

SRF ACTIVITIES FOR ILC AT MHI

H.Hitomi^{A)}, K.Sennyu^{A)}, H.Hara^{A)}, T.Yanagisawa^{A)}, K.Kanaoka^{A)}, M.Matsuoka^{B)}

^{A)} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, Kobe, Hyogo, 652-8585, Japan

^{B)} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, Tokyo, 108-8215, Japan

Abstract

MHI has supplied 1.3GHz superconducting cavities for the ERL (Energy Recovery Linac) project and the ILC R&D project (STF: Superconducting RF Test Facility in KEK) to KEK in Japan for the last few years. We are improving the technology to design and fabricate the superconducting cavities for ILC R&D step by step. We designed and fabricated nine STF-Baseline 9-cell cavities. We have improved the quality and productivity of the SRF activities for ILC. The status of superconducting cavity development for ILC at MHI is described in this paper.

三菱重工業における ILC に向けた超伝導加速空洞の開発状況

1. はじめに

STF(Super conducting RF Test Facility)とは、KEK に建設中の国際リニアコライダー (ILC) 向け超伝導加速空洞試験設備である。

当社はこれまで STF 用に 9 台の超伝導加速空洞を製作した。4 台はクライオモジュールに組み込まれ KEK においてテストを終えている^[1]。残りの 5 台は現在 KEK において表面処理と縦測定が行なわれている^[2]。

2. 当社の超伝導加速空洞の製作実績

表 1 に示すように、当社はこれまで様々な超伝導加速空洞を製作してきた。ここ数年は 1.3 GHz 超伝導加速空洞を製作し、多くの技術とノウハウを蓄積してきた。

表 1 当社が製作した超伝導加速空洞一覧 (1977~)

Project	Customer	Production year	Frequency (MHz)	Cell-number	Quantity	Operating temperature (K)	E _{acc} max at vertical test (MV/m)	Q ₀ at operating (final) E _{acc}
TRISTAN	KEK	1977-1989	508	5	38	4	6 to 12	2 × 10 ⁹
L-band R&D	KEK	1991-1998	1300	9	1	2	12	3 × 10 ⁹
	-			3	1		24.4	8.4 × 10 ⁹
	KEK/-			1	4		12 to 30	4 × 10 ⁹
	-			1	1		24.5	3 × 10 ⁹
KEKB R&D	-	1993-1994	508	1	1	4	14.4	9 × 10 ⁹
Crab	KEK	2004-2006	508	1	2	4	28.1 to 42 (E _{peak})	1.5 × 10 ⁹
ADS R&D	JAEA	2002-2004	972	9	2	2	10.5 to 11.1	1.5 × 10 ¹⁰
STF Phase1	KEK	2005	1300	9	4	2	20.2 to 28.4	2 × 10 ⁹
ERL R&D	KEK	2006	1300	1	2	2	31	9 × 10 ⁹
		2007		9	1		15	2 × 10 ⁹
		2007		2	1		30.1	4.8 × 10 ⁹
		2008		2	1		under testing	
STF Phase1.5	KEK	2007	1300	9	2	2	27	6 × 10 ⁹
		2008		3	under testing			

3. STF1.0 空洞の特徴

開発課題

STF1.0 空洞の開発課題は、ローレンツディチューニングを低減することであった。そこで、チューナ

機構を含めた高剛性のジャケットシステムを設計・製作した^[3]。

結果

空洞は KEK による縦測定の結果、1 台は E_{acc}=29 MV/m を達成し、ほかの 3 台は E_{acc}=20 MeV/m であった^[4]。また、高剛性のジャケットとチューナシステムによりローレンツディチューニングを低減できることが実証された^{[5][6]}。

4. STF1.5A 空洞の特徴

開発課題

STF1.5A 空洞の開発課題は、STF1.0 空洞よりも空洞性能を向上させることであった。空洞性能を向上させるため、溶接開先の清浄化と溶接後の内面ビードがより平滑になる様に溶接条件の改善を行なった^[7]。

結果

一回目の表面処理と縦測定において STF1.0 空洞と比較した結果、空洞性能の向上 (加速電界 E_{acc}) が見られた。結果を図 1 に示す。現在、これらの空洞は KEK において更なる表面処理と縦測定が行なわれている。

