

JT-60SA に向けた ECRF 装置長パルス試験における

伝送系の問題点とその対策

平内 慎一, 鈴木 貞明, 佐藤 文明, 和田 健次, 大関 正弘, 小林 貴之, 長谷川 浩一, 横倉 賢治, 森山 伸一

(独) 日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 トカマクシステム技術開発ユニット JT-60 RF 開発グループ

1. 概要

JT-60U 電子サイクロトロン加熱 (ECRF) 装置は、周波数 110GHz の高周波 (ミリ波) により JT-60U プラズマに対し局所加熱/電流駆動を行い、閉じ込め性能を向上させるものである。現在 JT-60U を解体し、コイルを超伝導化してプラズマを 100 秒間維持する JT-60SA (JT-60 Super Advanced) の設計と改造の準備が行われており、ECRF 装置でもこれに対応するための設計と開発が進められている。ECRF 装置に要求される 1MW、100 秒間の長パルス運転を実現するためには、伝送系機器での高周波放電を抑制して高周波を効率良く伝送することが重要な課題である。JT-60SA ECRF 装置の設計では、既設の 1MW、5 秒仕様である伝送系機器も使用する予定であり、長パルス運転に対応するためには一部の機器で改造が必要である。

今回、改造に必要な機器の発熱や真空度の変化に関するデータを得ることを目的として長パルス試験を行い、1MW 出力では過去最長となる 30 秒間伝送のデータを取得した。長パルス試験において明らかになった整合器、導波管などの伝送系機器の温度上昇や、ダミーロードの放出ガスの増加による放電などの問題点と、それを解決するために行った伝送系機器の冷却対策、大口径伝送系機器の導入について報告する。

2. JT-60U ECRF 装置の概要

2.1 ECRF 装置のシステム概要

JT-60U ECRF 装置は、4 系統で稼働しており、周波数 110GHz、最大出力 1MW、パルス幅 5 秒の能力を持つ発振管 (ジャイロトロン) で発生させた大電力高周波を、内部を高真空に保たれた高周波伝送系機器で JT-60U プラズマへ入射する。図 1 に JT-60U ECRF 装置のシステム構成を示す。

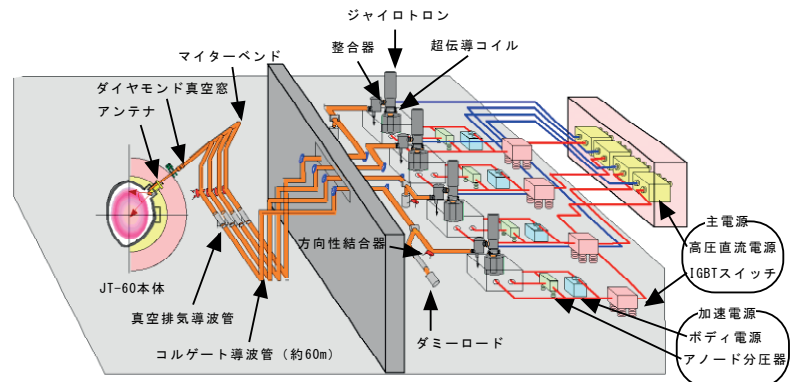


図 1 JT-60U ECRF 装置のシステム構成図

ECRF 装置でプラズマへ安定した入射を行うためには、真空管であるジャイロトロンの管内放電、導波管や真空窓などの伝送系機器での高周波放電を抑制することを目的としたエージングが必要となる。エージングは、短パルスの発振及び伝送を繰り返して、機器の温度上昇及び小放電を意図的に起こしてジャイロトロン内のコレクタ内壁や出力窓など、あるいは伝送系機器の真空表面からガスを放出させ、耐電力を向上させることを目的としている。その際に最も注意しなければならない点が、圧力上昇 (真空度劣化) と温度上昇である。圧力上昇によるジャイロトロンの管内放電や伝送系機器での放電、また急激な温度上昇は機器に損傷を与える可能性があるため、ジャイロトロンの発振パワーを短いパルス幅から徐々に延ばし、慎重にエージングを進める必要がある。

