

ILC 導波管コンポーネント大電力試験の為のレゾナントリング構築 CONSTRUCTION OF L-BAND RESONANT RING FOR HIGH POWER TESTING OF ILC WAVEGUIDE COMPONENTS

石本 和也^{#, A)}, 沼田 直人^{A)}, 塙 泰河^{A)}, 明本 光生^{B)}, 荒川 大^{B)},
片桐 広明^{B)}, 中島 啓光^{B)}, 松本 修二^{B)}, 松本 利広^{B)}, 三浦 孝子^{B)}
Kazuya Ishimoto^{#, A)}, Naoto Numata^{A)}, Taiga Hanawa^{A)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Dai Arakawa^{B)}, Hiroaki Katagiri^{B)},
Hiromitsu Nakajima^{B)}, Shuji Matsumoto^{B)}, Toshihiro Matsumoto^{B)}, Takako Miura^{B)}

^{A)} NAT Co.Ltd. (NAT)

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

In the International Linear Collider (ILC), the 10MW Multi-Beam Klystron is planned to be a RF source. This power distribution system from the RF source to the superconducting cavities consists of L-band waveguide (WR650) and are required to operate up to 5 MW RF power without discharge. However, frequent discharges in the waveguide have been observed at values less than a few MW in the STF accelerator. A resonant ring was constructed to investigate the discharge phenomena in the waveguide and to test the developed waveguide components at high power. The RF source of this resonant ring consists of an 800 kW klystron and a MARX modulator, which can be operated independently of the STF-2 accelerator. In addition, the coupler test stand with the resonant ring was constructed for conditioning of the input couplers. In this report, we will report from the construction and the performance of the resonant ring to the high power test of the waveguide components.

1. はじめに

国際線形加速器(ILC)での超伝導空洞への高周波源として 10 MW マルチビームクライストロン(MBK)の使用を予定しており、その仕様は運転周波数 1300 MHz、パルス幅 1650 μ s、繰り返し 5 Hz、最大出力 5 MW \times 2 である。超伝導空洞に付帯した入力カプラーまで L-band 方形導波管(WR 650)を用いて立体回路を構築、RF を供給する。このため、導波管は最大で 5 MW の RF 出力に耐えることが要求される。しかし KEK-STF 加速器の運転時、通過 RF 電力が数 MW に満たないところで管内放電が頻発している。

これに対して、絶縁ガスの封入など様々な対策はあるが、導波管製造の溶接方法や洗浄等による放電への影響を調査しようと考えている。これまでは製作した導波管に対して目視での内面検査、圧力シートを用いてのフランジ面の評価、ネットワークアナライザーで諸特性(VSWR、Loss 等)を測定し、問題が無ければ RF 供給ラインへの組込みを行っていた。今後、ILC の電力分配系での RF 安定供給を目指してレゾナントリングを構築、導波管コンポーネントの大電力試験を行うこととした。ここでは導波管の構築から大電力試験までの報告を行う。

2. レゾナントリング構築

以前レゾナントリングを構築したが、加速器運転に用いていた 800 kW クライストロンの導波管ラインを地上部で切り替えて運転していた[1]。この場合、加速器の運転期間中はレゾナントリングが運転できなかった。

そこで、今回新たに予備機の 800 kW クライストロンを MARX 電源[2]を使用して立ち上げ、加速器の運転とは

関係なく大電力試験が行えるように設備を構築した。(Figure 1)

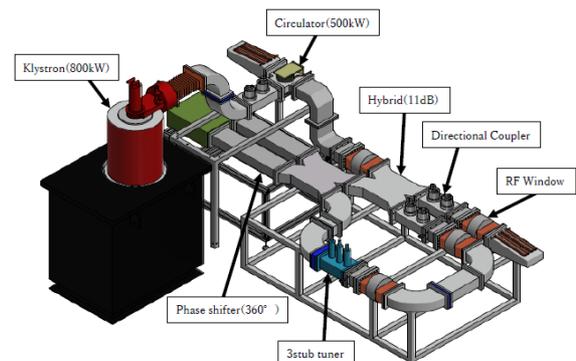


Figure 1: Resonant Ring with 800kW klystron.

