

MANUFACTURING OF THE L BAND 9-CELL NIOBIUM CAVITY

Masanori MATSUOKA, Kohichi OHKUBO, Toshiyuki YAMANAKA,
 Eiji KAKO*, Kenji SAITO*, Toshio SHISHIDO*, Masaaki ONO*, Shuichi NOGUCHI*
 MHI, Mitsubishi Heavy Industries, LTD.
 Kobe Shipyard & Machinery Works
 1-1, Wadasaki-cho 1 chome, Hyogo-ku, Kobe, 652
 *KEK, National Laboratory for High Energy Physics
 1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305

ABSTRACT

Since 1990, L-band niobium superconducting cavities have been developed with collaboration between our company and National Laboratory for High Energy Physics(KEK). The manufacturing procedure and the performance of 9-cell superconducting cavity are presented. The maximum accelerating gradient of 12 MV/m was attained in a cold test.

Lバンドニオブ製9セル空洞の製作

1. はじめに

次世代の素粒子物理学用の加速器として電子-陽電子衝突型線形加速器が注目されている。この加速器としてXバンドの常伝導空洞あるいは、Lバンドの超伝導空洞が有力候補と考えられ、世界の多くの研究所で精力的に研究されている。当社では、1990年より高エネルギー物理学研究所の協力を得、Lバンド超伝導空洞の開発を行っている。過去2年間の単空洞での製作研究の成果[1]を踏まえ、昨年度はTESLA

(TeV Energy Superconducting Linear Accelerator)用のプロトタイプとして9セル空洞を製作した。ここでは、この空洞の製作概要及び空洞性能について報告する。

2. 9セル超伝導空洞の仕様

製作した9セル超伝導空洞の主要パラメータ("SUPERFISH"により計算した)を表1に、空洞内面形状を図1に示す。

表1. 9セル超伝導空洞の主要パラメータ

項目	計算値
共振周波数	1296.91MHz
R/Q	952Ω
Esp/Eacc	2.4
Hsp/Eac	44.3Gauss/(MV/m)
結合定数	2.8%

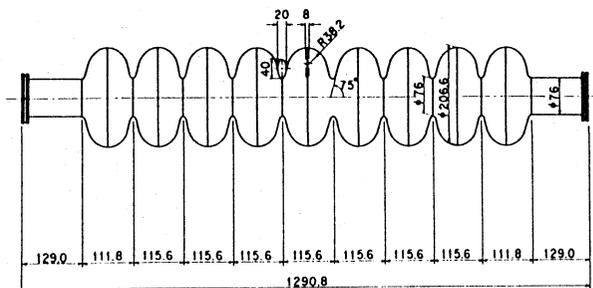


図1. 9セル超伝導空洞内面形状

3. 9セル超伝導加速空洞の製造

今回は、製作上の問題点を明らかにし、各工程でのいろいろなデータを得るために TRISTAN MR超伝導空洞の製造方法を参考にして9セル超伝導空洞の製造を行った。

(1) 素材

素材には、純度99.85%以上、RRR値200以上の東京電解社製純ニオブを用いた[2]。

(2) 素材加工

板材より円形状に加工する工程であり、外径寸法及びその精度は成形加工の条件より決定される。条件出しにより外径寸法は280mmとした。

(3) 成形加工

空洞内面形状の精度を維持するため、端部の耳やボディしわが発生しにくい条件を見だし加工した。成形法には、他工法に比較して工数の最も少ない深絞り成形を用いた。TRISTANではサイズが大きいため対向液圧成形を採用しており、この点は従来と異なる。

表2. 9セル超伝導空洞の製造フロー

プロセス	状態図	条件
素材	—	RRR>200 純度>99.85%
素材加工		丸切り加工(寸法及びその精度は成形条件より決定)
成形加工		深絞り成形(100Tがい) プレス金型の清浄度管理(押し込み面の防止)
バフ研削		240-320-400-500-フェルト-白綿-青綿-緑パフ-化 学研削(バフかす取り)
開先加工		空洞内面に傷の付かぬよう端心の注意を払う
溶接		電子ビーム溶接 ビードが平滑になるよう溶接条件(ビーム電圧/電流、溶接速度、焦点距離)を最適化、突起部はグラインダ掛け実施
表面処理	—	電解研削1-アニール-電解研削2 電解研削液: H ₂ SO ₄ : HF=85:15 アニール: 760度C×5時間
洗浄	—	超純水高圧洗浄-N ₂ 封入 洗浄水比抵抗=17.5MΩcm以上
組立て	—	高エネルギークリーンルームにて組立て(クリーンルームクリーン度: クラス100)

(4) 溶接

溶接中の不純物混入を防止するため、真空雰囲気で行う電子ビーム溶接を採用した。性能に悪影響を与えるビード突起を抑えるよう溶接条件(ビーム電圧、ビーム電流、焦点距離)を絞り込むと共に赤道部の溶接に関しては内側からのコスメ溶接を用いてビードの平滑化を計り、なおかつ突起の生じた箇所にはグラインダによる手入れを行った。また、溶接縮み代は単空洞での製作実績をもとに赤道部で0.8mmと設定し、9セル製作したデータでは、設定値に対し±0.15mmのばらつきであった。

