

Development of PPM-Focused X-Band High Power Klystron

Shuji Matsumoto¹, Mitsuo Akemoto, Shigeki Fukuda, Toshiyasu Higo, Hiroyuki Honma, Sergey Kazakov,
Noboru Kudoh, Hiromitsu Nakajima, Tetsuo Shidara, Mitsuhiro Yoshida
Accelerator Laboratory, KEK
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The R&D of PPM (Periodic Permanent Magnet)-focused X-band pulse klystrons has been conducted since 1999, originally for Global Linear Collider (GLC) project. So far six prototype tubes have been built. Some of the tubes successfully produce the power required in GLC (75MW, 1.6 micro sec pulse width). However their performance was not perfect as a GLC tube. The problems lie in the stability of RF output and the gun performance. Since GLC programs were terminated in 2004, some limited work on the improvement of the PPM tubes continues at X-Band Test Facility (XTF) in KEK. The work includes the test of the tubes as well as disassembling them after the test for further inspection.

XバンドPPMクライストロンの開発

1. はじめに

1.1 XバンドPPMクライストロン

われわれのXバンドクライストロンは、元来、TeVスケールでの電子陽電子衝突実験をおこなうリニアコライダ計画 (Global Linear Collider; GLC) の、主線形加速器にマイクロ波を供給するクライストロンとして仕様の策定がなされた。表1に仕様をまとめた。われわれのクライストロンは、その高いピークパワーが第一の特徴である。これは、リニアコライダーが、高い加速勾配をもった加速器であることの直接の反映である。

表 1: PPMクライストロンの仕様

Frequency	11.424GHz
Peak Power	75MW
Pulse width	1.6 μ s
Repetition	150Hz
Cathode Voltage	480kV
Cathode Current	266A
Perveance	0.8uK
Efficiency	>55%
Main Focus	PPM
Max B / period	0.32T / 30mm
Magnet Material	NdFeB

GLC計画では、クライストロン総数がおよそ4千本にもおよぶものであったため、高い電力効率も重要な開発目標になった。表1にあるように、マイクロ波変換効率は55%である。パービアンスを低くすることでこの効率を実現し、その一方、カソード電圧は480kVまであげてビームパワーを確

保することで、75MWのパワーを得ようとするシナリオである。

電力効率でいえば、収束系もふくめた総電力効率を上げるため、ソレノイド電磁石をやめ、永久磁石でクライストロン中の電子ビームを収束する。このとき、磁石の極性を交互に交代させる配置、PPM (periodic permanent magnet) 方式を採用することで、少ない磁石の量 (体積) で十分な収束を確保する。PPM収束方式自体は目新しいものではないが、大電力クライストロンへの応用は、あたらしい試みであり、当開発研究のもうひとつの特徴になっている。

ほかに、その高い要求性能を満たすべく、クライストロンの設計にはいくつかの新しいアイデアが盛り込まれている。代表的なものでは、電界強度を低減するための進行波型出力空洞や、円形TE01モード(進行波)によるRF出力窓がある。

1.2 これまでの試験結果[1]

1999年から今日までに試験機6本が作られた (名称は製作順にPPM1~PPM6)。以下試験結果のまとめ。

- 1) 第1号機 (PPM1) は、設計の簡略化のため、最低限の水冷構造しかもたない50MW仕様球として製作。出力、RFパルス幅および繰り返しが54MW \times 1.5 μ s \times 5ppsまで到達。その後継続した試験でピーク出力は最終的に最大63MWにまで達した (パルス幅0.3 μ s)。ほぼ設計どおりの性能が達成され、PPM収束方式によるクライストロンに原理的問題はないことを確認した (2000年)。
- 2) つづくPPM2では、ほぼ要求仕様である73MW \times 1.4 μ sを達成 (2001年)。繰り返しは3pps。その後、このPPM2の試験結果から、GLCクライストロンが原理的に可能とみなされるように

¹ E-mail: shuji.matsumoto@kek.jp

なる。

- 3) PPM4では、 $77\text{MW} \times 1.6 \mu\text{s} \times 50\text{pps}$ 到達（2003年）。PPM5も $70\text{MW} \times 1.6 \mu\text{s} \times 25\text{pps}$ 到達（2004年）。この頃より、定常 50MW 超での 50pps 運転が日常的に行われるようになってきた。
- 4) ピークパワーが設計仕様まで到達できなかった球はPPM3、PPM6で、いずれも寄生発振による制限であった。（前者は第2高調波空胴を搭載。その空胴部での発振。後者は、別の型の出力空胴を搭載。その空胴のHOMによる発振。）
- 5) 平均RF出力の最大はPPM2B（=PPM2改修機）での 13.7kW （ $67\text{MW} \times 1.7 \mu\text{s} \times 120\text{pps}$ ）（2004年）。

