

cERL および STF における導波管コンポーネントの諸特性

RF CHARACTERISTICS OF HIGH POWER WAVEGUIDE COMPONENTS FOR cERL AND STF

竹中たてる^{#, A)}, 三浦孝子^{A)}, 道園 真一郎^{A)}, 松本利広^{A)}, 福田 茂樹^{A)}, 荒川 大^{A)} (A:高エネルギー加速器研究機構 加速器施設), 花香 宣彦^{B)}, 石本 和也^{B)}, 阿部 慶子^{B)}, 柴田 篤志^{B)}, 吉田 哲郎^{B)}, 植武 優悟^{B)} (B:日本アドバンステクノロジー (株))

Tateru Takenaka^{#, A)}, Takako Miura^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Shigeki Fukuda^{A)}, Dai Arakawa^{A)} (A:KEK), Norihiko Hanaka^{B)}, Kazuya Ishimoto^{B)}, Keiko Abe^{B)}, Atsushi Shibata^{B)}, Tetsuro Yoshida^{B)}, Yugo Uetake^{B)} (B:NAT)

Abstract

L-band waveguide components are used at cERL (high power CW) and/or at STF (pulsed high power). Although the applied conditions to the components differ whether they are used at CW or at pulsed high-power, the cooling of the materials inside looks essential at both of them. We report the performance of these rf components such as circulators and dummy loads designed for CW or pulsed high power.

1. はじめに

cERL の高周波源 Figure 1 は 1300MHz (CW) の 20kW-IOT、25kW クライストロン、300kW クライストロン、16kW 半導体アンプ、8kW 半導体アンプで構成されている^[1,2]。

この高周波源からバンチャー空洞、入射器超伝導空洞、主入射器超伝導空洞 (ML) に高周波大電力が給電される。これらの導波管系^[3]には 16kW、30 kW、150kW と高周波大電力に応じたサーキュレータを挿入しているが今回改修が必要になったのは 30kW サーキュレータである。カップラコンディショニングため主入射器超伝導空洞に電力を投入していくと、この 30kW サーキュレータは通過ロスが増加し特性の悪化がみられた。一般的にクライストロンは負荷側に VSWR1.4 以下を要求するが CPI-IOT は VSWR が 1.2 以下である。負荷側の反射板の位置によって通過ロスや VSWR が大きく変化することが分かった。これは反射板の位置を代えると定在波の位置が変わり、フェライトの温度上昇を引き起し VSWR の悪化をおこすものと考えられる。また電力増加によっても同様なことが起きた。これはフェライトの冷却効果の効きが悪いものと思われる。

この不具合はスタブ等の調整では改修できなかった。試験は電力に対する VSWR 測定やフェライトの温度分布などの測定を行った、その結果を基にどの様に改修するか検討したので次の電力試験は今秋におこなう予定である。

STF^[4,5]では 1300MHz、パルス幅 1.5ms、繰り返し 5Hz 運転の高周波源で 500kW (パルス) SiC セラミックダミーロードを使用するが電力の増大に伴い VSWR が大きくなりダミーロードの表面温度が 100°C 近くまで上昇し VSWR も大きくなった。その

後、数度冷却構造の改修を重ね試運転を行った。冷却効率の改修方法としては冷却パイプをヒートシンク構造への変更、冷却面積の拡張、放熱性のよい接着剤で SiC セラミックを冷却板へ密接な結合の確保などの改修を行っている。