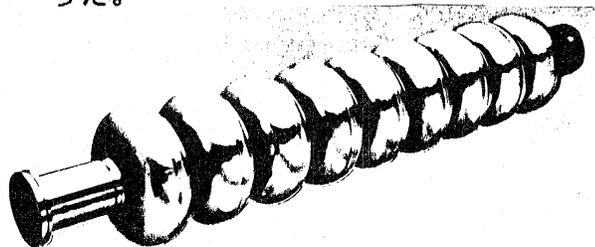


図2. 製造した9セル超伝導空洞

4. チューニング

空洞内の電界分布は各セルで均一になるよう設計されているが、実際は製作誤差の為、分布にばらつきが生じる。そこで、空洞に外力を加え変形させることによって、セル内の電界分布が10%以内になるまでチューニングした。図3にビーズ法により計測したチューニング前後のセル内の電界分布を示す。

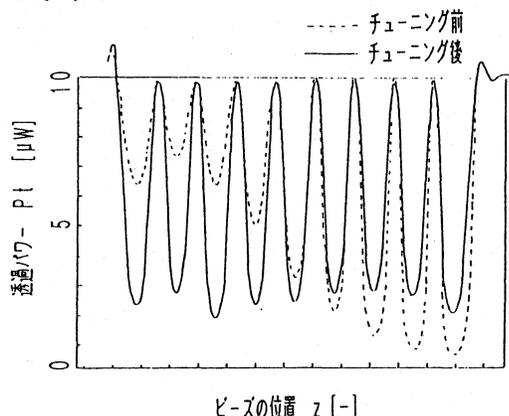


図3. チューニング前後の空洞内電界分布

表3にはチューニング後の9セル空洞の共振周波数を示す。“SUPERFISH”による計算値 1296.91MHz に対し、1297.69MHz と 0.06% の誤差があることがわかる (チューニング前は 0.2% の誤差であった)。

表3. 9セル超伝導空洞の共振周波数

モード	共振周波数 (MHz)		
	計算値	実験値 (常温)	実験値 (2K)
$\pi/9$	1263.36	1263.27	-
$2\pi/9$	1266.25	1266.04	-
$3\pi/9$	1270.69	1270.61	1272.39
$4\pi/9$	1276.20	1276.16	1277.95
$5\pi/9$	1282.19	1282.93	1284.82
$6\pi/9$	1287.95	1288.81	1290.73
$7\pi/9$	1292.65	1293.34	1295.29
$8\pi/9$	1295.85	1296.55	1298.56
π	1296.91	1297.69	1299.69
結合定数	2.8%	2.7%	2.8%

5. 性能計測

5.1 表面処理

性能計測に先立って、空洞内面の平滑化及び高滑浄度化を計るため、表面処理を行う。まず、電解研磨で空洞内面を $80\mu\text{m}$ 研磨し、脱水素の為の真空アニール ($760^\circ\text{C} \times 5$ 時間) を行い、さらに仕上げの電解研磨 $10\mu\text{m}$ を行った。また、最終洗浄では表面に残留するゴミを積極的に除去するため高圧水洗を実施した[3]。

5.2 計測結果

性能計測は、高エネルギー物理学研究所アセンブリホール内の縦型クライオスタットを用いて行われた。図4に加速電界とQ値の計測結果を示す。最大加速電界はフィールドエミッションにより 12MV/m で制限されているが、その要因をひとつに絞り込むには至っていない。推定される要因としては、(a) アイリス部溶接ビードの不適切、(b) 表面処理、組立時の異物混入などがあげられ、今後は、その究明と製造プロセスへのフィードバックが望まれる。

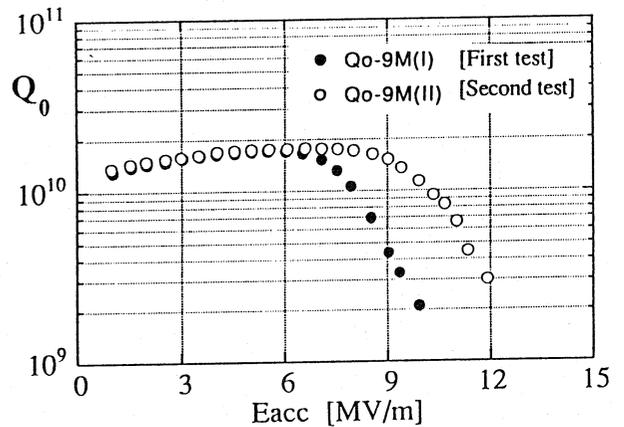


図4. 9セル超伝導空洞の性能計測結果

6. 周辺装置に関する検討

6.1 インプットカプラー

高周波を空洞内に導入するポートであるインプットカプラーを設計するため、アルミニウム製のモデルカプラーを用いて試験を行った(図5)。図6、図7に試験結果を示す。図6よりインプットカプラーのQ値 Q_i は、空洞中心軸からインプットカプラーショート板までの距離 (l) が 115mm のとき最小で、最も結合が強くなっていることが分かる。この特性は、空洞とインプットカプラーとの距離 (d) が変化しても変わらない。

