

DESIGN AND MANUFACTURING THE 60-KW KLYSTRON

DRIVING THE 50-MW KLYSTRON FOR KEKB

SHIGEKI FUKUDA

National Laboratory for High Energy Physics (KEK)

1-1 Oho, Tukuba, Ibaraki 305, Japan.

ABSTRACT

The KEKB-project (B-Factory project) requires an energy upgrade of the KEK linac from 2.5 GeV to 8.0 GeV and new 50-MW klystrons have been developed for this rf source. In order to feed a drive power to these 8 tubes which are used with SLED cavities, a 60-kW sub-booster klystron (SBK) has been designed in KEK and manufactured under the collaboration of KEK and MHI. A proto-type tube was tested and a 60-kW output power was obtained at the beam voltage of 25 kV, which is produced by the SBK modulator using semiconductor switching device.

KEKB-50MWクライストロン励振用60kW

クライストロンの設計と試作

1. 序論

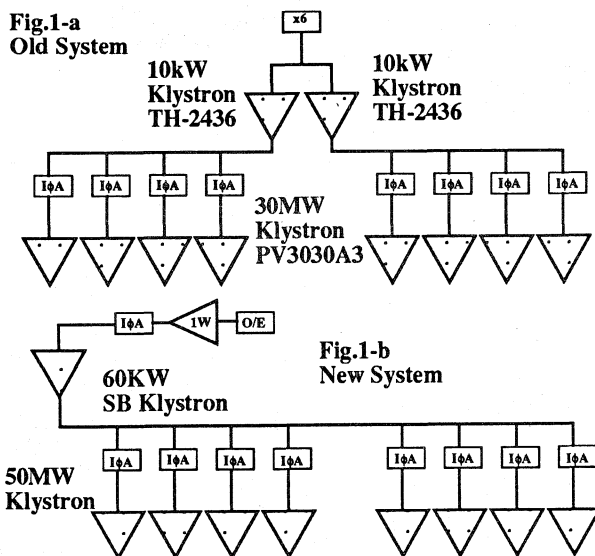
現在進行中であるKEKB計画では1セクター当たり8本ある50MWクライストロンを励振するサブブースタークライストロンの変更を考えている[1]。従来は市販品である出力10kWのクライストロンTH-2436を2本並列にして図(1)aのように使用してきた。しかし今後はSLEDを併用するためにビームとRFのタイミングの関係から図(1)bのように使用する。この時は伝送ラインの損失もあって最低でも40kW以上の出力電力が必要である。このようなクライストロンは市販品としてはないのでKEKで設計を行い、三菱重工の三原製作所に製造を依頼して試作品を開発した。本レポートで仕様、設計およびプロトタイプの実験結果について報告する。

2. サブブースタークライストロンの仕様

現在計画されているサブブースター用パルス電源のスイッチ素子の半導体化計画によると、最大36kVまで使用できるものを採用している。クライストロンへ印加される定格電圧を25kVとし、かつ電子銃のマイクロパービアンスを2.0とすると、効率30%で約60kW程度の出力電力が期待でき、そうむずかしい設計は必要ない。表1にサブブースタークライストロンに関する仕様をまとめて示した。

トムソンのクライストロンとの変更点としては以下の点が上げられる。

(1) 集束磁石を永久磁石から電磁石へ変更。



図(1)a旧システム及び図(1)b新システム。

- (2) 各空洞は外部同調可能型から固定型にした。また利得を考えて空洞数を4空洞から6空洞にした。
- (3) 内蔵のイオンポンプを取り付けた。
- (4) 各空洞の周りを水冷することで、温度的な安定度を良くした。
- (5) 入力用の給電同軸ラインは上部から入力空洞に直角に入り、内導体そのまま空洞壁面との間で直線状ループを形成する構造とした。これにより集束磁石等を

表1. サブブースタークライストロンの仕様

項目	単位	仕様	値
印加先頭電圧	kV		25.0
先頭電流	A		7.91
マイクロパービアン	$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$		2.0
パルス幅 (ビーム)	μsec		>6.0
繰り返し (二重パルス)	pps		100
パルス幅 (マイクロ波)	μsec		4.0
先頭 rf 電力	kW		>60
平均 rf 電力	W		24
効率	%		>40
利得	dB		57
入力電力	mW		100
全長	mm		約690
電子銃	BIカソード		
収束方式	電磁石集束		
冷却方式	水冷却		
イオンポンプ	1リッターポンプ内蔵		
空洞数	6個		
出力導波管	39D同軸管		
出力フランジ	EIA規格39D用フランジ		

