order to investigate instabilities induced by high intense electron beams in the main linac. Several developments, investigations and considerations are under way for the project. The present status of the PF injector linacs is described.

PF 入射器の現状

1. はじめに

PF 入射器の現状報告を仰せ付かり過去の報告例を調べたところ、PF 入射器全体にわたる現状報告は、本研究会では1980年の建設時期の1例だけであった。活動が多岐にわたるため、1個の報告で現状を網羅することが困難である、という事情が背景にあったものと思われる。

KEKでは現在Bファクトリー計画の検討が本格的に進められており、入射器であるリニアックには、8 GeVの電子ビームと強度のより強い陽電子ビームが求められている[1]。この計画がスタートすると、リニアックはかつてない規模で改造されることになる[2]。これに鑑み、現状の概要であっても現時点で整理しておくことは多少なりとも意味があるかもしれない。とはいえ、PF入射器全体を網羅するのは、筆者にはいささか荷が重過ぎるし、また適当であるとも思えない。従って、ここで取り扱う範囲はかなりウエイトの片寄ったものにならざるを得ないが、ご容赦いただきたい。

現状は過去に行われた改造や改良の集積である。まずこれまでの経緯を概観し(表1参照)、後に個別事項について説明する。PF 2.5 GeV リニアックは、4年間の建設期間の後1982年3月に完成し、直ちにPFリングへの入射が開始された[3]。ひき続いて陽電子発生装置の建設がスタートし85年に完成[4],[5]、86年からはTRISTANの蓄積リング(AR)への定常的な陽電子入射が始まった。88年にはPFリングにも陽電子ビームを供給する体制が夏には整い、この年の12月から2種類の陽電子ビームを切り換えて各リングに入射する運転が本

格的に開始された[6]。この年から92年にかけて陽電子ビーム増強のために各種の改造が継続的に行われた[7],[8]。また、Bファクトリーに向けて2.5 GeV リニアックで大電流の加速テストをすることが必要になり、92年の夏には入射部を全面的に改造した[9],[10]。現在はBファクトリーの8 GeV 電子加速に向けて、クライストロン[11]とその電源[12]及び加速管やSLEDの高電力・高電界試験[13],[14]や、モニター系、トリガー系真空系等の各種の試験や検討[15]が精力的に行われている。また制御系の大幅な更新も現在進行中である[16]。

以下では、ビームや高周波源の運転状況、と各種の改造を経た装置の現状等を中心にして報告する。

表1 入射器のこれまでの経緯

1982,3月	PF 2.5 GeV リニアック完成
1985,3月	陽電子発生装置完成
1985,10月	2.5 GeV まで陽電子ビームを加速
1986	ARへの本格的な入射開始
1987	クライストロン改良
1988	ミニコンピュータMX 3000II 導入
1988	モニター系改造
1988,7月	PFリングの陽電子運転開始
1989,3月	陽電子発生装置入射部 rf 増強
1990-92,1月	陽電子集束系の改造
1990,4月	PFリングの単バンチ運転開始
1991,3月	テストリニアック完成
1991	低速陽電子発生プロジェクト開始
1992,夏	2.5 GeV リニアック入射部増強
1992-93	制御システムの更新
1992-93	B-Factory 関係各種要素試験

表2 入射器の主な基本パラメータ

	eリニアック	陽電子発生装置
電子銃		
加速電圧	190kV	150kV
最大電流	10A	10A
ビームエネルギー		
電子	2.5 GeV	250MeV
陽電子	-	250MeV
加速周波数	2856 MHz	2856 MHz
加速管	2/3πモード, 進行波型, 準定勾配型	
	2 m管 x 162	4m管x11+2m管x1
クライストロン		40+1台 6+1台
パルス幅	3.5 μs	3.5 μs
繰り返し	25 (50) Hz	25 (50) Hz

2. 運転の状況

2.1 ビームの現状

現在営業運転で入射器から供給しているビームは、電子/陽電子それぞれ2種類ずつである。ARは単バンチ運転であるから、パルス幅が1.5 nsのビームのみであるが、PFリングは長パルス運転時には40nsのビームを使用し、単バンチの場合には1.5nsビームを使用している。尚、1 μs幅の電子ビームは、現在では、リニアックのクライストロンの位相調整時にのみ使用している。

