

# DEVELOPMENT OF THE SUPERCONDUCTING CAVITY SYSTEM FOR ERL INJECTOR AT KEK

Ken Watanabe<sup>1</sup>, Shuichi Noguchi, Eiji Kako, Toshio Shishido, Kensei Umemori, Yasuchika Yamamoto, Masato Sato  
KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Japan, 305-0801

## Abstract

Development of a Superconducting Cavity Injector Cryomodule for the compact ERL (cERL) is being continued at KEK since 2006. Design of a cryomodule containing three 2-cell 1.3-GHz cavities is almost completed and will be ordered soon. Status of R&D and design details are reported.

## ERL入射器用超伝導空洞システムの開発

### 1. はじめに

ERL入射器用超伝導空洞システムは、電子銃で生成した100 mAの大電流ビームを10 MeV程度まで加速するために用いられる[1]。主加速器とは異なりエネルギー回収が行われないので、ビーム加速に必要なとされる約1 MWの高周波電力はすべて外部の高周波電源から供給しなければならず、CW運転で1本あたり200 kW程度の高周波電力を投入することができる大電力入力カップラーと100 mAのCW大電流ビームによって空洞内に誘起された有害な高調波モードを効率よく外部へ取り出し、かつCWの加速モードの負荷に耐えうるHOMカップラー開発が重要な開発要素となる。cERL入射器用超伝導空洞システムとして、加速電界15 MV/mで運転するHOMカップラー4機を装着した2セル空洞1号機の低電力試験、表面処理および縦測定を行った。また、2008年度製作した大電力入力カップラー2本の低電力試験を2009年度行う予定である。

### 2. cERL入射器用超伝導空洞システム

表1にcERL入射器用超伝導空洞システムの基本パラメータを示す。運転周波数は1.3GHzであり、2Kで運転される。空洞形状はSTF Baseline 9セル空洞の基本設計を踏襲している。入力およびHOMカップラーのカップリングを確保するために、ビームパイプ径を88mmと大口径化している。入力カップラーは空洞当たり2本装着され、一本あたりCW運転で167kWの高周波電力を供給する。また、HOMのダンピングのために用いるHOMカップラーは同軸型を4機~5機装着する。図1にクライオモジュールの概念図および開発項目を示す。図2は2007年度製作したHOMカップラーを4機装着したプロトタイプ2セル空洞1号機である。HOMカップラーの内訳はループ型およびアンテナ型がそれぞれ2機装着されている。

表1：空洞システムの基本パラメーター

Frequency	1.3	GHz
Number of cell	2	
R/Q	205	
Operation Gradient	14.5	MV/m
Number of Input coupler	2	
Coupler power	167	kW
Coupler Coupling Q	$3.3 \times 10^5$	
Number of HOM coupler	4 or 5	
Operating Temperature	2	K

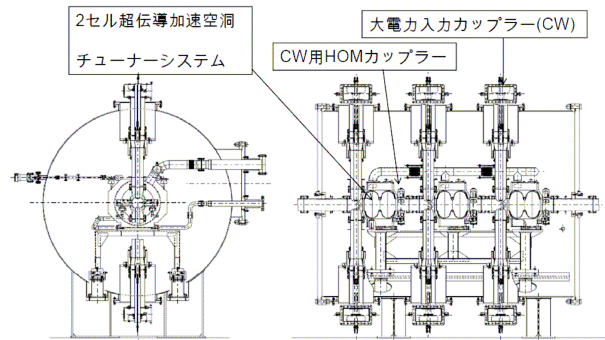


図1：クライオモジュールの概念図および開発項目

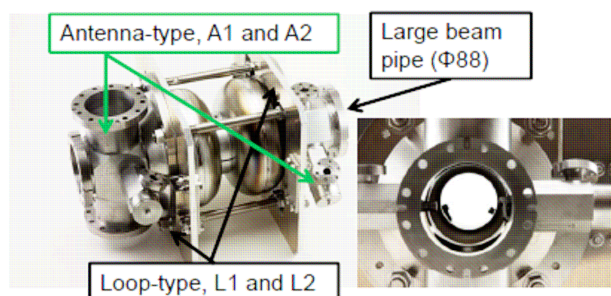


図2：プロトタイプ2セル空洞1号機（HOMカップラー4機装着型：ループ型×2、アンテナ型×2）

<sup>1</sup> E-mail: kenw@post.kek.jp

## 2.1 大電力入力カップラー

入力カップラーの形状を図3に示す。図4は2008年度製作した2本の入力カップラーである。高周波窓はトリストランで実績のある同軸窓方式を採用している。入力カップラーのインピーダンスは41Ωであり、外径は82mmである。また、運転時は高負荷のため、内導体の冷却は水冷で行う。2009年9月から単体での大電力試験を予定している。