2.1 導波管構成

レゾナントリングは 11 dB ハイブリッド(HB)、移相器(360°)、3 スタブチューナー、高周波窓、方向性結合器(DC)、サーキュレーター、水冷ダミーロード、導波管等で構成されている[3]。大電力試験を行う際にはレゾナントリング本体部での放電を抑制する目的で絶縁ガスを加圧する為、3 スタブチューナーの上流側と DC の下流側に導波管窓を取り付けて加圧、試験用の領域と区切っている。導波管構築後に内部へ絶縁ガス(SF₆)を 0.08 MPa 封入しリークチェックを実施したところ、11 dB-HB 及び移相器の 3 dB-HB の溶接部からリークが見つかった。その後、加圧仕様の HB を製作、交換してリークは収まった。RF 窓、水冷ダミーロード、サーキュレーターには 27 \pm 1°C の冷却水を循環させている。

2.2 センサー類

温度変化による影響を考慮し熱電対を各コンポーネ

[#] nat-kazu@post.kek.jp

ントへ設置した。また、レゾナントリング内で放電が起きた際にどの箇所かで放電が発生したかを判断する為、音響センサー(AE センサー)も 10 台設置した[4]。配置図を Figure 2、応答試験を Figure 3 に示す。

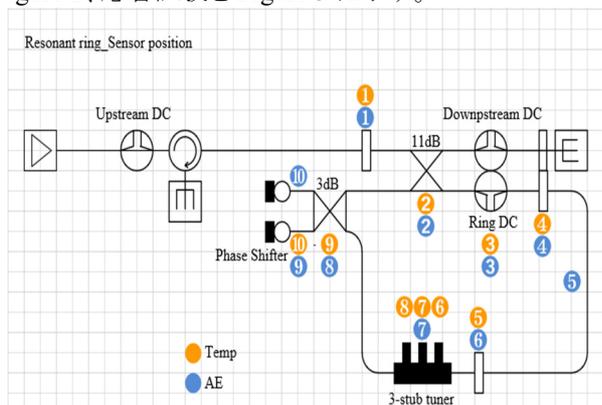


Figure 2: Layout of Resonant Ring and temp and AE sensors.

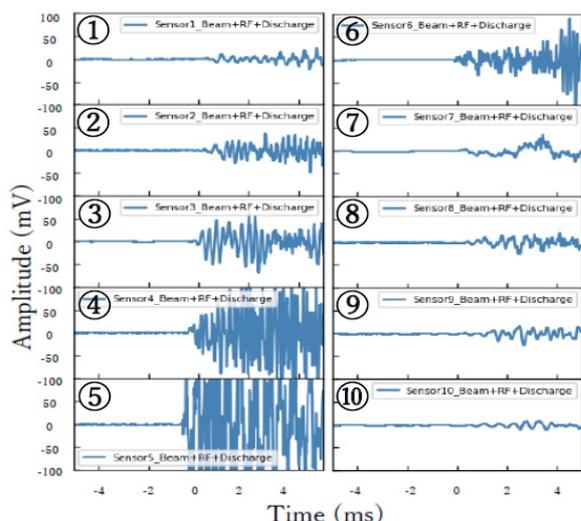


Figure 3: AE sensor response test.

Figure3 はセンサー⑤の部分で小型のプラスチックハンマーで軽く叩いた。センサー⑤の波形が一番早く、振幅が大きく反応しているのが分かる。以前は放電があったポイントを見つけるのに時間がかかったが、放電箇所が容易に判断できるため、非常に有効である。

3. 調整(ローパワー測定)

導波管ライン構築後には、いきなりハイパワーを投入するのではなく安全を考慮して最初にローパワーで調整を行う。今回は 800 kW クライストロン出力窓直後の E ベンドを取り外し、下流側に同軸導波管変換器を取り付け、クライストロン前段に設置してある 50 W 出力のアンプを使用して行った。調整は移相器を動かして 360° スキャンし、Gain 最大値の位置にセット、その後 3 スタブチューナーを調整して高 Gain、尚且つ反射パワーを極力低くなるように調整した。その結果 Gain が 13.5 dB、反射パワーはほとんど無く調整できた。この時、導波管

内部へは絶縁ガスを 0.08 MPa 封入している。これは以前 HB 溶接部からリークが起き、Gain の値が圧力の低下とともに下がっていく現象が見られた為である。そこで、ガス圧力の低下による Gain の変動調査を行った。結果を Figure 4 に示す。加圧した状態で HB 及び移相器を動かして、高 Gain に設定後、徐々にバルブを開けて圧力を下げていく手順で測定を行った。0.08 MPa 加圧から大気圧への低下とともに Gain が 1 dB 程下がっていくのが分かる。

