

DEVELOPMENT OF THE 9-CELL SUPERCONDUCTING CAVITY FOR ILC AT HITACHI

T. Watanuki^{1,A)}, M. Watanabe^{A)}, S. Taniyama^{A)}, T. Semba^{A)},
S. Noguchi^{B)}, E. Kako^{B)}, H. Hayano^{B)}, T. Saeki^{B)}, T. Shishido^{B)}, K. Watanabe^{B)}, Y. Yamamoto^{B)}
A) Hitachi, Ltd.

3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi, Ibaraki, 317-8511

B) High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

HITACHI is developing 9-cell superconducting cavity for ILC (International Linear Collider) project. We focus on the electron beam welding (EBW) techniques and plastic forming techniques, engineering of jig and so on. Performance tests (Vertical test) and surface treatments of the superconducting cavity were done at KEK and the accelerating gradient reached 35.2MV/m. The status of superconducting cavity development for ILC at HITACHI is described in this paper.

日立製作所における9セル超伝導加速空洞の開発

1. はじめに

ILC(International Linear Collider)計画に向けて国際的にR&Dが進められている。日立ではILC計画に対して、クライオスタット開発と超伝導加速空洞開発に参画している。クライオスタット開発では9セル空洞の開発試験設備であるSTF(Superconducting RF Test Facility)計画¹⁾に参画し、クライオモジュールの製作²⁾、組立、据付を行っている。本論文では後者の超伝導加速空洞開発について述べる。

日立はKEKとの共同研究で超伝導加速空洞の製作技術開発を行っている。超伝導加速空洞の製作技術には、非鉄金属の塑性加工技術や電子ビーム溶接技術、バーリング加工技術等が挙げられる。また、空洞製作には空洞特有の管理技術が要求され、塑性加工時の傷管理や溶接時の清浄度管理等が必要となる。

本開発の目的は1)空洞製作から性能試験までの一連の流れを経験し、空洞製造の基礎技術を獲得すること、2)各製造技術の問題点・課題点を明らかにすること、にある。空洞開発の概要と性能試験結果について以下報告する。

2. 開発空洞形状

本開発空洞の概略形状を図1に示す。9個のセルと両端のビームパイプ、フランジ、空洞ジャケットを取り付けるベースプレートで構成される。セルのアイリス部(くびれ部)には機械的強度を補償するためにスティフナーという強め輪を用いる。セル形状はSTFベースライン9セル空洞を採用した。本開発では空洞の製作性確認と性能評価に十分な形状として、端部のエンドグループにはHOM(Higher Order Mode)カプラは取り付けず、ベースプレートは必要最小限の厚さにする等の簡易形状とした。こ

こでHOMカプラとは加速電子によって空洞内に励起される高次モードを空洞外に取り出すための装置である。

空洞本体の材料はニオブで、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である。空洞本体は全部品が電子ビーム溶接で接合される溶接構造体であるため、溶接手順や溶接姿勢、溶接治具に注意が必要である。本開発空洞の主な仕様を表1に示す。

空洞開発における開発項目は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)治工具設計・製作技術、6)管理技術(清浄度管理/環境管理)とした。

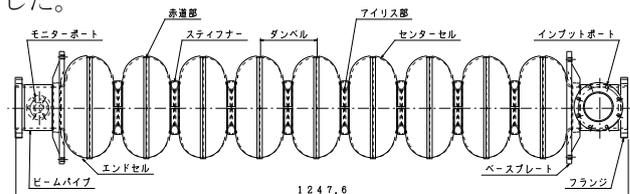


図1: 本開発での9セル超伝導加速空洞

表1: 本開発空洞の基本仕様

項目	単位	仕様
材料	-	Nb(RRR300)
全長	mm	1247.6
赤道径	mm	205
アイリス径	mm	70

3. 空洞開発概要

¹ E-mail: takamichi.watanuki.sd@hitachi.com

3.1 要素試作

本開発では各開発項目に対し要素試作を行い、開発を進めた。本論文では 1)プレス加工、2)EBW について示す。

1)プレス加工

空洞セルは 1 枚の円盤板(板厚 2.8mm)からプレス加工で成形する。円盤板には中心に下穴を開け、プレス後に設計アイリス寸法が確保できるように、中心穴径を決める必要がある。プレス試作は材料の入手性を考慮し、ニオブでのプレスに先立ち、銅板でプレスを実施した。銅板はニオブとの伸び(Elongation)を合わせるため、アニールした材料を使用した。プレス時の潤滑油は非塩素系プレス加工専用油を使用した。

