

## Development of input power coupler for ERL main linac

Hiroshi Sakai<sup>1,A)</sup>, Kenji Shinoe<sup>A)</sup>, Atsushi Ishii<sup>A)</sup>, Kensei Umemori<sup>B)</sup>, Shogo Sakanaka<sup>B)</sup>,  
Takeshi Takahashi<sup>B)</sup>, Takaaki Furuya<sup>B)</sup>, Masaru Sawamura<sup>C)</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 are developing the 1.3GHz 9-cell superconducting cavities for realizing the ERL under the collaboration between KEK, JAEA, ISSP, and other institutes. a power coupler is designed for the ERL main linac superconducting cavity. Estimated input power is about 20kW for 20MV/m ERL operation. This coupler is based on the STF-BL input coupler, which adopts the TRISTAN type coaxial coupler, and some modifications are applied for the CW 20kW power operation. Now we are developing the high power coupler test stand to carry out the components test of the ceramic windows and bellows by using a 30kW IOT. In this paper, we report the design strategy of the input power coupler for ERL main linac and the recent status of the high power coupler test stand.

## ERL主ライナックのための入力カプラーの開発現状

### 1. はじめに

次世代光源を目指すエネルギー回収型リニアック (ERL) の開発が KEK, JAEA 及び東大物性研が中心となって進められている [1]。特に ERL 開発において、100mA の大電流ビームをエネルギー回収下、安定にビームの加減速を行う主加速器部の超伝導空洞 (加速勾配 15-20MV/m) の開発は最重要課題である [2]。このようなエネルギー回収下、空洞の無負荷 Q 値 ( $Q_0$ ) は 2K にて  $10^{10}$  であり、投入パワーも 20MV/m 加速勾配下でもわずかに空洞一台あたり 40W 程度で済むが、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、共振周波数に peak を保つことは難しい。従って、ERL 運転下、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。

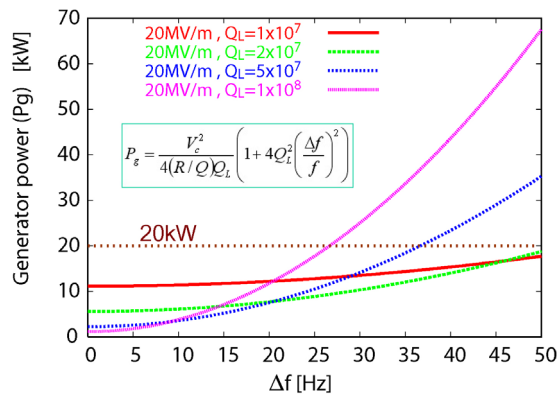


図 1: 各  $Q_L$  毎の共振周波数からの周波数変動 ( $\Delta f$ ) に対する入力パワー ( $P_g$ ) の関係。

図 1 は 20MV/m 加速時の共振周波数からの周波数変動 ( $\Delta f$ ) に対する入力パワー ( $P_g$ ) を  $Q_L$  毎に書いたグラフである。 $Q_L$  が高いほど周波数の変動 ( $\Delta f$ ) が小さい時は投入パワーは少なくすむが、周波数の微小な変化に投入パワーが敏感になる。この周波数変動の幅はクライオモジュールの設計に大きく反映され、出来るだけ microphonics を減らす工夫が必要である。海外のデータでは微小振動による周波数変動はクライオモジュール毎に異なり、r. m. s で 0.6-7Hz、peak 値で 4-42Hz 程度と言われている [2]。Microphonics の小さなクライオモジュールも超伝導空洞の重要な開発項目であるが、入力カプラーの設計方針としては安全を見て  $\Delta f$  で 50Hz までの振幅を許容範囲とし、20MV/m 運転時に  $Q_L = 2 \times 10^7$ 、最大入力パワー 20kW を基本仕様とした。また  $Q_L$  に関しては空洞やカプラーの pulse conditioning などを行えるよう、またエネルギー回収がない場合のビーム運転が出来るようにさらに  $Q_L$  を可変にし、より小さい  $Q_L$  を実現できることを基本方針とした。表 1 に基本仕様をまとめた。

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プラーの基本仕様

1.3GHz にて CW で 20kW ものパワーの供給を安定に行うための入力カプラーは重要な開発要素の一つであり、本文では、この基本仕様を元に主加速器用の入力カプラーの具体的設計を述べる。また、現在構築中のカプラー用のテストスタンドの現状報告も行う。

