

STATUS OF THE 9-CELL SUPERCONDUCTING CAVITY DEVELOPMENT AT HITACHI

T. Watanuki^{1,A)}, M. Watanabe^{A)}, T. Semba^{A)}
 Y. Yamamoto^{B)}, K. Watanabe^{B)}, T. Shishido^{B)}, T. Saeki^{B)}, H. Hayano^{B)}, E. Kako^{B)}, S. Noguchi^{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 in collaboration with KEK. Hitachi's first cavity without HOM couplers was completed in April 2010, which achieved an accelerating gradient of 35.2 MV/m in its vertical test at KEK. We have undertaken a second cavity with HOM couplers since January 2011, which completed in February 2012. Performance tests (Vertical tests) and surface treatments of the superconducting cavity were done at KEK and the accelerating gradient reached 40.9MV/m. This paper describes the status of the second cavity briefly.

日立製作所における9セル超伝導加速空洞の開発状況

1. はじめに

ILC(International Linear Collider)計画に向けて国際協力の下、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^[1]と超伝導加速空洞開発に取り組んでいる。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 2009 年より高エネルギー加速器研究機構(KEK)の協力の下、超伝導加速空洞開発に着手し、2010 年 4 月に HOM(Higher Order Mode)カプラ無しの 1 号機が完成した。KEK での表面処理、性能試験の結果、加速電界 35.2MV/m を達成した^[2]。この結果を踏まえ、2011 年 1 月より HOM カプラ付きの 2 号機の開発に着手し、2012 年 2 月に完成、加速電界 40.9MV/m を達成した。

2 号機開発の目的は 1)1 号機で明らかになった製造技術課題を解決する、2)HOM カプラ付き空洞の製造技術を獲得することである。特に前者は最も性能に寄与する赤道溶接の安定化、後者は新規開発品である HOM カプラ製作に注力した。本論文では上記目的に対する開発内容と 2 号機の性能試験結果について報告する。

2. 開発空洞形状

2 号機の概略形状を図 1 に示す。9 個のセルと両端のビームパイプ、空洞ジャケットを取り付けるベースプレート等で構成される。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イフナーという強め輪を用いる。セル形状は 1 号機と同様、STF ベースライン空洞を採用した。また、本開発では 1 号機開発の次ステップとして、端部のエ

ンドグループに HOM(Higher Order Mode)カプラを取り付けた形状とした。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。

空洞本体の材料は高純度ニオブで、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。特に赤道部とアイリス部の溶接品質は空洞性能に寄与するため、空洞開発における重要な開発要素である。その他開発要素として、非鉄金属の塑性加工・機械加工技術や化学研磨処理(CP)技術、バーリング加工技術等が挙げられる。本開発空洞の主な仕様を表 1 に示す。

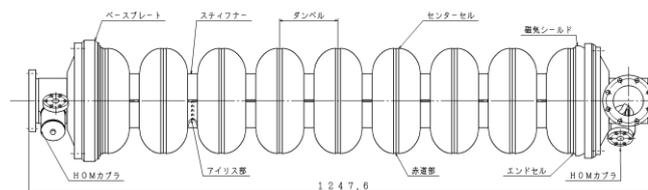


図 1: HOM カプラ付き 9 セル超伝導加速空洞

表 1: 2 号機空洞の基本仕様

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

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

3. 2号機開発内容

2号機開発で特に注力した 1)赤道溶接の安定化、2)HOM カプラ製作の2点について以下報告する。

3.1 赤道溶接の安定化

空洞製作において赤道部の溶接品質は空洞性能に寄与する重要な開発要素である。特に空洞内面側となる裏ビードが重要で、スパッタがないこと、幾何学的に滑らかであることが要求される。1号機開発では KEK のビード形状評価により、実績のある他空洞と同等レベルであることを確認した。1号機性能試験では 35.2MV/m という高加速勾配ではあるが、赤道溶接部欠陥が原因でクエンチしたため、赤道溶接の改善が必要である。そこで 1)1号機で見られた不安定領域(溶接開始・終了部のビード乱れ)の無い溶接条件、2)1号機より滑らかで裏ビード高さの低い溶接条件を得ることを目標に検討試作した。

