

DEVELOPMENT OF 20kW INPUT POWER COUPLER FOR 1.3GHz ERL MAIN LINAC

- THE HIGH POWER TEST OF THE PROTOTYPE COUPLER -

Kenji Shinoe^{#A)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Kensei Umemori^{B)}, Enrico Cenni^{C)}, Masaru Sawamura^{D)}
 Norio Nakamura^{B)}, Takaaki Furuya^{B)}

^{A)} Institute for Solid State Physics, University of Tokyo
 5-1-5 Kashiwanoha Kashiwa-shi, Chiba, Japan, 277-8581

^{B)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization
 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

^{C)} The Graduate University for Advanced Studies
 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

^{D)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
 2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

Abstract

We are developing ERL main linac input coupler. Until now, prototypes of ceramic windows were created and performances were tested. Using this ceramic window, we produced a coupler prototype model. The coupler prototype was installed into an insulating vacuum chamber and cooled by liquid nitrogen, and the high power test was performed. This is the condition, where the coupler is actually used in a cryomodule. In this test, we were able to input 25-kW power. It was checked that the magnitude of generation of heat is also satisfactory. It was checked that this coupler fulfills the specification demanded from ERL main linac.

ERL 主ライナックのためのカプラー開発 — 試作カプラー 1 号機におけるハイパワー試験 —

1. はじめに

1.3GHzCW 型超伝導空洞用入力カプラーの開発を行っている。これまで、カプラーの主要構成要素であるセラミック窓について、試作を行い、ハイパワー試験を行ってきた。セラミック窓については、初期モデルで問題となった発熱に対して改良モデルでこの問題を解決し、目標としていた入力パワー 20kW 以上のパワー投入が達成できた。今回、このセラミック窓を用いてカプラーの試作を行い、ハイパワー試験を行ったので、その結果について報告を行う。

2. カプラーの基本仕様と試作機について

入力カプラーについて、必要とされている基本仕様は周波数 1.3GHz で入力パワーが 20kW である。ERL での使用を考えると、エネルギー回収下では、本来はパワーを供給する必要はほとんど無いが、実際の運転では外乱による影響(microphonics)などにより空洞が機械的振動を受け、運転周波数に空洞の共振周波数 peak に保つことは難しい。従って、入力カプラーのカップリングを変化させ、負荷 Q 値 (Q_L) を小さくすることで共鳴幅を敢えて大きくさせ、機械的振動に堅牢なパワーの安定供給を実現する必要がある。主ライナック入力カプラーの基本仕様を表 1 に示す。

表 1 : 主ライナック入力カプラーの基本仕様

周波数	1.3GHz
加速勾配	15-20MV/m
入力電力	最大 20kW
負荷 Q 値(Q_L)	$5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ (可変)

本カプラーは CW にて 20kW のパワー供給が要求されているため、熱負荷対策としていくつかの特徴を持っている。主な点を上げると、同軸部のインピーダンスを 60Ω とし、内導体の電力損失の軽減を行っている。また、セラミック窓の材質も誘電損失の少ない 99.7%純度のアルミナセラミックス (HA997) を窓材に採用している、等が上げられる。

本カプラーは突発的なトラブルにより、セラミック窓が破断した場合でも、空洞本体に影響を与えないようにセラミック窓が 2 重になっている。この 2

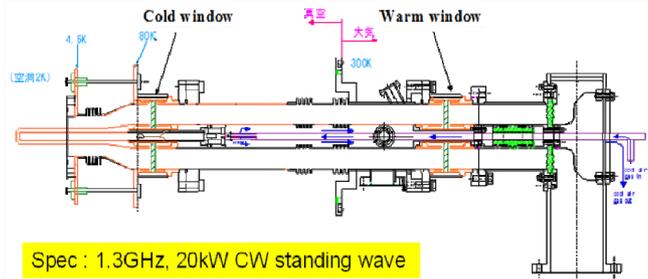


図 1 : 試作カプラー詳細図

¹ shinoe@issp.u-tokyo.ac.jp

種類のセラミック窓の内、空洞に近い方を cold 窓、大気側を warm 窓と呼んでいる。また、本カプラーの外導体や内導体にはベローズが用いられており、このベローズの伸縮を用いて空洞に対するカプラー先端の位置を変化させ、カップリング可変を実現しており、負荷 Q 値で $5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ まで変えることができる。今回作成したカプラーの詳細図を図 1 に示す。