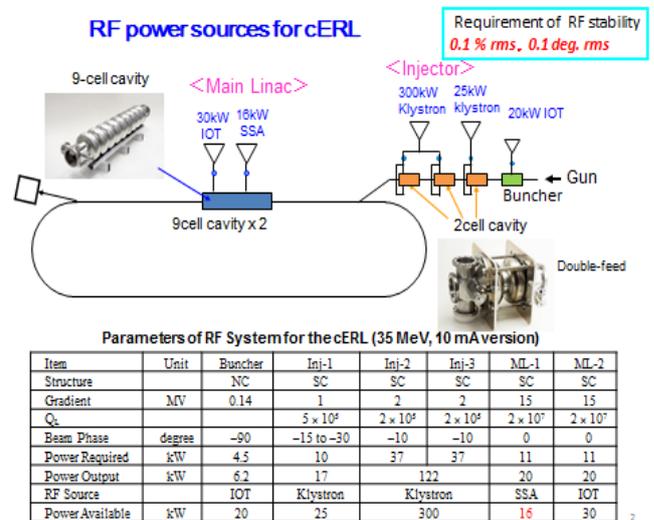


Figure 1: RF power sources for cERL

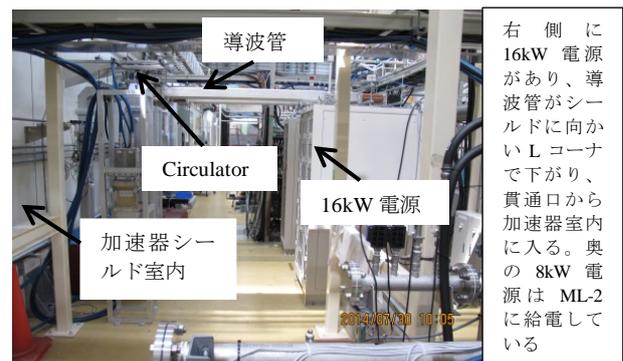


Figure 2: Waveguide of ML

tateru.takenaka@kek.jp

2. 30kW (CW) サーキュレータの改修

この 30kW サーキュレータは cERL 主入射器超伝導空洞の導波管系 Figure 2 に設置され ML のカプラコンディショニングを進めている最中に不具合を確認した。

徐々に電力を上げていくと 5kW で VSWR が悪くなり、ロスが増大するという不具合である。この 30kW サーキュレータを導波管系ラインから外して反射板の位置を代えて低電力でのネットワークアナライザによる測定をおこなった。VSWR は 1.02~1.06 の範囲にあり充分仕様を満たしていた。それからテストベンチを作り、反射板のみでの電力テスト、反射板の位置を代え VSWR およびフェライトの温度分布の測定などを行った。

改修のため製造会社で温度特性などを測定し整合ポストで調整したが電力に依存した高周波特性の悪化なので効果はなかった。また、テストベンチで反射板の位置を 0~130mm の間を段階的に代えて電力を投入したときの VSWR の状況は反射板から 30,40mm の位置では 30kW で VSWR1.14 とまだ良いが 90mm では 5kW でも 1.4 と悪く CPI-IOT の使用条件を大きく外れていた Figure 3。

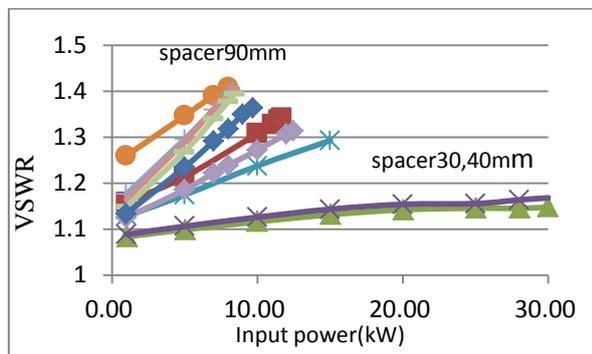


Figure 3: VSWR of 30kW circulator depending on the place of short plane.

30kW サーキュレータの 1,3 ポート側に方向性結合器 (DC1,DC2)、2 ポート側にビューポート付の E ベンドを取り付け、全反射条件で電力を投入していったが 20kW で 3 ポート側からの赤外線温度計の測定では内部のフェライトの温度が 139°Cに達していた Figure 4,Figure5,Figure6。

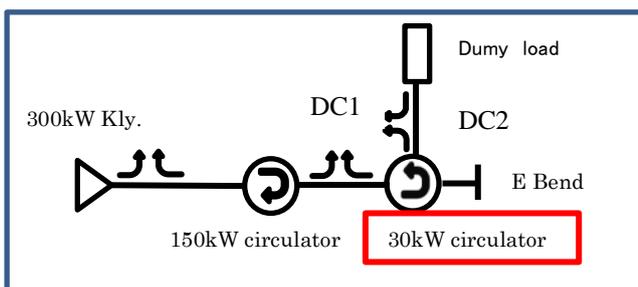


Figure 4: Test bench for 30kW circulator.

