

# Development of 20kW input power coupler for 1.3GHz ERL main linac

## — High power test of the renewed ceramic window —

Kenji Shinoe<sup>1,A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>B)</sup>, Kensei Umemori<sup>B)</sup>, Masaru Sawamura<sup>C)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Takaaki Furuya<sup>B)</sup>

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

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

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

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

<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 power coupler for a 1.3GHz ERL superconducting cavity for main linac<sup>[1]</sup>. We fabricated power coupler components such as ceramic windows and bellows and carried out the high-power test of the components by using a CW 30kW IOT power source<sup>[2]</sup>. During this test, the ceramic window was broken by the sudden heat load. We found that this heat load occurred by the unexpected dipole mode. We renewed the ceramic window and successfully carried out the high power test up to CW 27kW input power.

## ERL 主ライナックのためのカップラー開発

### — 改良セラミック窓のハイパワー試験 —

#### 1. はじめに

次世代放射光源を目指す Energy Recovery Linac (ERL) の開発は日本では 2006 年度から本格的に始まった。特に 100mA の大電流ビームをエネルギー回収を行いながら安定にビームの加減速を行う主加速器部の超伝導空洞の開発は最重要課題の一つであり、KEK、東大物性研、JAEA の協力の下、1.3GHz の超伝導空洞の開発が行われている。本報告では空洞開発の中の重要な開発要素の一つである主加速器用の入力カップラーの開発現状として、入力カップラーの構成要素の中でも重要なセラミック窓の開発現状について述べる。

#### 2. カップラーの基本設計と仕様

1.3GHz ERL 用主ライナックに用いられる入力カップラーについて、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。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、入力カッ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ップラーの基本仕様を表・1 に示す。

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)

表 1：主ライナック入力カップラーの基本仕様

入力カップラーの設計方針としては、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 空洞の入力カップラーを基本とした<sup>[2]</sup>。セラミック窓には TRISTAN や KEKB にて実績のあるトリスタントップの同軸型窓を 1.3GHz 用に拡張して使用している。但し、パルス運転の ILC とは異なり、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設計の改良を行った<sup>[3]</sup>。主な変更点として、同軸部のインピーダンスを  $50 \Omega$  から  $60 \Omega$  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、低温部 (cold-窓) と常温部 (warm-窓) の 2 つを設けた。2 種類のセラミック窓は同一寸法として、製作の簡便性を計っている。導体は熱侵入を減らすため、1mm の SUS に  $10 \mu\text{m}$  の銅鍍金を施した。パルス超伝導空洞用入力カップラーと比べて RF 投入時の dynamic loss が圧倒的に大きく、 $60 \Omega$  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

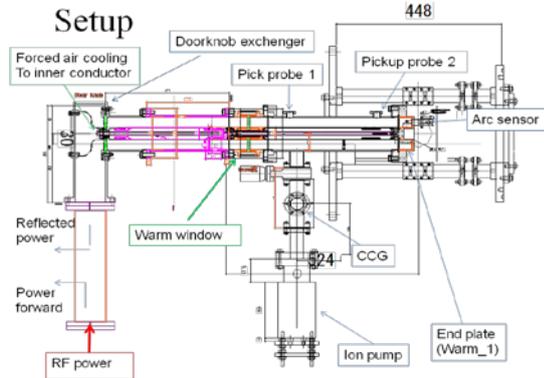
<sup>1</sup> shinoe@issp.u-tokyo.ac.jp

可能な設計となっている。また、常温側は内導体内部にロッドを挿入し、強制空冷により冷却する。

### 3. セラミック窓初期モデルのテスト

入力カプラーにおいて、セラミック窓は最も重要な構成部品である。特に CW 入力においてはセラミック窓の発熱が大きな問題になると予想され、セラミックの純度を上げるなどの対策を行ってきている。発熱がどの程度に抑えられているかを確認することは重要である。セラミック窓のハイパワー試験は、実際のカプラーでの使用と等しい状況になるよう、warm-窓-cold-窓をつなぎ、さらに導波管に接続するため warm-窓を繋いだ、3 連の状態で行った。このテストでは、cold-窓の急激な発熱がおき、セラミック窓の破断を引き起こした。<sup>[3]</sup>

Cold-窓の破断を受け、3 連での測定はあきらめ、warm-窓単体でのテストを行った。テストは Warm-窓の Cold-窓との接続側の内導体と外導体を短絡させる端板を接続し、定在波でテストを行った。端板は 2 種類用意し、1 つがセラミック窓のところで磁界最大（テストケース：warm\_1）、もう一つがセラミック窓のところで電界最大（テストケース：warm\_2）になるように端板の長さを選んだ。テストシステムの構成図を図・1 に示す。内導体の内側は空冷のため大気圧、内導体と外導体の間は真空とし、150 度程度で 24 時間ベーキングを行った。到達圧力は C.C.G. にて  $6 \times 10^{-7}$  Pa が得られた。

