

STATUS OF SRF DEVELOPEMENT AT MHI

K. Sennyu, H. Hitomi, K. Kanaoka, T. Yanagisawa, H. Hara
 Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Kobe, Hyogo, 652-8585, Japan

Abstract

MHI has supplied 1.3GHz superconducting cavities for the Energy Recovery Linac (ERL) project and the International Linear Collider (ILC) R&D project (STF: Superconducting RF Test Facility in KEK) to KEK in Japan for several years. [1] We are improving the technology to design and fabricate the superconducting cavities for ILC R&D step by step. The status of superconducting cavity development for ILC at MHI is described in this paper.

三菱重工における超伝導空洞の開発状況

1. はじめに

当社はこれまで、STF計画やERL計画向けの1.3GHz超伝導空洞を製作し、超伝導空洞製作の為に多くの技術とノウハウを蓄積してきた。表1に一覧を示す。

最近、STF Phase 1.5向けの超伝導空洞5台の性能計測（縦測定）が行なわれた。図1に結果を示す[2][3]。これら5台の空洞は、STF Phase 1.0空洞よりも性能向上を目指し、溶接条件を向上させている[4]。また、空洞性能を引き出す為、KEKによる各種表面処理の向上も行われている[5][6]。

性能計測の結果、ILC用空洞の仕様である $E_{acc} = 31.5MV/m$ に到達する空洞が現れ始め、当社の空洞製造技術に問題がない事が示された。

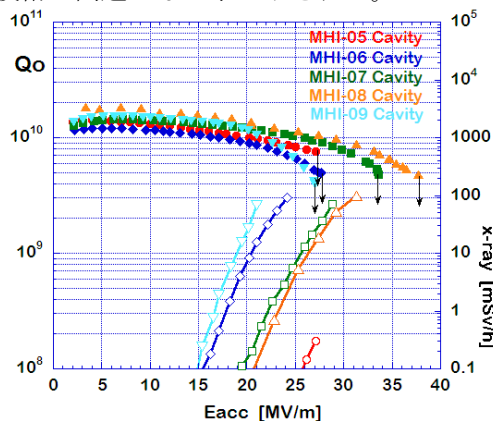


図1：最近の縦測定の結果（MHI-#5～#9）。

Courtesy of KEK.

2. ILC計画に向けた当社の取り組み状況

当社は、現在、高圧ガス保安法に適用したSTF Phase 2.0 向けの超伝導空洞を新たに11台製作中である。同時に、空洞の性能を維持したまま、空洞の生産性向上を検討しており、社内R&Dを行い、生産性向上に向けた製造技術の開発と、実機への適用可否を検証している。

表1：MHIにおける1.3GHz超伝導空洞の製造実績。

Project	Customer	Production year	Cell-number	Quantity	E_{acc} max at vertical test (MV/m)	Q_0 at operating (final) E_{acc}	Remarks
STF Phase1		2005	9	4	20.2 to 29.4	2×10^9	
		2006	1	2	31	9×10^9	
ERL R&D	KEK	2007	9	1	15	2×10^9	
		2007	2	1	43.7	3.4×10^9	w/o HOM pick up antenna
		2008	2	1	40.9	3.3×10^9	
		2009	9	1	before testing		
		2007		2	31.1	7.5×10^9	
STF Phase1.5		2008	9	3	37.7	4.8×10^9	
		2009		2	under testing		
		2010		11	under manufacturing		
STF Phase2			9				
ILC R&D	MHI	2009		1	before testing		

3. 新規工法を用いた試作空洞の製作

当社では、生産性向上に向けて開発した新規工法の一部を試作空洞（MHI-#A号機）に適用し、製作実証を行った。MHI-#A号機はH22.3月に完成し、現在KEKと共同で性能評価を実施している。

MHI-#A号機に適用した主な新規工法は、以下の2つである。1つは、深絞り成形を用いたHOMカプラ外導体の製造方法である。もう1つは、Laser Beam Welding (LBW)を用いた空洞構成部品の接合技術である。以下に、それぞれの工法の詳細を示す。



図2：MHI-#A号機

3.1 HOMカプラ外導体の製造工程簡略化

HOMカプラ外導体は、機械加工だけの製造方法に替えて、成形加工を取り入れた製造方法とした。厚さ3mmのニオブ板をコップ状に深絞り成形した後、ポート部をバルジ加工により成形した。今回、機械加工による切削は、外面の仕上げ加工のみとし、HOMカプラ外導体の内面は、深絞り成形後の表面をそのまま使用した。また、ノッチ周波数調整用の上部突起部は別途製作し、接合した(図3)。

