

# J - P A R C 超伝導空洞用入力結合器の大電力試験

加古 永治<sup>A)</sup>、野口 修一<sup>A)</sup>、宍戸 寿郎<sup>A)</sup>、  
浅野 博之<sup>B)</sup>、千代 悦司<sup>B)</sup>、鈴木 浩幸<sup>B)</sup>、堀 利彦<sup>B)</sup>、山崎 正義<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設  
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

<sup>B)</sup> 日本原子力研究所 大強度陽子加速器施設開発センター  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4

## 概要

ディスク型セラミクス窓を有する同軸タイプの高周波入力結合器が、設計・製作された。2本の入力結合器は真空排気装置を備えた結合導波管に取付けられ、972 MHz のパルス高周波源を用いて大電力試験が行われた。その結果として、0.6 ミリ秒のパルス幅で25 Hz の繰り返し運転時に、入力結合器への投入高周波電力として、最大2.2 MW が達成された。

## 1. はじめに

原研と高エネ研との統合計画である J - P A R C において、超伝導線形加速器は H<sup>-</sup> ビームを 400 MeV から 600 MeV へ増強するために用いられ、第2期計画において ADS (加速器駆動核変換システム) 実験に使用される予定である。ビームエネルギー 424 MeV ( $\beta = 0.725$ ) に相当するプロトタイプのクライオモジュールの設計がすでに行われ、その製作が現在進行中である[1]。クライオモジュールには、972 MHz のニオブ製9セル空洞2台が収納され、それぞれの空洞に大電力高周波入力結合器が取付けられる。ここでは、その大電力特性と信頼性を試験するために製作された2本のプロトタイプの入力結合器について行われた試験結果について、報告をする。

## 2. 入力結合器

972 MHz の入力結合器の基本設計[2]は、トリスタン超伝導空洞において用いられた508 MHz 入力結合器[3]を参考にして行われた。972 MHz 入力結合器の基本仕様としては、3.0 ミリ秒のパルス幅で25 Hz の繰り返しのパルス運転が行われ、10 MV/m の加速電界および30 mA のビーム電流について要求される入力高周波電力は、300 kW である。その条件において、入力結合器の外部 Q 値として  $5 \times 10^5$  が求められ、ビームチューブへのアンテナ先端部の突出長を調整することにより形状寸法の最適化が計算された[2]。チョーク構造を有する高周波窓部には、外径136 mm、厚さ7 mm、純度95%のアルミナ製セラミクスディスクが使用され、その真空側表面には2次

電子放出係数を低減させるための窒化チタン処理が施された。銅製パイプから製造された内導体の内部には、高周波損失による発熱を除去するための冷却水配管が内蔵されている。ステンレス製外導体の内面は銅メッキされ、内径80 mm の50 同軸線路に整合されている。

## 3. 大電力試験装置

972 MHz 入力結合器の大電力試験装置は図1に示されているように、2台のドアノブ(同軸・導波管変換器)に接続する WR975 導波管立体回路系、2本の入力結合器、真空排気装置を備えた結合導波管から構成されている。入力結合器と結合導波管は、クリーンルーム内で超純水洗浄され、1昼夜の乾燥後に組立てられた。実験室への移送・据付後、真空引きが開始され、120 で24時間のベーキングが行われた。到達真空度は、室温で  $1 \times 10^{-6}$  Pa 以下であった。大電力試験装置の構成を図2に示す。真空排気装置には、真空ゲージと残留ガス質量分析器が取付けられている。高周波窓近傍でのスパーク放電などを防止するための観測装置として、真空ゲージ、アーク検出器、放出電子捕獲プローブが、真空側にある3つのポートに取付けられている。結合導波管の底部にある覗き窓に設置された2台のビデオカメラにより、マルチパッキングによるグロー放電のような可視光が観測できる。冷却水装置

