

## ACTIVITIES FOR ILC R&D AT HITACHI

Atsushi Horikoshi <sup>#A)</sup>, Takamichi Watanuki <sup>A)</sup>, Mamoru Watanabe <sup>A)</sup>, Shuichi Taniyama <sup>A)</sup>, Tomoyuki Semba <sup>A)</sup>,  
Yukiko Tsujioka <sup>B)</sup>, Takabumi Yoshinari <sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Hitachi, Ltd. Hitachi Works, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 317-8511

<sup>B)</sup> Hitachi, Ltd. Industrial Systems, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8608

<sup>C)</sup> Hitachi, Ltd. Nuclear Systems Division, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8608

### Abstract

HITACHI is participating in the construction of STF (Superconducting RF Test Facility) at KEK, which aims for versatile development for the future ILC (International Linear Collider). We subjected the several cryostats for each phase of STF project, and found them to be reliable for this study. We are developing superconducting cavities for STF, and successfully completed our first 9-cell cavity in April 2010. We also studied superconducting quadrupole magnet in 2010. This paper describes our recent activities for the ILC.

## 日立製作所における ILC に向けた R&D への取組み

### 1. はじめに

国際リニアコライダー(ILC)など将来の先端加速器に向けた研究開発の一環として、高エネルギー加速器研究機構(KEK)では超伝導 RF 試験設備 STF の建設・整備が 2005 年度より進められている。日立製作所は KEK の指導の下、各種 R&D に取り組んでいる<sup>[1]</sup>。2005 年度より超伝導加速空洞(TECLA 空洞、LL 空洞)試験用のクライオスタット 2 台の設計・製作・組立を行い、KEK の各空洞評価試験に供せられた。2009 年度には国際協力実験 S1-Global のクライオスタットの組立にも協力した。

9 セル超伝導加速空洞の開発については、2010 年度に試作 1 号機を完成、現在 2 号機の製作をおこなっている。また、ILC 仕様を模擬した超伝導四極電磁石を 2010 年度に試作した。本報ではこれら一連の R&D への日立の取組みについて述べる。

### 2. STF クライオスタットの製作

#### 2.1 全体構成

STF Phase-1<sup>[2]</sup>のクライオスタットの構造を図 1 に示す。構造は Baseline 空洞と LL (Low-Loss) 空洞の 2 種類の空洞の性能試験を効率的に行うために、2 台のクライオスタットから構成され、いずれか一方での単独試験も可能となっている<sup>[3]</sup>。

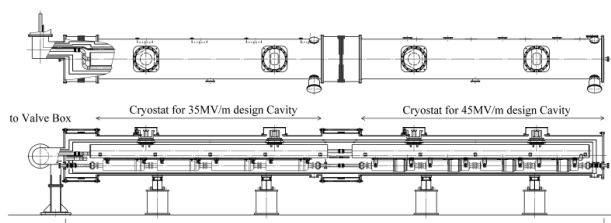


図 1 : STF Phase-1 クライオスタット構造

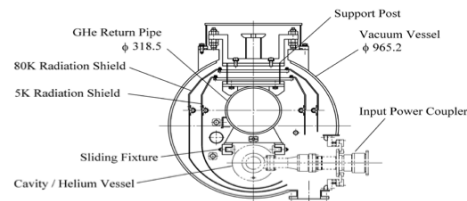


図 2 : STF Phase-1 クライオスタット断面 (Baseline 空洞用)

クライオスタットの断面構造を図 2 に示す。構成機器は TTF<sup>[4]</sup>を基本として設計しているが、空洞、インプットカプラー、チューナー、WPM(Wire Position Monitor)は KEK 独自の設計である。

#### 2.2 機器仕様

クライオスタットの仕様を表 1 に示す。以下、各構成機器の仕様について述べる。

表 1 : STF Phase-1 クライオスタット仕様

Cryostat's length	5.6m, 5.9m
Cooling Method	Saturated Superfluid Helium
Cooling Temp.	2K
Vacuum Vessel	Carbon Steel Pipe
Helium Gas Return Pipe	SS316L Pipe
Radiation Shield	Aluminum Dual Shield (5K, 80K)
Support Post	GFRP cylinder with thermal anchoring
Cavity Units	35MV/m for Baseline Cavity 45MV/m for LL Cavity