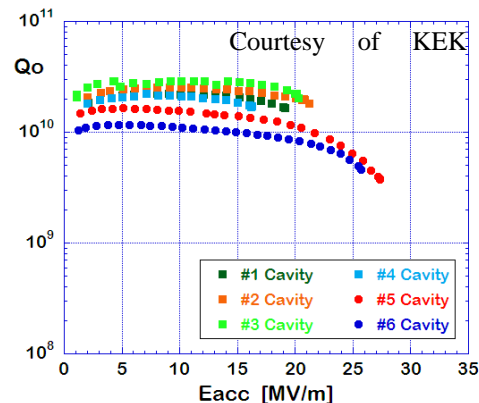


図 1 : KEK による一回目の縦測定における STF1.5A 空洞(#5,#6)と STF1.0 空洞(#1-#4)の Q-E 曲線の比較。

5. STF1.5B 空洞の特徴

開発課題

STF1.5B 空洞の開発課題は、STF1.5A 空洞よりも空洞性能とエンドグループ（空洞の両端に位置する HOM カプラ，ベースプレート，フランジ等の総称）の生産性を向上させることであった。空洞セル赤道部の Nb 板の厚み分布に依らず滑らかな溶接ビードとなる様にさらに溶接条件を改善して空洞性能の向上を図った。また、エンドグループの一部を成型加工で製作することにより生産性の向上を図った。

結果

現在、これらの空洞は KEK において CCD カメラによる光学検査，及び表面処理と縦測定が行なわれている^[8]。縦測定終了後、横測定のためにチタンジャケットを装着する予定である。

エンドグループ製作の詳細を以下に示す。

- **HOM カプラ**：HOM カプラ内導体のデザインを簡素化し、Stub の厚みをアンテナと同じ厚みへと変更した（図 2）。また、外導体は機械加工により削り出す方法から、Nb 板材を深絞り加工して成形する方法に変更した（図 3）。



図 2：HOM カプラ内導体。STF1.5A（左），STF1.5B（右）。



図 3：HOM カプラ外導体。STF1.5A（左），STF1.5B（右）。

- **ビームパイプ**：板圧 5 mm 以上のビームパイプは母材から機械加工により削り出す方法から、Nb 板材を深絞りとつば出し加工により成形する方法に変更した（図 4）。



図 4 ビームパイプ。STF1.5A（左），STF1.5B（右）。

- **インポートポート**：インポートポートはビームパイプを機械加工する方法に替えて、Nb 板材を深絞り加工して成形する方法に変更した。インポートポートはインポートカプラの自重を支えるため約 3 mm の厚みが必要となる。
- **ベースプレート**：ベースプレートは Ti 鍛造材を機械加工する方法に替えて、厚さ 20mm の Ti 板材をプレス加工して成形する方法に変更した。
- **NbTi フランジ**：STF 空洞は 6 つの NbTi 製のフランジを持った構造である。これらのフランジの突合せ溶接箇所を変更した（図 5）。新デザインのフランジは電解研磨時に薬液を密閉し易い点で有利であるが、一方で機械強度という点で不利がある。よって、フランジにはより深い溶け込みの溶接を施すか、または表側と同様に裏側からの溶接を実施する、若しくは Nb 製のビームパイプの厚みを上げる等の変更が必要となる。

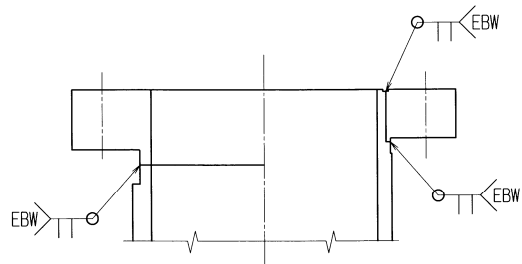


図 5：NbTi 製フランジの溶接箇所変更。中心線から左側が STF1.5A，右側が STF1.5B の溶接箇所を示す。

6. STF1.5B 空洞から STF1.5C 空洞，STF2.0 空洞への改善点

安定した空洞性能を発揮させることに成功した後は、空洞の更なる生産性向上と国内における高圧ガス保安法に適應した製品を製作する必要がある。

STF1.5C 空洞 (FOR S0 PROGRAM)

電子ビーム溶接 (EBW) の溶接前組立て時間を減らす為に、ヨーロッパで製作されている空洞と同様に溶接開先をステップ状に加工して組み立てて溶接する方法を採用予定である。溶接条件の改善により板厚の分布に依らず滑らかで安定な溶接ビードが再現出来るため、ヨーロッパの空洞と異なり開先内面の面取りは不要である。

STF2.0 空洞

国内では超伝導空洞運転に対して高圧ガス保安法が適用される。当社では、今後の STF の運転に向けて如何にして法規に適用した空洞を設計し、その品質を検査するかということ KEK と共同で検討中である。