1.3 XTFでのXバンド試験研究

2004年8月に各国のリニアコライダー計画は国際計画ILCに統合され、その主線形加速器には、超伝導加速管が採用されたのをうけて、国内のリニアコライダーR&Dは、超伝導線形加速器開発研究に再編成された。ILC計画が開始されて以降は、小規模なXバンド加速管およびクライストロンの開発研究のみを継続している。この研究には、GLC開発研究の拠点として名称GLCTA=GLC Test AcceleratorすでにKEKに建設されていたXバンド加速器関連施設をそのまま継続利用している。現在、施設名称は、X-Band Test Facility; XTFに変更している。

XTFでは2004年から、加速管高電界試験用のマイクロ波供給源として、PPMクライストロン2台を稼働させはじめた。1台あたりの（最大）定格 $50\text{MW} \times 0.4 \mu\text{s} \times 50\text{pps}$ で、2台の出力を合成することで、 100MW 級のXバンドマイクロ波を定常的に発生できる能力を持つ。

一方、PPMクライストロンの試験研究も行われており、以下で議論するRFパルス欠けの原因解明をめざして研究を継続している。

2. 問題点 RFパルスの欠け

われわれのクライストロンは、表1での要求性能にまで到達することができる。しかし、実用に耐えうるまで十分安定な状態での運転は現状では難しい。実用上の問題点で、現在そのもっとも大きなものは、「RFパルスの欠け」と呼んでいる、RF品質の低下である。図1に見られるようなRF出力が規定のパルス幅まできちんと出ず、パルス途中から出力が下がっていく現象である。RF出力ないしRFパルス幅が一定以上になると、この欠け現象がちらほらと目につくようになる。

欠け現象が顕著になり始める位置を、出力とRFパルス幅でプロットすると図2のようになる。図2よりぼんやりとした境界ではあるが、しかし系統的に2つの領域に分かれていそうなことが見て取れる。プロットの右側の領域はパルス欠けがよく目につく領域、逆に左は、それがほとんど起こら

ない領域である。

欠け現象の頻度は、平均出力（ピーク出力×パルス幅）が上げるとともに次第に顕著になる傾向があることが観察されている。つまり、図2の右上方向に行けばパルス欠けが顕著になる。

図2のパルス欠けの起こらない領域では、十分実用運転可能である。ちなみに、XTFでの最大定格（ $50\text{MW} \times 400\text{ns}$ ）はぎりぎり左側で、実際RF出力は、加速管の試験を十分行えるほど安定している。一方、GLC仕様（ $75\text{MW} \times 1.6 \mu\text{s}$ ）のような高い時間平均出力では、パルス欠けとの共存状態になる。

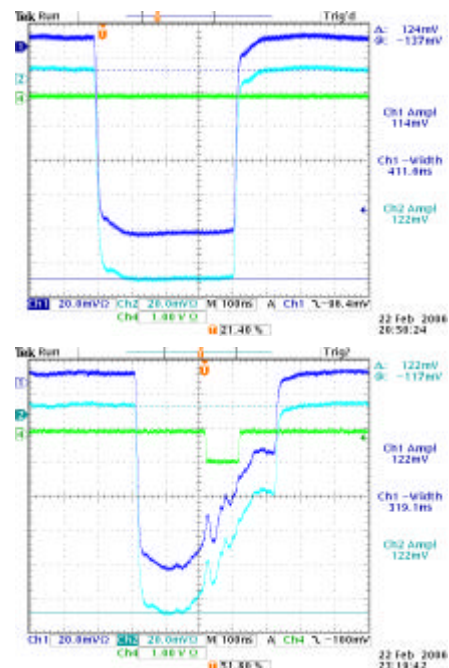


図1：RF出力波形の例。正常時（上）とパルス欠け時（下）。 $45\text{MW} \times 400\text{ns} \times 50\text{pps}$ 。欠け頻度は、1時間あたり5回程。Ch1、2はそれぞれのポートからの出力RF波形。（われわれのクライストロンは2つの対称な出力ポートから出力が引き出される。）Ch4は、パルス欠けカウンターのトリガー信号（パルス欠けを検知して、トリガーを出す）。

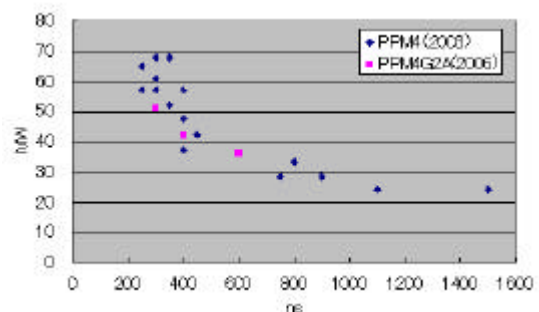


図2：RFパルス欠けが起こりはじめる出力（縦軸）とパルス幅（横軸）のプロット。PPM4と最近のPPM4G2Aでの結果。

パルス欠け出現の様子は、他のクライストロンでも、お

おむね図2のとおりになる。パルス欠け時のクライストロン各部での音響による観測やX線検出器での測定結果から、パルス欠けの直接原因は出力空胴内部での放電であるらしいことが判明した。しかし、通常行われるようなコンデショニング手法をもちいても、いままでにパルス欠けを根絶できた例はない。

