

Cバンド 50MWクライストロンを用いた大電力高周波源 (I) - 低電力励振系の構築 -

松本 利広¹、竹中 たてる、中尾 克巳、道園 真一郎、矢野 喜治、福田 茂樹
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

KEKBリニアックでは、2003年秋にCバンド大電力高周波源及び加速管を用いてビーム加速試験を行う予定であり、現在、Cバンド50MWクライストロンを用いた高周波源の大電力試験を行っている。

50MWクライストロンを励振するために、Sバンド信号発生器、周波数通倍器、半導体増幅器、Cバンドサブスタークライストロンからなる低電力励振系を構築した。本稿では、この低電力系励振系の構成、及び性能評価について報告を行う。

1. はじめに

KEKBでは、電子のエネルギーを8GeVから3.5GeV、そして陽電子のエネルギーを3.5GeVから8GeVと変更し、ピーク・ルミノシティ $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を目指す次期計画(SuperKEKB計画)がある^[1]。この計画で必要とされる陽電子ビームのエネルギー増強を実現するために、KEKBリニアックの高周波源のうち陽電子生成部から下流のSバンドクライストロンをCバンド50MWクライストロンに置き換えることを検討している^[1,2]。なお、大電力高周波源を励振するための励振系には、100kW出力のCバンドサブスタークライストロンを用いて8ユニットの大電力高周波源を励振する構成が考えられている。

2003年秋にKEKBリニアックのビームラインへCバンド加速管^[3]を設置してビーム加速試験を実施することを目標に、CバンドRF系の整備が2002年春から始まった。2003年春、KEKBリニアック棟加速管組立ホールにCバンド用テストスタンドをつくり、そこで大電力試験を兼ねた評価試験を行った。今までにRFパルス幅 $2\mu\text{s}$ 、繰り返し50ppsで42.8MWのRF出力という結果が得られている^[4]。

ここでは、Cバンド50MWクライストロンの大電力試験を行うために構築した低電力励振系について、その構成及び特性評価試験の報告を行う。

2. 低電力励振系の構成

図1に低電力励振系の構成図を示す。信号発生器(HP8648C)やSバンドで実績のあるRFパルス変調器を有効に活用するため、周波数通倍器を用いて5712MHzの信号を得た。信号発生器から2856MHzのRF信号を発生させ、パルス変調器を用いてRFパルスとする。その後、RFパルスは周波数通倍器にて、

CバンドのRFパルスとなる。このRFパルスは、半導体増幅器、サブスタークライストロンによって順次増幅され、50MWクライストロンに励振される。50MWクライストロンの飽和出力に必要な励振入力は約300Wである。

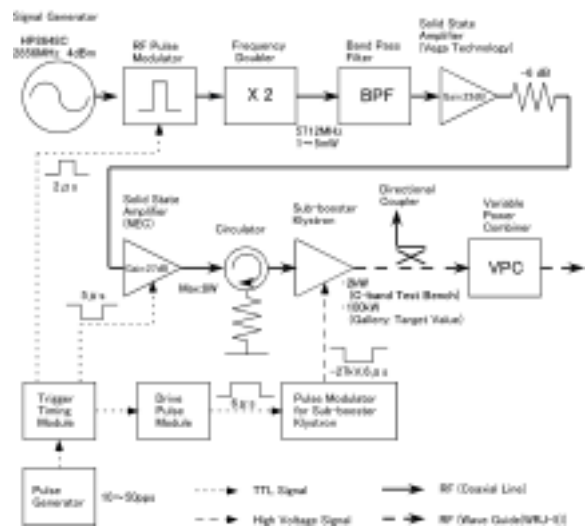


図1：低電力励振系の構成図

周波数通倍器(アルモテック製、最大入力:10dBm)によって作られたCバンドRFパルスについて、パルス立ち上がりや平坦度、パルス内の位相安定度の測定を行った。図2にSバンドRFパルスとのパルス立ち上がりの比較を示す。RFパルス変調後に周波数通倍器を使用した場合でも、パルス波形の劣化が見られないことを確認した。



図2：上)SバンドRFパルスと下)CバンドRFパルスの立ち上がりの比較。横軸は50ns/div.

¹ E-mail: toshihiro.matsumoto@kek.jp

周波数逡倍器直後のRFパルス出力は1～5mW程度であるが、サブブースタークライストロンの飽和時入力には2～3Wが必要である。そのため、RFパルスの増幅を2段の半導体増幅器（ベガテクノロジー及びNEC製）で行った。これにより、クライストロン入口では最大8WまでのRF入力が可能である。RF入力の調整には、NEC製半導体増幅器内に取り付けられた出力調整用のノブを用いる。

サブブースタークライストロンは、三菱電機製の気象レーダー用の5.3GHz、200kWクライストロンをもとにして、各空洞の再同調とパービアンズ増加の改造を行ったものである(図3)。クライストロンのビーム集束には、電磁石が使われる。