3. カプラーハイパワー試験

今まで行ってきたハイパワー試験では、原研にある 30kW IOT 電源を使用してきたが、昨年度に KEK 東カウンターホールに移設されたので、今回のハイパワー試験からは KEK で行うことができるようになった。移設に伴い、新しいシステムでのテストになるので、カプラーのエイジングや新しいシステムのチェックも兼ねて、ハイパワー試験の条件を大気中で室温にて、テストを行った。その後、真空断熱槽に組み込み、液体窒素による冷却を行って、実際の使用状況に近い条件で試験を行った。

図 2 がハイパワー試験スタンドの setup である。東カウンターホールのクリーンルーム内にてカプラー 1 号機を組み、断熱槽で cold 窓を覆い、液体窒素タンクに汲んだ液体窒素からブレード線にて cold 窓を 80K 近くに冷やし、モジュール組み込みに近い条件下にて、カプラー 1 号機のハイパワー試験を行った。図 2 上図にその詳細を示す。内導体は結露を防ぐため、窒素ガスで独立に冷却。流量は 110l/min に設定した。真空は 150°C、24 時間のベキングの後、cold 窓側(図 2 水色部)、warm 窓側(図 2 緑部)を独立にイオンポンプで排気し、それぞれ CCG でモニターした。パワー投入時発生する 2 次電子は probe(e-probe1,2,3)でモニターし、付随する発光は cold 窓、warm 窓に面するアークセンサー(arc1,2)でインターロックをかける。カプラー先端は端板を付け、1.3GHz の 30kW IOT からドアノブ変換器を通じ、CW 超伝導空洞運転と同じくカプラー内に定在波が立つ条件で大電力試験を行った。実際は、運転時に対し、テスト実験では定在波の電場と磁場のピークが逆転しているが、セラミック窓には電場や磁場のピークが来ない設計となっており、今回のテストにて運転時と放電レベルなどに大きな違いはないと思われる。またベローズの配置は運転時に磁場のピークが最小となるような設計であり、今回の配置ではむしろ温度上昇がベローズ中心で最大となる配置である。したがって、逆にこの条件下でも温度上昇が大きくなければ、実際の運転では十分に使用可能であることが測定結果から判断可能である。内導体、外導体部の各ベローズまた cold 窓などに熱電対を配置し、温度上昇をモニターした(図 2 TC1-4)。なお、断熱槽内では室温からの輻射を防ぐべく、cold 窓、外導体に熱シールドを覆っている。図 3 上図が 1 号機へのパワー投入履歴である。最初 20kW 近くまで放電や真空度悪化によるインターロックは作動せず、パワーがスムーズに入ったが、その後、アークセンサのインターロックにより

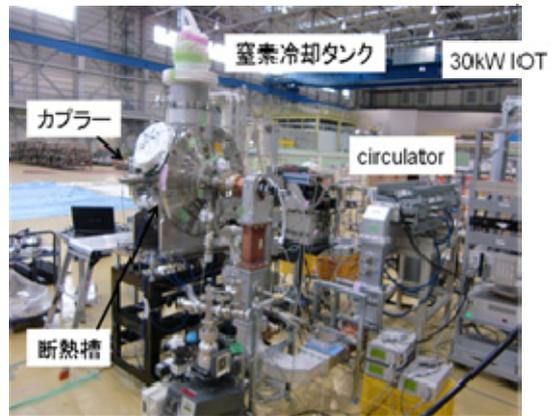
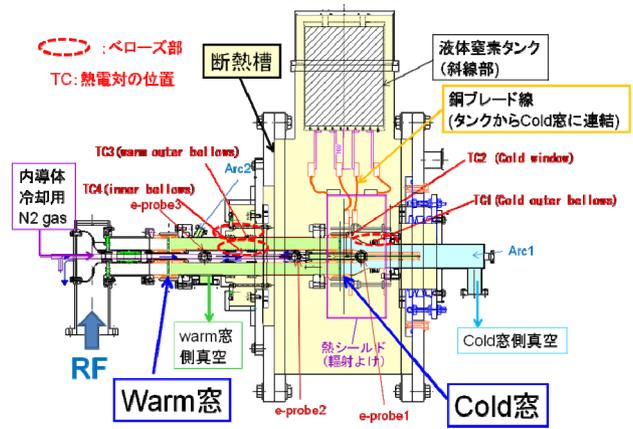