断熱真空容器は外径 965.2mm であり、クライオスタット内部の地磁気遮蔽のために厚さ 12mm の炭素鋼を用いている。

内部構造としては、超伝導加速空洞を 2K まで冷やす為に超流動ヘリウムの供給配管が配置されている。超流動ヘリウムからの蒸発ガス(GHe)はクライ

# atsushi.horikoshi.zs@hitachi.com

オスタット中央上部にある直径 318.5mm、SUS316L 製の GRP(ガスヘリウム回収配管)によって回収される。GRP は空洞(1 空洞の重量約 100kg)を支える構造体を兼ねており、鉛直方向の撓み量が 0.05mm 程度となるように設計している。また、2K 予冷・加温配管が空洞に取り付けられており、GHe や窒素ガスを送り込む事でコールドマスの予冷・加温を行う。

輻射シールドは、5K 用および 80K 用の二重シールドとなっている。STF Phase-1 では現地組立時の溶接作業を極力低減するため、冷却配管とシールド板とをボルト締結構造としている。

2K コールドマス、5K および 80K 輻射シールドは、GFRP 製円筒型のサポートポスト(TTF と同仕様、INFN 製)2 基によって吊られている。また、KEK においても同型のサポートポストを製作されており、今後使用される予定である。

### 2.3 組立

各機器の工場製作後、KEK の STF 棟で、全体組立を行った。図 3(a)は左から、組立前の断熱真空容器、輻射シールド、コールドマスである。断熱真空容器に挿入されるコールドマスは、門型治具に吊った状態で組み立てる。まず GRP を門型治具に吊り、この段階でビーム軸方向に 2mm 以下、ビーム軸垂直方向に 0.1mm 以下の精度で位置決めを行う。その後、冷却配管類、空洞、計測素子等を取付ける。

組立てたコールドマスは、断熱真空容器内に挿入し、STF 棟地下トンネルへ搬入・設置する。地下トンネル内では、冷媒配管の連結部・端部溶接、計測線処置、シールド板の取り付けを行った。図 3(b)に設置状況を示す。完成したクライオスタットを 2K 超流動ヘリウム供給システム<sup>15)</sup>に接続し、クライオスタットおよび空洞の各種性能試験が実施された。



(a)クライオスタット各機器 (b)設置状況  
図 3 : クライオスタットの各機器と設置の状況

### 3. S1-Global クライオモジュール組立

S1-Global 計画は日米欧の国際協力実験であり、将来の ILC に向けて各機器の仕様の比較検討および Plug-compatible な機器の設計を推進することを目的としている。

S1-Global は各国の協力により加速空洞 8 体とクライオスタット 2 台が組み合わされ、KEK で全体組立が行われ、弊社は設計および組立に協力した<sup>16)</sup>。

実験は 2010 年度に実施され、異なる国で製作されたクライオスタットの連結方法の検討、各国の加速空洞およびクライオスタットの比較・検討が行われている。

### 3. 1.3GHz 9 セル空洞の製作

2009 年より KEK との共同研究により空洞開発を開始した<sup>17)18)</sup>。開発を行っている加速空洞は Baseline 空洞を基本としている。試作 1 号機では空洞製作技術の確立を目的として開発しており、HOM(Higher Order Mode)カプラを取り付けない簡易形状とした。ここで HOM カプラは加速電子によって空洞内に励起される高次モードを取り除く役割を持つ。

9 セル空洞の概略を図 4 に示す。加速空洞は 9 個のセルが連なっており、その両端にビームパイプ、フランジ、および空洞ジャケットを取り付けるベースプレートが配置されている。各セルのアイリス部(くびれ部)にはスティフナー(強め輪)が取り付けられ、機械的強度を補償している。