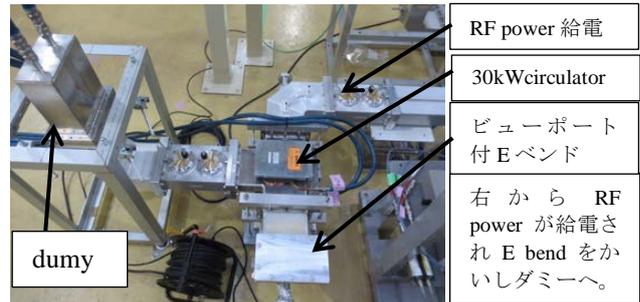


Figure 5: RF power test of 30kW circulator.

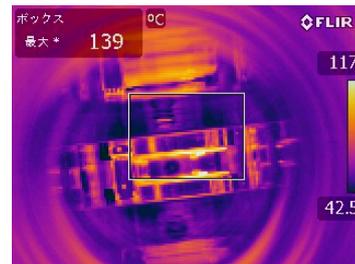


Figure 6: Inside circulator maximum temperature.

現在、サーキュレータの高周波特性および冷却効果を上げる改修を以下のように進めている。従来の 1 段形を 2 段形に改修 Figure 7 し内部の磁場を増強するため小磁石を 4 辺に貼り付け鉄板 (0.5mm) で磁場の均一化を図る、冷却効率を上げるために従来使用していた銅のブロック板を薄くして全体を削り込み冷却水のコンダクタンスも良くして広い面積の冷却構造にする、引出し冷却パイプも 6φから 8φにする。この改修作業後に、cERL に持ち込み秋には大電力テストをする予定である。

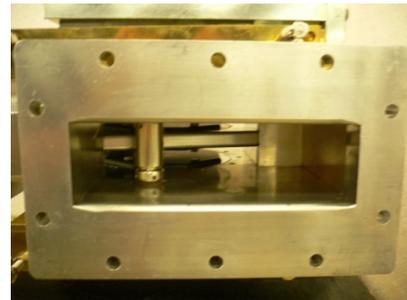


Figure 7: Improvement of 30kW circulator.

3. 500kW (パルス) SiC セラミックダミーロードの改修

概要でも述べているようにこの 500kW SiC セラミックダミーロードは電力を上げていくと終端の表面温度上昇が大きくなり、高周波特性が悪化した。これは改修を重ねていくが数度同じように SiC の熱が除去できない状態が続いた。

このダミーロードの試験は 1300Mz、1.5ms、5Hz 運転で 500kW が最終目標である。

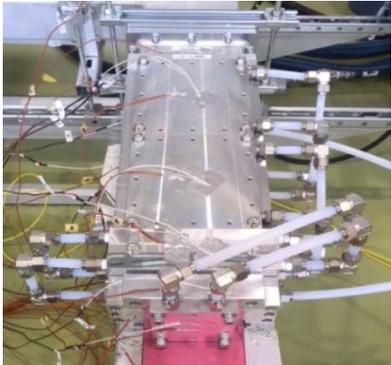
試作機の運転で SiC と本体は両面粘着テープで固定してある。電力は目標値を超えるが表面温度は

100°Cに達し VSWR は 4 を超え、放電も起きた。後日分解をしたら終端部や中間点の SiC で放電痕が確認された。SiC の $\tan \delta$ の温度依存、温度上昇に伴う VSWR の悪化なども特性悪化の要因になる。2 回目の試験は全長が 440mm から 550mm と長くなり、SiC の誘電率の温度変化を考慮したものとなる。試験結果は VSWR1.05 以下、ただし目標値になるとパルス幅 0.75ms で 150°Cとなるので繰り返しを下げパルス幅を 1.5ms にして 700kW まで運転したが放電は起きなかった。やはりこれも温度上昇が大きいので再調整となった。