図 2: 大電力試験 setup (上図: 詳細図)

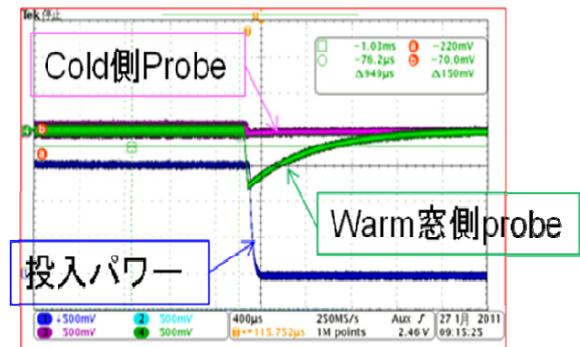
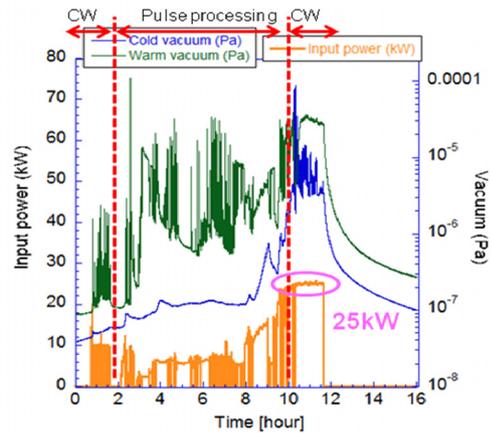


図 3: 25kW までの大電力試験結果 (上図) アークセンサ反応時の電子放出の反応 (下図)

パワーが落ちた後は、頻繁にアークセンサが反応し、それに伴う電子放出が warm 窓近傍のプローブ(e-probe3)から検出された(図3)。warm 窓でマルチパッキングが起こっているものと考えられ、これにより、warm 窓側で 10kW のレベル以上パワーが上がらなかった。そこで 8 時間のパルスプロセスを行い、真空レベルが 1×10^{-4} Pa を超えない状態を保ちながら、頻繁に 2 次電子で表面を叩くことで効果的に warm 窓のプロセスを行った。これにより、最終的に 20kW まで到達、この後はさらに最大 25kW の定在波をカプラーにパワー投入可能であった。

その後、図4に示すように 20kW の定在波を 16 時間保持し、温度の詳細データを測定した。まずベローズの温度であるが、内導体ベローズは窒素ガスでの空冷により、 120°C 以下に抑えられ、真空は warm 側で最高 4×10^{-6} Pa まで上がった後、下がっていく傾向が見られた。cold 部の外導体のベローズの温度上昇が最も激しく、 $\Delta T=113^{\circ}\text{C}$ であったが、温度としては -30°C であった。特にこの部分はモジュール組み込み時には 80K と 5K のアンカーの間に設置される部分であり、より冷却が強化されるため、cold 窓外導体ベローズ部の発熱による温度上昇は特に問題ないことが分かった。但し、運転時の 5K への入熱がどれくらいになるかは今後モジュール組み込み時の大きなテーマの一つである。warm 窓近くの外導体のベローズは、カップリング可変や冷却時の熱収縮による歪み回避のため、モジュール組み込み後の断熱真空槽内に設置する必要がある。本カプラーにとって、このベローズの温度上昇抑制も、今回の測定の大きなテーマであったが、温度上昇が 50°C 程度で抑えられており、断熱真空槽内でも問題なく発熱を抑えられていることが分かった。特に設計時の計算から、ベローズ内面に $150 \mu\text{m}$ の銅メッキを施したことが、今回のこの温度上昇の抑制に効果的であったものであり、本機カプラーの設計に反映させる予定である。次に cold 窓の温度上昇であるが、cold 窓は窒素冷却時では -165°C であったが、cold 窓で $\Delta T=83^{\circ}\text{C}$ の温度上昇が見られた。窒素温度の冷却により温度では -82 度で安定であった。このハイパワー試験では、プロセス後は 20kW までスムーズにパワー投入可能となり、またパワーダウンが無い状態で 8 時間以上、合計 16 時間弱 20kW の運転を継続できた。さらに一旦昇温し、カプラー内部を大気に意図的に 4 時間程度開放し、再度、同じ setup で液体窒素温度に冷却し、ハイパワー試験を行った後、24kW まで放電無しでパワー投入可能であった。一度プロセスを行えばそのプロセスの効果が保持されることが確認された。これは特にモジュールへの組み込み時に一旦カプラーを大気解放しても、スムーズなパワー投入が可能であることを示している。