空洞は酸化防止のため真空中での溶接が必要であり、且つニオブが高融点($\sim 2700^{\circ}\text{C}$)であることから、全部品を電子ビーム溶接(EBW)で接合する。EBWは一般にビーム電流や加速電圧、ab 値(対物距離と焦点距離の比)、溶接速度等をパラメータとし、目的とする溶接状態を得る。本試作においても、上記複数のパラメータを1号機での条件をベースに調整した。EBW 装置は一般に低電圧型(60kV)と高電圧型(150kV)に分けられるが、本試作では前者を使用した。試作は平板ビードオン、実形状試作と段階的に進め、徐々に溶接パラメータを絞る手順とした。

本試作で得られた赤道裏ビードの典型例を図2に示す。比較のため1号機の赤道裏ビードを併記した。KEK で開発した光学カメラによりビードを観察した結果、本試作で得られたビードは全周に亘り均一幅で、不安定部が無いことが確認できた。更に定量的評価を行うため、ビードのレプリカを作成しフォームトレーサによる形状解析を行った。その結果を図3に示す。実績のあるドイツ電子シンクロトン研究所(DESY)で開発された空洞の裏ビード形状も合わせて示した。1号機裏ビードは幅 5.5mm、高さ 0.17mm に対し、2号機では幅 5.9mm、高さ 0.04mm となり、ビード高さを 76%低下させることができた。2号機製作ではこの不安定領域が無く、裏ビード高さの低い溶接条件を赤道部に適用した。

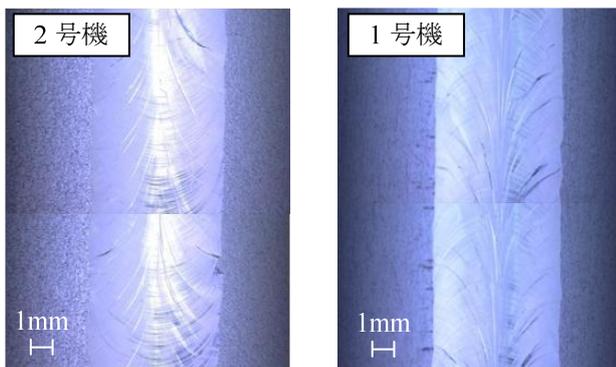


図2: 赤道裏ビード形状比較

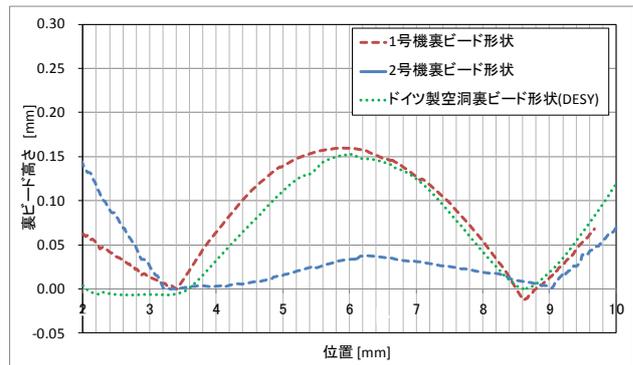


図3: 赤道裏ビード形状比較

3.2 HOM カプラ製作

2号機では空洞両端のビームパイプに HOM カプラと呼ばれる高次モード高周波減衰機構を取り付けた。HOM カプラは基本モード(加速モード)を外部に取り出すことなく、高次モードのみを外部に取り出すノッチ特性を備えている^[1]。

HOM カプラの概略形状を図4に示す。HOM カプラはニオブ材で構成され、内外導体からなる同軸管形状であり全部品を EBW で接合する。製作上の課題は 1)内外導体の EBW、2)ピックアップポート部のバーリングである。前者は単品性能であるノッチ周波数に寄与し、内導体の傾きを抑制した溶接が要求される。後者はパイプ形状から小径で且つ斜め方向にバーリング加工する必要がある。

図5に試作した HOM カプラを示す。溶接後の内導体に傾きは見られず、またピックアップポート部のバーリング部も滑らかに加工できた。両者とも製作条件だけでなく、冶工具の検討が重要である。

表2に KEK で実施した HOM カプラのノッチ周波数測定結果を示す。試作材も含め3つ製作し、バラツキが 5MHz 内と再現良く製作できており、設計ノッチ周波数 1300MHz に対し、調整可能範囲内 ($\pm 50\text{MHz}$)であることを確認した。