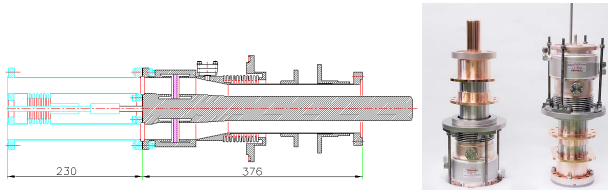


図3：2008年度製作した入力カップラー

## 2.2 HOMカップラー[2]

図4にERL入射器用に設計したアンテナタイプおよびループタイプの同軸型HOMカップラーを示す。STF Baseline空洞で用いたHOMカップラーでは、縦測定時（CW運転：14MV/m）に加速モードの負荷による取り出しプローブ（ニオブ製）の発熱が問題となった。そのため、HOMカップラーの設計は新たにハイパスフィルターおよび内導体の取り出しプローブ位置に突起を設け、取りだしプローブに対する加速モードの負荷を小さくする方策を取った。結果、STF Baseline空洞モデルと比較して、1/2から1/4の負荷となった。

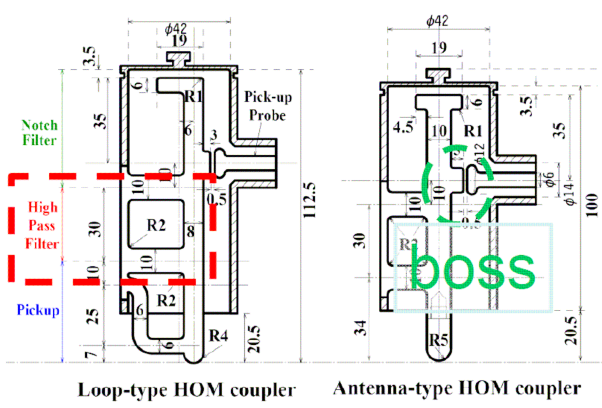


図4：CW用同軸型HOMカップラーの形状

## 2.3 チューナーシステム[3, 4]

チューナーシステムはSTF Baseline空洞で使用しているスライドジャッキチューナーを使用する。表3にスライドジャッキチューナーシステムのストロークをまとめる。

表2：チューナーシステムのストローク一覧

	Type	Stroke	$\Delta f$
Mechanical Tuner	Slide Jack	1 mm	1.3 MHz
Fine Tuner	Piezo	4 $\mu$ m	2.6 kHz

## 3. 2セル空洞1号機の性能評価

2007年度製作したHOMカップラーを4機装着したプロトタイプ2セル空洞1号機における低電力試験および高電界試験（縦測定）について述べる。空洞受取後に行った工程を以下にまとめる。

- (1) 空洞受取後の内面検査、加速モードおよび高次モードの低電力試験
- (2) 化学研磨（20um）、アニール、内面検査
- (3) 電解研磨：100um、H2O2リンス、HPR、組立、ベーキング
- (4) HOMカップラーのチューニングおよび縦測定

### 3.1 低電力試験

受取時の加速モード周波数は1299.369MHzであり、電界平坦度は99.8%であった。このため、加速モードに対するプリチューニングを行わずに、高次モードの測定および各種表面処理を行った。表3に縦測定時（2K）で測定した高次モードの周波数および $Q_L$ とR/Q（計算値）をまとめる。