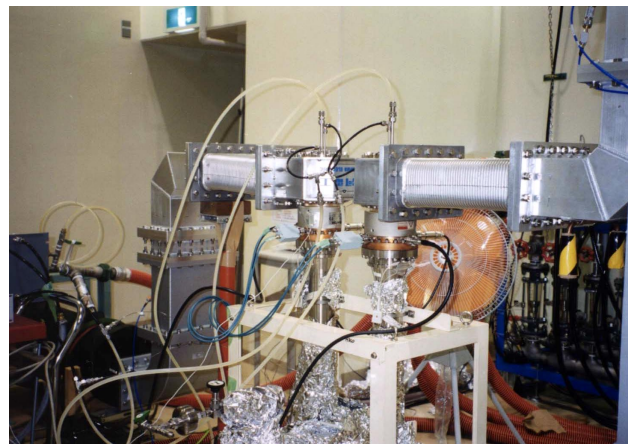


図1：972 MHz 入力結合器の大電力試験装置

<sup>1</sup> E-mail: eiji.kako@kek.jp

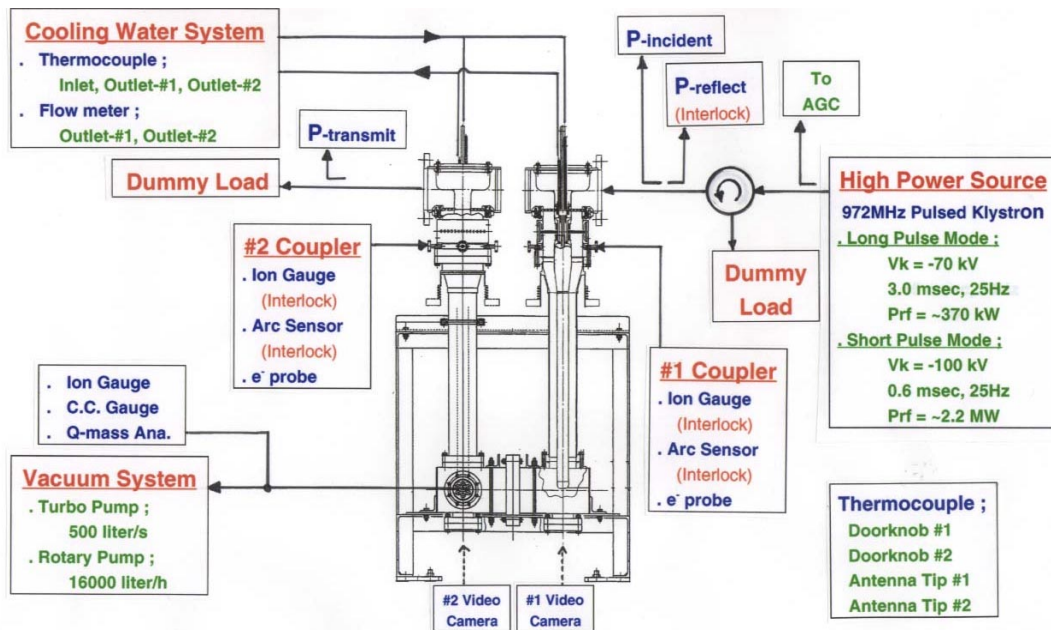


図 2 : 大電力試験装置の構成図

には、流量計と熱電対が備え付けられており、内導体での高周波損失の測定に用いられる。

大電力高周波源である 972 MHz パルスクライストロンは、0.6 ミリ秒のパルス幅で 50 Hz の繰り返し運転で最大出力 3.0 MW を目標として常伝導空洞用が開発中のプロトタイプのカリストロンである [4]。超伝導空洞においては、より長いパルス運転が要求されるため、低電力部の高周波制御回路の改造、直流高圧電源の調整などが行われた。現在、長パルスモードでは 370 kW (3.0 ミリ秒、25 Hz)、短パルスモードでは 2.2 MW (0.6 ミリ秒、25 Hz) の最大高周波出力が得られている。