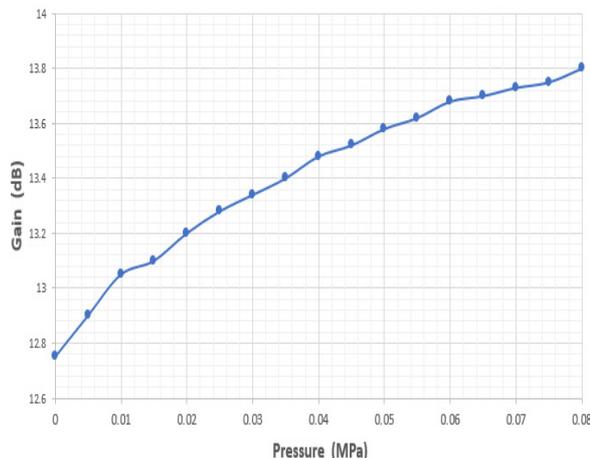


Figure 4: Measured correlation between Gain and pressure inside Resonant Ring.

4. レゾナントリング評価試験

コンポーネントの試験を行う前に、レゾナントリングの評価試験を行った。試験手順はパルス幅を 50~1650 μ s まで徐々に上げていき、各パルス幅で 1、2、3、4 MW を 1 時間ずつキープする手順で進めた。本来であれば 5 MW を目指す予定であったが MARX 電源の都合上、4 MW が限界であった。ここでパルス幅を徐々に上げていくと Gain が低下する現象が起きた。Figure 5 に各パルス幅で 4 MW、1 時間維持した時の Gain の時間変化を示す。

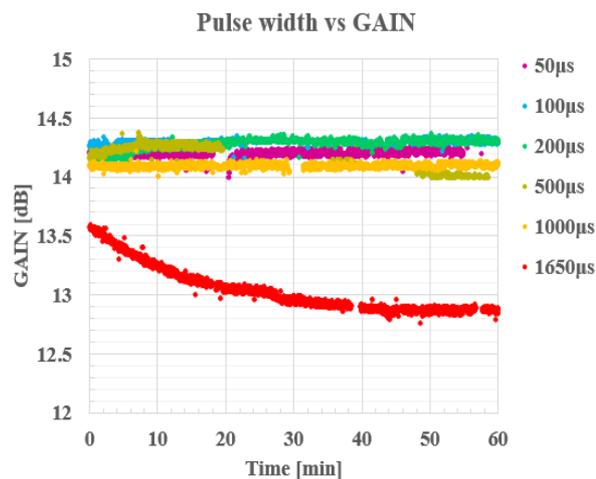


Figure 5: Time variation of Gain with several RF widths.

パルス幅が 1000 μs 以上になると Gain の低下が顕著に表れるのが分かる。HB 溶接部のリークは加圧仕様の物に交換して収まった為、導波管の表面温度上昇が原因と考えた。スポットクーラーで温度上昇の大きい 11 dB-HB を冷却しながら試験を進めると Gain 低下が少し緩やかになった。最終的に繰り返し 5 Hz、パルス幅 1650 μs 、4 MW、3.5 時間維持を達成できた。その時の導波管表面温度、Gain と反射パワーの変化を Figure 6 に示す。導波管の表面温度が上昇すると、Gain が 14 から 13 dB 程度まで落ち、反射も数 kW から 120 kW 程まで増えているのが分かる。

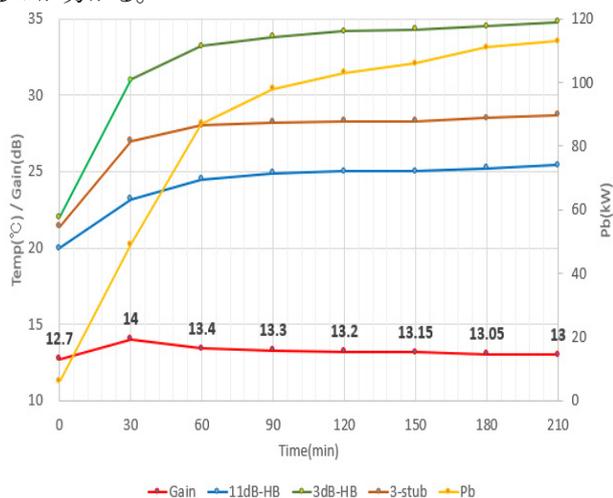


Figure 6: Time variation of Gain and temperature and reflected power.