2.2 ECRF 装置伝送系の概要

JT-60U ECRF 装置の伝送系は、ジャイロトロンからアンテナまでの約 60m の経路であり、内面に微細溝のあるコルゲート導波管、金属鏡を用いて高周波を 90 度曲げるマイターバンド、高周波電力のモニタを行う方向性結合器、高周波の偏波 (偏波角度、楕円度) を変える偏波変換器、JT-60U 真空容器と伝送系との真空境界を形成するための人工ダイヤモンド

ドを使用した真空窓、高周波を効率良く伝送する機能を有した真空ゲートバルブ、伝送路を電氣的に絶縁する DC ブレーク、真空窓での放電を検出するアーク検出器、伝送系内部を真空排気するための真空排気導波管及びジャイロトロンエージング時に使用する模擬負荷（ダミーロード）などで構成される。

高周波伝送電力 1MW、5 秒の設計仕様である JT-60U ECRF 装置の伝送系には、JT-60 本体室の限られたスペースへの設置に有利であることや、軸傾斜による損失が比較的小さいことなどから内径φ31.75mm のコルゲート導波管を使用しているが、排気コンダクタンスが 1m あたり 4l/s と非常に小さいという欠点がある。したがって、導波管内の真空度を良好に保つには出来るだけ多くの箇所から排気することが望ましいが、排気ポートの高周波損失、放電の可能性、コストの問題から設置箇所は限られる。#1～3 系統では伝送路に 2 箇所、ダミーロード部に 1 箇所の真空排気口を設け、ジャイロトロン付近とアンテナ付近の 2 箇所にターボ分子ポンプを設置し真空排気した。最後に増設した #4 系統には、それまでの運転経験から伝送路の中間地点と放出ガスの多いダミーロード部近傍にそれぞれターボ分子ポンプを追加した。

3. ECRF 装置長パルス試験

JT-60SA ECRF 装置では、既設の伝送系機器を一部使用する予定であり、JT-60U ECRF 装置建設時の 1MW-5 秒（5MJ）の設計目標を超えた性能を実現するため、一部の機器で改造が必要となる。今回、その改造に必要な伝送系機器の温度上昇や真空度の変化に関するデータを得ることを目的に、#3 系統を使用してダミーロードにおける長パルス試験を行い、1MW 出力では過去最長となる 30 秒間伝送のデータを取得した。図 2 に ECRF 装置の長パルス試験における伝送系ルートを示す。

このエージング過程では、導波管などの伝送系機器から急激なガス放出をさせない温度（50～100℃）の範囲に抑え放電を防止すること、既設冷却系の効果を確認することに留意しパルスを伸長した。

