

PPM 集束 X バンドパルスクライストロンの開発

松本修二^{1,A)}、大家圭司^{A)}、徳本修一^{A)}、陳 榮浩^{A)}、両角祐一^{A)}、水野 元^{A)}、Alexandre Larionov^{B)}

Sergey Kazakov^{B)}、Vladimir Teryaev^{B)}、菅野正人^{C)}、浦方弘人^{C)}、三宅節雄^{C)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{B)} The Branch of Institute of Nuclear Physics, 142284, Protovino, Moscow Region, Russia

^{C)} (株) 東芝 電子管技術部 〒324-8550 栃木県大田原市下石上 1385

概要

周期永久磁石(Periodic Permanent Magnet: PPM) 集束方式による、X バンド(11.42GHz)大電力パルスクライストロンの設計概要と、1号、2号機の試験結果について報告する。1号機の試験では、その設計仕様に到達し、つづく2号機の試験では、出力73MWパルス幅1.4 μ 秒、RF効率54%が得られた。

1. はじめに

KEKでは、JLC^[1](Japan Linear Collider)用のXバンドクライストロンの開発研究をおこなってきた。XB72Kの開発名を持つ一連のクライストロン^[2]は、ソレノイド電磁石による集束系(最大軸上磁界は約6500ガウス)と、高集束比(1:110)、高電圧(定格550kV)の電子銃を持つ。進行波型出力空洞を搭載した9号機では、パルス幅1.5 μ 秒で50MWをこえる出力が得られた(繰り返し10Hz、カソード電圧445kV)。だが、RF変換効率は30%強にとどまり、効率仕様値の47%^[2]には届かなかった。MAGICコードによる設計の見直しから、ドリフト長が最適でないため、ビームが十分バンチしていないことが判明した。10号機^[3]は、それまでの管より長いドリフトを持つことのほか、バンチング空洞をさらにひとつ加え(合計2個)、新規設計された2/3 π 進行波型出力空洞を搭載した管として設計された。試験では、パルス幅1.5 μ 秒、出力50MW(繰り返し25Hz)が達成された^[4]が、自励発振のため、効率改善がなされたかについては、はっきりと結論づけはできなかった。

クライストロン運転時の総合的な電力効率の観点からすると、消費電力の大きい集束用ソレノイドを無視することはできない(XB72Kの場合、ビーム平均電力と同程度である)。集束系については、周期永久磁石(PPM)をもちいた大電力クライストロンの可能性が早くから提案されていた^[5]。ただXB72Kのソレノイドと同等の強力な磁界をPPMでは得られないため、集束系のおき替えによるPPM管の実現は不可能であり、全面的な新規設計とならざるをえない。

KEKは東芝と共同で、1999-2000の両年度にわたり、PPMパルスクライストロン開発2ヵ年プログラムに着手した^[6]。期間中、PPM管を2本順次設計、製作することとした。まず1号機は、PPM管の基本設計を確立することを目標とし(そのため設計仕様をJLC仕様より低めにし、水冷構造は最小限にとどめた)、

つづく2号機でJLC仕様に到達する二段階での開発を行うことにした。先行するSLACでの50MW XバンドPPM管^{[7][8]}や、BINPとKEKの共同によるPPM管の試験結果^[8]等も考慮して、1号機の仕様の策定をした。PPM集束能力から、ビームの μ パービアンスを、XB72Kの1.2から0.8へ下げた。一般的に、低いパービアンスのクライストロンほど、高いRF効率を見込めることが知られている。印加するカソード電圧が同じなら、低いパービアン管のビーム電力は、その分低くなるが、高い効率がそれを補償し、結果的には同程度のRF出力を取り出しうる。PPM1号機のRF仕様を、カソード電圧450kV、出力50MW、RF効率50%とした。後述するように、1号機は試験で50%近い最大効率を得た。

XB72K10号機などの経験から、PPM管は自励発振の抑制にも重点をおいた。1号機の試験結果は良好であったので、2号機は、1号機の基本設計を踏襲し、RF空洞の最適化や、水冷構造の増設で、JLC仕様(出力75MW、パルス幅1.5 μ 秒)に到達しうる設計にした。試験では、出力73MW、パルス幅1.4 μ 秒、RF効率54%が得られた。

