

IN-HOUSE L-BAND NIOBIUM SINGLE CELL CAVITIES AT KEK

Hitoshi INOUE, Yoshiharu KOBAYASHI, Yoshisato FUNAHASHI, Susumu KOIZUMI,
Kenji SAITO, Shuichi NOGUCHI, Eiji KAKO and Toshio SHISHIDO

KEK; National Laboratory for High Energy Physics
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305 Japan

Abstract

For the TELSA as an energy frontier accelerator of the next generation improving the performance of the niobium superconducting cavities is the most important issue and much reduction of fabrication cost of cavities is another key. Since manufacturing of niobium material requires hard techniques due to the easily oxidizable metal, fabrication of niobium cavities has been conducted in only companies providing enough equipments in Japan. KEK has accumulated the fabrication technics such as forming method by deep drawing, trimming, centering of beam tubes, electron beam welding and measurement of manufacturing error so on. We made in-house L-band single cell cavities using these technologies. In this paper we present these manufacturing of the niobium cavities and estimate the fabrication cost as exactly as possible. The manufacturing error is also described.

L-バンドニオブ超伝導空洞のKEK所内製作

1. はじめに

TeV領域での物理実験のために、長さ数10Kmに及ぶ電子・陽電子衝突型線形加速器の研究が多くの研究所で精力的に研究されている。そうした加速器を作るには、場所の大きさ、建設コストの面から、安くコンパクトに作る事が鍵となる。したがって、高加速電界を発生できる空洞の開発、それを安く製作するための研究が重要となる。本研究所では、現在、そのリニアコライダの実現に向けて、常伝導、超伝導の両面から研究されている。この論文は、超伝導空洞に関するものである。TESLA用の空洞開発として、本研究所でホームメイドのL-バンドのニオブ製超伝導空洞を製作することにより、製作コストの正確な評価、製作精度、今後のコストダウンを行うための方策を検討することを目的とする。

2. 空洞設計

製作した空洞の形状を図1に示す。空洞パラメータはURMELコードを使って計算された。その結果は表1に示される。この空洞はアイリス部、赤道部ともに楕円形状であり、CEBAFの1.5 GHzの単セル空洞の相似形である。TRISTANの超伝導空洞では、赤道部が円弧と直線で接続されており、この点が異なっている。現在、我々のTRISTAN形状のL-バンドニオブ超伝導空洞では、14~20 MV/mのかなり決まった加速電界でクエンチを起こし、電子衝突（アーク放電と考えられる）によって、電界放出電子の種が空洞内表面上に作られ、加速電界が低い値に制限されている [1]。一方、CEBAF形状では、

そうした現象は報告されておらず、30 MV/m以上の加速電界が得られている [2]。今回、CEBAF相似形に変えた理由は、そうした我々の直面している現象が、形状効果（例えば、マルチバクタリング）による可能性を調べるためである。空洞の形状変更は、コスト、製作精度等、我々の本研究目的には本質的に何等影響を与えない。

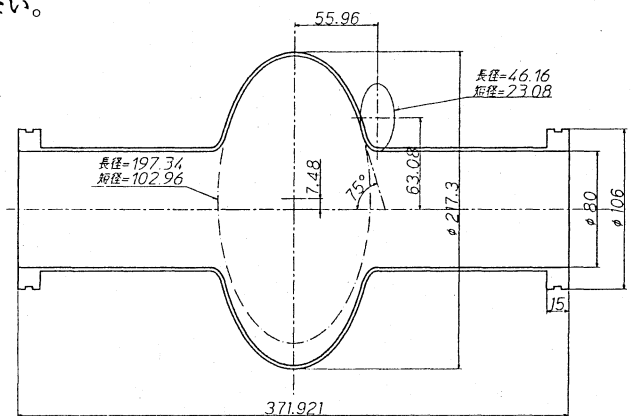


図1 1.3GHzニオブ超伝導空洞の形状

表1 空洞パラメータ (URMELでの計算結果)

周波数	$f_0 = 1297.542 \text{ MHz}$	$E_{sp}/E_{acc} = 1.704$
有効長	$L_{eff} = 111.92 \text{ cm}$	$H_{sp}/E_{acc} = 43.68$
Shunt Impedance = 2.764 MΩ		$E_{acc}/\sqrt{PQ} = 90.30$
$Q_0 \text{ (銅)} = 27061$		
$R/Q = 102.14\Omega$		
Geometrical Factor $G = 251.9$		

