

## 10MW マルチビームクライストロン試験の為の導波管系構築

### CONSTRUCTION OF WAVEGUIDE SYSTEM FOR TESTING OF 10 MW MULTI-BEAM KLYSTRON

石本和也<sup>#,A)</sup>, 沼田直人<sup>A)</sup>, 花香宣彦<sup>A)</sup>, 明本光生<sup>B)</sup>, 荒川大<sup>B)</sup>, 江木昌史<sup>B)</sup>, 片桐広明<sup>B)</sup>, 竹中たてる<sup>B)</sup>,  
中島啓光<sup>B)</sup>, 松本利広<sup>B)</sup>, 三浦孝子<sup>B)</sup>,

Kazuya Ishimoto<sup>#,A)</sup>, Naoto Numata<sup>A)</sup>, Norihiko Hanaka<sup>A)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>B)</sup>, Dai Arakawa<sup>B)</sup>, Masato Egi<sup>B)</sup>,  
Hiroaki Katagiri<sup>B)</sup>, Tateru Takenaka<sup>B)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>B)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>B)</sup>, Takako Miura<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Nippon Advanced Technology Co. Ltd.

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

In International Linear Collider (ILC), 10 MW multi-beam klystron (MBK) is planned as source of high power radio frequency and its specifications are operating frequency 1300 MHz, pulse width 1.65 ms, repetition 5 Hz, applied voltage 120 kV, beam current 140 A, maximum output 5 MW × 2. Until last year, the MBK was demonstrated by connecting its two output waveguide, 5 MW circulator and 5 MW solid dummy load and we obtained data such as perveance close to the specifications. But discharges occurred inside the circulator and the solid dummy load at the stage of performing the maximum power. For this reason, two Y-type branch waveguides were attached to each output waveguide and four 5 MW solid dummy loads were incorporated in consideration of the safety factor. Currently, the output of 5 MW × 2 is maintained with a pulse width of 1.6 ms and its power measurement is carried out based on calorie calculation. In the future, the specifications of MBK will be measured at the output of 5 MW × 2 with a pulse width of 1.65 ms.

#### 1. はじめに

国際リニアコライダー(ILC)の超伝導空洞へ供給する高周波源として 10MW マルチビームクライストロン(MBK)の使用を予定している。その仕様を Table 1 に示す[1]。

昨年まで、MBK の 2 ポート出力導波管各々に 5MW サーキュレータと 5MW 固体ロードを接続して実証試験を行い、仕様に近いパービアンスなどのデータを取得してきた。しかし、最大出力試験を行う段階でサーキュレータ及び固体ロード内部での放電が頻発した。このため、安全係数を考慮して各々の出力導波管に Y 型導波管を取り付けてパワーを 2 分割し、合計 4 台の 5MW 固体ロードを組み込んだ導波管系を構築し、MBK の動作試験を行った。

Table 1: MBK Specification

Typical	Operations
Frequency	1.300 GHz
Peak Power	10.3 MW
Pulse Length	1.5 ms
Repetition Rate	10 pps
Beam Voltage	117 kV
Beam Current	131 A
Efficiency	67 %
Gain	50 dB

#### 2. 導波管系構築

昨年までの MBK 実証試験時の導波管構成を Figure 1 に示す。

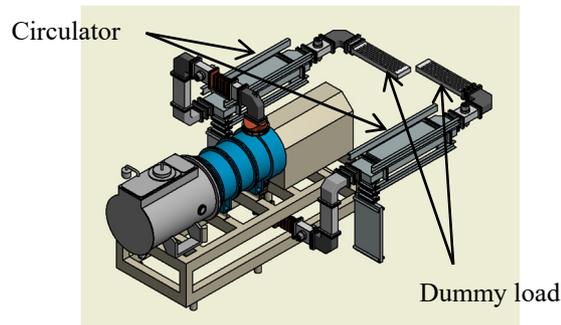


Figure 1: Old waveguide system.