図1は近年のリニアック運転総時間と運転率を示している[17]。年間5千時間以上運転しており、故障率は平均で98%台である。

表3 2.5 GeVの各ビームとリングの蓄積率

加速粒子	電子		陽電子	
パルス幅	1 μs,	1.5 ns	40 ns,	1.5 ns
ピーク電流	50 mA,	0.4 A	2 mA,	40 mA
供給先	Linac,	AR	PF,	AR,PF
蓄積率 (mA/s)	-	2	1,	0.3

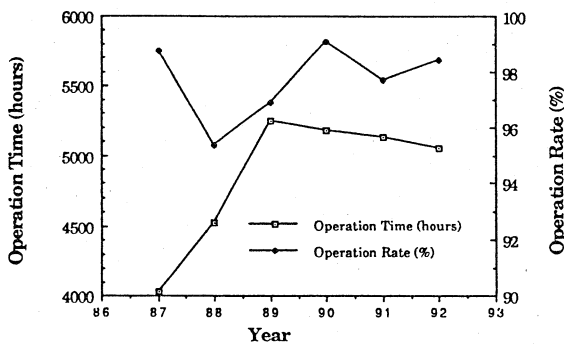


図1 運転総時間と運転率

2.2 クライストロン

図2は、クライストロンの運転状況を示している。近年とみに信頼性が向上してきた[17].[23].[24]。この結果高周波電力に多少の余裕が出来、将来計画に向けた諸々の実機試験が可能になった。

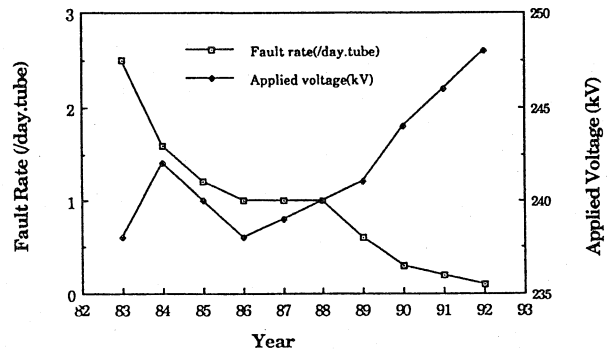


図2 クライストロンのFault Rateと印加電圧

3. モニター系の改良

1987年当時、陽電子ビームの調整には長時間を要する上に、立ち上げ毎にビームの状態が異なるという問題があった。この状況を改善するために、モニター系の整備が行われた[18]。陽電子発生装置の一次電子ビーム部終端と2.5GeVリニアック終端に運動量分析系を新設し、各分析系でスペクトルが自動で測定できるように整備した。また陽電子発生装置と2.5GeVリニアックをつなぐビーム輸送系のアクセプタンスを大きくすると同時に、関係する部分のビームモニター系を改造し、運動量分析系としての機能も改善した。

これらの整備により、陽電子ビームの運転が容易になり、信頼性も上がって大電流電子ビームの特性測定が行えるようになった。

4. 陽電子ビームの増強

陽電子発生装置では、完成以来、陽電子ビーム電流を増やすための努力が継続して払われてきた。その主な内容は、以下のようなものである。

4.1 一次電子ビームの集束系増強

電子銃の電流が次第に増加すると共に、電子ビーム径が大きくなり、ターゲットまでビームを損出することなく加速することが困難になってきた。そこでQ電磁石数をほぼ倍増して、アクセプタンスを大きくすることにより、ビームの透過率を改善した。これにより、ターゲットに入射する一次電子ビーム電流が増大した。

4.2 入射部の rf 増強

加速電流増加によりビーム負荷が深刻になり、クライストロン&モジュレータ電源を1台入射部に追加して rf を増強した。

4.3 電子銃の改造

1988年の12月から、PFリングへの陽電子入射が本格的に始まった。このビームは電荷量が大きくなるので、電子銃のカソードの寿命が問題となることが予想された。そこでカソードを Y-796 に変更し、ビームの安定を計った[6]。