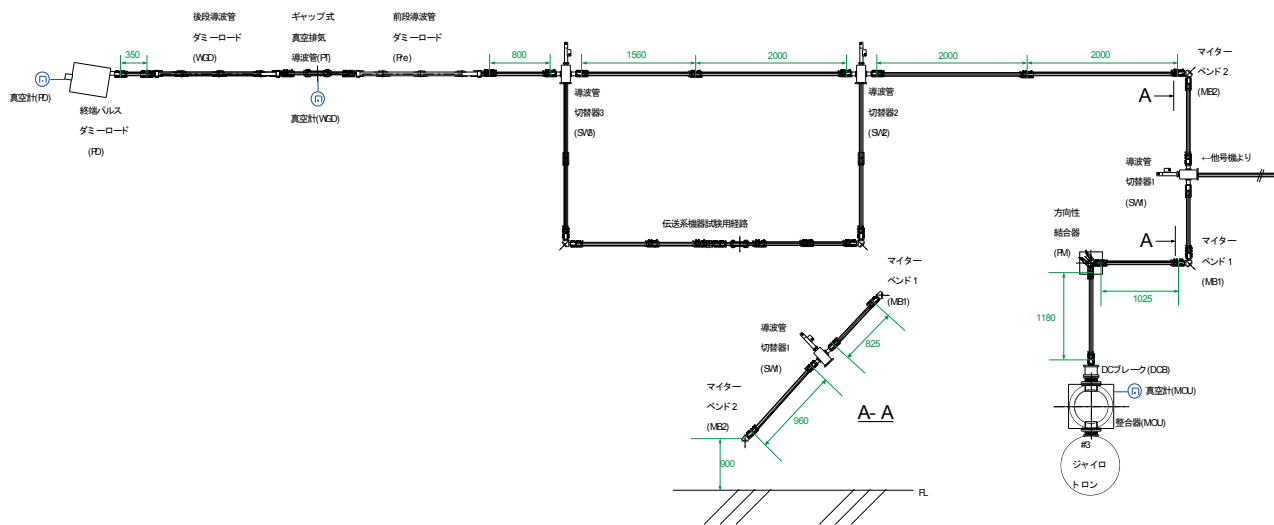


図 2 ECRF 装置の伝送系ルート

3.1 伝送系機器の温度上昇

JT-60U ECRF 装置の伝送系機器は、導波管にアルミニウム合金（6064-T6）、マイターバンドのミラー部にアルミナ分散強化銅などを使用しているが、これまでの 1MW、5 秒入射、デューティ 1/60 サイクル運転で、これらの機器に急激な温度上昇は観測されなかった。長パルス試験を行うに当たり、高周波損失の比較的大きい整合器（～7%）、マイターバンド（～1%）などの伝送系機器に温度上昇が懸念されたため、水冷却が可能な構造である整合器内ミラー部、整合器筐体入出力ポート部、マイターバンドなどのミラー部の冷却を行い、各機器の温度上昇を確認した。現在の冷却系を用いて、ジャイロトロン内の真空度（イオンポンプ電流）、あるいは電源機器のジュール熱制限に伴う休止時間（デューティ 1/60）内に十分な温度降下を確認することが出来た。しかし、冷却構造でない導波管などの機器については、冷却の必要性が明らかになった。以下の項に 1MW-30 秒における各機器の温度上昇の詳細を記す。図 3 に 1MW-30 秒時の伝送系機器の温度上昇を示す。

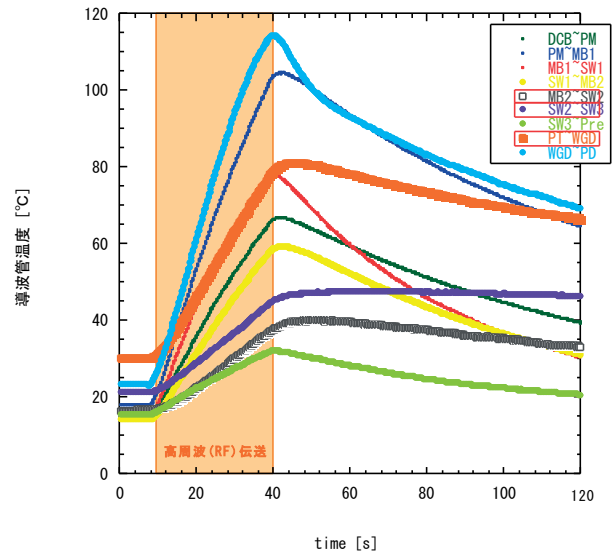
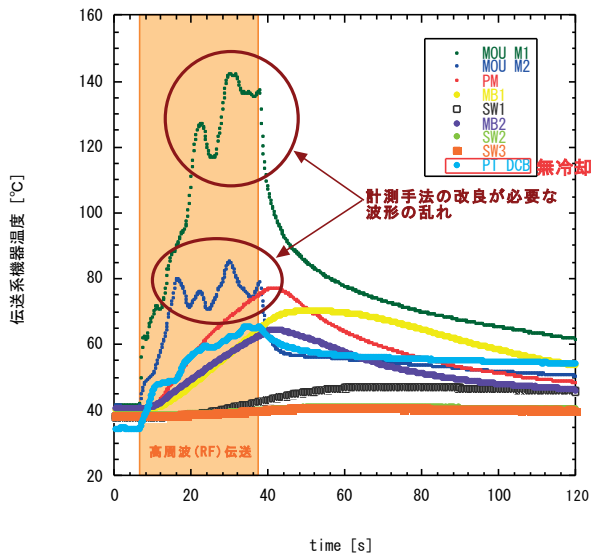


図3 1MW-30秒時の伝送系機器の温度上昇（冷却有）

3.1.1 整合器の温度上昇

整合器内ミラーには無酸素銅を使用しており、第一段ミラー(MOU M1)、第二段ミラー(MOU M2)を水冷却している。熱電対で計測したミラー温度(図3左)は、高周波伝送中については計測の問題と考えられる波形の乱れがあり、今後計測手法の改良が必要であるが、高周波伝送後の減衰時間は短く、冷却の効果がみられた。整合器の筐体温度は、ほぼ一般的な低い温度上昇であったが整合器の出力ポート溶接部に局所的な温度上昇が観測された。また、入出力ポート取合いフランジの溶接ベローズ部の発熱が非常に大きかった。図4に1MW-15秒時の整合器出力側ポート部の温度上昇を示す。入力側(ジャイロトン取合い)ベローズは500℃以上で過熱によるとみられる変色も観測された。

