

[F17p07]

Status of High-Power RF Sources in the KEKB 8GeV Linac

T. Matsumoto, S. Michizono, K. Nakao, S. Fukuda and S. Anami

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

An upgrade of high-power rf sources has been progressed at the PF 2.5GeV linac to increase the acceleration energy up to 8GeV required for the KEKB project. This report describes the present status of high-power rf sources. Fifty-eight high-power klystrons are installed in the klystron gallery and conditioned for beam operation. The output power of these klystrons is evaluated from the beam current and the statistics of their performance are estimated. 8GeV acceleration of electron beam is successfully achieved with the average output power of about 40MW.

KEKB 8GeV Linac の大電力高周波源の現状

はじめに

KEKB 計画[1]により電子-陽電子入射器では、電子を 8GeV まで加速させるために大電力高周波源の増強を進めてきた。KEKBで使用される 58 台の新しく開発された大電力パルスクライストロン[2]は、平均 41MW(最大 46MW)のピーク電力で運転される予定である。また高周波出力を増幅させるために、高周波パルス圧縮器(SLED)を採用している。

1997 年秋までに、クライストロンのクライストロンギャラリへの設置は終了し、運転に向けてのコンディショニングも、ほぼ完了した。ビーム試験では、KEKB リング入射のために要求される 8GeV の電子ビームの加速に成功した[3]。

今回、大電力クライストロンの状況(コンディショニング、達成された高周波出力等)について報告する。

大電力クライストロン

KEKB 計画による電子-陽電子入射器の大電力高周波源増強のために、40MW クライストロン(PV3030A3:三菱電機)、及び 50MW クライストロン(PV3050:三菱電機; E3730:東芝)の開発を行ってきた(図1)。これら 40MW および 50MW クライストロンの性能を表1に示す。

これらのクライストロンは、クライストロンテストホールにおいて受け入れ検査の後、ギャラリでの安定かつ効率的な動作のために高圧試験を行う[4]。この時、全てのクライストロンについて水負荷を用いて 46MW の高周波出力を確認し、また高周波出力に対するビーム電流の関係を測定している。

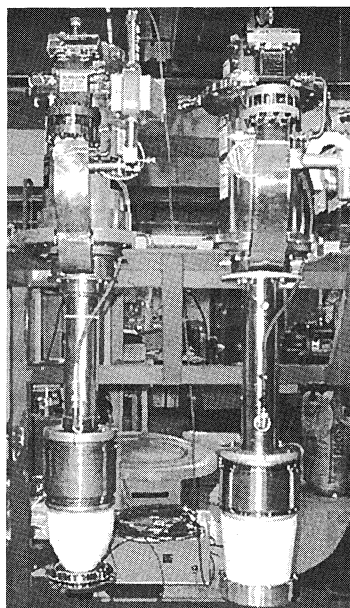


図1:大電力クライストロン

(左) 40MW クライストロン(PV3030A3:三菱電機)

(右) 50MW クライストロン(E3730:東芝)

表1:大電力クライストロンの定格性能 ; ()は最大値

	40MW クライストロン	50MW クライストロン
運転周波数	2, 856MHz±1MHz	→
ビーム電圧	285(310)kV	315kV
ピーク電流	319(362)A	370A
ピーク電力	40(50)MW	50MW
効率	44%	→
繰返し	50pps	→

クライストロンギャラリ

1) 設置およびコンディショニング

テストホールにおいて試験されたクライストロンアッセンブリは、クライストロンギャラリ(新設部のA~Cセクタ、既設部の1~5セクタ)に設置され、実際の運転に向けてのコンディショニングが行われる。設置されたクライストロンの内、2セクタ先頭の2-1は、陽電子生成部直後で加速勾配を上げるために、350kV印加し60MWの高周波出力(パルス幅1 μ s)で運転している。C-7は、PFリングへ入射する仮電子銃[5]が取り付けられているために高周波出力は約10MWに設定されている。また、5-8はECS(Energy Compression System)に用いられ、ビーム加速には使用されていない。

ギャラリに設置されたクライストロンのコンディショニングは以下の手順で進められた。

- (1)最初に PFN の充電電圧(E_{PFN})を 25kV に設定し、手動減衰器を用いてクライストロンへ高周波を徐々に入力する。この時 SLED は離調した状態である。
- (2)減衰が最小(700W 程度の高周波入力に相当)になった後、徐々に E_{PFN} を 42kV まで上げていく。
- (3) E_{PFN} が 42kV になったところでモジュレータ内の PFN の調整を行い、SLED 運転用にクライストロン印加電圧の頂上平坦部が 4 μ s になるようにする。その後 E_{PFN} を 45kV まで上げていく。(この時、 E_{PFN} に対するビーム電流の関係を測定する)
- (4) E_{PFN} を 25kV に戻し、SLED を同調した状態にしてコンディショニングを行う。

