

# UPGRADING OF THE PF LINAC RF SOURCE FOR THE KEK B-FACTORY

Shozo ANAMI, Shigeki FUKUDA, Hirofumi HANAKI, Kouichi HONMA,  
Katsumi NAKAO, Yuji OTAKE, Yoshio SAITOU and Tetsuo SHIDARA

KEK, National Laboratory for High Energy Physics

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305

## ABSTRACT

Upgrade of the PF linac microwave source is required to reach an acceleration energy of 8 GeV in the PF linac as an injector for the KEK B-Factory. This paper describes a discussion of the effectiveness of the SLED type of pulse compressor and the upgrade method of modulators and klystrons. By doubling the modulator output pulse energy and adopting the SLED with rf pulses of 4- $\mu$ s pulse width and 41-MW power, the acceleration energy of the 2.5-GeV PF linac will be increased up to 7 GeV.

## KEK-BファクトリーのためのPFリニアックRF源の増強

### 1. はじめに

放射光リニアックでは、かねてより、Bファクトリー計画の入射器に向けてエネルギー増強を計画しており、現在までに、その方式決定のための検討やビーム加速試験、又、関連機器の改造や評価等と言ったことを勢力的に進めてきた。Bファクトリー衝突リングには3.5GeVの陽電子と8GeVの電子が入射されるが、この8GeV電子の入射については、リニアックで8GeVまで加速して直接的に入射するのか、或いは、途中でブースターリングを設けそこで8GeVに加速して入射するのかなど、まだその入射方式が最終的に決定されていない段階である。この様な状況下でリニアックによる直接入射を実現するには、8GeV増強の費用を極力抑さえ、同時に、実用時の高い信頼性と安定性を如何に確保することが出来るのか、と言うことに掛かっている。これらはマイクロ波源の増強が如何なるものとなるかによるところが大きく、ここでの改造の規模や費用、また関わる技術の難度などを正確に見積もることが非常に重要なこととなる。

### 2. RFパルス圧縮の有効性

Bファクトリー入射器の絶対的な建設費の制限を考えるならば、マイクロ波源の増強目標として、現在の40加速ユニットから成るPF2.5GeVリニアックの加速エネルギーを少なくとも6GeV程度までに上げなければならない。このエネルギーをパルス圧縮を用いずに直接クライストロン出力で得ようとする、1加速ユニット当たり120MWが必要になる。これはコスト的にも技術的にも容易ではなく、残りの2GeV分を考えると余り現実的な方法ではない様である。一方のパルス圧縮方式は、その有効性から世界的に広く採用され、多くの

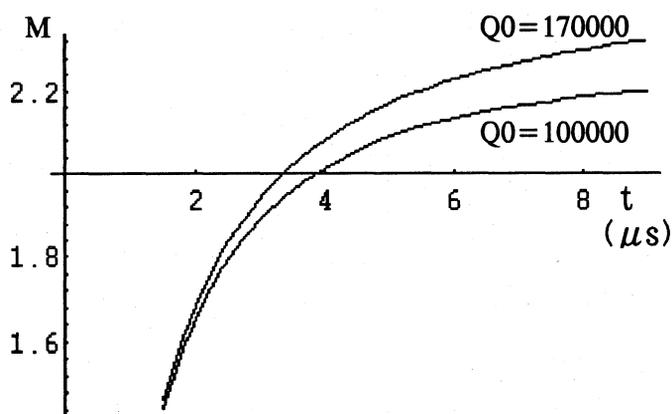


図1 SLEDによる電圧逡倍係数

実績がある。現在、Sバンド帯で実用されている圧縮方式は全てSLED (SLAC Energy Development)タイプである。このSLEDをPFリニアックの平均的な加速管Cタイプ( $T_f=0.507\mu s$ )に適用すると、図1に示すような加速電界通倍係数(M)が得られる。この係数はエネルギー蓄積空洞のQ<sub>0</sub>で異なるが、パルス幅が4 $\mu s$ 以下では大差はなく、以降の検討では最も実績のある空洞のQ値10<sup>5</sup>(TE<sub>015</sub>モード、SLAC)を用いることにする。このQ値でパルス幅が3 $\mu s$ (最適空洞結合係数 $\beta=7.4$ )、4 $\mu s$ ( $\beta=6.4$ )の時、それぞれの通倍係数は1.88、2.01となり、6GeV加速に必要なRF電力がそれぞれ34MW、30MWと低い値でよいことになる。この様に、SLEDによる効果はPFリニアックに於いても大きく、短パルスの加速を想定するこの8GeV増強では非常に適しいものであると言える。又、その他の圧縮方式として、現在、還流型と呼ばれるパルス圧縮方式も8GeV増強の候補として考えられている。この方式で得られる通倍係数はパルス幅2.3 $\mu s$ で1.34と余り大きくないが、平坦な加速電界が得られると言う有利さがあるため、以後の検討でも取り扱うことにする。