エージング過程では、整合器出口DCブレークのセラミック部が熱電対の測定箇所では150℃以上の高い温度上昇を観測し、赤外線カメラのピーク部では200℃以上の温度上昇を観測した。その後、2秒程度の短いパルスであったが放電が発生し、セラミック部が破損して真空リークした。対策として、破損したセラミック円筒(内径φ56mm)を大口径のもの(内径φ122mm)に変更し、ジャイロトンからの高周波軸の再調整を行った。変更後は、高い温度上昇、真空リークなどは発生していない。

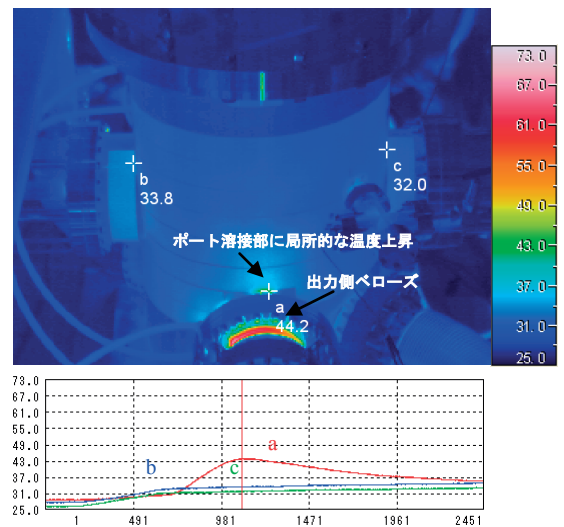


図4 1MW-15秒時の整合器出力ポート部温度上昇

3.1.2 導波管部の温度上昇

導波管の温度上昇は、マイターバンド、方向性結合器などのミラー直後導波管、傾斜敷設導波管、300mm短管導波管で高い温度上昇が観測された。また、導波管接続部前後においても比較的高い温度上昇であった。図5に各部導波管の温度上昇を示す。

エージング過程では、温度上昇により放出ガスの増加、放電の可能性が懸念されたため、導波管を銅製の冷却ジャケット(図6)や導波管接続治具(カップリング)を利用した冷却ジャケット(図7)で水冷却した。また今回の長パルス試験では、二次冷却設備がJT-60SA改造準備に伴って停止状態であったことに加え、気温が高かったことにより冷却水温度が~40℃程度になっていた。そこでチラーユニットを用いた閉ループの冷却水系を用いるように改造し、ベース温度を低

く（ $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ）することによって到達温度を低く抑えるようにした。これにより冷却した導波管は、高周波伝送直後に除熱されエージング効率を上げることが出来た（図3右）。