#### 4 . 大電力試験の結果

初回の大電力試験は、0.1 ミリ秒で 10 Hz の低デューティーで始められ、高周波窓部での真空度が  $5 \times 10^{-4}$  Pa 以上に悪化した場合に、高周波出力が停止されるように設定された。図 3 に示されるように、最初の真空度の悪化は、30 kW で観測された。その後、徐々に高周波電力を増加させて、300 kW までの到達時間は 22 時間であった。次に、パルス幅と繰り返し数を徐々に増加させ、最終的に 3.0 ミリ秒、25 Hz の長パルスモードでは、370 kW までの投入高周波電力が達成された。高周波窓と内導体における高周波損失が、冷却水の温度上昇および流量により測定され、平均投入電力の約 0.2 % が高周波損失であった。

短パルスモード (0.6 ミリ秒、25 Hz) では、2.2 MW までの投入高周波電力が達成されたが、図 4 に示されるように 2.2 MW 投入後においても 400 ~ 800 kW の間で真空度の悪化が観測され

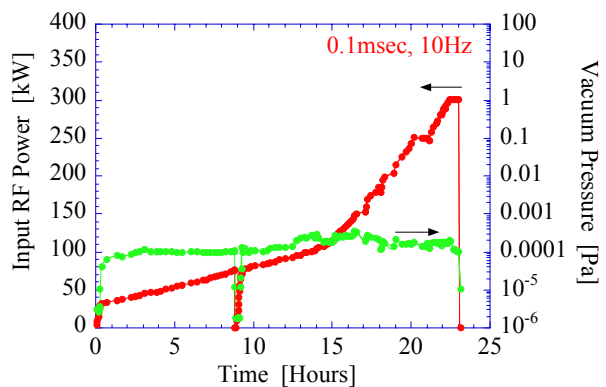


図 3 : 初回試験時の入力電力の時間変化

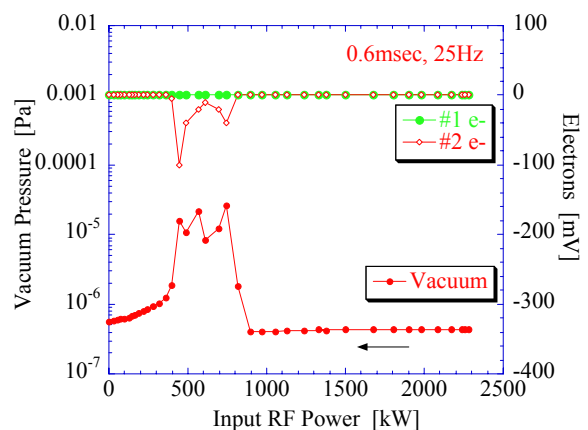


図 4 : 2.2 MW 投入後の真空度と放出電子

た。この真空悪化時には、プローブでは放出電子を検出し、ビデオカメラでは放電光が観測された。この原因はマルチパッキングであり、外導体付近に磁石を置いて静磁界を印加することにより、内外導体からなる同軸線路の比較的下部で発生していることが確認された。マルチパッキングにより放出される残留ガスの主成分は、水素、および窒素・酸化炭素であった。

高周波電力を投入することによりエージングを行ういわゆるRFプロセスの効果が、その後の各過程においても維持されるのかを調べる実験が行われた。初回の大電力試験が終了した大電力試験装置の真空内に、2日間の窒素封入（第2回）、1ヶ月間の真空封じきり（第3回）、2日間の空気封入（第4回）の実験が行なわれた。いずれの場合も、真空排気後には必ず120で24時間のベーキングが行われた。図5に示されるように、300kWまでの到達時間は、初回（図1）と比較してずっと速く、いずれの実験においても2時間以内であり差はなかった。このことより、RFプロセスの効果が、真空封じきり、窒素ガスおよび空気に晒すことによって大きな影響を受けないことが示された。