2. 設計概要

2.1 電子銃

XB72Kからのパービアン値の変更のため、電子銃は新規設計となった。設計コードはDGUN^[9]、クロスチェックにEGUNを用いた。設計された電子銃の特性を表1にまとめた。

カソード電圧	480 kV	
カソード電流	266 A	
カソードローディング (カソード中心)	< 10 A/cm ² 7.5 A/cm ²	
カソード直径	61 mm	
最大電界強度	全電極上	< 230 kV/cm
	カソード上	192 kV/cm
	アノード上	224 kV/cm
カソード磁界	0-20 Gauss	
ビーム径	ϕ 4.8-6.8 mm	

表1: 電子銃のパラメータ

¹ E-mail: shuji.matsumoto@kek.jp

カソード磁界の発生は、バックリングコイルによる。カソード磁界の増減により、ビーム径を表1の範囲で調整することができる。電子銃からのビームは、PPM部に入る前にマッチングコイルの磁界領域を通る。このコイルは、二連のソレノイド（向きは逆）で、静電集束され細くなったビームを、さらに絞りつつなめらかに PPM 部へ送り込む。このコイルで、PPM 部でのビームスカロッピングを調節することが可能である。

ヒーター定格通電時の電子銃の寸法（いわゆるホットディメンション）を設計寸法にあわせるため、ANSYS コードでカソード部の熱膨張を評価した。専用ベルジャー内でカソードの変位を CCD レーザー変位計で実測した結果は、ANSYS の結果とよく一致した。電子銃の製作の際、チムニーを熱膨張分だけ予め短くした。その結果、高圧試験時の測定パービアンスは、ほぼ設計値どおり（0.78-0.79）となった。

2.2 PPM 磁気回路

PPM 磁石材料は、希土類永久磁石(Nd-Fe-B)を使用している(住友特殊金属製 NEOMAX 35SH, 39SH)。PPM 磁界の周期は 30mm、最大軸上磁界は約 3.2 キロガウス。磁石はすべてビーム軸方向（z 方向）の磁化で、ビームパイプを巻く円筒状に配置する。これらの磁石はすべて半割で製作されている（全 30 対）。一方、磁極はすべてクライストロン本体側にある。半割磁石を本体へはめ込むことで、磁気回路が組みあがる。

変調をうけたビームは、下流へ行くにつれバンチしてくるため、バンチ内の電子はラジアル方向（r 方向）へ広がろうとする。そこで、下流側およそ 1/3 の領域では、(磁界周期は保ったまま)軸上磁界をだんだん大きくした。この「磁界テーパ部」では、磁石の強さは、r 方向の厚みで調整した。PPM 磁石は、z 方向の厚みがすべて同じなので、それらは必要ならばいつでも差し替えができるようになっている。

出力空洞部では、z 軸に沿う磁界がその全体を覆う。磁界を変化させ、シミュレーションで空洞部でのビーム透過の具合や、RF 出力値をみながら、適当な磁界を見出す。この部分の磁石も、z 方向に磁化させた、出力空洞部を巻く円筒状形状のものだが、出力空洞からの出力導波管（2本）のため、磁石に切り欠きが必要となる。ビーム軸上に磁界の r 成分がでないように切り欠いた。

磁界計算は、もっぱら(z,r)の二次元計算(コードは POISSON/PANDIRA)でおこない、出力空洞部など軸対称でない部分を三次元計算した。

1号機の試験中、ビーム透過に問題はなかったもので、2号機の設計磁界も1号機と同じものにした。ただし、2号機には、PPM部に1号機にない冷却水経路があるため、磁石形状を1号機用のそれから少し変更した。