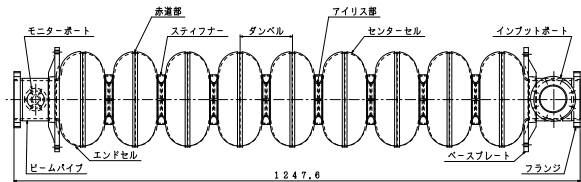


図 4 : 9セル超伝導加速空洞概略図

空洞本体の材料はニオブ(RRR~300)で、フランジは強度を考慮しニオブチタン、ベースプレートはチタンを用いている。

空洞の開発項目としては、1)非鉄金属の塑性加工・機械加工技術、2)電子ビーム溶接(EBW)、3)化学研磨(CP)、4)バーリング加工技術、5)治具の設計・製作技術、6)管理技術(清浄度・環境)とし、各項目について試作等検討・技術確立を行った。治具の設計・製作を例に挙げると、セルの多連化溶接の際、芯出しが確保できるような構造にする、溶接部の熱収縮を考慮したバネアクションをつける等を行っている。

空洞の製作工程概要は

- (1)センターセル深絞り、トリム加工
- (2)アイリス部溶接
- (3)9セル化(EBW)
- (4)エンドセルの深絞り・トリム加工
- (5)ベースプレートの製作
- (6)ビームパイプの製作
- (7)エンドセル、ベースプレート、ビームパイプの溶接
- (8)センターセルとエンド Gr の溶接となる。

試作 1 号機は 2009 年 3 月より開発を開始し、2010 年 4 月に完成した。完成した空洞の外観を図 5 に示す。

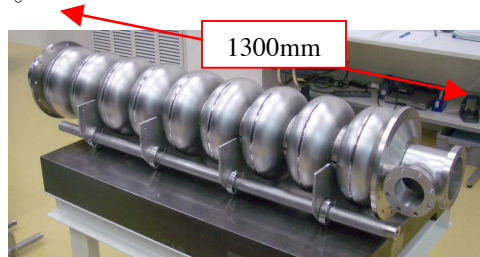


図 5 : 1.3GHz 9セル空洞試作 1 号機

空洞完成後の2010年5月から6月まで、KEKにて表面処理と性能試験を実施した<sup>9)</sup>。超伝導空洞の性能はQ-Eカーブという特性で評価を行う。Qは空洞の無負荷Q値で、Eは空洞の加速電界を表わす。測定の結果、最大加速電界( $E_{acc}$ )35.2MV/m、その時のQ値( $Q_0$ ) $6.5 \times 10^9$ となり、加速電界についてはILCの仕様(35MV/m)を満足することができた(図6)。

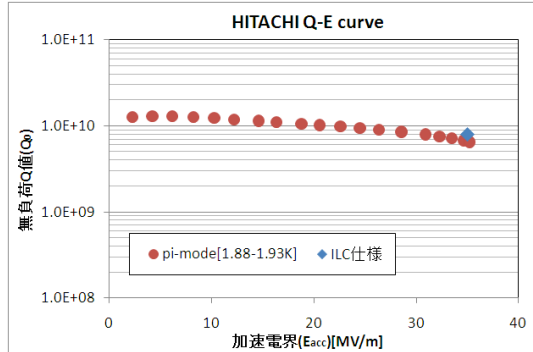


図6：試作1号機のQ-Eカーブ

試作1号機の製作経験を基に、2011年1月よりHOMカプラ付きの試作2号機の開発・製作を開始した。試作2号機では、1)製作技術の再現性確認、2)EB技術の改善、3)HOMカプラの製作技術確立を目的とし、現在開発を進めている。

以下、一例として2)EB技術の改善について示す。赤道部の内面ビードの滑らかさは、最も重要であると考えられるため、試作2号機ではより平坦なビードを得るため、EB条件の改善を行った。その結果、試作2号機の内面溶接ビードの高さが0.04mmとなり、試作1号機(0.17mm)より約76%低い平坦なビードを得た。