コンディショニングに際して、クライストロンや高周波窓の保護のため、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、高周波が負荷側に出力されないようにしてある。

コンディショニングに必要とした時間は、新規増設部となった A~C セクタにおいて 8 時間を 1シフトとすると、平均して(1)に 17シフト、(2)に 24シフト、(3)に 23シフト、(4)に 45シフト、合計で 109シフト(36日)であった。

2) 高周波出力の評価

クライストロンギャラリでの高周波出力は、クライストロンのビーム電流値を用いて、テストホールでの試験結果をもとに見積もる。

クライストロンギャラリにおいて、 E_{PFN} を 42kV に固定した際のクライストロンのビーム電流と高周波出力の関係とビーム電流より算出したクライストロンの効率の曲線を図 3、4 に示す。効率はパービアンズ $2.1 \mu A/V^{3/2}$ を用いて計算している。

40MW クライストロンは高周波出力 41MW で効率が最大になるように集束電磁石の磁場が設定されている。図 3 からわかるように、すべての 40MW クライストロンが

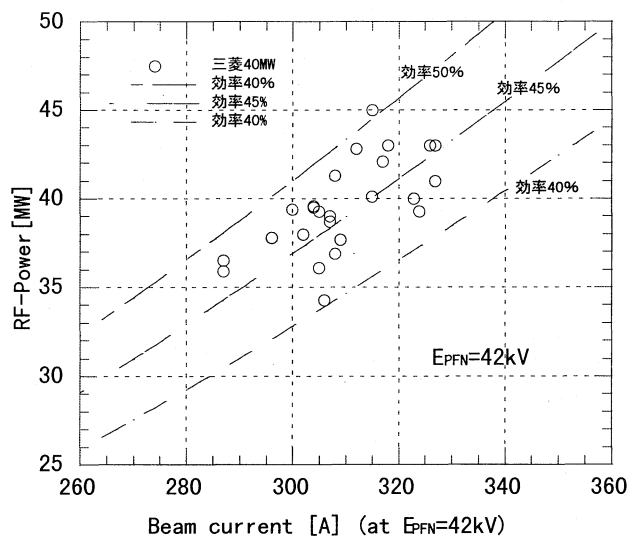


図3:40MWクライストロン PFN充電電圧 42kV 時の高周波出力とビーム電流の関係

効率 45%を中心に分布していることがわかる。

同じ E_{PFN} ($=42kV$) でクライストロンのビーム電流がばらついているのは、PFN の調整において SLED 運転用に印加電圧の頂上平坦部を 4 μ s 確保するのを目標に行われ、そのために PFN のインピーダンスが個々で異なったためである。図 3 ではビーム電流が 290A 以下になっているものが 2 台あるが、これらは PFN の再調整によりビーム電流の増加、それに伴い高周波出力が増大する可能性がある。

50MW クライストロンの場合には、図 4 のようになる。50MW クライストロンの場合、40MW クライストロンと比べて、効率が低めになって現れている。これは、50MW ク

