

# CONSTRUCTION OF INJECTOR CRYOMODULE FOR C-ERL PROJECT

Eiji Kako<sup>#, A)</sup>, Yoshinari Kondo<sup>A)</sup>, Shuichi Noguchi<sup>A)</sup>, Toshio Shishido<sup>A)</sup>, Yasuchika Yamamoto<sup>A)</sup>,  
Ken Watanabe<sup>A)</sup>, Haruki Hitomi<sup>B)</sup>, Katsuya Sennyu<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> MHI, 1-1-1 Itosaki-Minami, Mihara, Hiroshima, 729-0393

## Abstract

The compact energy-recovery linac (cERL) is under construction at KEK. In the injector cryomodule, electron beams of 10 mA are accelerated from the beam energy of 500 keV to 5 MeV. The injector cryomodule consists of three 2-cell cavity systems, and each cavity is driven by two input couplers. The design features, component test results and assembly status of the injector cryomodule for the cERL are described in this paper.

## c E R L 計画用入射器クライオモジュールの建設

### 1. はじめに

コンパクトERL (Energy Recovery Linac, エネルギー回収型線形加速器) 計画の入射部で用いられるクライオモジュールの建設が、KEKにおいて現在進行中である。この入射器クライオモジュールには、2セル超伝導加速空洞3台が内蔵されており、連続運転 (CW) で10 mAの電子ビームをビームエネルギー500 keVから5 MeVへ加速するために用いられる。このクライオモジュールにおいて、主要な開発要素となる構成部品は、ニオブ製2セル超伝導空洞、大電力入力結合器 (インプット・カップラー)、高調波取り出し結合器 (HOMカップラー)、HOMカップラー用RFフィードスルーなどである。各2セル超伝導空洞には、5台のループアンテナ型HOMカップラーがビームチューブに取り付けられ、さらに上下ポートには2本のインプット・カップラーが装着される。2セル超伝導空洞の運転加速電界は、cERLの初期段階としては6~8 MV/mであり、必要となる入力高周波電力は約100 kW (CW) であるが、次期計画となる3 GeV-ERLを想定した最終目標として、加速電界約10 MV/m, 高周波電力100 kW (CW) 程度での運転を目指している。これらの主要構成部品は、それぞれ単体での性能確認試験が行われた後で、クライオモジュールへの組み込み作業が開始された。本年4月より開始されたクライオモジュールの建設作業は順調に進行し、クライオモジュールの組立工程が終了した後の6月末にはビームラインへの設置・アライメントを完了した。今後、8月の高圧ガス完成検査を経て、9月には第1回冷却試験を開始し、まず低電力RF試験を行う予定である。その後、大電力RF試験でクライオモジュールでの加速電界の性能評価を行い、ビーム試験運転へと調整が進められる計画である。

<sup>#</sup> eiji.kako@kek.jp

### 2. 入射器クライオモジュール

2本のインプット・カップラーと5台のHOMカップラーを有する2セル超伝導空洞システム[1]の概念図を図1に示す。3台の2セル空洞システムおよび2 K・5 K・80 Kの冷却配管から構成されるcERL入射器クライオモジュールを図2に示す。

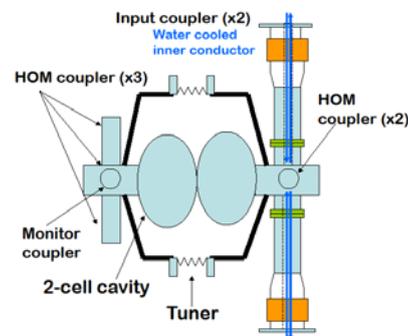


図1 : 2セル超伝導空洞システムの概念図

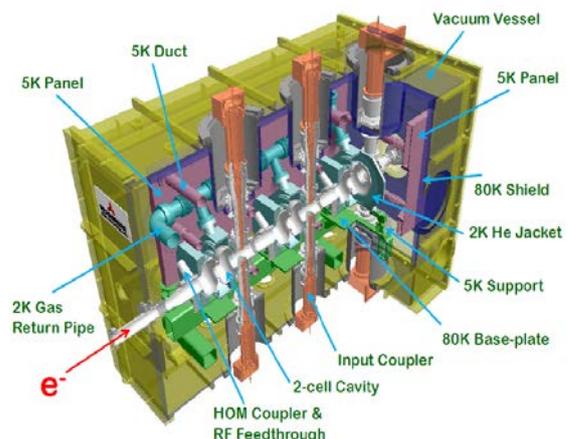


図2 : cERL入射器クライオモジュール

### 3. 主要構成部品

#### 3.1 2セル超伝導空洞

2セル超伝導空洞は、STF9セル空洞と同様なセル形状を有し、空洞とのより強い結合度が得られるようにビームパイプ直径は88mmである。図3に示されるように両端ビームパイプは、インプット・カップラー2台とピックアップアンテナの取付けポート、5台のHOMカップラーの装着など複雑な構造となるため、ニオブのブロックからの切削加工で製作された。チタン製ヘリウム槽ジャケット内部には、地磁気を遮蔽するための磁気シールドが挿入されている。



図3：3台の2セル超伝導空洞

#### 3.2 HOMカップラー・RFフィードスルー

CWで運転される2セル超伝導空洞において空洞性能を制限する原因としては、空洞内の表面欠陥・異物での超伝導破壊よりむしろ、HOMカップラー本体での発熱、あるいは、高調波取出し用RFフィードスルーのニオブ製アンテナ先端での発熱による超伝導破壊が主要となる。これらの発熱現象を抑制するために、図4に示す内部のループアンテナ