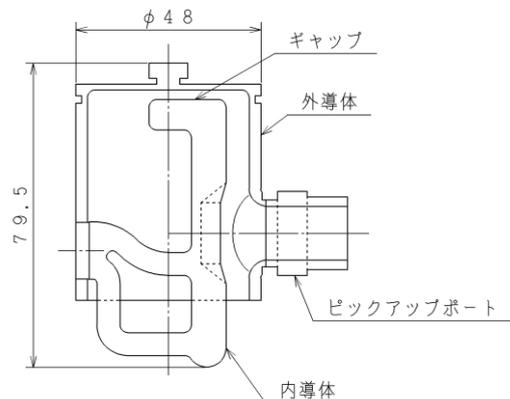


図4: HOM カプラ概略図



図 5: HOM カプラ(左図;溶接前、右図;溶接後)

表 2: ノッチ周波数測定結果

製作 No.	ノッチ周波数 (MHz)
No.1	1294.686
No.2	1290.435
No.3	1290.935

4. 性能試験結果

2号機は2012年2月に完成し、3月から7月までKEKにて表面処理と性能試験を実施した。完成した2号機空洞を図6に示す。

超伝導空洞は空洞内面が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、空洞内面を鏡面にするための電解研磨(EP)や各セル間の電場均一性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。超伝導空洞の性能は、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(Q₀)で、Eは空洞の加速電界(E_{acc})を表わす。

性能試験結果を図7に示す。1回目の測定では、最大加速電界35.2MV/m以上、Q値 5.2×10^9 となり、加速電界としてはILC仕様(E_{acc}=35MV/m, Q₀= 8×10^9)を満足したが、Q値は未達成であった。空洞内面のアイリス傷が原因で放射線が発生しQ値の低下が見られ、空洞の性能限界が判明しない結果となった。そこで、アイリス傷をスポンジ研磨材により研磨処理し、再度測定した。

2回目の測定では、最大加速電界40.9MV/m、Q値 6.1×10^9 となった。加速電界が35MV/mの時のQ値はQ₀= 9×10^9 となり、加速電界、Q値ともILC仕様を満足した。研磨処理の効果が大きく、加速電界が40MV/mを超えても放射線は発生しなかった。

以上の性能試験結果より、開発目的としていた1号機で明らかになった製造技術課題解決及び、HOMカプラ付きの空洞製造技術獲得を達成できた。今後の課題は、工数の少ない簡略化した製造技術の確立、ジャケットの取り付け付いた空洞の製造技術確立が挙げられる。



図 6: 9セル超伝導加速空洞試作2号機

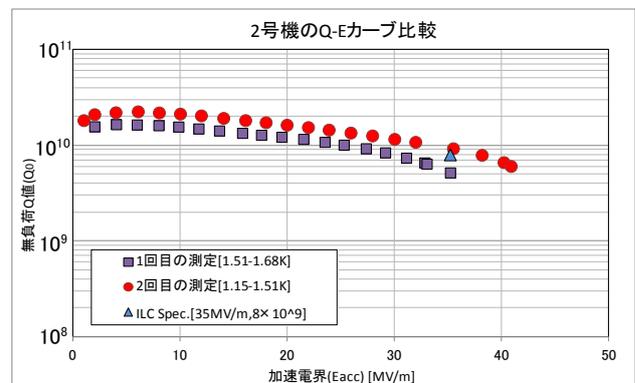


図 7: 2号機の Q-E カーブ

5. まとめ

超伝導加速空洞2号機開発の概要を説明した。

- 1号機の製造技術課題である赤道溶接の安定化試作を行い、1号機と比較し裏ビード高さを76%低下させた。また、HOMカプラ試作でバラツキ(ノッチ周波数5MHz程度)の少ない製作技術を確立した。
- HOMカプラ付き9セル超伝導加速空洞の製作技術を確立した。完成した2号機空洞の性能試験を実施し、最大加速電界40.9MV/m、Q値 6.1×10^9 という結果を得た。

6. 謝辞

本開発を行う上でリニアコライダー計画推進室長の山本明氏、KEK機械工学センターの上野健二氏、井上均氏、安島泰雄氏、渡邊勇一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] T. Semba et al., "Recent Activities in ILC R&D at HITACHI", EPAC'08, Genoa, pp.457-459.
- [2] T. Watanuki et al., "Status of the 9-cell cavity R&D for ILC at HITACHI", SRF2011, Chicago, USA (2011).
- [3] 渡邊謙, "超伝導9セル加速空洞の高次モードに関する研究", 博士論文(2007年度).