3. 空洞の成型及び正寸加工（トリム）

超伝導空洞のハーフセルの成型には、これまでスピニング法、液圧成型法、深絞り成型法等が使われている。それぞれに一長一短があり、目的に応じて使い分ける必要がある。スピニングでは、大きな物から小さな物まで製作可能でフレキシビリティに富む。しかし、熟練工の経験と勘に頼る所が多く、量産には向かない。液圧成型法は、TRISTANの超伝導空洞の製作で採用されたことから分かるように量産向きの成型法である。しかし、安定した成型性を得るためには、材料の均一性等の品質管理の要求が厳しい。材料の焼きなましが生じない場合、赤道部付近にしわが発生し、余計な作業が必要となる。又、プレスの際、材料の逃げを防止するために耳押えと呼ばれる材料固定部が必要であり、この部分は、正寸カットの時に切り取られる。したがって、捨て材が多く、特に小さな物に対しては、材料費が割高となる。深絞り法も又、量産向きである。厳しい材料の品質管理を要求するところは、液圧成型法と同じである。しかし、耳押えが不要なために、材料コストがかさばらない。また、成型法が最も簡単であり、成型時間も最短である。後で議論するように、空洞が小さくなると空洞の製作費に占めるニオブ材のコストが大きくなる。したがって、本研究では、材料コストが最小限に抑さえられ、かつ、成型コストが最も安いと期待される深絞り成型法を採用した。

成型

本研究で行ったハーフセルの成型方法が、図2に示される。アルミ超合金（AL-7050あるいはそれ相当品のYH75）よりNC旋盤で製作された雄型と雌型の間にニオブ平板（φ280、2.5 t、RRR=200）を挟んで、雄型にプレス機により力（100ton）を加えて成型する。板の滑りをよくするために、ニオブ板と雄雌の型には、オイルが塗られる。又、芯出し及び、板の逃げを避けるためにニオブ板の中心に7mmの穴が開けられており、雄型のピンがそこを通る構造になっている。表2に使用したニオブのセル材の機械的特性を示す。図3にこの方法でプレスした時のセルの各場所での伸び具合を示す。最大の伸びは、ビームパイプ用の突き出し部であり、20%である。図2に示した型は、板の減肉を考慮した設計にはなっていないので、特にアイリス部で板厚の減少により、雌型の当りが弱く板と雄型とのフィッティングが悪くなり、その結果、寸法が狂う可能性がある。それを避けるためにセルのプレス後、ニオブを雄型から外す前に、別の治具を押しつけて、アイリス部を再プレスした。しかし、これは、形状測定の中で触れられるように、アイリス部に、逆に、変形を与える結果となった。