図4：15台のHOMカップラー



図5：高熱伝導N型RFフィードスルー

にダブルスタブ構造を有する改良型HOMカップラー[2]、および、図5に示す高熱伝導N型RFフィードスルー[2]が開発された。

#### 3.3 インプット・カップラー

CWインプット・カップラーは、入射器クライオモジュールにおいて要求される仕様の厳しい開発要素の高い主要部品である。同軸型セラミック円板から構成されるRF窓が室温部にのみ位置し、室温部からの熱侵入を抑制するために外導体に5Kと80Kのサーマル・アンカーが取り付けられている。製作が完了した6台のインプット・カップラーを図6に示す。空洞との結合度(外部Q値)は、2種類の $1 \times 10^6$  (2台)と $4 \times 10^5$  (4台)になるようにアンテナ先端の長さが決められている。



図6：6台のCWインプット・カップラー

## 4. 単体での性能確認試験

#### 4.1 2セル空洞の高電界性能試験

空洞製作完成後には、内面検査、多量電解研磨(100 $\mu$ m)、真空熱処理(750 $^{\circ}$ C)、周波数調整、最終表面処理として少量電解研磨(20 $\mu$ m)、高圧水洗浄、クリーンルーム内での真空部品の組立、ベーキング(120 $^{\circ}$ C)など一連の標準工程が行われた。高電界性能試験(たて測定)は3種類のRFフィードスルーの試験を兼ねており、各空洞について繰返し数回のたて測定が実施された。3空洞についてのたて測定の最終結果を図7に示す。最終結果としてcERLの運転加速電界(8MV/m)より高い加速電界まで達成できることが確認された。

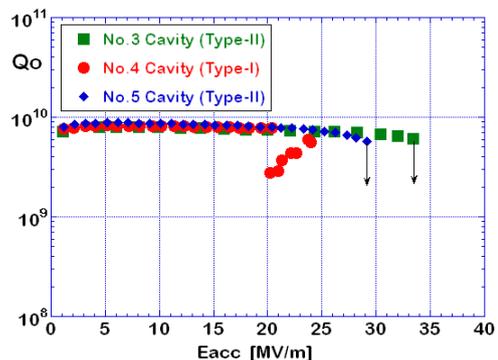


図7：3空洞のたて測定での最終結果

#### 4.2 インプット・カップラーの大電力試験

インプット・カップラーのコンディショニングは、300 kW (CW) クライストロンを用いて行われ、その大電力試験装置を図8に示す。内導体のアンテナ内部は水冷され、同軸管部およびドアノブ内部は窒素ガス冷却、外部はファンによる空冷が行われた。パルス運転で最大200 kWまで、CW運転では40 kWまでのコンディショニングが行われ、その結果を図9に示す。CW運転では、高周波損失による発熱で同軸管部内導体ベロー周辺が100°C付近にまで温度上昇したために、入射高周波電力は40 kWに制限された。

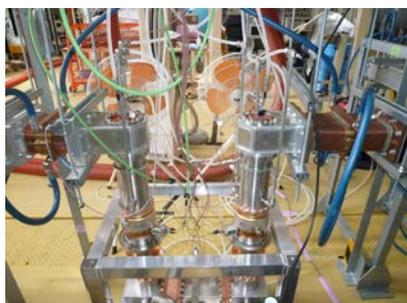


図8：インプット・カップラーの大電力試験装置

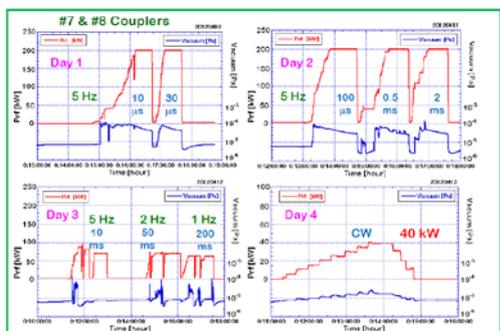


図9：インプット・カップラーの大電力試験結果

#### 4. クライオモジュールの組立

空洞多連化作業に用いられるビームパイプ、空洞間ベロー、RFフィードスルー、フランジ類などの全ての真空部品は超純水で丹念に洗浄され、クラス10のクリーンルーム内にて乾燥された。15個のRFフィードスルーは、図5に示す改良型に全て交換された。ヘリウム槽ジャケットを溶接した2セル空洞3台の連結作業、および、6本のインプット・カップラーの装着を完了した状態の写真を図10に示す。その後、2セル空洞への2Kヘリウム配管接続、空洞両側面への5Kヘリウムパネルの設置、80K窒素シールドの配管、温度センサーおよびRFケーブルの配線を終えた装置全体は、図10に示すように真空容器内部へ挿入された[3]。組立が完成したクライオモジュールは、図11に示されるようにビームラインへ設置され、アライメントが行われた。



図10：クリーンルーム内での空洞3台の多連化



図10：真空容器内への挿入作業



図11：ビームラインへの設置を完了した入射器クライオモジュール

#### 5. まとめ

2008年に設計を開始した入射器クライオモジュールの開発は、主要開発要素部品の試作・試験を経て、実機としての製作・組立を完了し、加速器としてのビーム加速試験の準備が整いつつある状況にまで順調に進展してきている。

#### 参考文献

- [1] S. Noguchi, et al., “cERL入射器用2セル超伝導システムの開発”, 第5回加速器学会年会、広島大学、東広島市, Aug. 6-8 (2008) FO22.
- [2] K. Watanabe, et al., “cERL入射器空洞HOMカップラー用高熱伝導N型フィードスルーの開発”, 第9回加速器学会年会、大阪大学、豊中市, Aug. 8-10 (2012) THPS098.
- [3] H. Hara, et al., “KEK-cERL設備におけるMHIの取り組み状況”, 第9回加速器学会年会、大阪大学、豊中市, Aug. 8-10 (2012) THPS054.