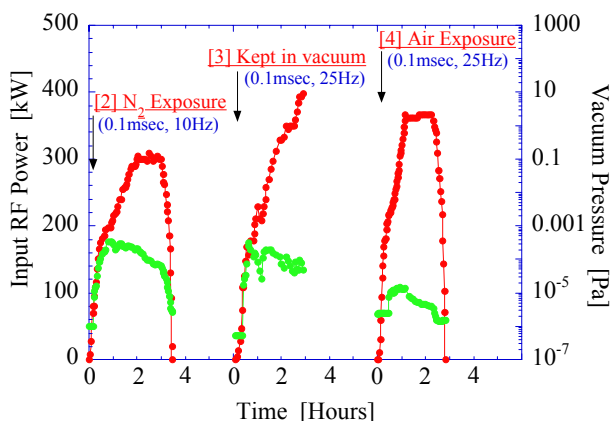


図5：窒素ガスおよび空気に晒した効果

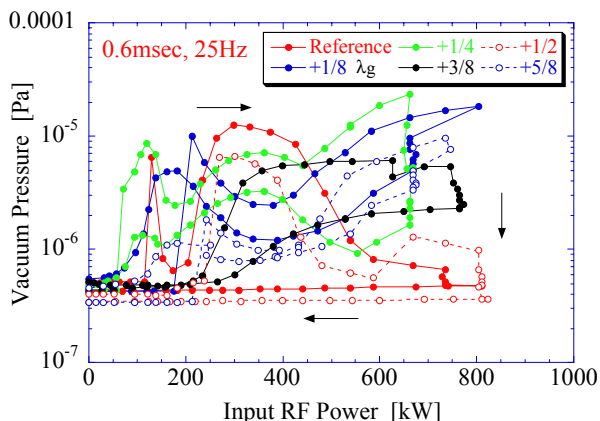


図6：全反射試験における真空度の変化

導波管の終端をダミー負荷（進行波）から短絡板に変更した全反射（定在波）での大電力試験が行われた。短絡板の位置を1/8管内波長ごとに移動させることにより、定在波の位相条件を変化させた。図6は、進行波で2.2MWまでの投入高周波電力が達成された直後に行われた定在波での800kWまでの実験結果である。入力結合器の内外導体間の同軸線路に沿った電磁界分布が、定在波の位相に伴って変化するため、マルチパッキングの共鳴条件も各位相毎に異なることを示している。進行波で2.2MWまで投入されていても、定在波ではわずか50kWで真空度の悪化が起こる場合もあり、また、マルチパッキングが観測される領域も、定在波のほうがよい広い範囲で起こっていた。たとえ大電力試験装置で十分なRFプロセスが行われたとしても、実際の超伝導空洞に取付けられた入力結合器の場合には、ある位相条件での定在波となるためそのRFプロセスには注意を要する。

## 5. まとめ

入力結合器への投入高周波電力として、長パルスモードで370kW（3.0ミリ秒、25Hz）、短パルスモードで2.2MW（0.6ミリ秒、25Hz）が達成された。これは、大電力高周波源の最大出力で制限されている。

マルチパッキングが観測される領域は、ダミー負荷（進行波）の場合、400～800kWの間であった。

RFプロセスの効果が、真空封じきり、窒素ガスおよび空気に晒すことによって大きな影響を受けないことが示された。

## 謝辞

本論文の高周波入力結合器の製作に関して、古河電工（株）の川口穰氏、（株）東芝の矢野充教氏、三菱重工業（株）の仙入克也氏に多大なご協力を頂きました。

## 参考文献

- [1] S. Noguchi, "SRF System in the JAERI - KEK Joint Project", Proc. of 10<sup>th</sup> Workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Japan (2001) p302-307.
- [2] E. Kako, et al., "大強度陽子加速器用超伝導空洞の高周波入力結合器", Proceedings of the 27<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Japan, Aug. 7-9, (2002) p177-179.
- [3] S. Noguchi, E. Kako and K. Kubo, "Couplers— Experience at KEK", Proc. of 4<sup>th</sup> Workshop on RF Superconductivity, Tsukuba, Japan (1989) p397-412.
- [4] M. Yamazaki, et al., "原研972MHzRFテストスタンドの現状", Proceedings of the 27<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Japan, Aug. 7-9, (2002) p296-298.