図3：サブブースタークライストロン

クライストロンへ印加する電圧パルス変調器は、現在Sバンドサブブースタークライストロンに使用しているものと同じく、直流30kV電源、及び半導体スイッチを用いたハードチューブパルサーのものである。この変調器により、クライストロンへは最大26.6kVのパルス電圧が印加可能である。

サブブースタークライストロンRF出力部から50MWクライストロンの直前までのRF伝送路は、極力減衰を避けるためWRJ-5導波管を用いた。最後に同軸導波管変換器でN型に変換され、50MWクライストロンのRF入力接栓に繋がれる。

導波管途中に設置した導波管型可変減衰器(VPC)の減衰量を手動で調整することにより、50MWクライストロンへのRF入力レベルの調整を行う。

3. 特性評価試験

今回のCバンド大電力試験では、励振させる大電力クライストロンが1台であり、又VPCの許容入力電力の制限もあるため、サブブースタークライストロンのRF出力は最大でも2kW程度で十分である。しかしCバンド化計画においてサブブースタークライストロンには、8ユニットの50MWクライストロンを同時に励振するための100kWのRF出力、そしてSLEDに用いる位相反転したRFパルスを供給するための位相安定性や広帯域特性が要求される。そのため、印加電圧対RF出力特性、入出力特性、RF出力の位相波形、印加電圧対位相変化、帯域幅特性の測定を行った。

図4に入出力特性、図5に印加電圧対RF出力特性の測定結果を示す。これらの測定に際してクライス

トロンのRF出力は、無反射終端器へ送られる。RF出力は、無反射終端器の前に取り付けられた方向性結合器からの信号をパワーメーターで測定して求めた。又、方向性結合器からの信号は、後述するRF出力の位相を測定する際にも用いられる。

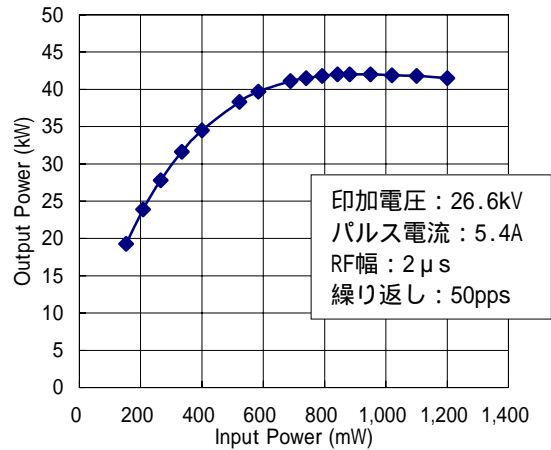


図4：入出力特性

横軸:RF入力[mW] 縦軸:RF出力[kW]

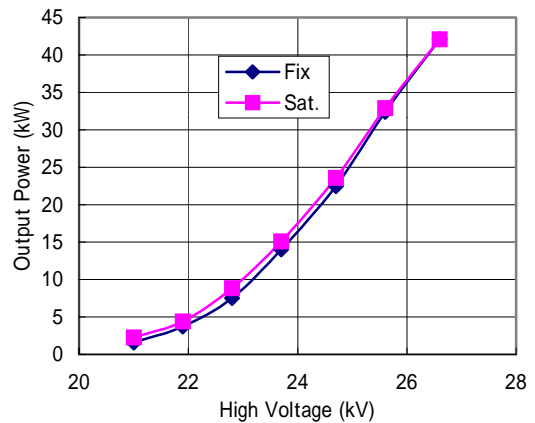


図5：電圧対RF出力特性

横軸:印加電圧[kV] 縦軸:RF出力[kW]

図4の入出力特性の測定では、最大印加電圧26.6kVにおいて、RF出力が最大になるように集束電磁石の磁場を調整している。最大印加電圧26.6kVでRF最大出力が42kW、パービアンズは $1.23 \mu A/V^{1.5}$ 、飽和時の効率は29%、飽和時の利得は46.8dBあった。

測定の結果、Cバンド化計画でのドライバークライストロンとして用いるには、パワー不足であることが分かった。又、クライストロンの効率が最大でも30%程度と低めであるが、これは基となったクライストロンが50kVでの運転で設計されたものであり、我々の動作値が26.6kVと大きく異なるためと思われる。

図5の電圧対RF出力特性では、印加電圧26.6kVでの飽和時入力(890mW)で固定した場合と印加電圧毎に飽和時入力へ調整した場合の両方がプロットしてある。電圧を下げるに従って、飽和時入力が増えていく傾向があった。

位相波形の測定には、ダブルバランスドミキサーとトロンボーン型移相器を用いた。この測定では、クライストロンのRF入力を参照波として用いている。50MWクライストロンのテストベンチでのコンディショニング用に調整した印加電圧が17kV、RF出力が1.8kWであるときのRFパルス出力とそのパルス内の位相波形を図6に、電圧変動対位相変化を図7に示す。図6から、RFパルス内の位相は±1度以内の範囲に入っていることがわかる。