### 3、モジュレータの増強

モジュレータを増強し1パルスあたりの出力エネルギー(ピーク電力×パルス幅)を増やすには、PFNの充電電圧が使用部品の耐圧(特にサイラトロン、PFNコンデンサー)や、配置、配線の空間距離等によって決まってしまうため、PFNコンデンサーの総容量を増やさなければならない。現使用のコンデンサー(0.0147 $\mu F$ )と同一のものをいい、これらを収納する筐体の拡張を他の機器配置に影響しない範囲に止めるならば、追加可能なコンデンサー数は最大20個程度となる。この結果、PFNコンデンサーの総数は現在の2倍の40個となり、総容量が0.588 $\mu F$ となる。従って、充電電圧が45kVの時、パルス出力エネルギーは590Jになる。この値は、パルス幅を標準的な3.5 $\mu s$ で考えると、パルス電力の出力が170MWになり、43%効率のクライストロンでは72MWのRF電力が得られる値であり、現在のほぼ最大クラスのクライストロンをドライブするに足る程のものであると言える。

PFNコンデンサーの容量倍増に伴い、主回路部品の殆どはその電力容量を倍増しなければならない。この内、現使用で十分な余裕のあるダイオード類(整流、充電、シャント)、デューキューイング用SCR、サイラトロン等は多少の冷却強化でそのまま使用できそうである。しかしながら、IVR、高圧整流トランス、平滑チョーク、充電チョークといったトランス類は全面的な造り変えとなる。一方、これらの収納筐体については、トランス類の冷却を水冷式にするならば、油タンクの大きさを現状の大きさに押さえられ、PFN筐体を除き、現在の配線と共にそのまま使用できる。

40個のPFNコンデンサーを収納するPFN筐体は、現筐体の上に高さ80cmの筐体を重ねて拡張を図る。40個の配列は、縦に4列それぞれ10個を並べ、各2列をPFNコイルを通してジグザグに接続し、それぞれが20セルからなる2つのPFNとする。この2つのPFNは充電回路やサイラトロンがつながる入り口端で並列に接続される。コンデンサー配列をこの様にしたのは、収納のスペースファクタを良くすると同時に、特定のセル間での結合の違いをなくし、それぞれを均等化し、より平坦で、配置構造に起因する歪のないパルスを得ようとするためである。

PFNインピーダンスは、充電電圧(45kV)及びクライストロンのパービアンズ( $2.1 \times 10^{-6} A/V^{3/2}$ )を一定とするならば、出力パルスのパルス幅をいくらにするかによって決まる。また同時に、

表1 パルス幅に対するマイクロ波源のパラメータ

RFパルス幅		2.3 $\mu s$ (還流型)	3.0 $\mu s$ (SLED)	4.0 $\mu s$ (SLED)
モジュレータ				
PFN総容量	$\mu s$	0.588	0.588	0.588
PFN充電電圧	kV	45	45	45
パルスエネルギー	J	588	588	588
パルス幅	$\mu s$	3.8	4.5	5.5
パルス電力	MW	155	131	107
パルス電圧	kV	22.5	22.5	22.5
PFNインピーダンス	$\Omega$	3.3	3.9	4.7
パルストランス				
昇圧比		15.7	14.6	13.5
パルス電圧×幅	V·s	1.3	1.5	1.7
クライストロン				
ビーム電圧	kV	352	329	304
ビーム電流	A	439	397	352
RF出力 使用最大	MW	67	56	46
RF出力 使用平均	MW	60	51	41
RFパルス幅	$\mu s$	2.3	3.0	4.0
パルス圧縮				
加速電界通倍係数		1.34	1.88	2.01
加速エネルギー 電子/40ユニット	GeV	5.6	7.3	7.0