5MW サーキュレータは固体ロードからの反射を考慮し、MBK 保護の目的で組込んだ。

昨年までの試験でパルス幅 1ms、繰り返し 5Hz、最大出力 5MW(片側)の試験データを取得したが、パルス幅を 1ms 以上に広げ、出力を上げていくとサーキュレータ及び固体ロード内でのアークセンサーインターロックが頻発した。その後、エイジング目的でパルス幅を 1ms より短い幅で試験を行ったがサーキュレータ及び固体ロードの改善は見られず、徐々にサーキュレータ内部での耐電圧が下がり、最終的にはパルス幅 20μs、最大出力 4MW(片側)で放電が起きるようになった。このため試験を中断し、サーキュレータ及び固体ロード内部の調査を行った。

<sup>#</sup> nat-kazu@post.kek.jp

Figure 2 にサーキュレータ前段(ハイブリッド部)の放電痕の写真を示す。

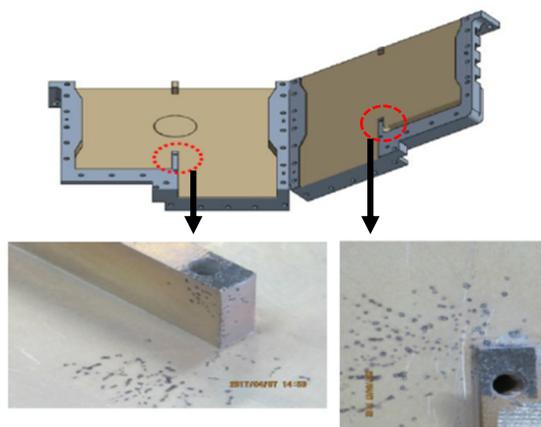


Figure 2: Internal discharge scar.

以前も同様のサーキュレータで同じ箇所放電痕があり、そのサーキュレータも耐電圧が徐々に下がり、最終的に使用不可になった経緯があることから、このサーキュレータでは最大出力(5MW、1.65ms、5Hz)は維持できないと判断し、Y型導波管を組み込んで出力パワーを2分割した導波管構成に変更した。その構成をFigure 3に示す。サーキュレータは5MW程度のパワーを通すためには修理が必要なため、組み込んでいない。また、固体ロード内には放電痕は確認できなかったが、白い粉(フ化アルミ)がみられた。Y型導波管及び固体ロードについてはネットワークアナライザを用いてVSWR値を測定し、使用上問題はない(1.1以下)と判断し、内部を清掃後、エアブローをしてから導波管ラインへの組み込みを行った。

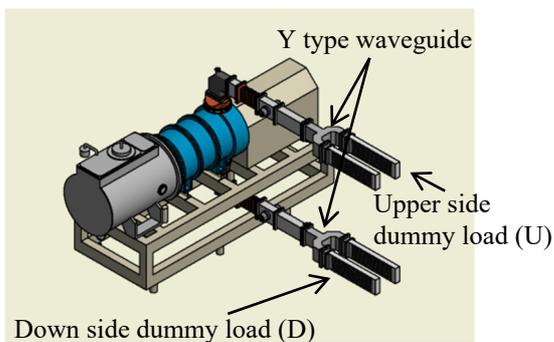


Figure 3: New waveguide system.

### 3. 電力モニター系の校正

校正はスライダックとパイプヒーターを用いて行った。Figure 4 にその回路図を示す。パイプヒーターを断熱加工した冷却水配管内に組み込み、スライダックを用いて電圧を0~200Vまで上げ、電圧・電流をモニターできるようにデジタルパワーメータ(YOKOGAWA製WT310HC)を設置した。この値から求めた電力量と、冷却水の温度差( $\Delta t$ )を熱量計算で求めた電力量との値

を比較し、相違の無い事を確認した。結果をFigure 5に示す。

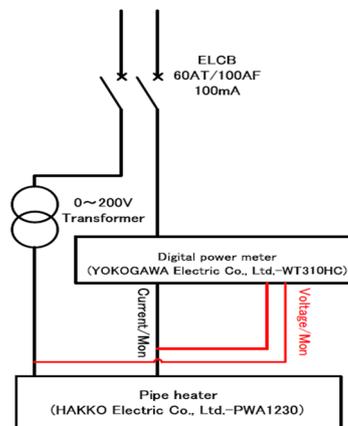


Figure 4: Diagram of transformer and pipe heater.

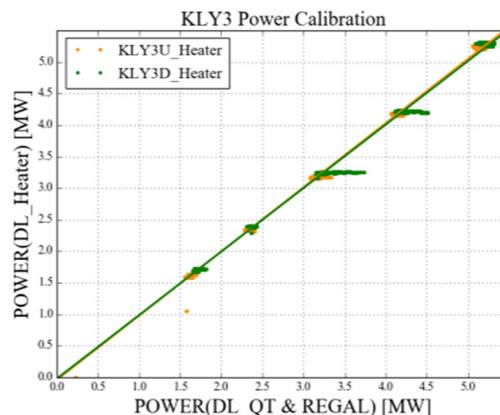


Figure 5: Graph of electric energy and calorie calculation of pipe heater.

