

## Development of 20kW input power coupler for 1.3GHz ERL main linac ---- Component test at 30kW IOT test stand ----

Hiroshi Sakai<sup>1,A)</sup>, Kensei Umemori<sup>A)</sup>, Shogo Sakanaka<sup>A)</sup>, Takeshi Takahashi<sup>A)</sup>, Takaaki Furuya<sup>A)</sup>, Kenji Shinoe<sup>B)</sup>,  
Atsushi Ishii<sup>B)</sup>, Norio Nakamura<sup>B)</sup>, Masaru Sawamura<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> KEK, High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

<sup>B)</sup> Institute for Solid State Physics, University of Tokyo

5-1-5 Kashiwanoha Kashiwa-shi, Chiba, Japan, 277-8581

<sup>C)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

### Abstract

We started to develop an input coupler for a 1.3GHz ERL superconducting cavity. Required input power is about 20kW for the cavity acceleration field of 20MV/m and the beam current of 100 mA in energy recovery operation. The input coupler is designed based on the STF-BL input coupler and some modifications are applied to the design for the CW 20kW power operation. We fabricated input coupler components such as ceramic windows and bellows and carried out the high-power test of the components by using a 30kW IOT power source and a test stand constructed for the high-power test. In this report, we mainly describe the results of the high-power test of ceramic window and bellows.

## ERL主ライナックのための1.3GHz入力カプラーの開発 -- 30kW IOTを用いたカプラーコンポーネントテスト --

### 1. 基本設計

1.3GHz ERL用主ライナックにおいて想定されているCW超伝導空洞は最大加速勾配20MV/mで、最大ビーム電流は100mAである。入力カプラーに投入されるパワーは、エネルギー回収下では従来ほとんどパワーを供給する必要はないが、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<sub>L</sub>)を小さくすることで共鳴幅を取って大きくさせ、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。表1がERL主ライナックの基本パラメータとなる。入力電力は20kWを想定する必要がある。

周波数	1.3GHz
加速勾配	15-20MV/m
入力電力	最大20kW
負荷Q値(Q <sub>L</sub> )	5×10 <sup>6</sup> ~ 2×10 <sup>7</sup> (可変)

表1：主ライナック入力カプラーの基本仕様

次に図1に入力カプラーの概念図を示す。具体的設計としては、1.3GHzにてパルス運転での大電力試験の実績があるILC用STF-BL空洞の入力カプラーを基本とした[1]。セラミック窓には500MHzで運転していたTRISTANやKEKBにて実績のあるト

リスタンタイプの同軸型窓を1.3GHz用に拡張して使用している。この点が採用を決めた理由の一つである。但し、パルス運転のILCとは異なり、CWでは20kWのpower供給が要求されているため、熱負荷の影響が大きく、いくつかの設計の改良を行った。[2]

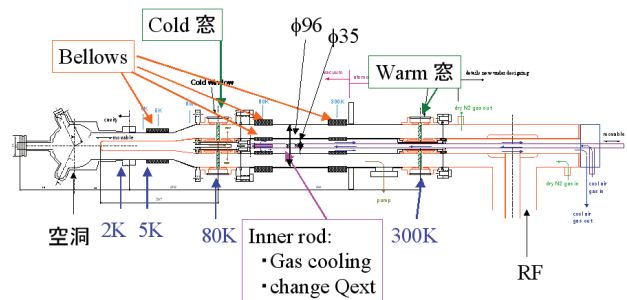


図1：入力カプラーの概念図。

主な変更点として、同軸部のインピーダンスを50Ωから60Ωにし、内導体の電力損失の軽減を行った。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)を窓材に採用した。大気中から真空中にRFを導入するセラミック窓は空洞への粉塵混入を避けるため低温部(cold窓)と高温部(warm窓)の2つを設け、特に製作の簡便性から2つを同一寸法とした。導体は熱侵入を減らすため、1mmのSUSに10μmの銅鍍金を施した。パルス超伝導空洞用入力カプラーと比べてRF投入時のdynamic lossが圧倒的に大き

<sup>1</sup> E-mail: sakai.hiroshi@kek.jp

く、60Ωのインピーダンスにしても外導体の発熱で7.7W、内導体の発熱で20.8Wになっている。セラミック窓の発熱はHA997を採用することにより一枚あたり1Wに抑えている。これらの冷却のために、低温側の内導体の熱負荷はcold窓80Kの温度定点をセラミック窓に設け、さらに低温側に5Kの温度定点を設けることで、2Kの超伝導空洞への熱侵入を0.3W程度に軽減することが可能な設計となっている。また、常温側は内导体内部にロッドを挿入し、強制空冷により冷却する。

カプラー用のセラミック窓とベローズの試作及びカプラー用のテストスタンドの製作を行った。本文ではそのコンポーネントテストを行うカプラー試験用のテストスタンドの概要とそこでの試験結果の現状報告を行う。最後に現カプラー製作の問題点と今後の方針を示す。