4. まとめ

これまでに、パワー試験を行い良好な結果であった、セラミック窓を用いてカプラーを試作し、ハイパワー試験を行った。ハイパワー試験は実際の使用

液体窒素がなくなる

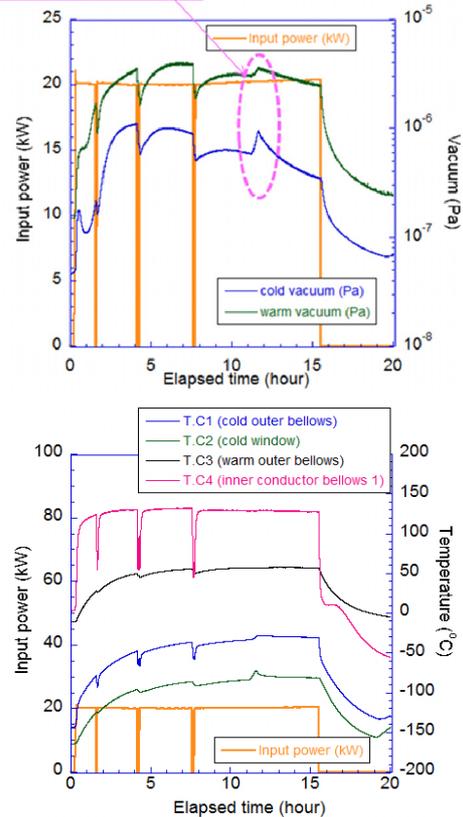


図4: 20kW 定常運転時の、上図: 投入パワー履歴と真空のグラフ。下図: パワー履歴と cold 窓 cold 部外導体ベローズ温度、warm 部外導体ベローズ中央温度、内導体ベローズ中央部温度のグラフ。

状況に合わせ真空断熱槽を用いて、液体窒素にて冷却を行いテストを行った。テストの初期段階では warm 窓でのマルチパッキングのため、投入パワーを上げることが出来なかったが、パルスプロセスにより、最終的に 25kW のパワーを入力することが出来た。パワー投入時の発熱の問題の有無を調べるために 20kW で 16 時間保持した。発熱は観測されたが、その大きさは問題のないレベルであった。また、16 時間のパワー保持中、パワーダウンは起こらなかった。1 度昇温してカプラー内を大気解放後、再び元の状態に戻しテストを行ったが、24kW まで放電無しでパワー投入可能であった。プロセスの効果が保持されることが確認された。

これらの結果から 1 号機の設計は CW 用超伝導空洞のカプラーとしては RF 及び熱設計に問題ないことが確認された。

5. 参考文献

- [1] 阪井寛志, 他: 「ERL主ライナックのための入力カプラーの開発現状 -30kW IOTを用いたカプラコンポーネントテスト-」, 第6回加速器学会, FPACA01 (2009).
- [2] 篠江憲治, 他: 「ERL主ライナックのためのカプラー開発 - 改良セラミック窓のハイパワー試験 -」, 第7回加速器学会, WEPS063 (2010).