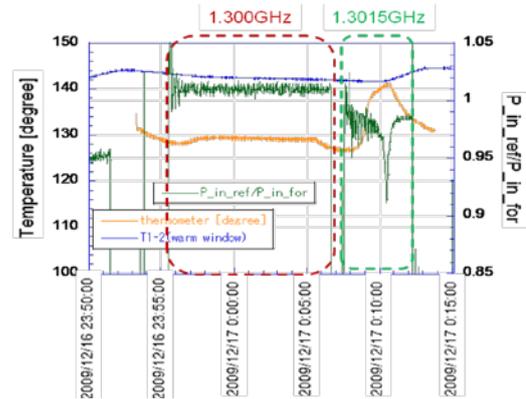


図・1 warm-窓単体のハイパワー試験構成図

試験の結果、テストケース Warm\_1 では幾度かのプロセスを経て、20kW の RF パワーまで入力することが出来た。この時 cold-窓で観測された透過パワーの損失は認められなかった。しかし Warm\_2 においては、入力パワー 7kW 付近で透過するパワーの損失が大きくなり、真空リークを引き起こすに至った。セラミック窓はここでも破断していた。

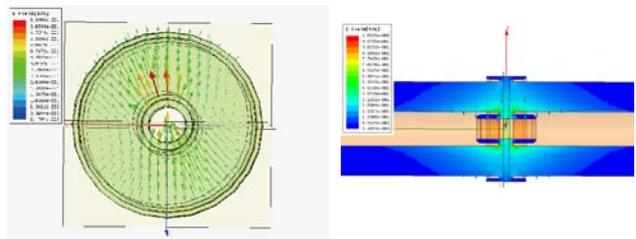
次にパワー損失について、原因を調べるためにアークセンサを取り外しデジタル放射温度計（横河電機 53006）を取り付け、セラミック窓の温度を直接測ることにした。また、ローパワーの測定では共鳴周波数が 1.307GHz にあったことから、シグナルジェネレータ（S.G.）の周波数を変えて、パワーを入力した。入力パワーは 1kW とし、セラミック窓の温度を変えるために、セラミック窓の周りに

ヒーターを取り付け加熱をおこなった。セラミック窓の温度とパワー損失の関係を図・2 に示す。セラミック窓の温度が約 130°C の時 1.3GHz ではパワー損失もセラミック窓のさらなる温度上昇も観測されなかったが、S.G.の周波数を 1.3015GHz に変えた時、パワーロスが観測されて、急激な温度上昇が発生し、それに併せてさらに大きなパワーロスが観測された。これらのことから、パワーロスの原因として、1.3GHz に近い周波数の、セラミック窓内に励起される共鳴モードが原因であると考えられる。



図・2 S.G.の周波数を変更した時のセラミック窓の温度とパワーロスの計測結果

この共鳴モードを調べるため、HFSS や MW-studio を用いて計算を行い、固有モードを調べた。計算の結果、TE-dipole モードが 1.3GHz の近辺にピークを持つことが分かった。計算結果を図・3 に示す。なおテストケース Warm\_1 において、発熱が観測されなかった理由として、入射波と反射波で TE-dipole mode が逆向きに励起され、キャンセルされると考えている。

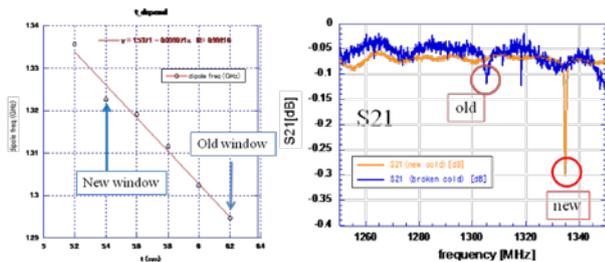


図・3 1.3GHz 付近に共鳴ピークを持つ TE-dipole mode の計算結果(HFSS)

### 4. 改良セラミック窓のハイパワー試験

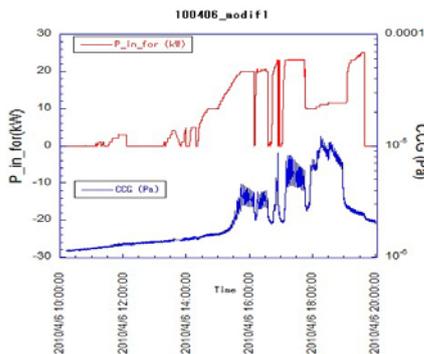
セラミック窓の発熱、および発熱の原因がセラミック窓内に励起される TE-dipole mode であるというテスト結果を受け、セラミック窓の改良を行った。