2.3 RF 回路

1号機は、入出力空洞のほか5つの中間空洞（2ゲイン空洞、3バンチング空洞）をもつ。MAGICコー

ドを使用し、各中間空洞の配置、共振周波数を決定した。

XB72K10号機に搭載された出力空洞^[3]は、表面電界強度の低いいわゆる進行波型で、発振に関与しない（TE111）モードは、離調による抑制がなされているため、これを PPM 管にも使うことにした。ただし、本来は、10号機のビームに最適化されているため、出力カップラーの形状を再設計して、PPM1号機の仕様 RF 出力が得られるよう改造をおこなった。

1号機の RF 出力試験結果は良好であったので、2号機のための RF 回路設計は、二つの改良のみおこなった。第6空洞の周波数を変更したのと出力空洞のカップラーを RF 出力について最適化した。

空洞の高次モード（HOM）や空洞間のドリフト空間でトラップされるモードは、発振に結びつく可能性があるため、これらを効果的に減衰させるため、ドリフト管および中間空洞は、それぞれステンレスおよびモネル(Ni Cu 合金)製とした。モネルは、ステンレスよりも軟らかい金属であることで、周波数調整のやりやすさから1号機の空洞材料に採用した。その後、ステンレスでも調整可能であることがわかったため、2号機では、空洞もステンレス製とした。ちなみに、出力空洞は両管とも銅製である。

出力空洞の発振対策としては、2本の出力導波管をかたむけて出力空洞にとりつけ、空洞内の HOM と導波管の結合をとることで、HOM 減衰をはかることとした。

3. 試験概要

大電力試験は、KEK AR 南実験室の#3ステーションでおこなわれた。本ステーションでは、ブルームライン型モジュレータからのパルス出力を 1:8 パルストランスを通じて、最大電圧 550kV、最大繰り返し 50Hz でクライストロンに供給できる^[10]。480kV（PPM 管定格）でのパルスフラットトップはおよそ 1.7 μ 秒である。

1号機の試験期間は2000年7月から9月。その後、改修作業（RF窓を Taper 型^[11]から、ロングパルス仕様の Mixed Mode 型^[12]に変更し、一部空洞の差し替えと、出力空洞の再チューニング）を行った。1号機の改修管、「1.5号」機の試験は、2001年1月より3月まで行い、性能の向上を確認した。

2号機の試験は2001年4月より6月まで実施した。（その後、工事のため中断。2001年末ごろ再開の予定）

4. 試験結果

4.1 1号機、1.5号機

1号機試験は、専ら短い RF パルスで PPM 管の特性を測定した。PPM 特有のビーム透過に関するストップバンドについては、300kV 以上のカソード電圧で、透過がほぼ 100%になることを確認した。RF パルス幅 0.3 μ s、繰り返し 5Hz（冷却の制約のため）、

カソード電圧 514kV で飽和最大出力 68MW に達した。発振現象は、試験中まったく見られなかった。

適当なアイリス付き導波管を挿入することで、ロード系とのマッチング整合をはかり、出力の最適化を試みた^[13]。

1号機試験終了後、ただちに改修作業に入った。改修された1号機 (=1.5号機) の性能試験で、効率の改善を確認した。1.5号機も、その試験中、発振現象は見られなかった。表2に試験結果をまとめた。

	Design	PPM-1	PPM-1.5
Peak Power (MW)	>50	68	67.5
Efficiency (%)	>50	47	49.6
Pulse Length (μs)	1.5	1.5 (@ 56MW)	

表2 : PPM-1、PPM-1.5 の試験結果

4.2 2号機

RF効率が1.5号機よりさらに(5%程度)改善された。まず、繰り返し25Hzで、短いRFパルス幅を用いて出力値を確認しつつ、カソード電圧を480kVまであげた。このとき、発振現象はまったくみられなかった。つづいて、RFパルス幅を1.5μ秒まで延ばしていくコンディショニングに移り、パルス幅1.4μ秒、73MWの出力に達した(カソード電圧503kV)。オシロスコープで見たパルス波形を図1にあてた。このときは、RF窓セラミックの破損のため、繰り返しを3.6Hzに落として運転していた。表3にJLC仕様値と、今回の試験結果をまとめた。

	JLC spec	PPM-2	
		Design	Achieved
Power (MW)	75	75	52 (443kV) 73 (503kV)
Efficiency (%)	55	55	52 54
RF width (μs)	1.5	1.5	1.5 1.4
Rep rate (Hz)	150	50	25 3.6