## 6. 超伝導四極電磁石の製作

ILCのクライオモジュールに設置される超伝導四極電磁石についても、各国で試作・検討がすすめられている<sup>10)</sup>。弊社も2010年に、ILC仕様を模擬した超伝導四極電磁石を試作した。

電磁石の特徴としては、8本の超伝導線材をリボン状に編み、この線材をダブルパンケーキ巻きすることで巻線作業の効率化を試みた。コイルエンドで各々の導体を半田接続し、ソレノイド巻線を構成した。電磁石の仕様をまとめると、表2のようになる。

表2：超伝導四極電磁石の仕様

項目	単位	仕様
線材	-	8本導体リボン線材
コイル形状	-	レーストラック
巻線方法	-	ダブルパンケーキ
磁石型式	-	Superferric
鉄心長	mm	500
最大磁場勾配	T/m	60(最大)
磁場領域	mm	$\phi$ 95.2
有効磁場領域	mm	$\phi$ 20

製作は2010年に行い、2011年よりKEKによって冷却励磁試験が行われている。製作した電磁石の外観を図7に示す。

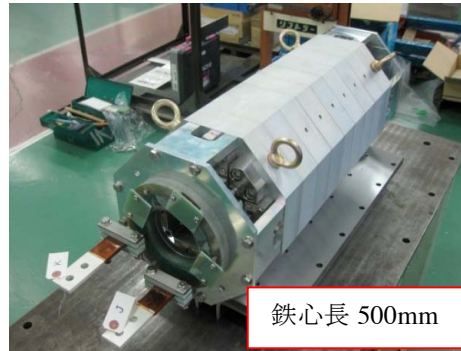


図7：ILC仕様を模擬した超伝導四極電磁石

## 7. まとめ

2005年度よりKEKで進められているSTF計画に参加している。

クライオスタットの製作においては、STF Phase-1、S1-Global、等とSTF計画の各フェーズにおいて製作に携わっている。9セル空洞については2009年度より開発を始め、2010年に試作1号機を完成させ、現在試作2号機を開発している。また、2010年にはILC仕様を模擬した四極電磁石を試作し、KEKの冷却励磁試験に供された。今後もILCに向け着実にR&Dを継続していく。

## 謝辞

本R&Dへの取組みに際して終始厚くご指導をいただきました高エネルギー加速器研究機構、土屋清澄教授、山本明教授、STFグループ、機械工学センター、ILC推進室、ほか関係各位に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] T. Semba et al., "Recent Activities in ILC R&D at HITACHI", EPAC'08, Genoa, pp.457-459.
- [2] STF Phase-1 Activity Report, KEK Report 2009-3.
- [3] K. Tsuchiya, et al., "Cryomodule Development for Superconducting RF Test Facility (STF) at KEK", EPAC'06, Edinburgh, pp.505-507.
- [4] C. Pagani et al., "The TESLA Cryogenic Accelerator Modules", TESLA Report 2001-36.
- [5] J. Yoshida et al., "Development of STF Cryogenic System in KEK", PAC'07, Albuquerque, pp.2701-2703.
- [6] N. Ohuchi et al., "Construction of the S1-Global Cryomodules for ILC", IPAC'10, Kyoto, pp.3356-3358.
- [7] T. Watanuki et al., "日立製作所における9セル超伝導加速空洞の開発", THPS027, 第7回加速器学会年会.
- [8] T. Watanuki, et al., "Status of the 9-cell Superconducting cavity R&D for ILC at HITACHI", SRF2011, Chicago, USA (2011)
- [9] Y. Yamamoto, et al., "Recent Results of 1.3 GHz 9-cell superconducting Cavities in KEK-STF", LINAC10, Tsukuba, Japan (2010).
- [10] Vladimir S. Kashikhin et al., "Design and Manufacturing Main Linac Superconducting Quadrupole for ILC at Fermilab", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.18, No.2, PP.155-158, (June 2008)