3 回目は冷却パイプからヒートシンク構造にするが目標値においては VSWR1.4、本体温度が 140°Cを超えた。4 回目はヒートシンクの増設により冷却面積を拡大するが 400kW で VSWR が 1.66 となったので試験をやめる。この時の表面温度は 40°Cである。

5 回目の試験 Figure 8, Figure 9 では SiC と管体の接着を粘性のある放熱用接着剤を用いて、目標値である 500kW において表面温度は 40°C、VSWR も 1.08 と安定している。ここで新たな試みとして内部の SiC 温度を E ベンドに付いているアークセンサー用のビューポートから赤外線温度計で測定したら 100, 200, 300, 400, 500kW で 41, 49, 57, 72, 91°Cとなっていた。SiC を管体に放熱用接着剤で接着したことと冷却構造の改修で目標値を満足することが出来た。

今後は長時間運転に向けた準備を進めていく。



上が RF 入力
で上流から
1~4 で裏側が
6~9 の熱電対
が貼ってあ
る。下の電力
投入時の時間
と温度経過グ
ラフを参照し
てください。

Figure8: Power test of 500kW load.

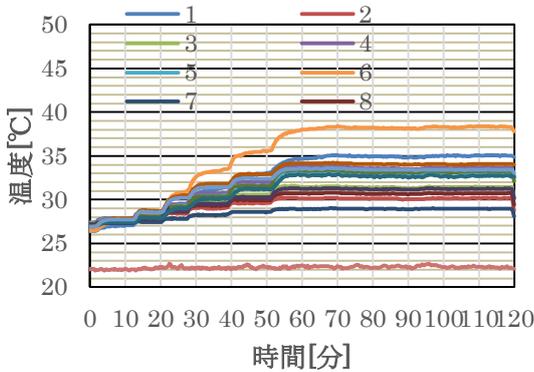


Figure 9: Load temperature.

4. まとめ

先に述べた 30kW (CW) サーキュレータは他社と比較しても電力に依存して高周波特性悪化が顕著にみられ熱の除去が悪いことが運転当初から予想された。サーキュレータの冷却水温度を数十度変えて高周波特性をとり、整合スタブの調整を試みたが改善されない。負荷側の電波長を代えるとサーキュレータ内部のフェライトに定在波が立ちそれがロスになり、熱を出し悪循環となる。改善は 2 段形にして冷却面積の増強、フェライトの熱除去とロスを減らす改善をしたので秋に試運転を行う予定である。

500kW (パルス) SiC セラミックロードは 5 回にわたり改修を重ねた。冷却構造はパイプからヒートシンクにしたが終端のロスが計算より大きく熱が上昇したのでヒートシンクを追加、SiC セラミックの密着は当初平面精度のみで進めていたが熱が除去できないことが分かり放熱用シリコンオイルコンパウンド (耐ポンプアウト性、耐ズレ性、電気特性、耐離油性) などに優れているものを採用した。

最近、冷却効果が悪く製品の出来が疑わしいものが目立つ傾向にある。電源の冷却も水漏れを起こし放電を起こしたりするものも出ている。尚、冷却効果を十分に行った製品が欲しいと思っている。

5. 謝辞

30kW(CW)サーキュレータ、500kW (パルス) SiC セラミックロードの改修結果を記述するに当たり NKK 相沢氏 川根氏 鶴岡氏 古河 C&B 武藤氏 岡本氏には資料を提供していただき御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] T.Miura,他,"RF system for cERL Injector",第 10 回日本加速器学会.
- [2] M.Shimada,他,"Beam commissioning of compact ERL",第 11 回日本加速器学会.
- [3] N.Hanaka, 他 ,"Construction of distribution system at cERL",第 11 回日本加速器学会.
- [4] T.Matsumoto, 他 ,"RF system for Quantum beam experiment and STF-II in KEK-STF",第 11 回日本加速器学会.
- [5] S.Fukuda,他,"Additional Specification of HLRF for ILC IDR and Technical Task to be Solved in KEK",第 11 回日本加速器学会.