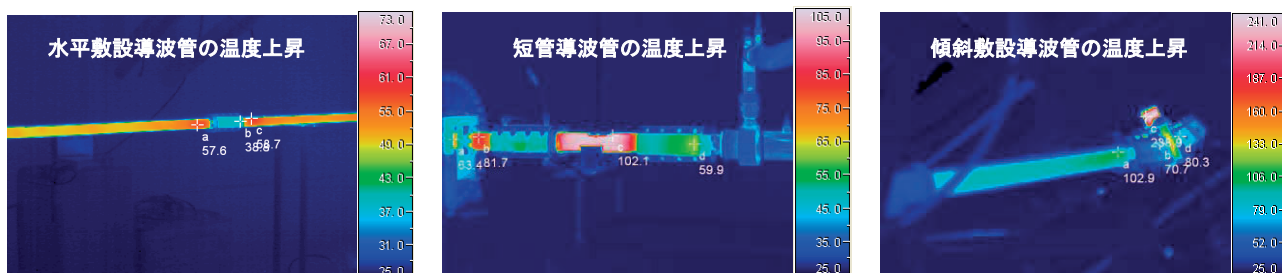


図5 1MW-15秒時の各部導波管温度上昇（冷却無）



図6 銅製冷却ジャケット

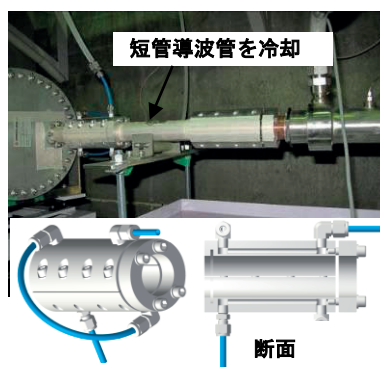


図7 カップリング式冷却ジャケット

3.1.3 マイターベンド、方向性結合器の温度上昇

マイターベンド、方向性結合器のミラー部の温度上昇は、冷却効果もあり 80°C 程度の許容範囲内であった。しかし、ミラー直後の出口側導波管部では 100°C 以上の高い温度上昇が観測された。（図3左）また、ミラー部温度上昇による放出ガスを排気するために設けた真空排気ポートが 200°C を超える非常に高い温度であった。真空排気ポートは、高周波漏れを防止するために 1mm 程度の穴を $2\sim 3$ 個空けた構造であるため、排気コンダクタンスは小さい。長パルスにおいては、この穴からの高周波漏れによる真空排気ポートの発熱が大きく性能の限界となる結果であった。

3.2 伝送系内の圧力上昇

JT-60U ECRF 装置の伝送系内圧力は、導波管真空排気口近くの計測箇所では $10^{-4}\sim 10^{-3}\text{Pa}$ 前半台であり、高周波を伝送した場合には 10^{-3}Pa 後半 $\sim 10^{-2}\text{Pa}$ 前半台に達して放電する場合があった。真空排気口から最も遠い箇所では、更に一桁以上圧力上昇したと考えられる。これまでの $1\text{MW}\cdot 5$ 秒運転においても真空排気設備を増力するなど、放電防止対策を講じてきた。長パルス試験を行うに当たり、放出ガスの多い整合器 (MOU)、導波管ダミーロード (WGD)、終端パルスダミーロード (PD) 部の真空度の変化を確認しながらエージングを進めた。以下に各機器の放出ガスの増加について記す。図8に $1\text{MW}\cdot 30$ 秒時の各測定箇所における圧力上昇を示す。