表3：2セル空洞1号機の2Kにおける高次モード周波数、 $Q_L$ （測定値）およびR/Q（計算値）

Mode	Frequency	R/Q	Measured $Q_L$
TE111	1.557 GHz	0.59 $\Omega/cm^2$	750
	1.563 GHz		350
	1.578 GHz	1.8 $\Omega/cm^2$	440
	1.589 GHz		300
TM110	1.629 GHz	4.0 $\Omega/cm^2$	1260
	1.639 GHz		1190
	1.784 GHz	1.9 $\Omega/cm^2$	850
	1.801 GHz		5130
TM011	2.281 GHz	64 $\Omega$	6000
	2.309 GHz	12 $\Omega$	5040
TM020	2.67 GHz	0.4 $\Omega$	—
	2.69 GHz	31 $\Omega$	—

### 3.2 高電界試験（縦測定）

2009年4月に第1回目の縦測定をSTFにて行った。空洞を縦測定スタンドへ移動後、常温にてHOMカップラーのチューニングを行った。また、空洞性能の評価のため、HOMカップラーおよびセル赤道部へ温度センサーを設置した。縦測定前の加速モードの周波数は1298.756MHzであり、2Kでは1300.439MHzであった。図5にHOMカップラーの位置および設置した各温度センサーの配置を示す。取り付け位置は取り出しプローブ、カップラー前面、内導体溶接部およびノッチフィルター先端の4つであり、各HOMカップラーに設置した。

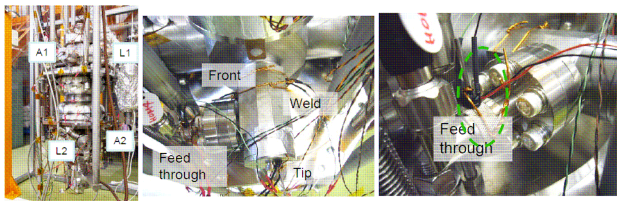


図5：縦測定時における温度センサーの配置

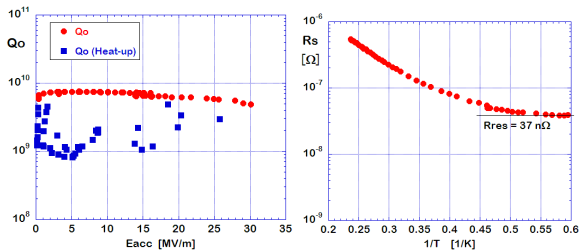


図6：Q-EaccカーブおよびRres

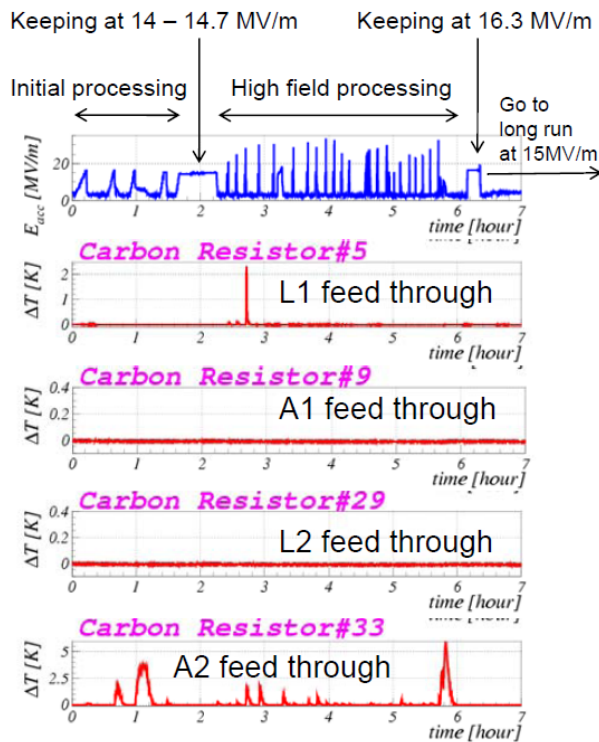


図7：プロセッシング履歴

図6にQ-EaccカーブおよびRresを示す。図7にプロセッシング履歴および各HOMカップラーの取り出しプローブの温度変化を示す。Rresは37nΩであり、これはビームパイプや入力ポートに取り付けたSUSの単板の損失が原因であり、HFSSで計算した結果とよく一致している。始めのプロセッシングではA2の取り出しプローブの発熱で15MV/mに達しなかったが、A2の取り出しプローブが発熱しQ<sub>0</sub>の低下が起こる前に可能な限り電界強度を上げて、高電界におけるプロセッシングを行った。瞬間最大加速電界は30MV/mであり、この際、A2の取り出しプローブの発熱が原因でQ<sub>0</sub>が低下し、フィールドを長時間保つ