コンパクトにすることができた。

- (6) 全体構造としてSLACのサブブースタークライストロンを参考にさせていただいた[2]。

3. サブブースタークライストロンの設計

設計は各種計算機プログラムを用いてKEKで行った。最初のプロトタイプはすでに完成し、評価試験を行っている段階である(第五章)。電子銃は口径1インチのBIカソード(Irコートタイプ)を使用した。設計は電極構造設計については、計算機プログラムEGUN[3]を用いた。集束磁石の設計および磁界の下でのビーム軌道の計算については更にPOISSONコード[4]を用いて行なった。電子銃は、良く知られたピアス式電子銃設計にもとずいた設計となっている。マイクロ波とビームの相互作用領域での動作解析には、最初5空洞配置について計算機プログラムJPNSDK(一次元ディスク模型)[5]およびFCI(25次元PICコード)[6]を用いてシミュレーションを行なった。この計算では出力電力や効率では良好な結果が得られたが(一次元ディスク模型JPNSDKによるシミュレーションでは、印加電圧が25kVの時に、効率58.2%、利得51.6dB)、利得に若干不満が残る結果となっ

表2. 空洞関係のパラメーター

空洞番号	周波数 MHz	RQ	全空洞 との距離 mm	Q	ギャップ 長 mm
1(入力)	2858	67.5		450	5.0
2	2860	97.5	30	5000	5.0
3	2861	105.0	35	5000	5.0
4	2886	97.5	40	5000	5.0
5	2891	100.0	60	5000	5.0
6(出力)	2856	85.0	35	75	5.0

た。この計算結果では1W弱の入力電力を必要とし、何らかの増幅器が必要となるが、位相や振幅の安定度の面からはなるべくアクティブな素子の多用は避けたいところである。利得を上げるために前述のとおり、6空洞配置で同様に再計算を行ない、最終的な設計値を決めた。JPNSDKによるシミュレーションによれば、計算上は印加電圧が25kVの時に、効率58.0%、利得62.8dBを得た。よりリアリスティックなシミュレーションであるFCIコードによる計算結果では、印加電圧が25kVの時に、効率58.9%、利得62.2dBと同様な結果を得ている。この結果をそのまま信用すれば、出力電力はピーク100kW以上可能な結果を与えているが、一般的にマイクロパービアンが20前後のクライストロンでは効率が50%以上となるのはきわめて難しく、現実的には60kW程度以上を期待している。表2に最終的に決めた各空洞のパラメーターをまとめて示した。出力の同軸管は従来と同様に真横に出ている。20Dから39Dの同軸管に変換した後、出力窓が来る。出力フランジは、プロトタイプについては、トムソンのクライストロンと同様にEIA規格のバットフランジにしたが、日本での使い勝手を考慮すると今後BSX規格に変更することになる。ソケット部の構造としては、クライストロン製造時に必要な排気管が電子銃部の下部に位置しているために、そのチップオフ部(真空封じ切部)の保護も兼ね、金属の絞り加工による保護カバーを下部全体を覆うように取り付ける。ヒーターおよびカソード端子はトムソンのクライストロンと互換性のある構造にし、サブブースター電源側からは旧型も新型も両方使用可能な構造とした。

4. 製作

製造は機械加工的なものは三菱重工の三原製作所に依頼し、排気ベーキングとチップオフ、カソードの活性化

等は KEK で行った。製造上まず問題となったのは入力空洞の結合度であった。シミュレーションについて示した結果は入力空洞の負荷 Q が 200 程度にした時の計算結果であるが、コールドテストではもっと大きな値となってしまった。入力空洞の負荷 Q を変えて再計算をしたところ、この値は 200 ~ 450 の範囲で効率はほぼ一定であるという結果を得たので、試作品は表 2 にあるように入力空洞の負荷 Q が 450 で製造した。この場合は JPNSDK コードと FCI コードの予測の差は大きくなっているが、それでも計算上は両者とも効率 50% 以上の結果を与えている。

KEK で行った排気ベーキングの際に二三のトラブルが生じ、製作のスケジュールが大幅に遅れた。その一つは排気炉の地絡問題で、改造を行った。二つ目の問題としては、排気管の支持構造を新しくした際に支持治具の歪のためにリークをおこし、電子銃処理からやり直したことが上げられる。これらは改善され今後同種のトラブルは避けられると思う。図 2 に排気炉にセットされたクライストロンをチップオフしている写真を示す。

