

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 -

松本 利広¹、明本 光生、大越 隆夫、柿原 和久、片桐 広明、設楽 哲夫、竹中 たてる、
中尾 克巳、中島 啓光、本間 博幸、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計画では、陽電子のビームエネルギーを3.5GeVから8GeVへ増強してピーク・ルミノシティ $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を目指す将来計画(SuperKEKB)の検討が進められている。KEKBリニアックでは、この要求の実現のためにCバンド(5712MHz)の導入を検討し、Cバンド加速管によるビーム加速試験を2003年秋に予定している。その準備として、Cバンド高周波源の大電力試験を行い、パルス幅 $2\mu\text{s}$ 、繰り返し50ppsでRF出力42.8MWまでの試験を行った。又、50MWクライストロンの入出力特性やRF出力の位相安定度、RF出力の周波数依存性を測定した。本稿では、この大電力試験について報告する。

1. はじめに

KEKB計画においてルミノシティ $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を目指す次期計画(SuperKEKB)が検討されている^[1]。この計画では、電子のビームエネルギーを今までの8GeVから3.5GeVへ、そして陽電子ビームのエネルギーを3.5GeVから8GeVへ増強する必要がある。

なるべく既存の設備を用いて陽電子のエネルギーを増強するために、KEKBリニアックで運転に使用しているSバンド(2856MHz)高周波源の代わりに、運転周波数を2倍にしたCバンド(5712MHz)の50MWクライストロンによる高周波源へと変更することを検討している。この計画では、8GeVの陽電子のエネルギーを実現するために、KEKBリニアックの陽電子生成部より下流の#3、#4、#5の3セクター24台のSバンド大電力高周波源を、Cバンド大電力高周波源48台に置き換える^[1,2]。

2003年秋に予定しているCバンド用加速管^[3]を用いたビーム加速試験を実施するための準備として、Cバンド高周波源の構築および大電力試験を行った。この高周波源は、Cバンドサブブースタークライストロンを用いた低電力励振系^[4]、コンパクト化のためにインパータ電源を導入したパルス電源^[5]、Cバンド50MWクライストロンを用いたクライストロンアセンブリから成る。高周波源のコンディショニングは2003年3月から開始された。ここでは、50MWクライストロンを用いたクライストロンアセンブリの構成及びそのコンディショニング過程、そしてCバンド50MWクライストロンを用いた大電力高周波源の性能試験結果について報告する。

2. クライストロンアセンブリ

表1は、Cバンド高周波源に用いる50MWクライストロン(東芝製 E3746)の定格性能である^[6]。

表1: 50MWクライストロンの定格性能

	定格性能
動作周波数	5712 ± 5MHz
ビーム電圧	350kV
ビーム電流	320A
パービアンス	1.55 $\mu\text{A}/\text{V}^{1.5}$
RFパルス幅	2 μs
効率	45%
利得	52-54dB
飽和時入力電力	300W

50MWクライストロンに対して、Sバンドクライストロンと同様にKEKBリニアック棟クライストロンテストホールにおいて、ヒーター特性とエミッション電流特性の試験を行った。ヒーター特性試験では、1kVのDC電圧印加時でのヒーター電圧対エミッション電流の測定を行い、エミッション電流の肩特性を求めた。又、エミッション電流特性試験では、ヒーター電圧一定のもと3kVまで電圧を印加してエミッション電流を測定し、低電圧でのパービアンスを求めた。これらの試験による動作確認の後、クライストロンアセンブリ(図1)を組み立てた。

C-band Klystron Assembly

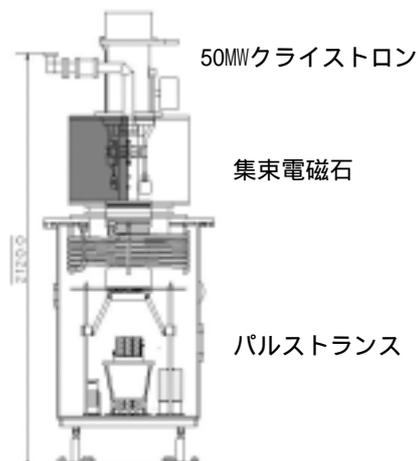


図1: クライストロンアセンブリ

¹ E-mail: toshihiro.matsumoto@kek.jp

Cバンド50MWクライストロンでは、集束電磁石の直径がSバンドのもの比べて一回り大きく、外径600mmとなった。このため、集束電磁石を載せるタンクは、以前にSバンド60MWクライストロン用に作成した内径700mmのタンクを用いている。集束電磁石用の電源及び電源コントローラは、コイル毎に分割して通電し、Sバンド高周波源の集束電磁石で使用していたものを流用した。又、集束電磁石は、ホール素子を組み込んだ磁場測定器により各コイルの測定を行い、電源極性等を確認した。

パルストランスは巻き線比1:15のものを使用した。このパルストランスは、クライストロンギャラリにおいて、電子銃や陽電子生成部直後で加速勾配を上げるためにSバンドクライストロンに350kV印加して60MW (RFパルス幅: 1 μ s) のRF出力を出すために使用した実績のあるものである。パルストランス回りの回路は、基本的にSバンドのクライストロンアセンブリと同じ構成である。