今後、水配管を設置しチラーで温度管理しながら HB の特性を測定する予定である。

5. レゾナントリングを用いたカプラーテストスタンド

レゾナントリングを使用してカプラーの大電力試験も行った。カプラーは、繰り返し 5 Hz、パルス幅 1650 μs 、2 MW 程で試験する為、レゾナントリングで充分に対応できる[5, 6]。試験時の導波管構成を Figure 7 に示す。

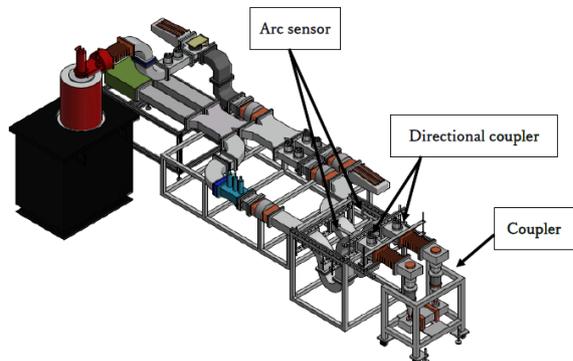


Figure 7: Resonant Ring with coupler test stand.

放電が起きた場合にカプラー側なのかレゾナントリング側なのかを判断する為、DC をカプラーの上下流に設

置した。カプラー側で放電が起きた場合は真空値が跳ねるので真空値もモニターしている。さらにカプラーの内面側に向けてアークセンサーも設置した。大電力試験はレゾナントリング内の HB や 3 スタブチューナーで数回放電が起きてしまったが、カプラーの要求するスペックは達成でき、無事に試験を終えることができた。

6. 直線導波管を用いた大電力試験

導波管製造方法は従来、押し出しで製作した素管と加工したフランジとに段差を付けてはめ合わせ、外側溶接で製作していた。(製造方法①)しかし、この方法では溶接熱による歪みが生じ、隙間が大きくなりやすく、実際に素管とフランジの境目で放電痕が頻繁に見られた。そこで、フランジの首下を長くし、溶接熱が影響しないような製造方法(製造方法②)と、加工したフランジに素管を貫通させて外側溶接、最後に面を仕上げる製造方法(製造方法③)を考えた。(Figure 8)

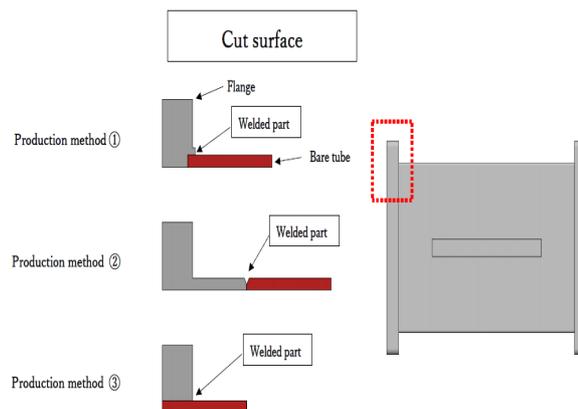


Figure 8: Several cut surface of waveguide flanges.

②と③の方法で業者に製造を依頼し、現在完成品が数台納品されている。また、溶接熱で生じてしまったフランジと素管の隙間に切粉や加工油などが混入してしまった事による放電への影響についても今後試験する予定である。現在、製造方法③の直線導波管をレゾナントリング内に組み込んで試験を行っている。まだ目標の値まで到達していないが、パルス幅 1000 μs 、3 MW を 1 時間維持できた。その間放電は 1 度も起きていない。今後さらにパルス幅を広げて試験を行う予定である。

7. まとめ

今回、新たに 800 kW クライストロンを立ち上げ、レゾナントリングを構築、センサー系も強化し、コンポーネントの大電力試験設備として運用できた。しかし、温度上昇による Gain の低下や反射パワーの増大など改善していく問題点がある。

今後 HB へ水冷ラインを増設し、チラーで温度管理しながら特性を測定する予定である。レゾナントリングから安定して RF が供給できれば様々なコンポーネントの大電力試験を実施し、より放電しにくい導波管の製造方法の確立や、放電原因の究明を行いたいと考えている。

参考文献

- [1] N. Hanaka *et al.*, “Status of RF power distribution system construction for ILC in STF”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, MOP038.
- [2] H. Nakajima *et al.*, “Improvement and High-Power Test of Chopper-type Marx modulator for ILC Klystron at KEK”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, THP058.
- [3] D. Baiting *et al.*, “High-power operation of an L-BAND resonant ring”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July.31-Aug. 3, 2019, FRPH009.
- [4] N. Numata *et al.*, “Construction of RF system for RF gun operation at KEK-STF”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, THP059.
- [5] S. Imada *et al.*, “Assembly procedure of input couplers for STF-2 cryomodule”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, Aug. 9-11, 2014, SUP041.
- [6] Y. Yamamoto *et al.*, “Recent results on power coupler R&D for future accelerators”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 7-10, 2018, WEOL02.