図7の実験結果より Q_i と d との間には

$$Q_i = 210 \cdot \text{EXP}(d/8.68) \quad (1)$$

の関係が得られ、TESLA仕様の $Q_i < 10^6$ (単空洞では結合が約9倍に強くなると考えられるので、単空洞を使った今回の試験の場合は $Q_i < 10^5$) とするには $l = 115\text{mm}$ のとき $d < 54\text{mm}$ であればよいことが分かる。また、(1)式より Q_i の値を10%以内のばらつきに抑えるには d の製作誤差を 0.8mm 以内にする必要があるが、今回製作した9セル空洞の実績によれば、溶接縮み代の設定を的確に行うことで十分対応可能と考えられる。

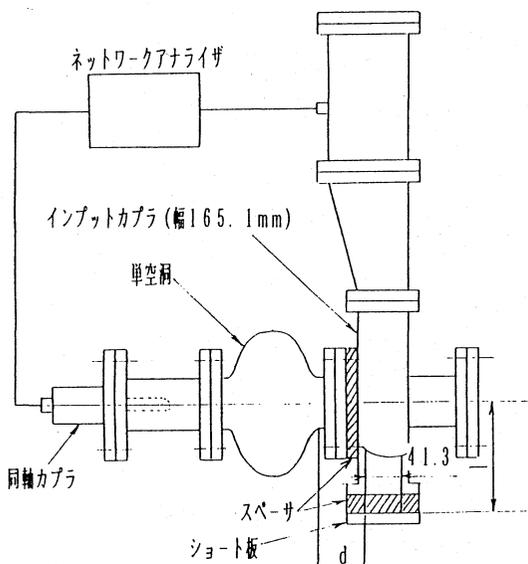


図5. インプットカプラ性能計測システム

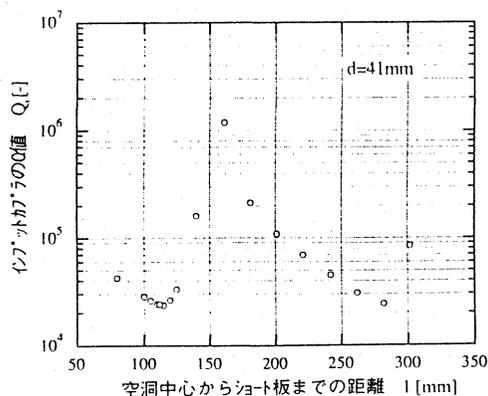


図6 インプットカプラ性能計測結果
(ショート板位置の Q_i に与える影響)

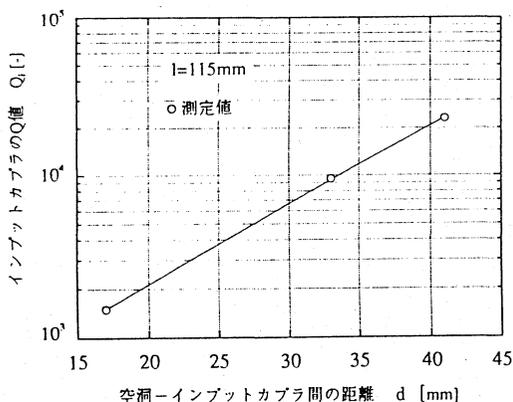


図7. インプットカプラ性能計測結果
(空洞-インプットカプラ間距離
の Q_i に与える影響)

6. 2 クライオスタット

TESLA用超伝導空洞では、シンプルな構造とすることによって低コスト化を計るため空洞とLHe槽を一体化した構造を検討しており、このための要素技術としてニオブとステンレスのろう付け試験を行っている。

7. まとめと今後の課題

今回、TRISTAN MR超伝導空洞の製造プロセスと同様に9セル超伝導空洞の製作を行った。この空洞の最大加速電界は12MV/mであり、フィールドエミッションによって制限されている。今後は性能を制限する要因を明かにし、製造プロセスの改善を計ることが必要である。また、製造プロセスを見直し、特に工数の多い電子ビーム溶接を中心に工法を改善してコストの低減を計る必要がある。また、カプラ、LHe槽等の周辺装置についても検討をすすめ、ビーム加速試験につなげる必要がある。

参考文献

- [1]E.Kako et al., "The result on L-band Superconducting Cavities for High Gradient Applications", Proc. of the 17th Linear Accelerator meeting in Japan. (1992), p79
- [2]H.Umezawa et al., "Development of High Purity Niobium Material for Superconducting Cavity", in this meeting.
- [3]H.Miwa et al., "Application of High Pressure Rinsing for Superconducting Niobium Cavities", ibid.,ref[1], p82