クライストロンへ印加される電流と電圧は、パルストランス内にある電流トランス (CT)、容量分割器(CD)の値を読み取り、係数を掛けて求まる。

3. 大電力試験

クライストロンアセンブリは、大電力試験を行うため加速管組立ホール内のテストベンチへ移された。テストベンチには、Cバンド用低電力励振系^[4]、インバータ電源で充電される小型化電源^[5]、真空導波管系が設置してある。

真空用WRJ-5導波管系は、真空ポート付導波管、ベアホールカプラー方向性結合器、T分岐を介して2個の水負荷から成る。クライストロンのRF出力は、水負荷に吸収させて入水と出水の温度差より測定する(図2)。

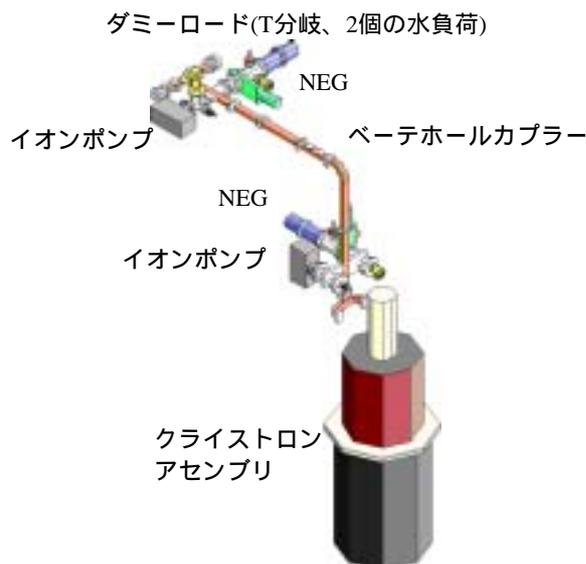


図2: クライストロンアセンブリと導波管系

今回のコンディショニングでは、イオンポンプとNEGの強化された真空排気系を導入して、クライストロンの高周波窓の破損を防止するよう心掛けた。

又、クライストロンや高周波窓 (クライストロン、水負荷) の保護のため、真空の悪化やVSWR1.4以上の場合には、インターロックが働き、クライストロンのRF出力が負荷側に行かないようにした。今回、すべての導波管系が始めて使用されるので、若干コンディショニングに時間を必要とした。

印加電圧335kVの時、クライストロンのRF出力が42.8MWに到達した。この時のビーム電流は306Aであり、パービアンスは1.58 μ A/V^{1.5}、効率は42.6%であった。なおビーム加速試験では、運転値40MWを考えているので、テストベンチではここまでの評価に留めた。

4. クライストロン性能試験

クライストロンに取り付けられた導波管系のコンディショニングが終了した後、入出力特性、電圧対電力特性、位相特性、帯域幅特性などを測定した。

図3にビーム電圧335kV、RFパルス幅2 μ s、繰り返し50ppsの時の入出力特性を示す。飽和時入力力は約310Wで利得は51.5dBであった。図4は、印加電圧に対するRF出力特性を示す。印加電圧335kVの飽和時入力(310W)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を示す。RF入力変化や印加電圧の変化による発振等の不安定な動作は見られなかった。

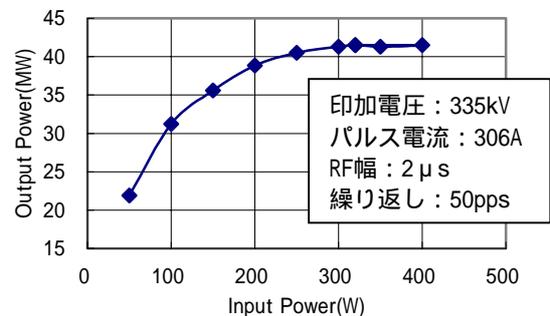


図3: 入出力特性

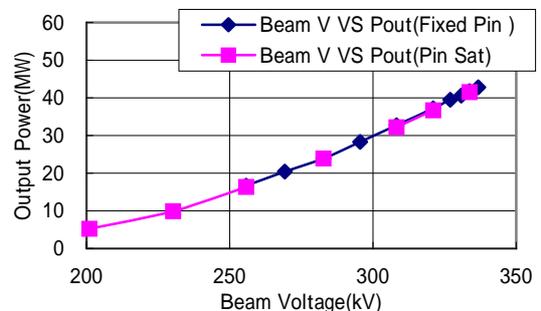


図4: 飽和出力特性

ダブルバランスドミキサーとトロンボーン型移相器からなる位相検出器を使って、RF出力パルス内の位相安定性を測定し、図5に示した。参照波にはクライストロンのRF入力を用いている。位相波形は印加電圧の変動に敏感に反応するため、パルス電源のPFN調整に利用した。PFN調整の結果、電圧の

フラットトップは1.3%の平坦度、RFパルス内の位相変動は2.6度であった。Sバンドでは、電圧平坦度0.3%、位相変動は約1度であり、今回の電圧及び位相安定度の結果は、今後の検討課題である。