コンデショニングしてもなくなる放電は、何らかの原理的問題を含んでいると考えられるので、その問題を取り除かないかぎり、いくらコンデショニングをおこなっても退治はできない。パルス欠けにいたる放電の原因について、出力空胴表面の電界が高すぎるためとの指摘もあるが[2]、ソレノイド収束のXバンドクライストロンでは、同様の進行波出力空胴の下で、1マイクロ秒幅以上の50MW級出力がパルス欠けなしで安定に得られた実績があることから、これとは別の原因があるのではないかと考えている。

3. より頑強な球に

実用化には、寿命も大切な要件である。この観点からいえば、まずは、運転に耐えられるだけの十分な機械的強度がクライストロン各部に確保されていることが必要条件になる。試験を終えた球を分解し、その内部検証の行った結果、PPM収束特有の損傷が管壁におこりうるということがわかってきた。

PPM収束では、いわゆるストップバンドがあるため、カソード電圧がある一定値以下の場合、ビームは十分収束されずにその一部もしくは全部が途中の管壁に衝突する。われわれのクライストロンのストップバンド電圧は、約150kVなので、カソード電圧の立ち上がり立下り時に必ずビーム損失が起こる。

ストップバンド電圧以下でのわれわれのクライストロンに対するビーム軌道のシミュレーションから、球の最上流部でビームロスによる熱負荷が大きくなっている場所があることがわかった。さらに、試験後の球分解調査で、軽微な損傷が実際に計算どおりの位置に見つかった。図3参照。

シミュレーションから、この銅ビームパイプ上の損傷部分の単位面積あたりの入熱量を評価できる。パルス立ち上がり立下り時間を200nsとすると、パルス当たりおよそ $0.7\text{J}/\text{cm}^2$ となった。ちなみに、入熱している時間(400ns)の間のパワー密度はおよそ $1.8\text{MW}/\text{cm}^2$ に達し、電子ビーム溶接と同程度。ストップバンド電圧150kVも、ちょうど電子ビーム溶接で使われる電圧程度であるので、いわば、この損傷部分は、数百ナノ秒の短い時間ではあるが、繰り返し繰り返し、溶接用ビームを当てられていることに相当する。

顕微鏡で銅ビームパイプ表面を観察すると、損傷のないところは旋盤痕がきれいにみえるが、ビームが衝突する部分では旋盤痕が消え、明らかに表面が荒れているが、どうやら溶融までには至っていない。図4参照。

ビームが当たる場所は最上流部に限られているので、対策として、モリブデン製スリーブをビー

ムパイプ内面に挿入し表面を覆うことにした。このモリブデンの効果については現在試験により調査中。

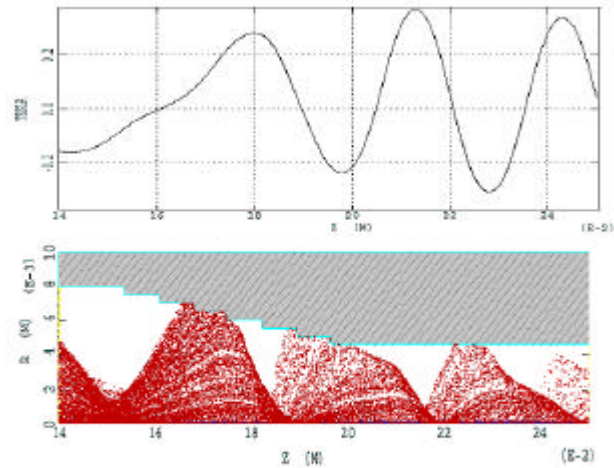


図3：入力空胴上流部分の収束(軸上)磁場(上図)と100 kWでのビーム軌道の計算結果(中図)。下図は運転後半割されたカットモデルの内面の写真。テーパ部でのビームパイプ表面に傷が見える。ちょうどシミュレーションでビームが当たる位置である。

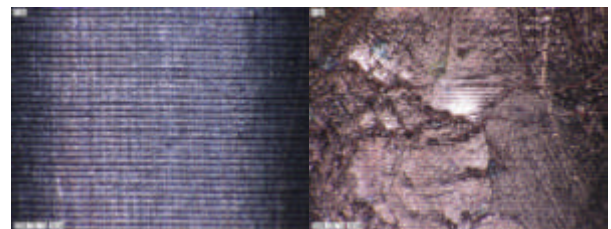


図4：右図は、図3で傷が見える領域の顕微鏡写真。傷なし領域の写真は左図。いずれも倍率150倍。

4. 謝辞

東芝電子管デバイス(株)假家強、浦方弘人、三宅節雄各氏には、本クライストロン設計、製作で努力いただきました。顕微鏡写真撮影では、KEK工作センタ渡辺勇一氏に感謝します。

参考文献

- [1] S.Matsumoto, et al., "Development of PPM-focused X Band Pulse Klystron", 第2回加速器学会予稿集, Aug. 2005.
- [2] C. Adolphsen., "Advances in Normal Conducting Accelerator Technology from the X-Band Linear Collider Program", Proc. of PAC 2005.