試作において検討した項目は、プレス圧、プレス速度、潤滑油種、円盤中心穴径である。各条件を数パターン振り、3 次元測定にて設計形状と比較照合を行い、プレス条件の妥当性を評価した。

プレス加工の作業は①プレス治具セット/芯出し、②ニオブ(銅)板セット、③潤滑油塗布、④しわ押さえ治具セット、⑤プレス、⑥しわ押さえ治具取り外し、⑦ニオブ(銅)板取り外しの順で実施した。プレス治具セット/芯出しに時間がかかるが、プレス作業自体は数分の作業である。また、プレス面へのピット等の傷発生を抑制するため、プレス前にゴミ、埃の付着が無いかに注意を払った。

プレス後のハーフセルを図 2 に示す。しわや割れが生じる等の大きな不具合は見られず、表面状態・形状共に良好な結果を得た。



図 2 : プレス後ハーフセル(ニオブ)

2)電子ビーム溶接(EBW)

超伝導空洞は酸化防止のため真空中での溶接が必要であり、且つ高融点(~2700℃)であることから、全部品は電子ビーム溶接(EBW)で接合される。EBW は一般にビーム電流や加速電圧、 ab 値(ワークディスタンスと焦点距離の比)、溶接速度等をパラメータとして、目的とする溶接状態を得るように溶接条件を決定した。

また、EBW 装置は低電圧型(60kV)と高電圧型(150kV)に分けられる。本開発では溶接部位(要求さ

れる溶接ビード)により、装置を使い分けた。

本開発空洞では、セル赤道部やアイリス部、スティフナー部、異材接合(ニオブ-チタン)、傾斜溶接部等、13 種もの EBW 条件が必要である。特に空洞性能に寄与し重要である部位はセル赤道部であり、空洞特有の滑らかな裏波ビードが要求される。以下、赤道部の条件出し内容について示す。

溶接条件出しは、①平板ビードオン・突合せ、②周方向ビードオン・突合せ、③実形状の流れで実施した。上記①にて、目的ビード条件の探索や溶接条件の安定性を検討した。また、上記②にて、電流パターン、溶接縮み量の検討を行った。最後に③にて②までに得られた条件の調整を行った。

試作結果の一例を図 3、図 4 に示す。図 3 は実形状赤道溶接の試作材であり、図 4 は本開発で得られた赤道裏波ビードの典型例である。赤道ビードは全周に亘って図 4 のように均一幅で滑らかなビードが繋がっている。ビード外観形状は KEK での寸法形状評価(ビード幅、高さ寸法)により、実績のある他空洞のビードと同等レベルであるという結果を得た。



図 3 : 赤道溶接の試作材

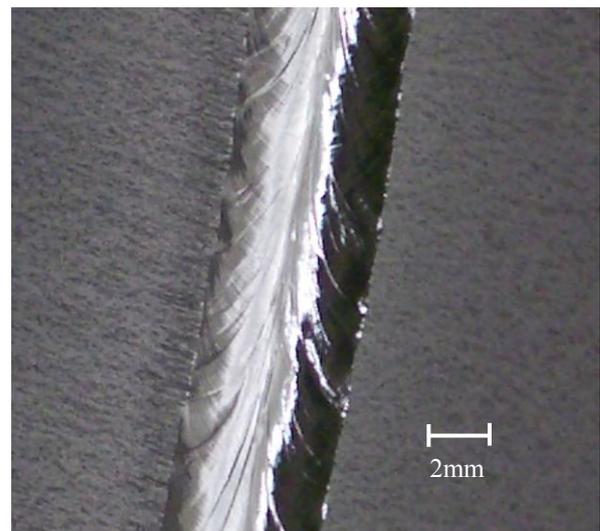


図 4 : 赤道裏波ビード

3.2 試作 1 号機製作

2009 年 3 月から空洞開発を開始し、2010 年 4 月

に試作 1 号機が完成した(図 5)。実機製作において特に留意した点を下記に示す。

- 多連化溶接の際、溶接部の芯が確保できるように治工具の設計・製作を行った。(溶接ビード状態は溶接条件のみでは決まらず、治工具や開先形状に依存する。)
- 溶接後の酸化防止のため、熱電対で溶接部近傍温度を測定し、十分冷却されていることを確認した。(100°C以下^[3]を目安とした。)
- 溶接時の熱縮みを補償できるように、溶接治具にバネアクションを持たせた。