改良に当たっては、HFSSにてセラミックの厚みを変えてシミュレーションを行い、このモードの周波数が厚みに依存するという結果が得られたことから、セラミック窓の厚みを変えることで共鳴周波数を1.3GHz付近から遠ざけることにした。シミュレーションの結果を図・4左側に示す。遠ざける周波数の大きさは、セラミックの加工精度やセラミックの強度などを考慮して、約30MHz高周波側に動かすことにした。この時のセラミックの厚みは5.4mmであった。この結果を受け新しくcold-窓の製作を行った。セラミック窓の厚さは5.4mmとした。この



図・4 (左) HFSSにて計算を行った TE-dipole mode の周波数とセラミック窓の厚みの関係 (右) セラミック窓初期モデルと改良型のローレベルでの S-parameters (S21) の計測結果

cold-窓について、ローパワーで透過特性を測定し、発熱の原因とされている TE-dipole mode の周波数を測定し、初期モデルのそれと比較を行った。結果を図・4右側に示す。この測定でピークの周波数の差は、約30MHzとなっており、この値はHFSSを用いて行ったシミュレーション結果と良く一致している。

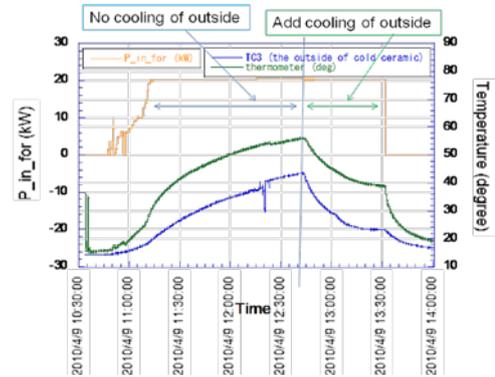


図・5 改良型セラミック窓のハイパワー試験結果

ハイパワー試験は、図・1に示した warm-窓単体のハイパワー試験と同様の構成をしており、cold-窓に対してパワー入射部には warm-窓を接続し大気圧で、パワー出射部に対しては cold-窓テスト用の端板を作成し取り付け、イオンポンプにて150°Cで24時間ベーキングを行い、 $1.1 \times 10^{-6}$  Paの圧力にて試験を行った。内導体は90 l/minのエアを送り強制空冷での冷却を行った。改良型セラミック窓のハイパワー試験の結果を図・5に示す。

この図は入力パワーと真空度圧力の推移を表示したもので、入力パワーを上げると、内導体ベローズ

の発熱によるベーキング効果で脱ガスが起り、真空圧力が上昇するが、時間と共に脱ガスは少なくなっていく真空圧力は下がっていった。入力パワーは順調に増やすことができ、最終的には27kWまでRFパワーを入力することができた。



図・6 入力パワー20kWでのセラミック窓の温度上昇測定結果

次にセラミックの温度上昇を確認するため入力パワーを20kWに保持して、セラミックの温度を測定した。測定はセラミック周りを強制空冷した場合としない場合に分けて測定を行った。結果を図・6に示す。セラミックの温度上昇は、外側の強制空冷無しでも約40K程度あった。この値はERLでの使用において、十分使用可能な小さい値である。

## 5. まとめと今後

ERL用主ライナックに用いるための入力カプラーにおいて最重要コンポーネントであるセラミック窓のハイパワー試験を行った。初期モデルでは、予期しなかった TE-dipole mode のためセラミック窓の急激な温度上昇を引き起こし、セラミック窓の破断を引き起こした。この問題への対処として、セラミック窓の厚みを変更し、改良型セラミック窓の製作を行いハイパワー試験を行った。改良型セラミック窓では、急激な温度上昇は観測されず、順調に入力パワーを27kWまで増加することができた。また、20kW入力において、セラミック窓の温度上昇は冷却を行わない状態で40K程度であり、この値はERL運転において十分使用可能な値である。今後は、改良セラミック窓を用いて入力カプラー1号機を制作し、ハイパワー試験を行う予定である。

## 参考文献

- [1] K.Umemori et al., Proc. of SRF2009 Workshop, Berlin, (2009) p355.
- [2] 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).
- [3] 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を用いたカプラーコンポーネントテスト-」, 第6回加速器学会, FPACA01 (2009).