このパイプヒーターは最大出力3kWである。測定には、クライストロンの運転条件(出力5MW(片側)、繰り返し5Hz)を基準に熱量計算し、ヒーター最大出力が3kWであっても、パルス幅100 $\mu$ sの条件であればクライストロンの運転条件を満たすことができた。冷却水の温度差( $\Delta t$ )をなるべく大きく出し、測定精度を上げるため、冷却水流量は10l/min.に設定し、データを取得した。

## 4. RF出力試験

### 4.1 電力モニター系の校正試験

出力試験はまず、スライダックとパイプヒーターを用いた校正時の条件(パルス幅100 $\mu$ s、出力5MW(片側)、繰り返し5Hz、冷却水流量10l/min.)で試験を行った。

冷却水の温度差( $\Delta t$ )の値から熱量計算した出力を共通にして、パイプヒーターの電力量とGigatronix製パワーメータの表示値を比較した。このGigatronix製パワーメータは方向性結合器の結合度やケーブルロスオフセット値を入力したものを使用した。結果をFigure 6に示す。パイプヒーターの

電力量と Gigatronix 製パワーメータの表示値とでは数%の誤差があった。このため、パワーメータのオフセット値を再設定し、電力モニター系の校正を終了した。

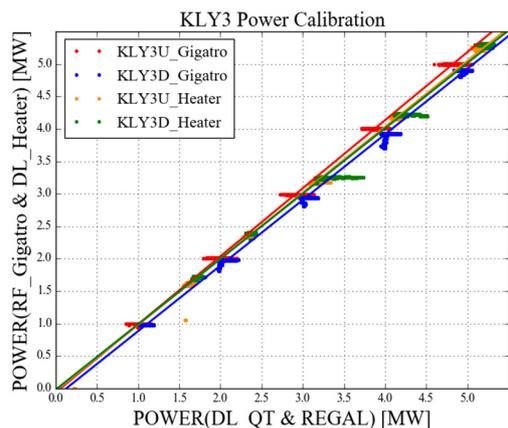


Figure 6: Comparative chart of heater value and Power Meter value.

#### 4.2 RF 出力試験

試験はパルス幅 100~1650 $\mu$ s、出力 5MW(片側)で 1 時間キープ運転を行い、徐々にパルス幅を広げていく手順で試験を進めた。サーキュレータを組み込んでいないので、反射のインターロック値の閾値を低く、アークセンサの Gain を高く設定して、安全に運転を行った。試験中、2 ポートの出力(Pf)値のバランスが崩れ、インターロックで RF が落ちる現象が起きた。Figure 7 にその時の波形を示す。

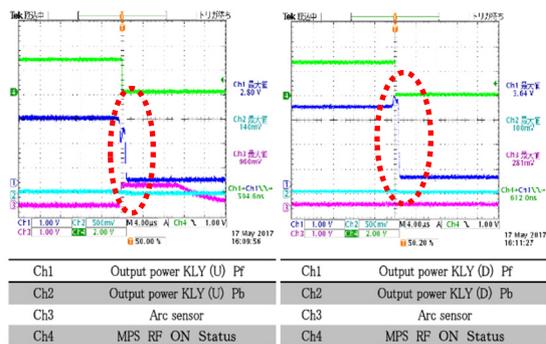


Figure 7: Corrugation at the time of an output unbalanced phenomenon.

アンバランス現象が数回起きた為、メーカーに問い合わせを行ったところ、この現象が起きた際に MBK のイオンポンプ真空値に変化があれば MBK 内部での放電、真空値に変化が無ければ導波管内での放電であるとの解答があり、調査を行った。

この現象が起きた際にイオンポンプの真空値に変化が無かった為、導波管内の放電と判断し、放電の頻度も少ないことから試験を進めた。

最終的に ILC のスペックである、繰り返し 5Hz、パルス幅 1650 $\mu$ s、出力 5MW(片側)を達成できた。メーカーの試験結果と KEK での試験結果の比較グラフを Figure 8、Figure 9 に示す。[2]

