

DEVELOPMENT OF 1GHz RF SYSTEM FOR KEKB UPGRADE

Kiyokazu Ebihara¹, Kazunori Akai, Shigeru Isagawa, Masaaki Ono, Susumu Takano,
Yasunao Takeuchi, Hiroshi Nakanishi, Katsumi Marutsuka, Masato Yoshida
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

A project to develop 1GHz (1017.8MHz) 1MW CW RF system for KEKB upgrade is underway at KEK. It is considered as an option to the existing RF system of 508.9MHz. It allows us to increase the maximum number of bunches by a factor of two, which raises the limit of single bunch instabilities and higher order mode loss. If it is used for crab cavities, the required crabbing voltage and the size of the crab cavities are reduced to half. Since 1MW CW klystrons and high power components such as circulators and water loads at 1GHz are not commercially available, we have been developing them in collaboration with manufacturers. A prototype klystron and high power components have been completed and we recently started a high power test at KEK.

KEKBアップグレードに向けた1GHz高周波システムの開発

1. はじめに

KEK B-ファクトリー(KEKB)は3.5GeV低エネルギー陽電子リング(LER)、8GeV高エネルギー電子リング(HER)と入射リアックから構成される。最高ルミノシティは2006年に $1.71 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ が記録された。ビーム電流はLER 1.66 A, HER 1.34 Aであった。高周波加速システムの周波数は508.9MHzであり、LER 8MV, HER 13MVの電圧をクライストロン^[1]から加速空洞に供給している。LERの加速空洞は常伝導空洞(ARES)^[2]であり、20台設置されている。一方、HERはARES 12台と超伝導空洞(SCC)^[3]8台が設置されている。クラブ空洞^[4]は両リングに各1台設置されている。ARESはクライストロン1本から空洞2台にパワーを供給している。SCCはクライストロン1本で空洞1台にパワーを供給している^[5]。

KEKBアップグレードは、リング全周の真空チェンバーの交換等を行なった後、まず現在と同程度のビーム電流で運転を開始して、その後に高周波システムを段階的に増強してビーム電流を増加していく計画である。最終完成時には、ビーム電流はHERで現在の約3倍、LERで約5倍に増加する。高周波加速システムは、KEKBでの実績がありコストも最小となる現行の508.9MHzシステムをベースラインとしている。ビーム電流増強に対応するため、(1)クライストロンおよび地上のRFステーションの台数を倍増させる、(2)ARES空洞はクライストロン1台から空洞1台にパワーを供給するシステムに変え、空洞あたりのビームパワーを約3倍に増加させる、(3)空洞およびHOMダンパー等の機器の改良を行なう、などを実施する予定である。

一方、アップグレードのオプションの1つとして、加速周波数を2倍の1.018GHzに上げる可能性についても検討している。この場合、最大蓄積可能なバン

チ数が2倍に増えるので、単バンチ不安定性や高次モード損失等の限界が上がる。また、クラブ空洞に使用した場合には、必要なキック電圧を1/2に減らし、空洞のサイズをコンパクトにできる。このため、我々は1GHzの連続波1MW出力のクライストロンおよびハイパワー機器の開発を行なっている。

2. 1GHzシステムとコンポーネント

1GHzシステムはクライストロン、サーキュレーター、ウォーター(ダミー)ロード、導波管と制御系から構成される。これらのコンポーネントは既存のものが無く、大電力コンポーネントを中心にメーカーと共同で開発をしてきた。今後も性能アップのため開発を継続して行く。以下に開発状況をまとめる。

2.1 クライストロン

このシステムのキーテクノロジーの一つであり、最終的に1MW連続出力を目指す。当面の目標は500kWに設定し、他のコンポーネントの様子を見ながら徐々にパワーを上げて行く。508.9MHz系と同様、クライストロンは変調アノードを持つ3極管であり、カソードには最大95kVの電圧をかける。コレクターは1.2MWのパワー損失に耐えうる構造になっている。冷却方式は熱効率の良い蒸発冷却を採用している。クライストロン出力は入力レベルとアノード電圧により制御され、利得は50数dBある。変換効率は65%以上の高効率を目指す。安定運転のためVSWRは1.15以下で運転する。出力はクライストロン出力空洞から扁平導波管で取り出し、ドアノブ変換器で同軸モードに変換し、セラミック窓で真空絶縁する。その後、ドアノブ変換器で導波管モードに変換される。クライストロンのスペックを表1、外観を図1に示す。