ことができなかった。また、縦測定中にセル赤道部での発熱は観測されなかった。空洞性能はA2の取り出しプローブの発熱が原因で制限されたが、最終状態では16.3MV/mで長時間フィールドを保つことができ、クライオスタット上面に設置した線量計に反応は無かった。

縦測定では空洞およびRFケーブルの大半は2Kの液体ヘリウムに浸かっている状態である。今回、クライオモジュールの運転を想定して、高電界のプロセッシング後（液体ヘリウムは十分に残っていたため）、低温試験を継続して15MV/mにおけるロングラン試験も行った。これは長時間運転における安定性を調べるとともに、Heレベルがどの時点、どの場所でクエンチが起こるのかを調べるためである。図8にロングラン試験の結果を示す。試験は始め、1.6K、電界強度15.2MV/mで行い、クエンチ無しで6時間、その後、排気系を調整して、ヘリウム温度を2K（3kPa）とし、電界強度 15.8 MV/mで3時間30分フィールドを保つことができた。最後はA1の取り出しプローブの温度が上昇し、結果Q<sub>0</sub>の低下が起こった。その時のHeレベル、フィードスルーおよびケーブルの状態を図9に示す。A1のフィードスルーおよびRFケーブルはヘリウムの液面から完全に出ており、空洞側からの伝熱でのみ冷却されている状態であった。L1はまだヘリウムに浸っている状態であった。次回以降の縦測定では、RFケーブルのラインに2Kのサーマルアンカーを設置し、クライオモジュールを想定した試験を行う。

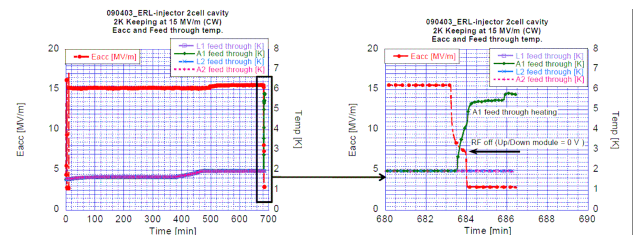


図8：ロングラン運転の結果

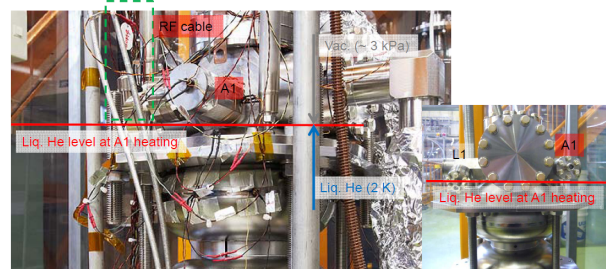


図9：ロングラン試験終了時の配置およびHeレベル

#### 4. まとめ

2007年度から2009年度にかけて、cERL入射器用超伝導空洞システムの開発を行ってきた。入力カップラーは2009年度秋に常温における大電力試験を行う予定である。2セル空洞では、縦測定の状態で

15MV/mの仕様を達成した。今後、クライオモジュールの運転を想定したセットアップで縦測定を行っていく予定である。また、高次モードのダンピングをより強化した2セル空洞2号機（ループ型HOMカップラー×5機）が2008年3月に完成し、現状では低電力試験およびPre-EP、EP-1が終了したところである。2セル空洞1号機、2号機の縦測定は2009年冬を予定している。

## 参考文献

- [1] コンパクトERLの設計研究, KEK Report 2007-7, JAEA-Research 2008-032, February 2008 A
- [2] K. Watanabe, et al., “New HOM coupler design for ERL injector at KEK”, Proc. of 5<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Hiroshima Japan 2008.
- [3] E. Kako, et al., “Cryomodule Tests of Four Tesla-like Cavities in the STF Phase 1.0 for ILC”, PAC’09, Vancouver, Canada, 2009
- [4] Y. Yamamoto, et al., “Observation and numerical calculation of Lorentz-detuning for the cryo-module test of STF baseline cavities at KEK-STF”, PAC’09, Vancouver, Canada, 2009