

UPGRADE OF PF INJECTOR LINAC FOR B-FACTORY

Isamu SATO and PF Injector group
National Laboratory for High Energy Physics
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305 Japan

Abstract

An upgrade of the PF injector linac has been planned for the KEK B-factory project, and its energies will be reinforced from 2.5 GeV to 8.0 GeV in order to inject directly both beams of electron and positron into the collider rings. This upgrade will be performed by combination with the subjects as developments of high power source and of rf-power multiplying techniques and extension of the linac length. A feasibility study of endurable discharges into applied accelerator structure with high field have also been executed continuously. R&D have been steadily advanced for an upgrade of klystron, power multiplying installations as SLED, reconstructions of klystron modulators, and etc. This paper describes the results of R&D and the outline of the new injector.

PF入射器のエネルギー増強計画

1. はじめに

入射器ではBファクトリーに対応するために、入射器のエネルギー増強計画を検討してきた。r線が電子対(一対の電子と陽電子をつくる)反応を起こすとき、どの反応でも電子対(粒子と反粒子)ができるが、これはチャージの保存則と物理法則の超対称性の原理を如実に表している。しかし、我々は現実に粒子(反粒子でない)の世界に住んでいる。それには「粒子の世界と反粒子の世界の物理法則に違いがあるのではないか?」との物理学上の大問題を検証する必要がある。

Bファクトリー計画の目的はこの問題を検証することにある。このためには実験事実が粒子(チャージ:C)の入れ替えと、空間反転(パリティ:P)を適用した物理法則と矛盾(CP不変性の破れ)を検証することになる。BNLのフィッチ&クローニンは1965年に、ごく一部のKL中間子崩壊にこの矛盾を発見し、CP不変性の破れを示唆した。一方、FNLのレーダーマン等は1977年にアップシロン(Υ)粒子を発見し、実験事実から、この粒子がBクォークと反B^{*}クォークから成り立っている事を証明し、益川、小林両氏は「CP不変性の破れはクォークの混じり具合による」事を示唆し、又、ロックフェラー大の三田教授はBクォークの崩壊過程ではCP不変性の破れが大きい事を予言した。そこで、Bクォークの物理的性質を徹底的に調べるために、電子陽電子衝突加速器を使って Υ 粒子を大量に生産する事が提案され、Bファクトリー計画が世界のあちこちで持ち上がった。しかし、等しいエネルギーの e^- と e^+ が衝突して発生する Υ 粒子は運動エネルギーを持たないので、この粒子が崩壊してできるBクォークと反Bクォークは常に等しい運動エネルギーになる。このような状態でBクォークと反B^{*}クォークが更に崩壊する過程を測定するとき、両者の崩壊過程の区別が付けにくいために、実験精度が悪くなる。そこで、異なるエネルギーの e^- と e^+ を衝突させて Υ 粒子に運動エネルギーを与えて、クォークと反クォークにエネルギーの差をつくれれば、それぞれの崩壊過程の違いを明確に測定することができる。この計画がKEKのBファクトリーである。

2. Bファクトリー計画の内容

KEK-Bファクトリー計画は、トリスタンのトンネルに電子ビームと陽電子ビームの2つの蓄積リングを建設し、このリングを交差させて大電流の電子ビームと陽電子ビームを衝突させる。衝突点では、毎秒1億回衝突し、毎秒1

個の Υ 粒子が発生する。この Υ 粒子の崩壊過程をカロリメトリックな実験装置で精密測定を行う。Bファクトリー全体計画のレイアウトを図1に示す。又、この衝突リングの主要パラメーターは表1の如くなる。

表1 衝突リングの主要パラメーター

Electron beam energy (GeV)	8.0
Electron beam current(A)	1.1
Positron beam energy (GeV)	3.5
Positron beam current(A)	2.6
Luminosity	10^{34}

KEKのBファクトリー計画には、今までの蓄積リングでまだ経験していない加速器技術上の難しい問題を多く抱えている。この問題点の主要なものをあげると次の如くなる。1) 大電流の蓄積、2) 入射時間の短縮化、3) 衝突確率の向上、4) 蓄積ビームの寿命、5) 放射光による損傷。

一般に、衝突リングではルミノシティを上げると e^-e^+ の電磁相互作用によってリングに貯蔵される粒子の寿命は数時間でかなり短くなる。このようなリングでは、ビームを頻りに入射することになる。従って、実験時間を相対的に多くするには、ビームの入射時間を可能な限り短縮しなければならぬ。入射時間の短縮化は、入射器から衝突リングへ電子と陽電子を直接供給する事によって解決できる。そのためには入射器のエネルギー増強を行う必要がある。

3. 入射器のエネルギー増強計画

リングの入射時間を20分程度と仮定すると、入射器は 4×10^9 /パルスの陽電子を蓄積リングに供給する必要がある。陽電子の発生数は電子のエネルギーとそのビーム電流の積、即ち、ビーム電力に比例する。しかし、大電流ビームの加速は空間電荷効果のためにビームが空間的に広がる(エミタンスが大きくなる)。入射器では電子エネルギーを上げる事によって、陽電子発生量を増強する手法をとる。従って、陽電子ビームを現在の20倍発生させるためには、 10^{10} /パルス(約10nC)の強度をもつ電子ビームのエネルギーを現在の0.225GeVから4.5GeVに加速させる必要がある。又、BB^{*}の第2励起エネルギー(8.213GeV)までに対応できるように入射器のエネルギーを考慮し、入射器が常に全稼働する可能性