¹ E-mail: kiyokazu.ebihara@kek.jp

表1 クライストロンのスペック

周波数	1.018GHz±0.35MHz(-1dB落ち)
入力電力	10W以下
出力電力	300kW以上、目標500kW連続
許容反射電力	2.5kW以下、VSWRで1.15以下
高調波出力電力	-23dBc以下
コレクター損失	1.2MW以下
コレクター冷却	蒸発循環方式
導波管フランジ	WR-975用FUDR-9
電波漏れ量 @1m	0.1mW/cm ² 以下
漏れ放射線量 @1m	0.2μS/h 以下



図1 クライストロンの写真

2.2 サーキュレーター

クライストロン同様、このシステム中で開発要素が大きいコンポーネントである。周波数が高く、ハイパワーなので4ポート型90°非可逆移相器方式を採用した。サーキュレーターは空洞等の反射からクライストロンを保護する役割を持ち、マジックT、1対の導波管型移相器と3dBカップラーから構成される。フェライト板はY-Gd-Al系焼結物であり1.2Tのバイアス磁場をかけている。磁場は導波管外部の上下に設置されたフェライト系永久磁石から発生する。通過パワーは1MW連続、反射は600kW連続である。低パワー測定で挿入損失は0.3dB、各ポート間アイレーションは20dB以

上であった。冷却方式は導波管上下に接続された銅パイプによる間接冷却である。サーキュレーターのスペックを表2、外観を図2に示す。

表2 1MWサーキュレーターのスペック

周波数	1.018GHz±5MHz
入射電力	1MW連続
反射電力	0.6MW連続、1MW 0.1秒パルス
挿入損失	0.25dB以下
アイソレーション	25dB以上
VSWR	1.15以下、中心周波数で1.1以下
導波管フランジ	WR-975用FUDR-9
冷却水	純水
最大圧力	1MPa以下
冷却水流量	150 リットル/分
周囲温度	0~45°C
磁場漏れ量 @1m	3 Gauss以下
電波漏れ量 @1m	25μW/cm ² 以下

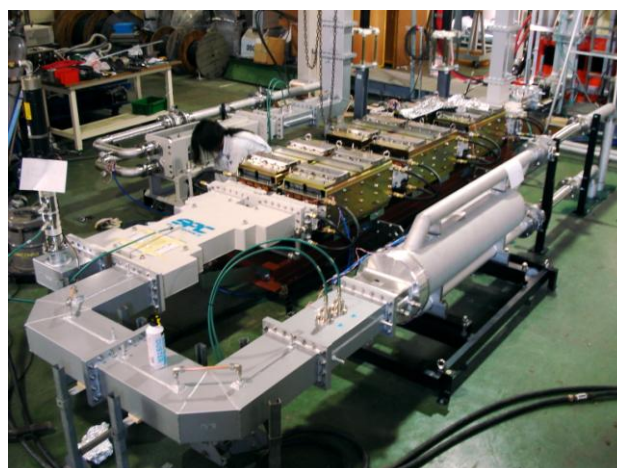


図2 サーキュレーターとウォーターロードの写真

2.3 大電力ウォーターロード

ウォーターロードはクライストロンで発生したパワーを純水で吸収するもので最大1MW入力に対してVSWRは1.1~1.2以下に設計されている。1~1.5MWの入力に対してもVSWRは保証されないが、連続運転に耐える構造になっている。パワーの減衰率は45°Cの純水に対して14.4dB/mである。低い温度では減衰率はさらに高くなる。ウォーターロードは2種類あり、各々サーキュレーターの第2と第3ポートに接続される。第2ポートのウォーターロードはクライストロンからのパワーを吸収する。第3ポートのロードは全反射試験に使用し、通常は第2ポートからの反射を吸収する。第2ポート接続ロードはセラミックス窓で冷却水と導波管部を仕切るタイプで、パワーの高い窓付近を集中的に冷却する。ロード長は約1.3mである。一方、第3ポートのロードは先端