<sup>1</sup> E-mail: hrsakai@issp.u-tokyo.ac.jp

## 2. 入力カプラーの設計

図2に主加速器用入力カプラーの概念図を示す。

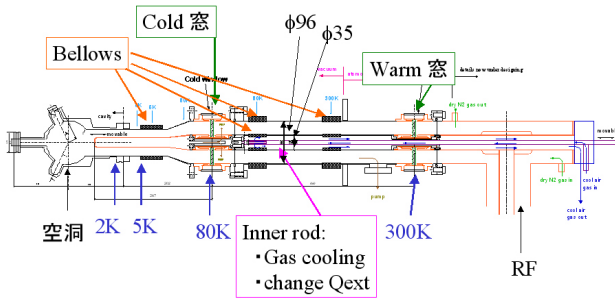


図2：入力カプラーの概念図。

基本設計は1.3GHzにてパルス運転で1MW(パルス幅1.5ms, 5Hz)までのhigh power試験の実績のあるILC用STF-BL空洞のinput couplerから始めた[3]。特にセラミック窓には500MHzで運転していたTRISTANやKEKBにて実績のあるトリストンタイプの同軸型窓が採用されており、これを1.3GHz用に拡張されている点がERL空洞への採用を決めた理由の一つである。但し、ILCとは異なりERLではCWの20kWのpower供給が必須であるため、熱負荷の影響が大きく、いくつかの設計の改良を行った。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。表2は20kWpower投入時のdynamic loss、表3は図2に示す温度定点を設けた際のstatic lossの計算結果である。導体は熱侵入を減らすため、1mmのSUSに5μmの銅鍍金を施した。ILCの場合と比べ、RF投入時のdynamic lossが圧倒的に大きく60Ωのインピーダンスにしても外導体の発熱7.7Wに対し、内導体の発熱で20.8Wになっている。さらにセラミック窓の発熱も一枚あたり5.4Wと大きい。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軽減することにした。また、常温側は内軸内部にロッドを挿入し、強制空冷により冷却する。

内導体発熱	20.8W(Total) (80Kで吸収)
外導体発熱	4.5W (80K)   3.2W (5K)
セラミック窓発熱	5.4W(一枚当たり)

表2：dynamic lossの計算 (20kW投入時)

	300k→80K	80K→5K	5K→2K
Static loss	4.7W	0.73W	0.36W

表3：Static lossの計算

図3はカプラー用に用いる同軸型セラミック窓の電場分布の計算結果である。内導体、外導体には

chokeが施され、セラミックの内外導体部分とのロウ付部分に直接電場が立たないようにするとともにセラミック窓からの反射を軽減している。HA997のεが10であり、また60Ωであるため、STF-BLからchoke部の長さや深さを変更し、結果として、反射(S11)を-23dB程度に抑えた設計を行った。

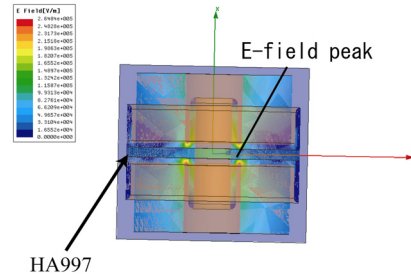


図3：セラミック窓の電場分布の計算結果。

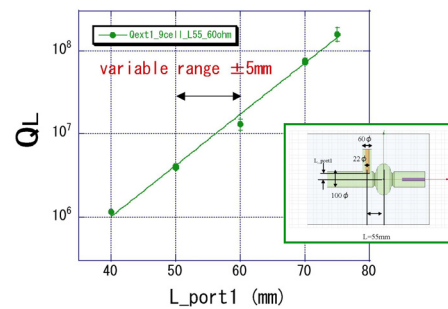


図4：カプラーの挿入位置 vs  $Q_L$  の計算結果。

負荷Q値( $Q_L$ )を $5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ まで可変とするために低温部の外導体にベローズを設け、内導体を可動にした。図4は空洞に対する内導体の位置( $L_{port1}$ )と $Q_L$ の関係を計算したものである。可動範囲を空洞軸センターから50mm~60mm程度に設定することで $Q_L$ を $5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ まで可変としているのがわかる。従って我々の設計ではベローズの可動範囲を±5mmに設定することとした。

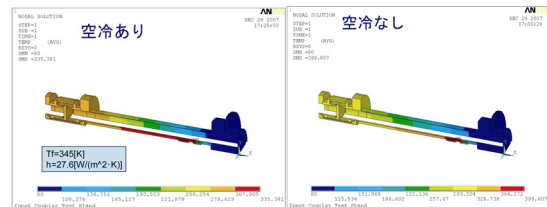


図5：内導体ベローズでの温度上昇計算結果。

それ以外にカプラーの可動を可能にするため、また低温に冷やしていくときに熱収縮を吸収するためにCold窓とwarm窓の間の内導体、外導体にもそれぞれベローズを設ける。特に内導体での発熱による温度上昇はベローズ部分で大きく、ロッドによる強制空冷が必須となる。図5は空冷後のベローズ部での温度上昇を計算したものであり、空冷なしでは130