HOMカプラ外導体の内面は手入れ不要であり、材料の削減と切削工数を削減することが可能となった。

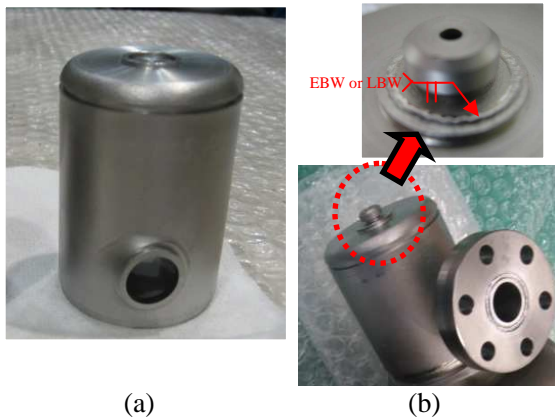


図3 : (a) 外面の仕上げ加工後、(b) 突起部の溶接

3.2 LBWの適用

ダンベルと強め輪の接合及びビームパイプとフランジの接合にLBWを採用した。LBWは、Electron Beam Welding (EBW)に比べて、冷却時間が短く、真空雰囲気が必要としない為、施工時間を短縮することが出来る。

EBWと同程度の溶接ビードが再現できた為、実機への展開は可能と判断している。ただし、MHI-#A号機の性能評価(縦測定)により、LBW施工部分が超伝導性能に影響を及ぼさないかを検証する必要がある。

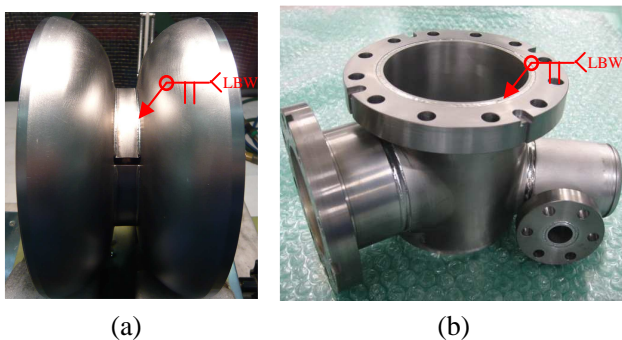


図4 : (a) 強め輪とダンベルの溶接、(b) ビームパイプとフランジの溶接

3.3 シームレスダンベル成形技術の開発状況

当社では、上述のMHI-#A号機の製作と並行してシームレスダンベルの成形技術の開発も行った。

従来のダンベルは、お椀型に成形したハーフセルの小口径同士(アイリス部)を接合して得られる。(図5(a)、(b))。これに替えて、シームレスパイプをスピニング成形し、一体型のシームレスダンベルを成形する方法を開発中である(図5(c)、(d))。

前回報告時には、シームレスダンベルの仕上がり状態(アイリス部内面)が、製品に適用出来るレベルではなかった[7]。今回、シームレスダンベル素材の内面品質に着目し、深絞り成形により内面品質を向上させたシームレスパイプを製作して、シームレスダンベルの成形を行った。

その結果、シームレスダンベルの内面品質が向上し、空洞に適用可能なレベルに到達した。(図6(a)、(b))。

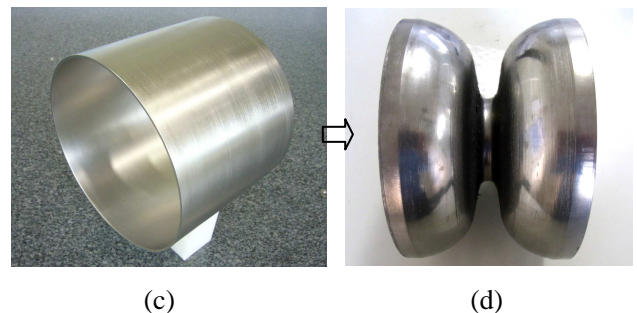
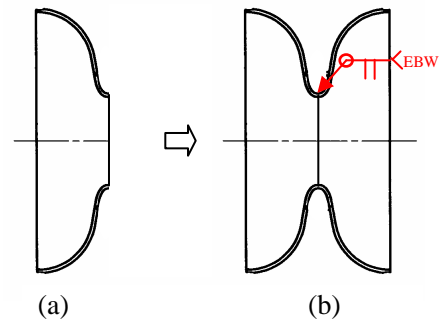


図5 : (a) ハーフセル、(b) ダンベル、(c) シームレスパイプ、(d) シームレスパイプから得たダンベル

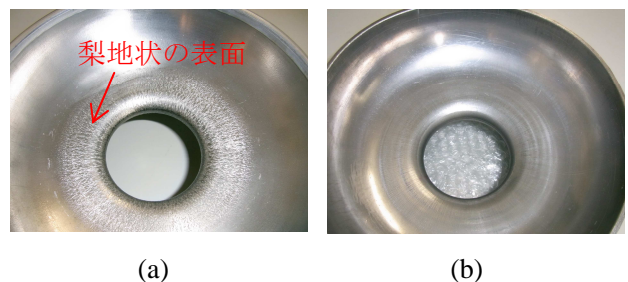


図6 : シームレスダンベルの内面比較、(a) スピニング成形で得た素材を使用し、成形したダンベル[7]、(b) 深絞り成形で得た素材を使用し、成形したダンベル(今回)