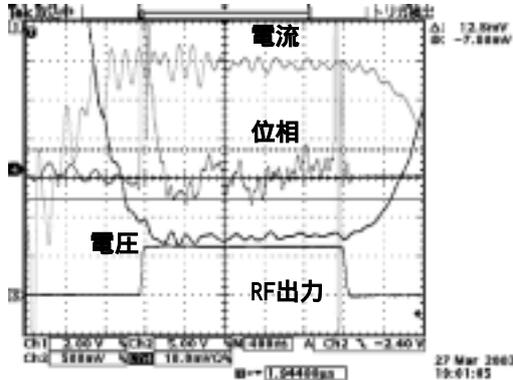


図5：RFパルス出力、電圧、電流、位相波形。縦軸:2.2度/div.

図6は、クライストロンの電圧変動とRF出力の位相変化の関係である。印加電圧の変動によりビームの速さが変化し、出力空洞への到達時間が変わることによって位相が動く。ここでは、印加電圧330kVの時のRF位相を基準とした。測定の結果、印加電圧の変化による位相変化は、5.8度/(V/V(%))であった。Sバンドクライストロンでは、4.2度/(V/V(%))である^[7]。Sバンドと同等の位相安定性が必要な場合には、Sバンドより約40%厳しい電圧平坦度が要求されることとなる。

図5から評価される値(2.6度/1.3%)とのズレについて、測定器系へのノイズの影響が考えられ、さらなる考察が必要である。

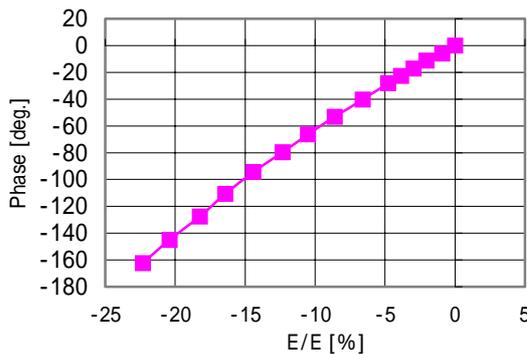


図6：電圧変動に対するRF出力の位相変化 (印加電圧330kVが位相の基準)

SLED使用時での位相反転や、レゾナントリングでの同調特性等からクライストロンの帯域幅特性も必要である。レゾナントリングの使用条件より、RF出力10MW (印加電圧230kV)のもとで、クライストロンRF出力の帯域幅特性を測定した。5712MHzでの飽和時入力(200W)に固定した場合と飽和時入力を各周波数で調整した場合との帯域幅特性を図7に示す。

測定の結果、半値幅は23MHzであった。又、クラ

イストロンへのRF入力を調整することで、周波数を動かした場合でも、10MWのRF出力が5712MHz±10MHzの範囲に渡って可能であることが分った。

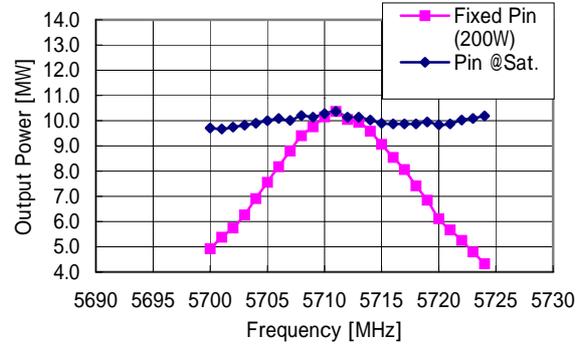


図7：RF出力の帯域幅特性

5.まとめ

低電力励振系、パルス電源、クライストロンアセンブリで構成するCバンド高周波源の大電力試験を行った。コンディショニング後、パルス幅2μs、繰り返し50ppsで、50MWクライストロンから42.8MWのRF出力が得られることを確認した。又、50MWクライストロンの入出力特性等の測定を行った。

この大電力高周波源は、レゾナントリングでの大電力高周波窓の試験^[8,9]、SiCダミーロード^[10]の試験、Cバンド加速管^[3]等のコンディショニングに使用され、その後、2003年秋のビーム加速試験のためにクライストロンギャラリーに移設される予定である。

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電子陽電子ライナック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 (I)-低電力励振系の構築-", in these proceedings.
- [5] 中島啓光, 他, "小型パルス電源の特性と今後の課題", in these proceedings.
- [6] 大久保良久, 他, "50MW Cバンドパルスクライストロン", 第23回リニアック技術研究解論文集、筑波、茨城、1998.
- [7] 中尾克巳, 他, "KEKBライナック大電力クライストロンの位相変動測定", 第22回リニアック技術研究解論文集、仙台、宮城、1997.
- [8] 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.
- [9] 道園真一郎, 他, "Cバンドミックスモード高周波窓の開発", in these proceedings.
- [10] 杉村高志, 他, "Super KEKBに向けたC-band Dummy Loadと3dB Hybrid Couplerの開発", in these proceedings.