印加電圧が 25 kV と低いため特別な電圧エージングおよびマイクロ波的なエージングは不要であった。

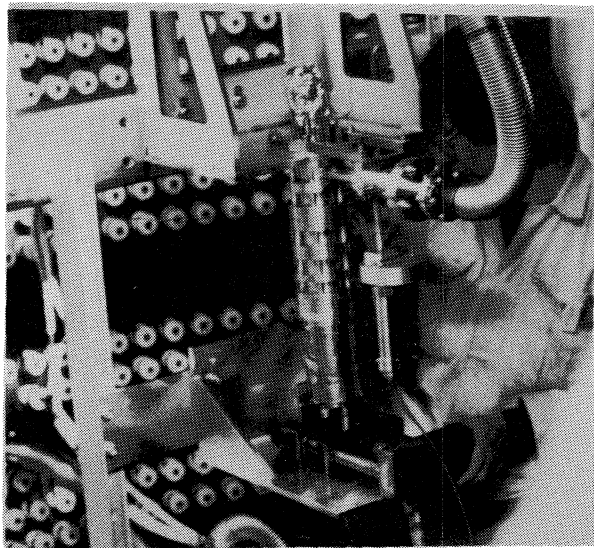


図 2. SBK の排気炉におけるチップオフの様子。

5. 試験とその評価

試験は KEKB 用に改造された新しいサブブースター電源で行った。これはスイッチ素子に半導体を用いたハードチューブパルサーであり、DC 電圧最大 36 kV かけてクライストロンには 25 kV 前後までの電圧を印加できる。クライストロンビーム集束用電磁石は 3 つのバンケーキ

からなっており、800 ガウス程度で集束する設計となっている。クライストロンのマイクロパービアンスは設計値通りであった。試験のセットアップは簡単であり、出力電力は 39 D 同軸管の無反射終端の前にセットした 39 D 同軸管の方向性結合器をモニターして測定した。まだ完全に評価試験を終えた訳ではないが、出力電力 60 kW 程度 (入力電力約 110 mW の時) 出ていることが確認されている。今回のプロトタイプは若干寸法が設計値とずれたところがあり、集束磁界とのマッチングがずれている。そのこともあってよりよい動作パラメーターを探しているところである。

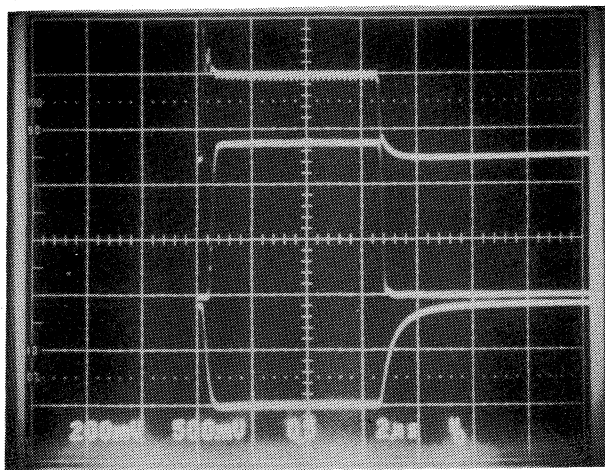


図 3. 電流パルス波形 (上)、rf 出力波形 (中)、電圧パルス波形 (下)。横軸は $2 \mu\text{s}/\text{div}$ である。

6. 今後の展望

KEKB 計画ではこのサブブースタークライストロンを 7 台使用する。そのために昨年度製作した 1 号機の評価、そして今年度数台の製作が控えている。安定して minimum 60 kW の出力が得られること、そして故障確率や寿命に関する評価を今後継続して行う必要がある。

参考文献

- [1] "放射光入射器増強計画 - KEKB にむけて" (デザインレポート)、to be published.
- [2] R. Neal, "The Stanford Two Mile Accelerator", W. A. Benjamin INC, New York, USA, 1968./A. E. Vliet, in private communication (SLAC).
- [3] W. B. Herrmannsfeldt, SLAC - Report-226, 1979.
- [4] K. Halbach et al., Particle Accel., 7, pp. 213, 1976.
- [5] H. Yonezawa et al., SLAC - TN - 84 - 5, May, 1984.
- [6] T. Shintake, KEK - Report 90 - 3, 1992.