は低いので、入射器を安定に稼働させるには少なくとも、このエネルギーの5%増の8.6 GeVに入射器のエネルギーを設定する必要がある。SLCでは、リニアックは設定エネルギーの約20%増の能力を持っている。

ここでは、入射器のエネルギーを8 GeVに設定して、エネルギー増強を検討してみる。入射器の加速部を1.5倍に延長した場合、加速電界強度が8.33 MV/mから17.78 MV/mに上昇する。電界強度比率は約2.13倍である。従って、加速管1本に供給する高周波電力は約5 MWから約23 MWに増強しなければならぬ。現在の加速ユニットではクライストロン1本の高周波電力を4分割し4本の加速管に供給している。このシステムでは、クライストロンの出力電力は $23 \times 4 = 92$ MWとなる。通常、線形加速器を安定に運転するには、高周波電力に1.4~1.5倍の余裕が必要である。そのためには、150 MW級の最大定格をもつクライストロンが必要となるが、現在このような大出力のクライストロンは存在しない。例えば、このようなクライストロンが開発されたとしても、その全長が長くなり、現在の入射器棟には収まらない可能性もある。入射器のエネルギー増強計画では、実用的なクライストロンの出力電力を50 MWと仮定すると、この出力電力を2倍程度に増幅する必要がある。以上の事柄から入射器のエネルギー増強の基本的設計基準を示すと次の如くなる。

- (1) 入射器の加速部を1.5倍に延長
- (2) 60 MW級のクライストロンの開発
- (3) 2倍以上の電力増幅システムの開発

入射器の延長は現在のKEKの敷地との関連から、現在の陽電子リニアックの南側に約30m、北側に約10m建物を延長する事が可能である。現在の2.5 GeV電子リニアックを南側に延長して、15m離れて平行に並んでいる2つのリニアックのビームラインを直列になるように偏向電磁石で接続する。この配置では入射器トンネルに設置できる加速ユニット数が現在の41台から61台に増加する。この場合、電子ビームの折り返し点の最大エネルギーは1.720 GeVとなる。この偏向軌道の曲率半径を4.0mとすると、最大偏向磁束密度は $B=1.43$ Tになる。この設定は現在の加速器技術から容易である。図2は入射器トンネルの延長部分を示す。表2には現在の入射器とエネルギー増強案のパラメーターを示す。図3にはエネルギー増強のための標準加速ユニットを示す。

4. 入射器のR&D

昨年度の夏期運転停止期間を利用して、入射部の大改造を行った。即ち、電子銃電圧160 kVから200 kVに上げられ、プリバンチャーは低インピーダンス型に設計され、バンチャーは15 MV/mの電界強度に設計されたものが組み込まれ、且つ、集束磁場は現在の0.2~0.4 kGから1.4 kGに強化された。入射部の終端にはEMS (Energy Monochromatic System) も組み込まれた。その結果、大電流の電子ビーム加速が可能になった。最近の実験結果は表3の如くである。

表2 入射器の現状と増強案のパラメーター

	Present	Future
Electron Energy (GeV)	2.5	8.6
Positron Energy (GeV)	2.5	3.7
Generator Energy (GeV)	0.2	5.1
Electrons $\times 10^{10}$ (P/P)	12	12
Positrons $\times 10^9$ (P/P)	0.2	4.0
Bunched beam width (ns)	<2	0.03

Repetitions (Hz)	25	50
Length of Linac (m)	412	648
Electric Field (MV/m)	8.33	19.1
Acceleration length (m)	300	450
Length of acc. (m)	1.875	1.875
Attenuation Neper/m	0.177	0.177
Shunt resistance Mohm/m	55	55
Total numbers acc.	162	242
rf-power/acc. (MW)	5.2	15.0
rf-power Amplitude/unit	1.0	1.81
Supplied-power MW/unit	21	61
Klystron power (MW)	30	60
Accelerator units	40+1	60+1
Positron generator units	3	34
Extension length (m)	0	40

表3 入射器の大電流加速

Intensity (A \times nS)	Charge/Pulse (nC)	Position
5 \times 15	58	End of Pre-injector
8 \times 4	32	Center in 2sector
2 \times 15	30	End of 2sector
1 \times 15	15	End of PF Injector

現在のARに供給している陽電子ビームは、10 nCの電子ビームを225 MeVに加速して、金属ターゲットに当てて発生させている。表2に示してあるように、Bファクトリーの陽電子蓄積リングに現在の20倍 (4×10^9 個/パルス) を供給する必要がある。上のテスト実験の結果から、現在の入射器は10 nCの電子ビームを、加速する能力を持っていることが明らかである。