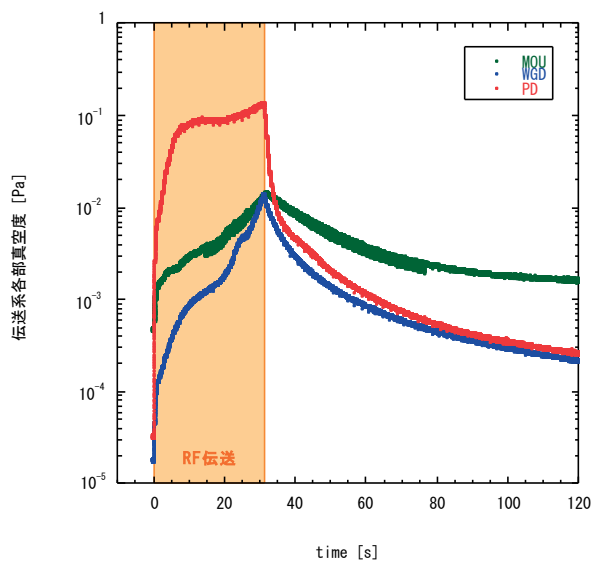


図8 1MW-30秒時の伝送系各部圧力上昇

3.2.1 整合器の放出ガスの増加

放電を防止するためには、伝送系内の圧力を $\sim 10^{-3}$ Pa 以下（設計目標）に保つことが必要であるが、これまでの運転（1MW-5 秒）において整合器内部で発生する導波管に導かれない漏れ高周波や不要モードの高周波が導波管外に散乱して、周辺機器である DC ブレーク（絶縁セラミック）、真空ベローズ配管で温度、圧力が上昇し、放電を起こして真空リークが発生した。整合器は、ジャイロトロンから出力されるガウスモードの高周波を導波管の伝送モードである HE_{11} モードに変換するものであるが、変換に伴う高周波損失により発熱するため放出ガスの多い機器であった。また、高周波軸の調整にはジャイロトロンの内部ミラーと整合器の内部ミラーを高精度で調整する必要があるが、微妙な軸ずれにより放電を起こし、機器を損傷させる恐れがある。対策として、整合器の高周波入口と出口に高周波の吸収体である SiC（炭化ケイ素）セラミックのリングを設置し、整合器底面に SiC のブロックを敷き詰めた。更に DC ブレークの保護には反射板（アルミ板）を設置した。対策後、設置した SiC リングにクラックが生じたことがあったが、これも整合器内の漏れ高周波や不要モードの高周波の散乱によるものと考えられる。ECRF 装置は通常の真空装置とは異なり、ジャイロトロンの交換や整合器のミラー調整などに必要な大気開放が頻繁にあり、理想的な真空を維持することが困難であった。また、ECRF 装置の伝送系は、高周波伝送を短パルスから行い導波管温度を徐々に上昇させるエージングを主なガス出し手段としているが、そのために大気開放操作は運転効率の悪化にも繋がり問題となっていた。

これらのことを踏まえて放出ガスが多く体積の大きい整合器の出来るだけ近い位置（各系統 ~ 2 m 付近）に真空排気系を増力し、実効排気速度の増力を行った。これにより、配管コンダクタンス（分子流）は 51/s（20m）から 451/s（2m）に改善し（#3 系統）、伝送系の圧力計測箇所は、 10^{-5} Pa $\sim 10^{-4}$ Pa 台となった。整合器の圧力も一桁以上改善されて 1MW、30 秒伝送においても放出ガスの増加による放電を抑制することが出来ている。

3.2.2 ダミーロードの放出ガスの増加

JT-60U ECRF 装置のダミーロードには、ジャイロトロンの発振調整及び電力測定に使用する短パルス仕様の全金属製パルスダミーロードと長パルスのエージングに使用する 1MW-5 秒仕様のタンク型ダミーロードを使用していた。タンク型ダミーロードは、内部で高周波に反射を繰返させることで抵抗損失により高周波電力を熱に変え、冷却水で除熱する構造のものであり、1MW の高周波電力伝送時に真空排気ポートへの入力を 0.1W 以下になるようなメッシュシールドを設けている。これによりコンダクタンスが 61/s 程度になる。タンク型ダミーロード入射運転では、反射電力が若干大きく（5%程度）ジャイロトロンの調整がしにくいという問題があったほか、圧力上昇による放電、若しくは局所的な熱入力により真空排気ポートが損傷して真空リークが発生した。タンク型ダミーロードは 5MJ 仕様で、それ以上の長パルス入射は性能の限界を上回るため、#3 系統に 1MW-連続仕様の導波管型ダミーロードを導入した。導波管型ダミーロードは、導波管内部の溝の深さを変えたコルゲート形状を設けて意図的に高周波損失を増加させ、高周波伝送電力の約 75%を管壁の発熱として水で除熱する構造である。これにより長パルス入射を可能とし、導波管型ダミーロードの冷却水の流量と出入口の温度変化を計測することにより長パルスでの電力計測も可能となった。JT-60U ECRF 装置の電力計測は、ダミーロードの冷却水流量と出入口の温度変化を計測する熱量計法を用いており、これまでは短パルスダミーロードを使用してきた。ジャイロトロンから出力される高周波には、ショット毎に変化する 20ms 程度の無発振時間が存在するため、それを考慮して短パルスダミーロードの仕様である 200ms 以下でパルス幅を数十 ms 刻みで変えた入熱量を 4 \sim 5 ショット求め、ショット毎の入熱量から発振時間を除して平均化した値をジャイロトロンの出力電力として算出する。この導波管型ダミーロードでは、無発振時間を無視出来る長パルスの入射で計測が可能であり、1 ショットで電力算出を行う。ECRF 装置のダミーロード伝送系では、この導波管型ダミーロードを前段導波管ダミーロード、後段導波管ダミーロードの 2 段構成で高周波伝送電力の約 85%を吸収し、終端に冷却系を強化し長パルス仕様に改造したパルスダミーロードを使用して残りの電力を吸収するシステムとしている。このダミーロードの放電防止対策には、導波管ダミーロード間にギャップ式の真空排気導波管を接続することで差動排気を出来るようにした。ギャップ式真空排気導波管は、導波管間に約 1mm のギャップを設けて（排