4.4 陽電子集束系の改造

1990年から2年間、陽電子の集束系のアクセプタンスを倍増するための一連の工事を行った[7].[8]。これにより、陽電子ビーム電流が倍増すると共に、運転時の安定性と信頼性が増した。

表4 陽電子集束系の主な改造

	改造前	改造後
Pulsed Solenoid	1.2T x 76 mm	2.3 x 45 mm
Pulse Power Supply	1 kV - 5 kA	4 kV - 20 kA
DC Solenoid	0.2T x 4 m	0.4T x 8 m
e ⁻ /e ⁺ Separator	-	4 B.M.
Q-Mag System	8 Q-triplets	FODO+4 Q's

5. テストリニアック

2.5 GeVリニアックの入射部の隣にある側室(長さ20 m余り)の入り口を、コンクリートブロックでシールドして建設された[19]。完成は1991年3月である。リニアックで使用される部品などの要素開発や試験のほか、営業マシンでは困難である各種の研究開発を目的としている。

6. 制御系の改造

制御系計算機(MELCOM)の更新に伴い、システムの構成を大幅に改造している。ハードウェアの主要部分の置き換えを行うと共に、ソフトウェアの構成も変更される[16]。

7. 低速陽電子発生装置

単色の低速陽電子を2.5 GeVリニアックの電子線を用いて発生させ、クライストロンギャラリまで導くためのビームラインの建設が、リニアックの終端部で現在進められている[20]。これは低速陽電子の利用を推進するためのものである。

表5 低速陽電子源ビームの現状

1次電子	2 GeV	25 Hz	2 ns
ビームパワー	8 W		
低速陽電子ビーム強度			
陽電子に起因するγ線	10 ⁶ 個/sec/kW		

8. B-ファクトリー関係

KEKのB-ファクトリー計画は、8 GeVの電子ビームと3.5 GeV陽電子ビームを正面衝突させて、CP violation や素粒子間のmixingなどを測定しようというものである。沢山のイベントを必要とする精密実験であるから、リング内に蓄積されるビームは必然的に大電流になり、数アンペアに達する。

従って、トリスタンの主リングを使用する現在の案の場合には、蓄積電流が現状の百倍以上になり、特に陽電子の入射時間つまり陽電子のビーム強度が重要なポイントになる。また、リニアックからリングへ8 GeVの電子ビームを直接入射することになっているので、加速電界がもう一つの重要課題である。現在B-ファクトリー計画の実現に向けて、以下に述べるような改造や試験及び検討等が精力的に行われている[2]。

8.1 入射部の改造 [9]

昨年(1992年)の夏期保守期間中に2.5 GeVリニアックの入射部を大幅に改造し、大電流加速ができるようにした。これはB-ファクトリーに向けた入射器改造の第1歩である。入射器改造案では、陽電子ビームの10倍増強を1次電子ビームのエネルギーを現在の250 MeVから4 GeV程度まで引き上げることにより、実現しようとしている。このためには、現在と同程度の大電流の電子ビームを、現在よりもはるかに長い距離にわたって加速し、ターゲットまでロスなく導くことが重要である。従って、BBUなどの問題を現在の装置であらかじめ調査しておくことが必要である。

図3は、改造後のビーム加速特性である。B-ファクトリーで必要とする10 nC程の電子ビームが第二セクター中央までは特に問題なく加速された。但しこれはsバンドの単バンチビームではない。電荷量を大きくすると第1セクタ入り口でのロスが増加する。ビーム負荷によるエネルギー幅の増加とウェークフィールドによるエミッタンス増大が原因であると考えられる。入射部以外の殆どの部分は、1982年の完成時のままで、トランスポート

トのアクセプタンスは $1\mu\text{s}/50\text{mA}$ のビームを想定して設計されており、この部分のアクセプタンスが最小になっている[21]。

今年の夏期保守期間中に、第1セクターの第1ユニット中央にQ-tripletを1組追加し、アクセプタンスの最小部分を改善する。また476MHzのSHBを導入して、Sバンドの単バンチ加速試験ができるように、現在準備中である。