パルス出力、パルストランス昇圧比、RF出力(効率は43%で一定とする)等と言ったものも全て定まってしまう。これらをまとめたのが表1であり、それぞれのパルス圧縮方式で必要とされるパルス幅に対応して示している。但し、ここで示すRFのパルス幅は、電圧パルスの半値幅から立ち上がり、立ち下がり時間に要すると考えられる $1.5\mu\text{s}$ を、簡単のためにパルス幅や昇圧比に関係なく一律に差し引いた値としている。更に、上記のようにして求めたRF出力は実際に用いる場合の使用最大値であるとし、これに0.9を乗じた値を使用時の平均値としている。又、PFリニアックの加速エネルギーはこの使用平均値を用いてスケーリング(21MWクライストロンで2.5GeV)によって求めた。従って、この値にはビーム負荷による加速エネルギーの低減も含まれている。

#### 4、クライストロン及び周辺機器

8GeV増強で用いられるクライストロンがどの程度のものになるかは、たとえモジュレータの増強を現在のパルス出力エネルギーの2倍と定めたとしても、表1で示した様に採用するパルス圧縮方式(パルス幅)によってかなり異なったものとなる。クライストロンの大きさや価格を決めるものは、決してピーク出力値だけでなく、パルス幅やデューティ、効率といったものも影響するが、ここで対象としているパルス幅( $2.3\sim 4\mu\text{s}$ )と繰り返し(50pps)のもとでは、ほぼピーク値のみで決まると考えることができる。

表2はそれぞれの方式で要求されるクライストロンの性能をまとめたものである。ここで示す最大定格値はそれぞれが持つ潜在的な能力を意味するものであるとして、表1にあった使用平均値を1.2倍したものである。また表中には、比較のためにPFで使用しているPV-3030(三菱電機)及びSLACの5045も記載している。この表から、還流型やSLED- $3\mu\text{s}$ では、現PF使用中のPV-3030クラスのものでは無理があり、やはり5045クラス程度のものが必要になるかと考えられる。しかし、一方のSLED- $4\mu\text{s}$ モードでは、十分とは言えないが、PV-3030クラスのものでも改良すれば、使用可能になると考えられる。更に、このSLED- $4\mu\text{s}$ では、使用最大電圧が300kV(表1)程度なので、現使用中のパルストランス(少なくとも鉄芯)や波形モニター類、オイルタンクなどの周辺機器が使用できる。しかし、330kVを越える場合にはこれらが殆ど使用できなくなると考えなければならない。ここで、PV-3030と5045との外形上の違いを比較すると、集束磁石の長さに影響する第一空胴-出力空胴間が約1.4倍、磁石の内径に影響する電子銃外径が約1.2倍、それぞれ5045が大きく、体積で1.6倍の違いとなる。また必要集束磁場でみると、PV-3030が1.1kGに対し5045が1.4kGであり、磁石の大きさも相まって磁石電源の容量には2.5kWと5kWとの違いとなる。この様にPV-3030と5045とでは、本体のみならず、周辺機器に於いても大きな違いがあり、5045クラスを採用するには相当の費用を要するものと思われる。

この様に、同じSLED方式に於いても、増強費用の面から $4\mu\text{s}$ モードと $3\mu\text{s}$ モードとでは大きな開きがある。たとえ、 $4\mu\text{s}$ モードでは加速エネルギーが低く、その分増設ユニット数が多くなる事になって、現用のクライストロン周辺機器の多くが再使用できるため、全体的には $4\mu\text{s}$ モードの方が増強費用低減の上でかなり有利になる。更に、多少加速エネルギーが低くなるSLED- $4\mu\text{s}$ モードであっても、加速管の電界でみると、使用最大値ではほぼ25MV/mにも達し、既に、大型実用機として他にない程の高い値になっており、場合によっては、クライストロンの出力を下げて使用しなければならない事態も十分に予測される。これらの事から、マイクロ波源としてはSLED- $4\mu\text{s}$ であっても加速管に対して十分な電力を備えていると言える。

表2 要求されるクライストロンの性能(最大定格)

	2.3 $\mu\text{s}$ (還流)	3.0 $\mu\text{s}$ (SLED)	4.0 $\mu\text{s}$ (SLED)	PV-3030 (MELCO)	5045 (SLAC)
ビームパルス幅 $\mu\text{s}$	3.8	4.5	5.5	3.5	
ビーム電圧 kV	363	340	312	270	350
ビーム電流 A	459	416	366	295	414
パービアンス $\mu\text{V}^{1/2}$	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0
RFパルス幅 $\mu\text{s}$	2.3	3.0	4.0	2.0	3.5
RF出力 MW	72	61	49	33	67
効率 %	43	43	43	42	46
繰り返し Hz	50	50	50	50	180
RF平均出力 MW	8.3	9.1	9.8	3.3	42
空胴数		(5)	5	5	6
全長 mm			<1400	1317	1690
窓	(double)	(single)	single	single	double