入射器のエネルギー増強を行う場合、現在使用している2m加速管がどの程度の耐加速電界強度を持っているか見極める必要がある。このテストは加速ユニット#4-8で行われ、クライストロン電源を42.5 kVに昇圧し、クライストロンから27 MWの高周波電力を進行波環流型加速管 (Traveling Wave Recirculating Accelerator Structure: TRAS) に供給し、約28.6 MV/mのビーム加速に成功した。現在の加速管が約30 MV/mの加速ができる事を実証した。加速管の加速電界強度は電子ビームを加減速して、そのエネルギーを運動量分析電磁石で測定して評価している。又、加速管には個体差があるので、今年度は更に4本の加速管の耐久テストを同様なシステムを用いて行う予定にしている。

クライストロンモジュレーターの改造計画は現在の電源容量294 Jから2倍の588 Jに設定して進められている。2倍以上の高周波電力増幅システム (Microwave Power Compression System) が必要であるから、このシステムにSLEDを用いる場合は、パルス電力幅は現在の3.5 μ Sから5.6 μ Sに広げる必要がある。表4には現在のモジュレーターとSLED用とTRAS用のそれぞれの仕様を比較して記載する。

表4 各種モジュレーターの仕様比較表

		Present	SLED	TRAS
Max. peak power (MW)		84	117	153
Max. average power (KW)		14.7	30	30
Trans. step-up ratio		1:12	1:13.5	1:15
Output pulse Voltage (KV)		23.5	23.5	23.5
Output pulse current (KA)		3.60	5.00	6.53

表5 入射器のエネルギー増強の作業年次計画

年度 四半期	0年度				1年度				2年度				3年度				4年度				5年度			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
運転(e-GeV)	2.5	2.5			2.5	3.0			3.5	4.0			4.5	4.5			4.5	4.5			4.5	8.0		
運転(e+GeV)	2.5	2.5			2.5	2.5			2.5	2.5			2.5	2.5			2.5	2.5			2.5	3.5		
既設M輸送路					5	4			3	2+P			1											
陽電子ニアック										発生部移設			改造								反転作業	テスト運転		
入射部移設													移設作業	テスト運転										
高周波増幅系	R&D 準備				5	4			3	2+P			1											
クライ電源改造	R&D 準備				5	4			3	2+P			1											
低電力増幅系									設計	製造							据付	テスト運転						
制御系切換									設計				製作								据付	テスト運転		
加速ユニット					設計					製造							据付	調整	テスト運転					
高周波増幅系					設計					製造							据付		テスト運転					
ビーム輸送路					設計					製造							据付	調整	テスト運転					
クライ電源新設					設計					製造							据付		テスト運転					
建築:増設1									設計	建設工事														
設備:増設1									設計	設備工事														
建築:増設2									設計	建設工事														
設備:増設2									設計	設備工事														

数字:セクター — : 運転 ~~~~ : 現場作業

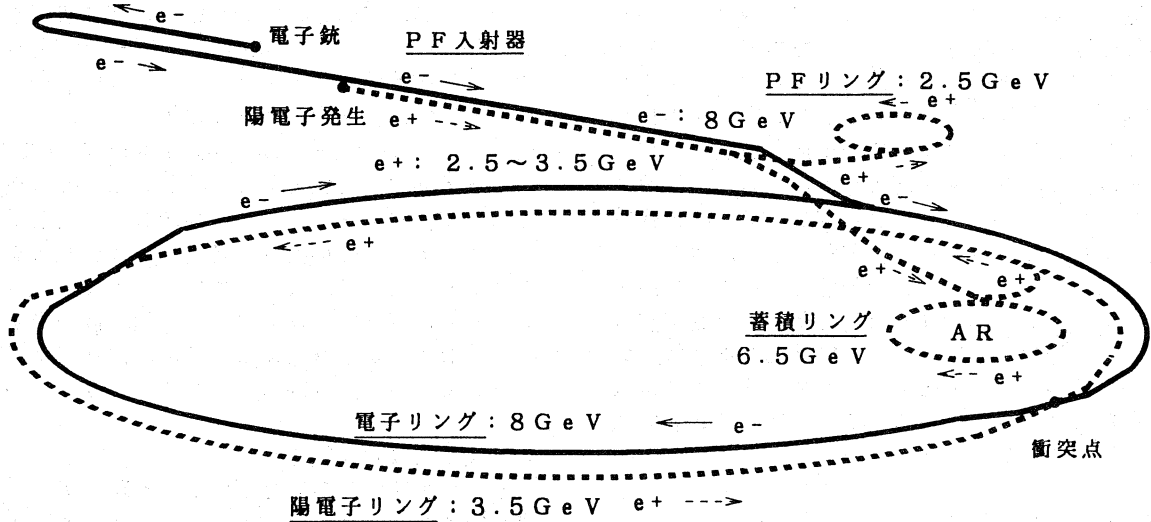


図1 Bファクトリー全体図

実線: 既設部 ——— 既設 加速ユニット
 破線: 増設部 ——— 増設 加速ユニット

図2 8 GeV リニアックの増設部地下トンネル平面図

0 10 20 30 40 50m