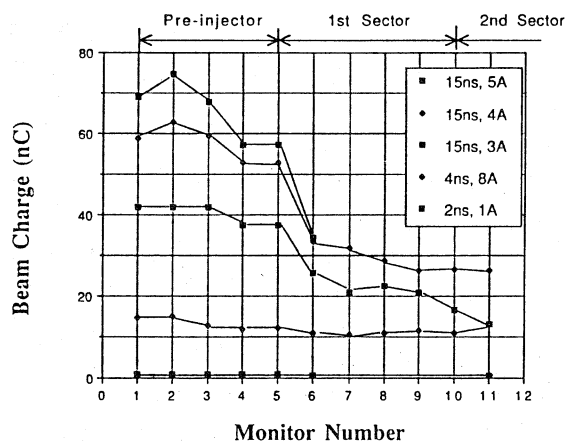


図3 入射部改造後の大電荷加速試験

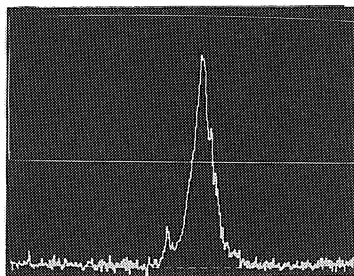


図4 8 A-4 ns ビームのバンチ幅、FWHM 9.8 ps

8.2 SLEDの試験 [14]

表6 SLEDの加速試験結果

クライストロン出力	28 MW
加速電界	SLED off 10.3 MV/m
	SLED on 19.4 MV/m (平均)
	23.1 MV/m (ピーク)
エネルギー増倍率	1.9 倍

8 GeV を達成するにはクライストロンの出力電力を上げるだけでは十分でなく、何らかの方法でパルスを圧縮することが必要である。この1つの方法がSLACで開発されたSLEDである。PFリニアックでは、JLCで開発したもの[22]を基本にしてテスト用空洞を製作し、4セクターの6ユニット

に実装して高電力試験を行っている。加速電界の値は、ビームエネルギーの測定値から算出した値である。

8.3 加速管の耐電圧試験 [13]

既存の加速管がどの程度の高電圧に耐えられるかを見極めることは、B-ファクトリー計画の基本方針に関わる重要課題である。クライストロン1台分の全パワーを1本の2 m 還流型加速管に供給して、加速管の耐電圧試験をした。

多数の加速管をタイミングを合わせた状態で試験をしないと、電界放出電流の問題もあるので、最終的な判断は難しいが、まずは第一段階をクリアしたものと考えられる。

表7 加速管の耐電圧試験結果

クライストロン出力	30 MW
(4-8 unit, 還流型)	
加速電界	28.6 MV/m
running 試験	25~30 MW, 4ヵ月
Timing	Standby 状態
rf off の回数	数回

8.4 クライストロンのハイパワー化 [11]

現在ライナックで使用しているクライストロンの絶縁碍子を大きくして印加電圧を高電圧化するとともに、集束磁場を強化した結果、310 kV の印加電圧時に51 MW の出力パワーが得られた。

これで、既存のコンポーネントの多くを再利用可能す方向で、ハイパワー化するめどが付いた。但し、カソード面積を大きくし、単位面積当りの電流密度を無理のない値にする等の改良を加える。

表8 ハイパワー化Kly. の試験条件と結果

クライストロン	PV3030A	改良型
印加電圧	265 kV	310 kV
出力パワー	33 MW	51 MW
パルス幅		4 μs
効率		44 %

8.5 モジュレータの改造 [12]

クライストロンの効率はほぼ一定であるから、rf パワーを増やすにはパルス電源のパワーを増やすことが必要になる。PFNのコンデンサーの総数を2倍にして、パルス当りのエネルギーを2倍にする改造を進めている。

表9 モジュレータの改造

PFN			
コンデンサー	20個	--->	20個2組バラ
総容量	0.292 μ F	--->	0.584 μ F
パルスエネルギー	295 J	--->	590 J
ピーク電力			105 MW
パルス幅 (半値)			5.6 μ s
(平坦部)	3.3 μ s		
クライストロン効率	(仮定)		44 %
期待されるrf出力パワー			46 MW