がコーン状に閉じたPTFEパイプが導波管部に突き出した形状であり、パイプを上下に板で仕切り、先端部で冷却水が戻る構造になっている。ロード長は約1mである。冷却水流量は両方ともに毎分500～600リットル程度である。第2ポートのロードを図2サーキュレーターの右に示す。第3ポートのロードを図3に示す。ウォーターロードのスペックを表3に示す。この他、第4ポートに40kW同軸型ダミーロードが接続されている。

表3 1MWウォーターロードのスペック

周波数	1.018GHz±5MHz
耐電力	1.5MW連続
VSWR(1MW以下)	1.2以下、中心周波数で1.1以下
ロード長	1.3m(第2ポート)/1m(第3ポート)
導波管フランジ	WR-975用FUDR-9
冷却水	純水
最大圧力	1MPa以下
冷却水流量	～600 リットル/分
使用温度	30～60℃
電波漏れ量 @1m	25μW/cm ² 以下



図3 第3ポートのウォーターロード

2.4 導波管及び制御系

導波管は周波数帯域内でパワー損失の少ないWR-975(WRI-9)を採用した。このサイズは全く手持ちがなく、直管、E-ベンド、H-ベンド、方結管等を新しく製作した。通過パワーが～300kWに上昇すると導波管表面が100℃以上の高温になると予測されるので全て冷却用角パイプを付けた。VSWRは全て1.1以下である。接続された導波管を図2に示す。

テストスタンド用制御系は信号発生器、モジュレーター、RFスイッチ等から構成される。モジュレーターには電圧をかけ、クライストロン入力レベルをコントロールする。同時にクライストロン出力を検波し、出力レベルが一定になるようにフィードバックをかける。

3. 大電力試験

高周波を入れる前にDCエージングと呼ばれるクライストロンのガン周辺とコレクター部のガス出し作業を行った。この時クライストロン出力はウォーターロードに導波管で直接接続した。次に図2に示すようにサーキュレーターを挿入し、高周波をONし、パワーを徐々に上げていった。途中、セラミックス出力窓のマルチパクターリング(MP)による真空悪化^[6](ガスバースト)が何度も起きた。MPが起きた時、1) 反射レベルの増加、2) セラミックス窓の温度上昇、3) 真空悪化等の現象が観測された。多数のMP点を乗り越え、40kWまでパワーを上げた。現在、ここで一時テストを中断している。その理由はクライストロンとサーキュレーター間にWR-650サイズの変長ベロー管を暫定的に使用していて、このベロー管からの反射が大きいためである。サーキュレーター、ウォーターロード等他のコンポーネントはこのパワーレベルまで特に問題なかった。

4. まとめ

1GHz、1MW連続のクライストロン、サーキュレーター、ウォーターロード等をメーカーと共同開発し、テストスタンドを組み立てた。最初の大電力試験を行い、クライストロン出力で40kWが得られた。クライストロン下流ベロー管からの反射が大きいため、現在一時テストを中断している。暫定的に使用しているベロー管を反射の小さいWR-975サイズに交換し、大電力試験を再開する予定である。

5. 謝辞

大電力コンポーネントを共同で開発した東芝電子管デバイス(株)、日本高周波(株)、島田理化学工業(株)の関係者の方々に深く感謝します。

参考文献

- [1] S. Isagawa et al., "Development of High Power CW Klystrons for TRISTAN", Proceedings of IEEE Particle Accelerator Conference, Washington D.C., Mar 1987, Vol 3 (1988) 1934-1936.
- [2] T. Kageyama et al., "The ARES Cavity for KEKB", Proceedings of e⁺e⁻ Factories '99, Tsukuba, Japan, Sep.1999.
- [3] T. Tajima et al., "The superconducting Cavity System for KEKB", PAC'99, New York, (1999) 440-444.
- [4] H. Hosoyama, et al., "SUPERCONDUCTING CRAB CAVITY FOR KEKB", APAC98, Tsukuba, Japan, Tsukuba, (1998) 828-830.
- [5] K. Akai et al., "RF Systems for the KEK B-Factory", Nucl. Inst. Methods A 499 (2003) 45-65.
- [6] M. Yoshida, et al., "Instabilities due to Multipactoring, Modulation and Anode Emission found for TRISTAN High Power CW Klystron", Proceedings of 6th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tokyo, Oct 1987, (Ionics, Tokyo, 1987) 126-128.