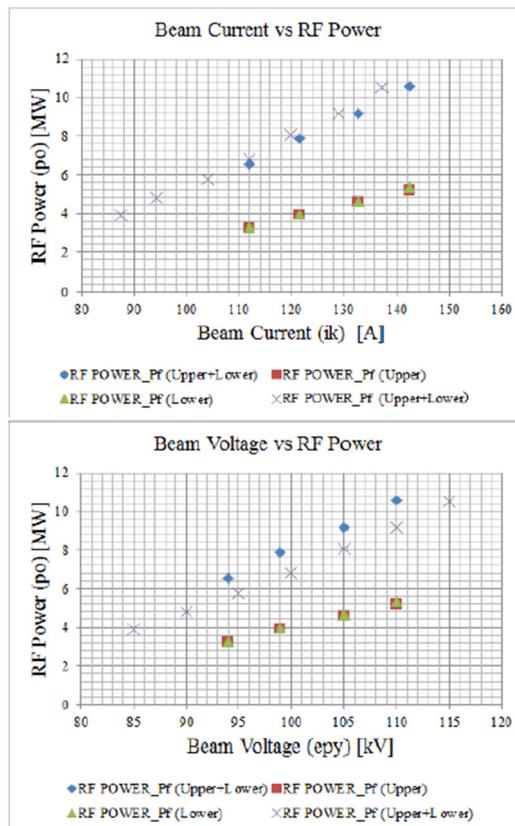


Figure 8: Output power chart to beam current and beam voltage.

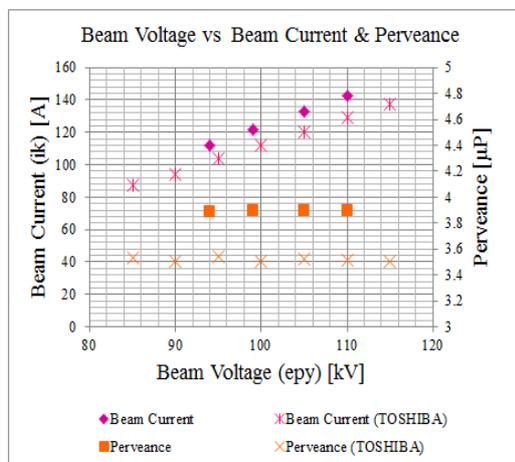


Figure 9: Chart of perveance value to beam current and beam voltage.

メーカーの試験結果と比較すると、KEK での試験結果はパービアンズ値が高めにしていることが分かる。この原因としては、ビーム電流・ビーム電圧のモニター機器の誤差が影響しているものと思われるが、

現在調査中である。

また、今回 ILC に向けて検波器を用いたパワー系のモニター監視も行った。

測定にはまず信号発生器 (SG) と検波器、オシロスコープを使用し、SG から信号を送り検波器を通して、オシロスコープで表示された電圧から本体及びケーブルのロスを確認し、基準を取得した。その後、クライストロンから RF を出力し、冷却水の温度差 ( $\Delta t$ ) から校正した値と検波器の電圧の関係性を求めた。結果を Figure 10 に示す。その係数を CSS に入力し電力系のモニターとして現在、問題なく使用できている。

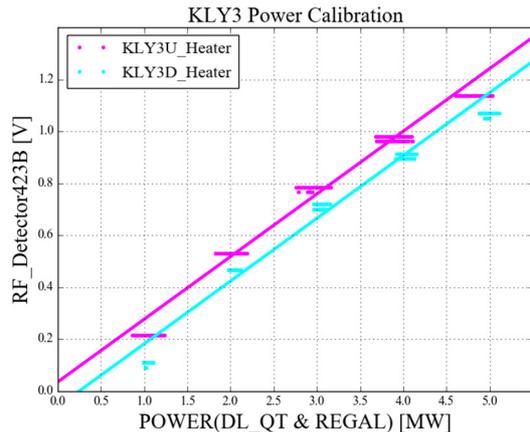


Figure 10: Chart of the detector value to the heater value.

## 5. まとめ

今回 Y 型導波管を組み込んだことで放電の頻度をおさえ、ILC のスペックを達成できた。今後も導波管系構築の際は、安全係数を考えたコンポーネントの組み込みが重要になってくると考えられる。

また電力モニター系について KEK-STF 棟では従来 PM、VSWR メータなどを主に使用してきたが、1 年もしくは数年に 1 度校正に出す必要がある。ILC では、電力モニター系を大量に校正に出すことは困難である。そこで検波器を用いた電力モニターを構成出来ればメンテナンスやコストを低減できるのではないかと考える。

## 参考文献

- [1] <http://www.toshiba-tetd.co.jp/tech/klystron.htm>
- [2] 福田茂樹, 他, “加速器と電子管技術”, Proceedings of the 10th PASJ, Nagoya, Aug. 3-5, 2013 SUOTL1, MOOTL1.