8.6 モニター系

各種モニター系の検討や開発、テスト等が進められている。ストリップライン型の位置モニターは、夏期保守期間中に第1セクター前半に4台設置され、実機試験が始まる予定である[15]。

参考文献

- [1] 黒川真一, B-Factory Mini-Workshop, 1993年7月
- [2] 佐藤勇., "入射器のエネルギー増強計画", 本研究会; A. Enomoto et al., "Linac Upgrade Plan for the KEK B-Factory", submitted to the 1993 Particle Accelerator Conference, Washington, D.C., 1993
- [3] J. Tanaka et al., "Operation of the KEK 2.5-GeV Electron Linac", Proc. of 1984 Linac Conf., Darmstadt, 1984, pp. 475-479
- [4] A. Asami et al., "Injector of the Positron Generator", Proc. of 1986 Linac Conf., SLAC, pp. 496-489
- [5] I. Sato et al., "Accelerator Characteristics of Positron Generator Linac", Proc. of 1986 Linac Conf., SLAC, 1986, pp. 502-504
- [6] S. Ohsawa et al., "Positron Beams for the PF Storage Ring", Particle Accelerators, 1990, Vol 27, pp. 139-144
- [7] A. Enomoto et al., "Performance of the Upgraded Positron Generator at KEK", in Proceedings of the Third European Particle Accelerator Conference, Hamburg, Germany, 1992
- [8] S. Ohsawa et al., "Improvements to the Positron Focusing System of the KEK Positron Generator and Its Performance", in Proceedings of the XVth International Conference on High Energy Accelerators, Hamburg, Germany, 1993, pp.135-137
- [9] S. Ohsawa et al., "New Pre-injector of the KEK 2.5-GeV Linac and its Performance", submitted to the 1993 Particle Accelerator Conference, Washington, D.C., U.S.A., 1993; T. Kamitani et al. "A Simulation Study on Beam Bunching in the KEK 2.5-GeV Linac New Pre-injector", ibid.
- [10] Y. Ogawa et al., "Beam Monitor Utilizing Transition Radiation", ibid.
- [11] 道園真一朗ほか., "Bファクトリー用46MWクライストロンの出力試験", 本研究会
- [12] 本間博幸ほか., "Bファクトリーのための46MWクライストロン用増強パルス電源", 本研究会
- [13] 大越隆夫ほか., "レゾナントリングによる2m加速官の実験", 本研究会
- [14] 花木博文ほか., "パルス圧縮法によるPFリニアック高周波源の増強", 本研究会
- [15] 諏訪田剛ほか., "電子/陽電子ライナック用ビーム位置モニターの開発(II)", 本研究会
- [16] 古川和朗ほか., "制御系の構成について"; 上窪田紀彦ほか., "KEK-Linac新制御システム"; 阿部勇、中原和夫ほか., "PCによる大型加速器(PF 2.5 GeV Linac)制御の試み", 本研究会
- [17] Photon Factory Activity Report 1987-92
- [18] T. Shidara et al., "Improvements to the Monitoring System of the KEK 2.5-GeV Linac and its Performance Tests", Particle Accelerators 29, pp. 239-244 (1990)
- [19] H. Kobayashi et al., "Present Status of Test Linac at Photon Factory, KEK", in Proc. of the 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, 1991, p.10-12
- [20] 白川明弘ほか., "PF低速陽電子源", 本研究会; 浅見明ほか., "フォトンファクトリー2.5 GeV電子線形加速器を用いた低速陽電子源の建設計画", 放射線Vol.18, No. 2, 1992, pp. 35-39
- [21] 紙谷琢哉、私信
- [22] H. Matsumoto et al., "High power test of a SLED system with dual side-wall coupling irises for linear colliders", Nuclear Instruments and Methods A330(1993)1-11
- [23] 松田七美男ほか., "放射光入射器線形加速器マイクロ波源の現状", 第13回リニアック研究会、1988, pp. 44-42
- [24] 本間博幸ほか., "PFライナック大電力パルス電源PFN用コンデンサーの故障と改善", 第14回リニアック研究会、1989, pp. 294-296