実機製作における隘路事項は、エンドグループを溶接した際(赤道溶接)、ビード幅が通常ビード幅 5mm に比べ、3mm と狭くなったことが挙げられる。これは熱容量の大きいエンドグループを溶接した事による熱逃げが原因と推定している。赤道ビード幅の安定性を確保することが今後の課題である。また、溶接部位により、試作条件と実機製作条件の差が大きかったことが挙げられる。これは実機と試作時のテストピースで熱容量が異なるためと推定している。



図 5：9 セル超伝導加速空洞試作 1 号機

4. 性能試験結果

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。

超伝導空洞は空洞内面が非常に滑らかで清浄に保たれている必要がある。性能試験前には、空洞内面の不純物除去及び、空洞内面を鏡面にするための電解研磨や溶接ビード付近の欠陥探索のための空洞内面検査^[4]、各セル間の電場均一性(field flatness)を確保するためのプリチューニング等、いくつかの工程を経て性能試験を実施した。また、性能試験に際して、空洞性能が制限された理由を確認できるように、空洞各所にカーボン抵抗温度計と X 線モニター用 PIN ダイオードが取り付けられている^[5]。

超伝導空洞の性能は通常、Q-E カーブという特性で評価される。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(Q₀)6.5×10⁹ となり、加速電界としては ILC 仕様 (35MV/m)を満足することができた。但し、本開発空洞は HOM カプラが取り付けしていない形状であることに注意が必要である。

今後の開発で HOM カプラ付きの 9 セル空洞を製作し、本開発空洞との性能比較を行い、HOM カプラ取付の影響を評価する必要がある。また、本開発で確立した製作法の再現性確認も合わせて行う必要がある。

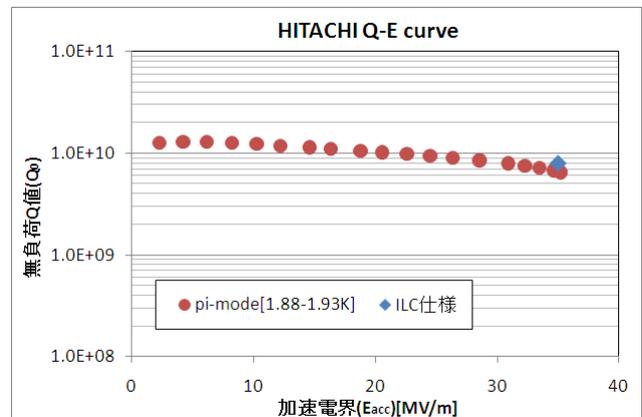


図 6：試作 1 号機の Q-E カーブ

5. まとめ

超伝導加速空洞開発の概要と性能試験結果を概説した。

- 9 セル超伝導加速空洞の製作技術を開発した。空洞製作に必要なプレス加工技術、EBW 技術等一連の基礎技術を得た。
- 空洞製作で特に重要な EBW は、溶接ビードの寸法形状評価と性能試験結果から、実績のある他空洞のビードと同等レベルであるという結果を得た。
- 完成した 9 セル超伝導加速空洞の性能試験を KEK にて実施した。最大加速電界 35.2MV/m、その時の Q 値 6.5×10^9 という結果を得た。

6. 謝辞

本開発を行う上で KEK の山本明氏、KEK 機械工学センターの上野健二氏、安島泰雄氏をはじめ多くの方に、ご指導と貴重なご助言を頂きました。ここに感謝の意を表わします。

参考文献

- [1] STF Phase-1 Activity Report, KEK Report 2009-3.
- [2] T. Semba et al., "Recent Activities in ILC R&D at HITACHI", EPAC'08, Genoa, pp.457-459.
- [3] 佐伯学行 超伝導加速空洞の製作技術と計測技術 KEK-OHO テキスト(2006)
- [4] K. Watanabe et al., "Recent Result of the cavity inspection for the superconducting cavities at KEK-STF", 第 6 回日本加速学会, 原研, 2009.
- [5] 山本康史, "STF における縦測定システム", LC 技術検討会, 2010-6-21.