気コンダクタンスは 5l/s 程度) 高周波損失を極力小さくして (約 0.01%) 真空排気を可能としている。また、放電を防止するためにダミーロードからの反射電力を検出し、高周波を遮断するインターロックも設けている。

エージング過程では、3 秒パルスにおいて前段導波管ダミーロードで放電が発生し、真空リークした。その際、反射電力インターロックは検出レベル以下であった。リークしたダミーロードを内部点検した結果、数箇所放電痕が見つかった。その後、代替の導波管ダミーロードと交換すると、ショット毎にインターロックレベルを調整することに

4. 予測される問題点のまとめとその対策

今回 1MW、30 秒までの長パルス試験により伝送系機器の問題点に対する対策を検討した。

(1) 整合器の温度上昇では、出力ポートの溶接部の局所的な温度上昇と溶接ベローズの発熱が問題となった。対策として、これまでも破損の経験のあった SiC リングを変更し、水冷却機能を設けた銅製の冷却ジャケットを製作した。また冷却ジャケットには、高周波吸収の目的で実績のある TiO₂ コーティングを施し、入出力ポート及びベローズ部の発熱を防止する。また、ベローズ単体についても熱伝導を良くするために銅コーティングを施した。図 9 に改良型整合器の構造を示す。これによりポート溶接部と溶接ベローズの温度上昇を許容範囲の 100°C 以下に抑える。

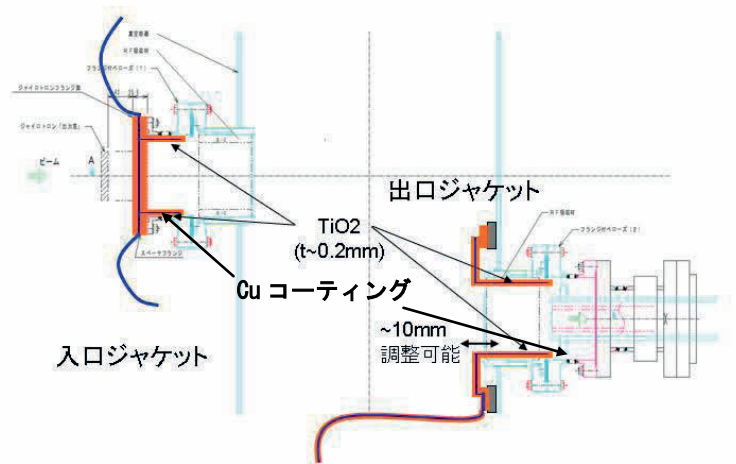


図 9 改良型整合器の構造

(2) 導波管、マイターベンドなどの $\phi 31.75\text{mm}$ 伝送系温度上昇であった。また、マイターベンドなどのミラ上のパルス伸長への対策としては、 $\phi 60.3\text{mm}$ の大口徑 #3 系統及び、#2 系統のダミーロード運転を可能とし、傾斜敷設、短管の使用を避けたルートを検討した。導

に必要不可欠な既設 $\phi 31.75\text{mm}$ のテーパ導波管、真空排気導波管、終端パルスダミーロードについては、個々に専用の冷却ジャケットを製作して発熱を防止することとした。終端パルスダミーロードの入射口導波管部は、銅製の導波管に変更する。

(3) 整合器、ダミーロードの放出ガスは、1MW、30 秒までの伝送において $10^{-2}\text{Pa} \sim 10^{-1}\text{Pa}$ 台まで達した。これまでも真空排気設備の増力、圧力インターロックの追加など放電防止対策を行ってきたが、今後パルス伸長による放出ガスの増加が問題となることが予測される。これに対しては、大口徑伝送系機器を導入することで導波管のコンダクタンスの改善が期待できる。また、ガスが溜まりやすい終端パルスダミーロード部が 10^{-1}Pa で飽和傾向であるが、排気部にマニホールドを設置するなど、コンダクタンスを大きくする改造を実施し、排気速度の増力を行い 100 秒運転での放電を防止する。

JT-60SA で想定する 1MW、100 秒入射、デューティ 1/18 サイクルの範囲においては、現在計画している対策を行うことにより、導波管の到達温度をその熔融温度 (600°C) よりも余裕を持って低く抑えることができる見通しである。しかし、想定外の局所的な温度上昇による放出ガスを防ぐことが放電を防止する上で重要であり、継続して温度、真空度の監視を行い長パルスを目指していく計画である。