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 planed 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 sujects as developments of high power source and of rf-power multipling techniques and extension of the linac length. A feasibility study of endurable discharges into applicated accelerator structure with high field have also been execuded continuously. R&D have been steadily ad-va nced for an upgrade of klystron, power multipling installations as SLED, reconstructions of klystron modulators, an d 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齢計画

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 エネルギー増進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 証する事が必要である。

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(パリティー: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。B NLのフィッチ&クローニンは1965年に、ごく一部の K[®]L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 ウプシロン(Y)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T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T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 e⁻を衝突させてT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1億回種突し、毎秒1 個のY粒子が発生する。このY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の如くになる。

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ファクトリ計画には、今までの蓄積リングで また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にな 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ーを上げると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 ームを頻繁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 しなければならない。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進1個

リングの入射時間を20分程度と仮定とすると、入射器 は4×10⁹/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、10¹⁰/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4.5 GeV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8.6GeV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8GeV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8.33MV/mから 17. 78MV/mに上昇する。電界強度比率は約2. 1 3倍である。従って、加速管1本に供給する高周波電力は 約5MWから約23MWに増強しなければならない。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23×4=92MW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閉発されたとしても、 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益計画では、実用的なク ライストロンの出力電力を50MW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 くになる。

- (1)入射器の加速部を1.5倍に延長
- (2) 60MW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2.5GeV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1.720GeV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=1.43T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」

160kVから200kV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15MV/ 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0.2~0.4kGから1.4kGに強化さ れた。入射部の終端にはEMS Energy Monochromatic Sy stem)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 (GeV) 2.5 Electron Energy 8.6 Positron Energy (GeV) 2.5 3.7 Generator Energy (GeV) 0.2 5.1 Electrons ×10 (P/P) 12 12 Positrons ×10⁹ (P/P) 0.2 4.0 Bunched beam width (ns) <2 0.03

(Hz)	25	- 50
(m)	412	648
(MV/m)	8.33	19.1
Acceleration length (m)		450
(m)	1.875	1.875
Neper/m	0. 177	0.177
Mohm/m	55	55
С.	162	242
(MW)	5.2	15.0
de/unit	1.0	1.81
MW∕unit	21	61
(MW)	30	60
s	40+1	60+1
or units	3	34
(m)	0	40
	(Hz) (m) (MV/m) gth (m) (m) Neper/m Mohm/m c. (MW) de/unit MW/unit (MW) s or units (m)	(Hz) 25 (m) 412 (MV/m) 8.33 gth (m) 300 (m) 1.875 Neper/m 0.177 Mohm/m 55 c. 162 (MW) 5.2 de/unit 1.0 MW/unit 21 (MW) 30 s 40+1 or units 3 (m) 0

表3 入射器の大電流加速

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

現在のARに供給している陽電子ビームは、10nCの 電子ビームを225MeV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(4×10⁹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10nC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42.5kVに昇圧し、ク ライストロンから27MWの高周波電力を進行波環流型加 速管 (Traveling Wave Recirculating Accelerator Struct ure:TRAS)に供給し、約28.6MV/mのビーム加速に成 功した。現在の加速管が約30MV/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、加速管には個体差はあるので、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294Jから2倍の588J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3.5µ Sから5.6µS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

		Presen	t SLED	TRAS
Max. peak power	(MW)	84	117	153
Max. average power	(KW)	14.7	30	30
Trans. step-up ratio	0	1:12	1:13.5	1:15
Output pulse Voltage	e(KV)	23.5	23.5	23.5
Output pulse current	t (KA)	3.60	5.00	6.53

PFN impedance	(Ω)	6.0	4.7	3.6
PFN capacitance	(mF)	0.3	0.6	0.6
Pulse width	(µS)	3.5	5.6	4.3
Pulse pepetition	(pps)	50	50	50

クライストロンの開発は順周に行われており、現在のク ライストロンの電子銃周辺を改良して、51MWの高周波 電力を発生させることに成功している。最終仕様の60M W出力に向けて更に開発研究を押し進める。