度の温度上昇が60度までの温度上昇に抑えられているのがわかる。なお、このロッドにてカプラーの可動を行うことが可能である。

### 3. カプラーテストスタンド

入力カプラーの設計上、避けて通れないのが、セラミック窓やベローズの出来不出来である。これらコンポーネントのテストを行うべく現在、カプラー用のテストスタンドを製作中である。

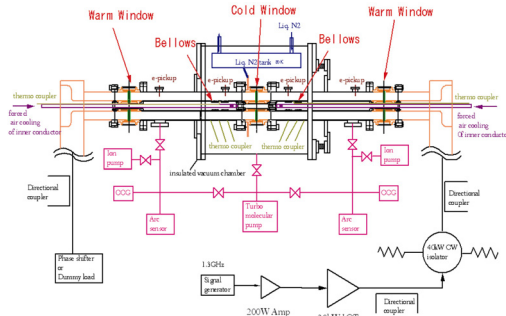


図6：カプラーテストスタンド setup。

図6にテストスタンドのsetupを示す。1.3GHzの最大30kWのIOTを用いて、high power試験を行う[4]。特にセラミック窓のテストがERL運転時に近い形で行えるよう中心に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。high power時のテストとして重要となる発熱や温度上昇を見積もるため、cold窓は実際の状況と同じく断熱槽内部におかれ、なおかつ液体窒素による冷却を行い80Kの温度定点をcold窓に設けた。このスタンドを用いることでwarm窓とcold窓のhigh powerテストを超高真空中で冷却テストを行えるような設計とした。温度上昇を見るため、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。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を設け、ERL運転時と同じく全反射状態での測定を行う。

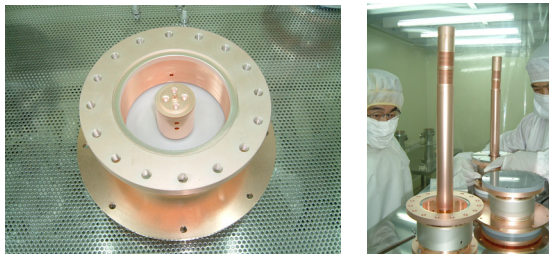


図7：cold窓(左写真)とwarm窓(右写真)。

図7に製作したcold窓とベローズ付のwarm窓を示す。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は傷などなく、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、leak checkを行い、図

8に示すように断熱槽を除くセラミック窓3連を導波管と繋ぎ、テストスタンドを構築した。ドアノブを含む3連セラミック窓のLow level測定では、ドアノブとwarm窓の距離を調整し、-23dBの反射を実現し、Simulation結果と比較しても特に大きな問題がなくhigh power試験に向けて良好な結果を得ている。

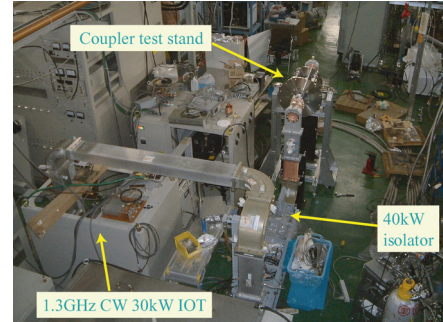


図8：カプラーテストスタンド全体。

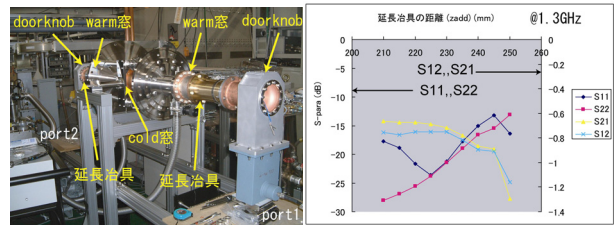


図9：セラミック窓3連 low level 測定結果。

### 4. まとめ

ERL主ライン用インプットカプラーの設計を行った。STF-BL空洞に用いる同軸型窓のカプラーを採用した。1.3GHzの20kWのパワー投入時の発熱を軽減する設計を行うと共に $Q_L$ を可変にする機構を設けた。現在、30kW IOTを用いたテストスタンドの構築を行い、今年度にセラミック窓およびベローズのhigh powerテストと80Kでの冷却テストを行う。この結果を元に実機カプラーの設計に反映する。

### 5. 謝辞

設計、製作にあたり、色々助言頂きましたKEKの加古永治氏、野口修一氏、Cornell大のSergey Belomestnykh氏に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] S.Sakanaka, et.,al, EPAC'08, MOPC061 (2008)
- [2] M.Liepe,et.al, Nucl. Instr. Meth. A557, p354-369 (2006).
- [3] 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).
- [4] 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).