4. MHI-#A号機の現状

完成したMHI-#A号機は、H22年10月末にKEKで1回目の縦測定を実施予定である。現在、MHI-#A号機は、KEK内で縦測定前の各種処理が行われている。以下に現状を報告する。

4.1 溶接ビードの形状計測

MHI-#A号機は、3.1項、3.2項に記載した新規工法を採用しただけでなく、赤道部及びアイリス部の溶接内面ビードの向上を行い、従来のSTF空洞（～MHI-#11号機）に比べ更に滑らかな内面ビードを目指した。

今回、MHI-#A号機の内面ビードのレプリカを取得し、従来のもの（MHI-#8号機）と比較を行った。ビード形状の計測結果を図7に示す。MHI-#A号機のビード高さは0.15mm程度であり、従来よりもビードが更に滑らかになっていることが確認出来た。

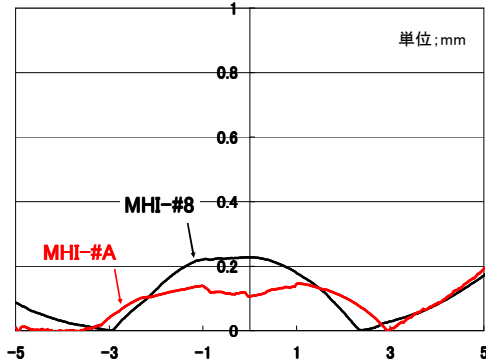


図7:セル溶接内面ビード形状の比較

4.2 内面検査

MHI-#A号機は、受入れ後の検査（KEKの京大カメラによる内面検査）を終えた。内面検査は、セルの赤道部及びアイリス部の溶接ビードと溶接ビード近傍（熱影響部）について行った。

その結果、ピットの疑いのあるものがビード上の数箇所確認された。代表的なものを図8に示す。今回確認されたピットの疑いがあるものは、直径0.2mm以下のものであり、いずれも溶接ビード上に存在した。また、受入れ検査時に、ピット状のものが確認されたのは今回初めてである。

しかし、粉塵や汚れの可能性もあり、現段階での判断は困難である。また、今後の電界研磨等により除去される可能性もある為、今後の経過を追う。

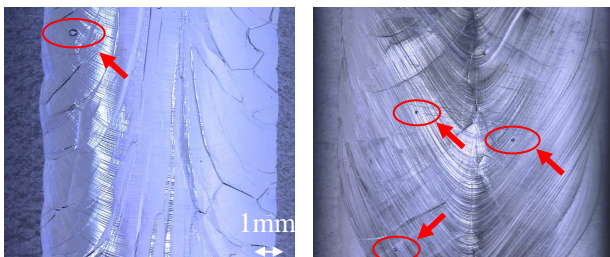


図8:(a) 1セル赤道部 (b) 1-2セルアイリス部

5. まとめと今後

- 当社はKEKにおけるSTF計画やERL計画向けの1.3GHz超伝導空洞を製作し、ILC計画に向けて多くの技術とノウハウを蓄積してきた。
- 現在、国内の高圧ガス保安法に適用したSTF Phase2.0計画用空洞（MHI-#12～#22号機）を新たに製作中である。
- 当社は、空洞の生産性向上に向けた新規工法を開発し、試作空洞（MHI-#A号機）により製作実証を行った。MHI-#A号機は、H22年3月末に完成した。
- 試作空洞に適用した新規工法だけでなく、シームレスダンベルの開発にも取り組んでおり、空洞に適用可能なレベルに達した。
- MHI-#A号機はKEKにおいて性能計測を実施する為、縦測定前の各種処理を実施しており、最初の電界研磨（EP1）前の作業迄完了している。
- MHI-#A号機の性能評価の結果、新規工法の使用が性能上問題無いことが確認された後、製品への適用を開始したい。

6. 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] K. Sennyu, et al., “Design and Fabrication of Superconducting Cavities for Industrialization”, 13th SRF2007, Beijing, China, (2007), WEP48
- [2] E. Kako, et al., “Recent Vertical Test Results of KEK Cavities”, ILC10, Beijing, China (2010)
- [3] Y. Yamamoto, et.al., “Summary of Vertical Tests for S1-Global Project in KEK-STF”, IPAC’10, Kyoto, Japan (2010)
- [4] E. Kako, et al., “Cryomodule Tests of Four Tesla-like Cavities in the STF Phase-1.0 for ILC”, PAC09, Vancouver, Canada, (2009), TU3RAI04
- [5] K. Watanabe, et al., “Techniques of Superconducting Cavity for Improvement Cavity Performance at KEK-STF”, IPAC’10, Kyoto, Japan (2010)
- [6] E. Kako, et al., “Preparation Status of Cryomodule Tests of Tesla-like Cavities in S1-Global Project at KEK”, IPAC’10, Kyoto, Japan (2010)
- [7] K. Sennyu, et al., “Status of the Superconducting Cavity Development for ILC at MHI”, 12th EPAC’08, Genoa, Italy, (2008), MOPD009