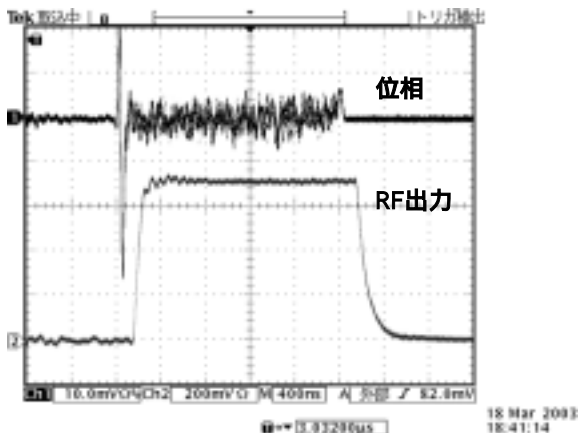


図6：クライストロンRF出力と位相波形
縦軸:2.3度/div. 横軸:400ns/div.

図7より電圧変動に対する位相変化は、約19度/(V/V(%))であった。KEKBリニアックで使用しているSバンドサブプースタークライストロンでは、10度/(V/V(%))である^[5]。Sバンドと同程度の位相安定度を実現するには、2倍の電圧安定度がパルス変調器に要求される。

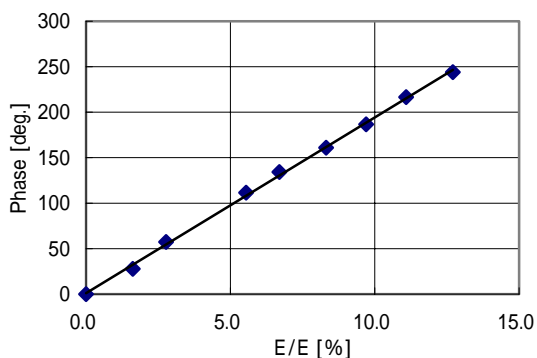


図7：電圧変動対RF出力の位相変化
横軸: E/E[%] 縦軸:位相変動[deg.]
(印加電圧17kV時を位相の基準にする)

図8に、印加電圧26.6kVでのクライストロンRF出力の帯域幅特性を示す。5712MHzの飽和時入力に固定した場合と、各周波数で飽和時入力を調整した場合が図7にプロットしてある。周波数の変更には、信号発生器の周波数を变化させた。

測定結果からクライストロンは、ほぼ5712MHzに調整されており、その半値幅は23MHzであった。又、RF入力を飽和点に調整した場合には半値幅の広がることを確認した。

テストベンチでは本来の励振用の他にクライストロン出力を直接レゾナントリングへ繋げて、大気中でのレゾナントリングのライン長と共振周波数を調べるために運転も行った^[6]。

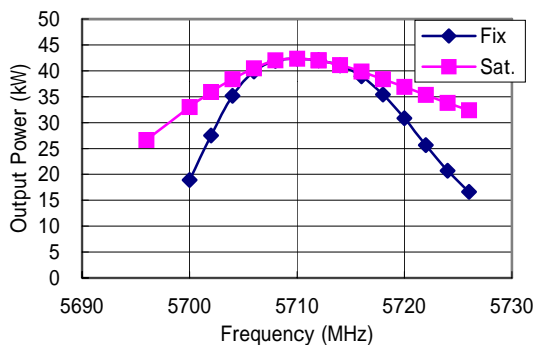


図8：クライストロンRF出力の帯域幅特性
横軸:周波数[MHz] 縦軸:RF出力[MW]

4. 今後の予定

50MWクライストロンを用いた高周波源の大電力試験のために低電力励振系を構築した。テストベンチでの50MWクライストロンのコンディショニングに用いる低電力励振系としては、満足できるものであった。しかし、Cバンド化計画を視野に入れた場合、今の電圧パルス変調器を使用した時には、サブプースタークライストロンはパワー不足であり、RF出力の増強のための対策が必要である。このため、クライストロン再設計による効率向上、パルス変調器の導入によるクライストロン印加電圧の増加について検討中である。

今後、ギャラリーでの運転に向けて、振幅位相調整器(I/A)モジュールの開発やSLED運転用のRFパルス位相反転化の検討が必要である。又、制御系や位相モニターについても今後の検討課題である。

参考文献

- [1] T. Kamitani, et al., "R&D Status of C-band Accelerator unit for SuperKEKB", PAC2003, Portland, Oregon, USA, May 12-16, 2003.
- [2] 福田茂樹, 他, "SuperB計画の為にKEK電子陽電子リニアックCバンド化計画", in these proceedings.
- [3] 紙谷琢哉, 他, "SuperKEKB計画のためのCバンド加速管開発", in these proceedings.
- [4] 松本利広, 他, "Cバンド50MWクライストロンを用いた大電力高周波源(II)-大電力試験-", in these proceedings.
- [5] 松本利広, 他, "60kW ドライバークライストロンの位相変動測定", 第24回リニアック技術研究会論文集、札幌、北海道、1999.
- [6] 竹中たてる, 他, "C-バンドレゾナントリングを用いた大電力試験", in these proceedings.