7. ILC に向けた R&D

製造における様々な観点から ILC 計画実現のためには多くの研究開発が必要であると考えられる。

溶接方法

空洞量産化のために溶接時間の短縮が必要となる。以下に量産化に向けた検討例を示す。

LBW(Laser Beam Welding)

- 空洞性能への影響が少ないスティフナーとハーフセル及びフランジとビームパイプの溶接を EBW に替えて LBW により接合する技術を開発している。現在スティフナーや NbTi 製フランジ等の基礎的な溶接試験を進めている。LBW は溶接後の冷却時間が EBW より短く、溶接治具の簡略化も図れ、組立て時間の短縮が可能である。また、設備のコストも優れている。

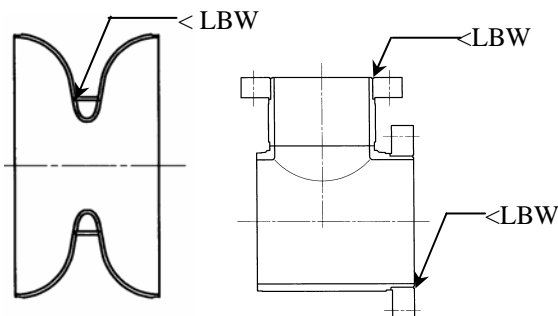


図 7: ILC に向けた LBW 検討箇所。スティフナーとハーフセルの溶接 (左), ビームパイプとフランジの溶接 (右)

検査・仕上げ

量産化の為に、検査や仕上げに費やす時間の短縮も考える必要があり、以下に示す項目について現在検討中である。

- **検査**: 品質と安全を確保した上で検査時間を短縮する為に、検査項目・検査頻度・検査基準の見直しを行なっている。
- **仕上げ**: 空洞内表面の小さな窪みや傷を取り除くには多くの労力が必要であるが、どれほどの大きさのものを除去するかという基準が不明瞭である。このため、基準の明確化と、自動化の検討を行なっている。

8.まとめ

- 当社は KEK における STF や ERL の計画において 1.3 GHz 超伝導加速空洞を KEK と共同で設計・製作し、製作技術を向上してきた。
- STF1.0 空洞において、周波数チューナを備えた高剛性のジャケットシステムを製作し、ローレンツディチューニングを低減した。
- STF1.0 空洞より空洞性能の優れた STF1.5 空洞を 5 台製作した。これらは現在 KEK において更なる縦測定を行なっている。
- 当社は ILC R&D として生産性向上のアイデアを KEK に提案するとともに、高圧ガス保安法に対する申請の準備を行なっている。
- 当社は ILC に向けた生産性向上のひとつとして、空洞の性能に影響が少ない箇所の溶接を EBW から LBW へと変更することを検討中である。

9.謝辞

本稿を作成するに当たり KEK の野口修一氏、加古永治氏、山本康史氏、宍戸寿郎氏、渡辺謙氏をはじめ多くの方々にご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] E. Kako, et al., "Cryomodule Tests of Four Tesla-like Cavities in the STF Phase-1.0 for ILC", PAC09, Vancouver, Canada, (2009), TU3RAI04
- [2] Y. Yamamoto, et al., "Recent Results of the Vertical Test for 1.3GHz Superconducting 9-cell Cavities at KEK-STF", PAC09, Vancouver, Canada, (2009), TU5PFP074
- [3] K. Sennyu, et al., "Design and Fabrication of Superconducting Cavities for Industrialization", 13th SRF2007, Beijing, China, (2007), WEP48
- [4] E. Kako, et al., "Vertical Test Results STF Baseline 9-cell Cavities at KEK", 13th SRF2007, Beijing, China, (2007) WEP10
- [5] S. Noguchi, et al., "Review of New Tuner Design", 13th SRF2007, Beijing, China, (2007) WE303
- [6] Y. Yamamoto, et al., "Observation and Numerical Calculation of Lorentz-Detuning for the Cryo-module Test of STF Baseline Cavities at KEK-STF", PAC09, Vancouver, Canada, (2009), TU5PFP075
- [7] K. Sennyu, et al., "Status of the Superconducting Cavity Development for ILC at MHI", 12th EPAC'08, Genoa, Italy, (2008), MOPD009
- [8] K. Watanabe, et al., "Recent Results of the Cavity Inspection for the Superconducting Cavities at KEK-STF", PAC09, Vancouver, Canada, (2009), TU5PFP073