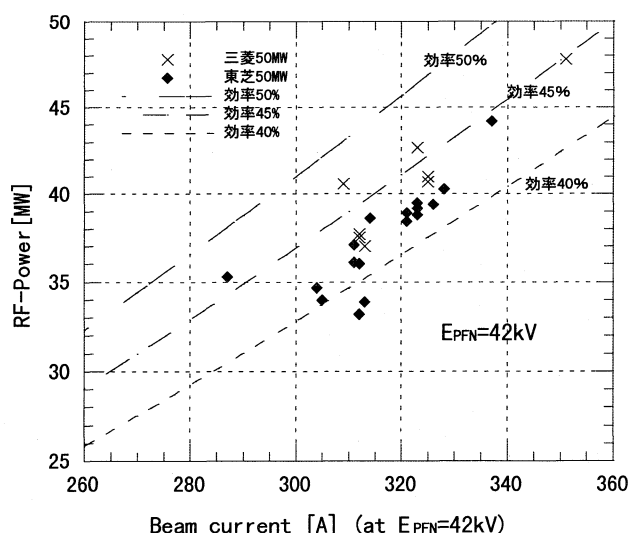


図 4:50MWクライストロン PFN充電電圧 42kV 時の高周波出力とビーム電流の関係

ライストロンの集束電磁石等のパラメータが、高周波出力 46MW で最適化されているためと考えられる。

8GeV 加速時のパラメータ

98 年 4 月からのビーム試験において、電子の 8GeV 加速に成功した。加速に用いられたクライストロンの高周波出力と E_{PFN} を図 5、6 に示す。

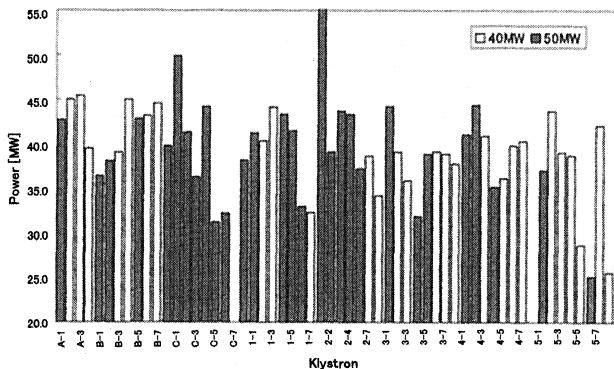


図5: 電子ビーム8GeV 加速時のクライストロン高周波出力
横軸: 設置場所; 縦軸: 高周波出力 [MW]

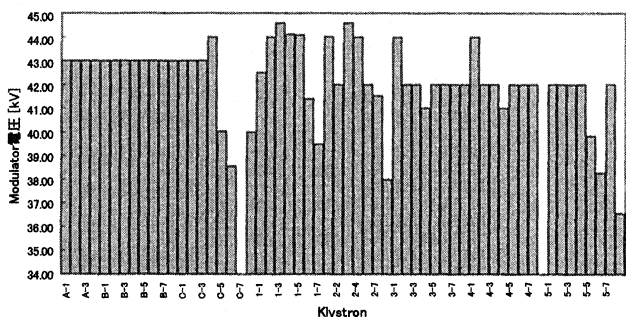


図6: 電子ビーム8GeV 加速時のモジュレーター充電電圧
横軸: 設置場所; 縦軸: パルス充電電圧 [kV]

8GeV 加速には、4-8、5-8 を除く 56 台のクライストロンが用いられた。この時 C-5、C-6 は、コンディショニングが終了しておらず、5-5、5-6 については、VSWR が高かったため、 E_{PFN} を下げて運転していた。また、1、2 セクタでは、 E_{PFN} が低く設定されていたものが数台あった。この 8GeV 加速時におけるクライストロンの1台あたりの平均出力は、C-7、2-1 を除いて加速に用いられた 54 台中、40MW クライストロンで 40MW (26 台平均)、50MW クライストロンで 39MW (28 台平均) であった。54 台の平均出力は 39.5MW であった。

180 度偏向部[1]を境にしてリニアック全体を A、B セクタ部 (1.5GeV 加速部) と C~5セクタ部 (6.5GeV 加速部) とに分けると、A、B セクタ部では 1 台あたり 42MW (12 台平均)、C~5セクタ部では 39MW (42 台平均) であった。C~5 セクタ部の平均出力が低いことについて

は、コンディショニング中 (C-5、-6) や、VSWR が高い (5-5、-6) 等により E_{PFN} を下げたクライストロンがあったことが原因であり、今後のコンディショニングにより解決できると思われる。

今後の計画

1) 50pps 運転

これまでの運転は繰り返しが 25pps であるが、4、5 セクタで 50pps 運転を試験的に行った。今回の試験では、クライストロン、モジュレータ共に 50pps 運転において、問題なく動作した。現在、98 年秋からの 50pps 運転に向けて、準備をすすめている。

2) A-1 クライストロンの変更

電子銃直後の A-1 クライストロンを、2-1 と同様に加速勾配を上げるために 60MW 出力用に置き換える予定である。

まとめ

電子-陽電子入射器では大電力高周波源の増強により、KEKB 用電子ビームの 8GeV 加速が達成できた。加速に用いられたクライストロンの平均高周波出力は 39.5MW であり、予定していた出力 (41MW) より低めであったが、モジュレータ内の PFN 再調整や、パルス充電電圧の増加等による今後のコンディショニングにより解決できると思われる。

参考文献

- [1] KEK B-factory Design Report June, 1995.
- [2] S. Fukuda et al., "Design and evaluation of a compact 50MW rf sources of the PF linac for the KEKB project", Nucl. Instrum. and Meth. A368(1996) 561-571
- [3] N. Akasaka et al., "Commissioning of the KEKB 8-GeV e⁻/3.5GeV e⁺ Injector Linac", Stockholm, Sweden, 22-26 June, 1998
- [4] K. Nakao et al., "High Power Klystron Test in the new test hall of the KEKB 8GeV Linac", presented in this meeting.
- [5] S. Ohsawa et al., "Vertical Injection Electron Gun System", Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Sept. 1997