高周波電力増幅システムの開発はSLED型とTRRS (Traveling wave Resonant Ring System)型とTRAS型 の3種類について遂行されている。SLED型はKEKの JLCグループが開発したものと同じシステムを加速ユニ ット#4-6に設置し、テスト実験を行っている。このシ ステムはTE015モードの高周波空洞2個を対称に並べ、方 向性結合器に接続した構造になっている。又、このシステムの特色は、高周波空洞のQ値は高く(約10⁵)、空洞に は2つの結合孔を取り付けるみとによって、縮体モードで あるTMモードの発生を抑制できる。このシステムは、ク ライストロンから供給される電力の6.59倍の尖頭電力 と約2倍の加速電界増幅率が得られるように設計された。 テスト実験では、設計値の約97%の値が得られた。クラ イストロンの供給電力が24MWの場合、このシステムを 使ったビーム加速実験では、加速電界強度が約19MV/ mであった、TRRS型は新しい電力増幅システムであり、 4端子方向性結合器の2端子をリング状に結合したレゾナ ントリングである。このシステムの電力損失を小さくする ために、リングはTE20モードの矩形尊波管で構成される。 設計ではQ値が約6.5×104あり、SLED型より約3 %の電界増幅率が低くなる。しかし、このシステムには動 作周波数の近辺に縮体モードが存在しせず、又、構造がシ ンプルで安価に製作できる特色をもつ。現在、開発研究を 進めており、来年には性能テストができる予定である。

TRAS型は電力増幅率が約2、加速電界増幅率が1. 4と低く、既に述べたように専ら加速管の耐久テストに利用している。

5. エネルギー増強スケジュール

ここ数年間の放射光利用研究は物理、化学、生物に於ける光反応から光工学、光医学の分野にも確実に広がり、学際的研究に発展しつつあり、年間の放射光利用実験者数は2000人を超え、共同利用実験の申込数は年間約350件を超えている。その利用形態も全国大学共同利用から産学官共同利用へ、更に国内利用から国際利用へと発展しつつあり、高エネルギー物理学研究所で放射光利用研究を支えて行かなければならない実状にあり、長期間の共同利用実験の停止は許されない状況である。

従って、現在の放射光共同所用実験を維持しながら入射 器のエネルギー増強を行う事が条件である。又、年間40 00時間程度の共同所用実験時間を確保するとしても、エ ネルギー増強作業のために、半年を超える様な長期間の運 転停止は許されないので、2期運転は確保しなければなら ない。従って、エネルギー増強作業が3ヶ月毎に区切る必要 から、綿密な作業計画を立案し厳密に実施するにしても、 多少の無駄が生じる。

37月毎の運転を維持するには、改造作業後に入射器が確 実に稼動する必要があり、多数の加速ユニットを一度に改 造する事は、運転維持に対するリスクが大きい。又、マン パワー、作業場所、作業量を考慮すると、37月の作業期間 では、1群(1セクター=8加速ユニット)の改造作業が 限度である。従って、現在の入射器のエネルギーを年間4 000時間程度の運転を維持しながら、2.5GeVから 8.6GeVに増強するには、最低5年の歳月と1年間の 準備期間を必要とする。

Bファクトリー計画は当初4年計画で立案されたが、諸 般の事情で5年計画に変更された。現在の建設スケジュー ルのピリオッドパタン(3カ月運転、3ケ月建設)は変え ていないが、建設の最終段階では、既設加速器と増設加速 器の接合、建て屋と増築建て屋の接合を同時に行う必要が あり、この工事には3ケ月以上の期間を必要とする。建設 スジュールに基ずいて立案した入射器のエネルギー増強の 作業年次計画を表5に表す。

<u>6. まとめ</u>

入射器のエネルギー増強が現在のリニアック技術で可能 かどうか?。これは、1)クライストロンの開発、2)高 周波電力圧縮システムの能力、3)加速管の耐圧、に依存 する。従って、当面はこの問題に積極的に取り組み、その 開発研究と改良に全力を投入する必要がある。陽電子ビー ムの強度を現在の20倍にするには、10nCの単パンチ を4.5GeVに加速する必要性からビーム軌道に安定性 が要求される。現在の入射器では、短パンチの10nCの 加速に成功しているが、単パンチビームでは更にウェーク 場が強くなりエミッタンスの悪化が予想されるが、加速電 界強度も強化されるので、この影響は減少する。それでも 集束系の強化とビーム軌道の安定化には工夫が必要であり、 又、ビーム軌道を精密に測定できるモニターの開発も重要 となる。

予算の制約から建設計画を当初の4年から5年に延長されたので、時間的に余裕が出来、R&Dを積極的に取り入れる事が可能となった。しかし、建設が長くなると放射光 共同所用を制約する期間も延長されるので、これは新たな 問題点でもある。

入射器のエネルギー増強の実現の可能性はBファクトリー計画が実施できるかどうかにある。この計画が実施されるまでには、学術審議会、予算通過等、幾つかの関門を通らなければならない。入射器のエネルギー増強には加速器以外に建築、施設の拡充も重要な要素である。又、入射器の運転を継続しながら建設計画を進める上では、これらの施設がどのように実施されるかが、非常に重要となる。





表5 入射器のエネルギー増強の作業年次計画

-47 -