## 2. カプラーテストスタンド

coupler test stand block diagram

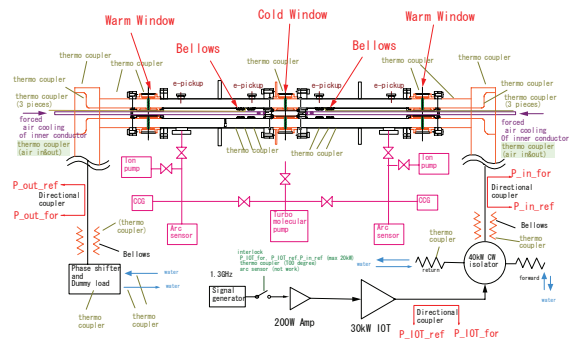


図2：setup of coupler test stand

図2にテストスタンドのセットアップを示す。  
 1. 3GHzの最大30kWのIOTを用いて、電力試験を行う[3]。特にセラミック窓の試験がCW運転時に近い形で行えるように、中心にcold窓を据え、その両側をwarm窓で挟んだ3連のセラミック窓のスタンドとなっている。大電力試験として重要となる発熱や温度上昇を見積もるため、セラミック窓や外導体だけでなく、内導体にも熱電対を設置し、特にベローズの温度上昇をモニターできるように設計を行った。内導体にはカプラー設計と同じくロッドを設け、内導体内部の空冷が行えるシステムとなっている。Warm窓の大気側からドアノブ変換器にて導波管に変換し、一方からパワーを投入し、他方は位相器と端板またはダミーロードを設けている。IOT直後に1つ、スタンドの前後に1つずつ合計3つの方向性結合器にて入力パワーの進行波と反射波を常時モニターする。我々は図3に示したcold窓とベローズ付のwarm窓の製作を行った。ベローズの銅メッキのはがれやセラミッ

ク及びベローズの傷等はなく、ロウ付けの状態も良好であった。これらをクラス6の環境下にて、セラミック窓は超純水洗浄、外導体は高圧超純粋洗浄を行い、テストスタンドを組み立てた。

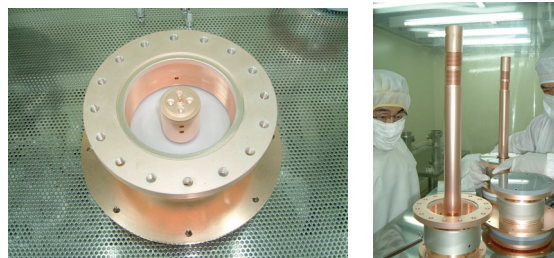


図3：cold窓(左写真)とwarm窓(右写真)。

## 3. 試験結果

次に電力試験の結果を示す。まず、常温時での熱負荷の状況を見るべく、カプラー内の真空引きを行わずに、セラミック窓3連の状態の20kWの進行波の大電力試験を行った。内導体のベローズの温度上昇が大きと思われるため、空冷の効果調べることも行った。

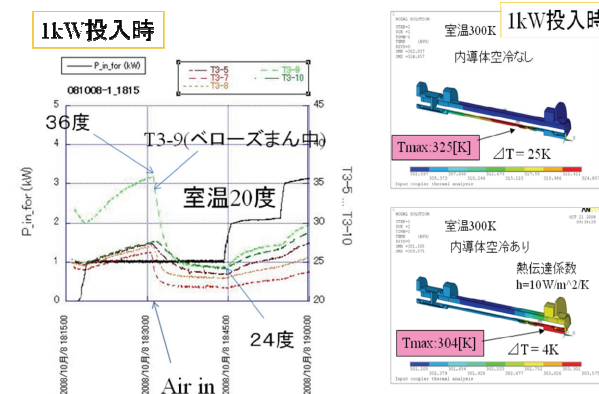


図4：(左)カプラーパワー投入時のベローズの温度上昇。緑がベローズ中央の温度上昇を示している。(右)内導体空冷ありなしでの温度上昇の比較計算。(上)空冷なし、(下)

図4は空冷ありなしでの内導体の温度上昇の比較を測定したものである。投入パワー1kWに対し、室温20度からベローズの温度上昇は空冷なしで $\Delta T=16$ 度であったのに対し、内導体の空冷(流量=60l/min)を施したところ $\Delta T=4$ 度であった。これは、図4に示す空冷ありなしの計算結果(空冷なしで $\Delta T=25$ K、空冷ありで $\Delta T=4$ K)とおよそ一致しており、ベローズの温度上昇の抑制がスムーズに行われていることを示している。この結果にてベローズの温度上昇の抑制も行えていることから、次に20kWまでパワーを投入することを試みた。図