表3 : PPM-2 の試験結果と JLC 仕様

5. まとめ

2本のPPM管の設計、製作、試験を1999-2001年にかけて行ってきた。JLC仕様を満足する試験機はいまだ実現されていないが、PPM管の能力は、かなり高いことがわかった。2号機は、窓の改修等の後、2001年末ごろより試験を再開する予定である。

なお、本PPM管、ならびに、XB72K管や、ロシアBINPと共同開発したPPM管等の写真が、[14]に掲載されている。

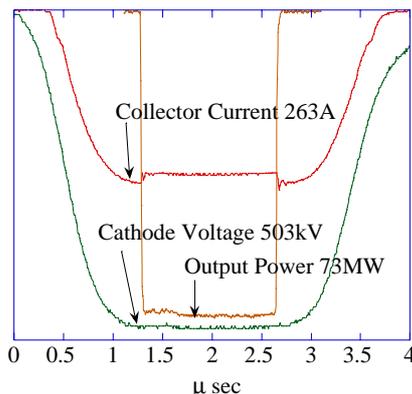


図1 : カソード電圧、コレクター電流、RF出力波形。

謝辞

KEK 中山久義氏には、磁界三次元計算、とくに出力空洞部の磁石形状設計で支援していただきました。住友特殊金属幸田勉氏には、PPM磁石、トーキンマシナリー尾形敢一郎氏には、マッチングコイルに関してそれぞれご尽力いただきました。ここに感謝を表します。高田耕治、Vladimir Balakin、明本光生、峠暢一各氏のご尽力にも感謝いたします。

参考文献

- [1] JLC Group, JLC Design Study, KEK Report 97-1, Apr. 1997.
- [2] H. Mizuno, et al., "X-Band Klystrons for Japan Linear Collider", Proceedings of EPAC94, London, UK, Jun. 27-Jul. 1, 1994.; H. Mizuno, "X-Band RF System for JLC", Proceedings of RF96 (KEK proceedings 97-1), Hayama, Kanagawa, Japan, Apr. 8-12, 1996.
- [3] Y. H. Chin, et al., "The 120MW X-Band Klystron Development at KEK", Proceedings of EPAC98, Stockholm, Sweden, Jun. 22-26, 1998.
- [4] S. Matsumoto et al., "High Power test of an X-Band Klystron in KEK", 第12回加速器科学研究発表会予稿集.
- [5] D. Sprehn, et al., "PPM Focused X-Band Klystron Development at the Stanford Linear Accelerator Center", Proceedings of RF96 (KEK proceedings 97-1), Hayama, Kanagawa, Japan, Apr. 8-12, 1996.
- [6] Y. H. Chin, "Status of X-Band Power Source Development for JLC", in Proceedings of 18th HEACC 2001, Tsukuba, Mar. 26-30, 2001.
- [7] G. Caryotakis, "Development of X-Band Klystron Technology at SLAC", Proceedings of 1997 PAC, Vancouver, B.C., Canada, May 12-16, 1997.
- [8] ISG Progress Report (Chapter 5, "X-Band RF Power Sources"), KEK-Report 2000-7, Apr. 2000.
- [9] BINP で開発された電子銃設計コード
- [10] H. Mizuno, et al., "A Blumlein type modulator for a 100-MW-class X-band klystron", Proceedings of EPAC94, London, UK, Jun. 27-Jul. 1, 1994.; M. Akemoto et al., "Development of the X-Band Klystron Modulator at KEK", Proceedings of LINAC '98, Illinois, USA., August 23-28, 1998.
- [11] Y. Otake, et al., "Design and High-power Test of a TE11-mode X-Band RF Window with Taper Transition", Proceedings of 1995 PAC, May 1-5, Dallas, Texas.
- [12] S. Kazakov, KEK Preprint 98-120, Aug. 1998.
- [13] H. Mizuno, Proceedings of 18th HEACC 2001, Tsukuba, Mar. 26-30, 2001.
- [14] URL <http://ldev.kek.jp/>