5は20kWを投入した際のcold窓及びwarm窓の温度上昇を示したものである。左グラフ中の赤い破線で示すcold窓の温度が8kWのパワー投入から急激に上昇していることが判明した。室温20度に対し、cold窓の温度は80度以上になっている。この原因は右グラフに示すように投入パワーの透過率が少なくなっていることと相関があり、3連のカプラー窓を通過する際に何らかのパワーロスが生じ、cold窓にて急激な温度上昇を起こしている。3回大電力試験を行ったが同じくcold窓の急激な温度上昇とパワーロスの相関がみられ、再現性は確認された。

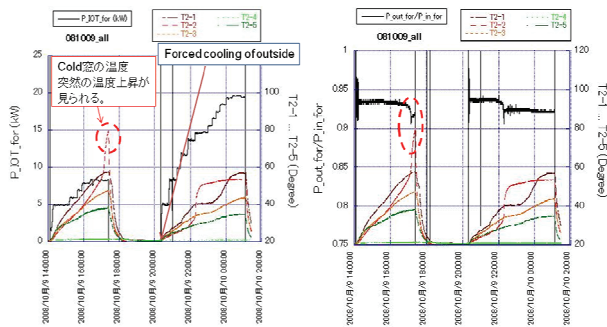


図5：カプラースタンド大電力試験時の様子。左のグラフは黒が投入パワー（左軸）、茶色、赤色、緑色がそれぞれ上流 warm 窓、cold 窓、下流 warm 窓の温度（右軸）を示したものである。右のグラフは温度は同じだが、黒がカプラースタンドに入力したパワーと透過したパワーの比（左軸）を示したものである。

このような状況下、カプラースタンドを一度解体した所、cold窓のセラミック窓が割れているのが判明した。特に内導体の銅メッキが完全に酸化しており、想像以上の温度上昇(200度程度)が内導体で起こったものと予想された。但し、warm窓やベローズは特にメッキの劣化やセラミックの割れなどは見つからなかった。

その原因を探るべくcold窓単体、およびwarm窓2つの単体のlow level測定を行える治具を別途製作し、個別にRF特性を測定した。図6がその結果(S21)である。割れたcold窓、およびwarm窓2つのうち、割れたcold窓と下流のwarm窓のS21が図6と同様に1.305GHzの急峻なpeakを持つことが判明した(図6左中の緑色の円内)。特にこのpeakはセラミック窓の温度を上昇させると1.3GHzに近づく傾向があり、図5に示すhigh powerテスト時のセラミック窓の温度がある温度(50~60度)以上になると急激な温度上昇が見られる傾向があり、このpeakが発熱の原因と考えられる。また、このpeakがセラミック窓に起因することからセラ

ミック窓に立つmodeをHFSSやMW-StudioによるRF simulationで詳細に調べたところ、計算では図6の右図に示されるようにdipole modeが1.305GHzに現れることがわかった。これがpeakの原因である可能性が高いことがわかり、幸い、このmodeはセラミックの厚みに依存するため、セラミック窓の厚みを変えてcold窓の製作を進める予定である。

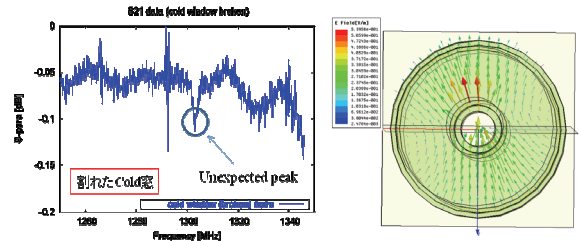


図6：(左)割れた cold 窓の lowlevel 測定結果。(S21)。(右)HFSS によるセラミック窓に立つ mode。

#### 4. まとめ&今後

20kW 用の入力カプラーの設計を行い、セラミック窓とベローズの試作を行い、常温下でセラミック窓およびベローズの大電力試験(最大入力パワー20kW)を行った。ベローズの温度上昇の抑制は概ね良好であり、計算とも良い一致を示していた。それに対し、2種類のセラミック窓の1つ(cold 窓)で急激な温度上昇が見られ、結果的にcold セラミック窓が割れる結果となった。その後、窓単体の詳細な low level 測定を行い、セラミック窓の構造に起因する 1.305GHz 付近の吸収 peak が存在すること、およびそのピークが温度上昇により 1.3GHz に近づいてくることが判明した。とくに詳細な simulation ではセラミック窓に起因する dipole mode が 1.3GHz 付近に存在することが判明し、これらの結果から想定するに、この peak が急激な温度上昇の原因と考えられる。従って、次年度は改良 cold 窓の製作を行い、早急に high power 試験を行い、改善の効果を見る。また、低温試験を行った後、これらのデータを元にカプラーの本機の作成を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] 加古永治, 他: 「STFベースライン超伝導空洞用大電力高周波入力結合器」, 第3回加速器学会プロシーディング, p136-138 (2006).
- [2] 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」, 第5回加速器学会, WP120 (2008).
- [3] 沢村勝: 「IOT高周波出力特性」, 第3回加速器学会プロシーディング, p832-834 (2006).