表2 使用したニオブセル材の機械的特性

引っぱり強さ = 15.6kg/mm ²	耐力 = 4.1kg/mm ²
伸び = 42.5%	RRR = 200
硬度（ピッカース） = 49.6	

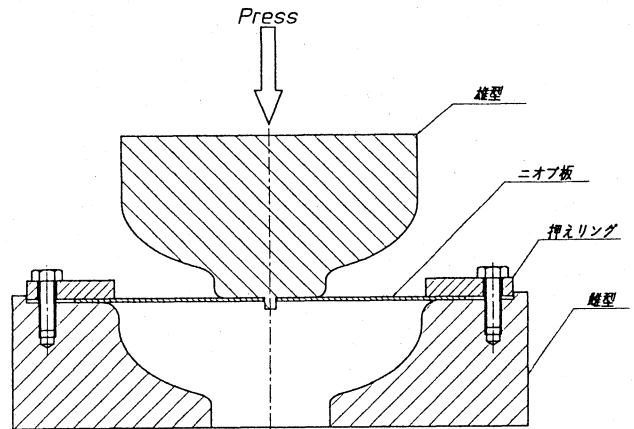


図2 深絞り成型法

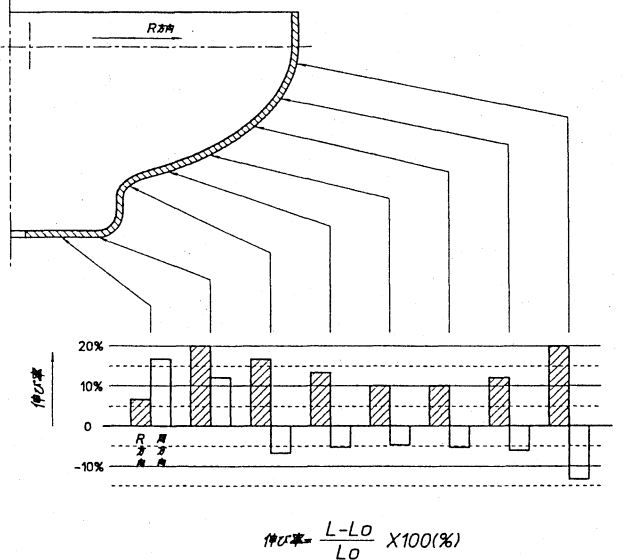


図3 深絞り成型後のセルの各場所での伸び率

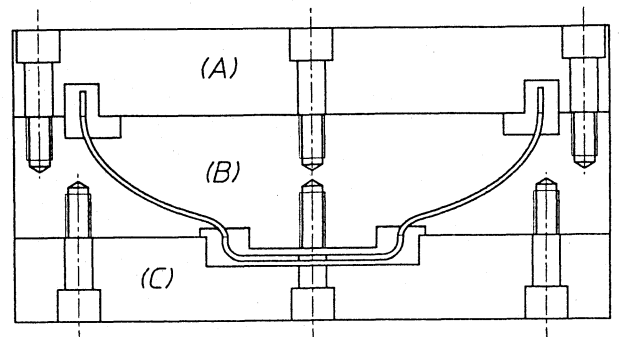


図4 トリム治具

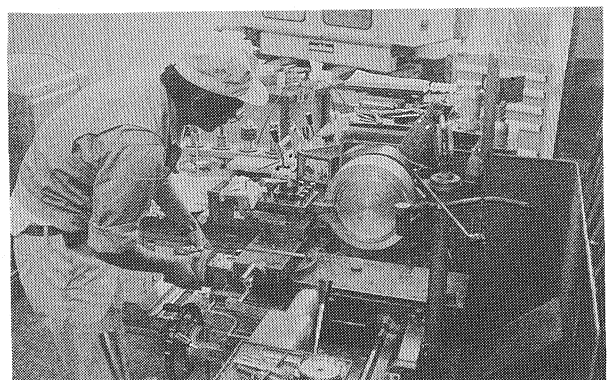


図5 KEK工作センターでのトリミング

正寸加工 (トリム)

ニオブが雄型から外された後、図4に示されるトリム治具 (アルミ超合金製) を使って、正寸加工した。まず、治具 (B) と (C) の間に成型されたセルを挟み、ボルトで固定した後、旋盤で赤道部のトリムをする (図5)。その後、再び (B) に (A) をボルト締めし、(C) を外してアイリス部を旋盤でトリムする。これらの作業で、旋盤の軸方向の治具振れは10μm程度であった。

ビームパイプの製作

ビームパイプは、2.5mmのニオブ板をロールで丸めた後、合わせ目を電子ビーム溶接して直管を作り、それにフランジを電子ビーム溶接することにより、製作された。直管は、そのままでは真円度が出ていないので、図6に示すような通し治具を使い、芯出しをした。高い真円度を得るためには、芯出し前の直管の内径を正寸よりわずかに小さくする必要がある。そのためには、ロールの板取りの際、直管の周長 (L) の計算式として次式が有効である。

$$L = (\text{パイプ内径正寸} + \text{板厚} / 2) \times \pi \dots (1)$$

こうして製作したビームパイプの真円度の精度は、標準偏差で80μmであった。

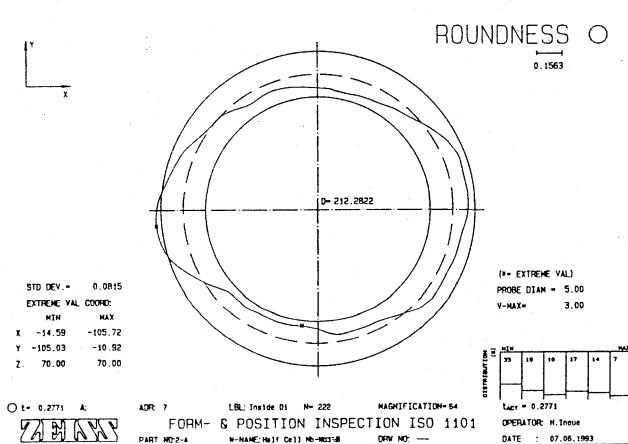


図7 トリム後赤道部の円周方向の寸法精度

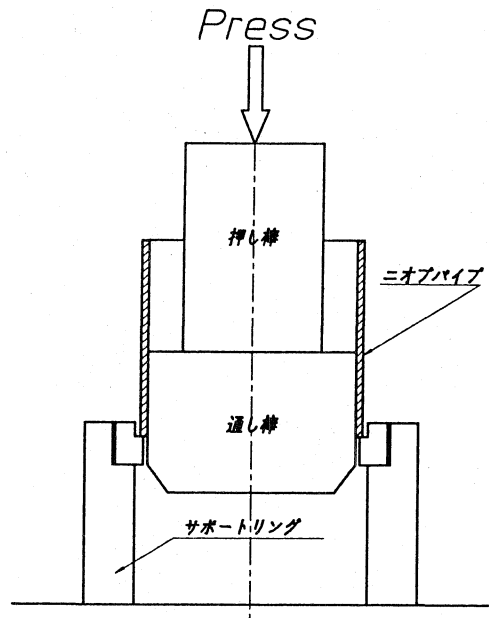


図6 ビームチューブの芯出し治具

製作精度

ハーフセルは、トリム前後で三次元測定器 (ZEISS UPMC850) を使って形状測定された。図7にトリム後のセル内面の赤道部の円周方向の測定結果を、図8には、セル内面の断面の測定結果を示す。円周方向には、ニオブ板に残る圧延方向の異方向性が原因と考えられる楕円変形が観察される。しかし、それは、標準偏差で82μmと小さく、後に述べる溶接に対して問題にならない。既に述べたように、アイリス部には再プレスによる変形のために、0.3mm程度の大きな製作誤差を生じている (図8)。しかし、この誤差は、再プレス工程を止めることで改善されると期待される。トリム前後で、ニオブ材のスプリングバックによる寸法の有意な差は測定できなかった。

製作加工時間

この空洞の成型、トリム加工に要した作業時間 (単空洞当たりの) を表3にまとめる。ハーフセルの製作に4.7時間、ビームパイプの製作に7.3時間要している。

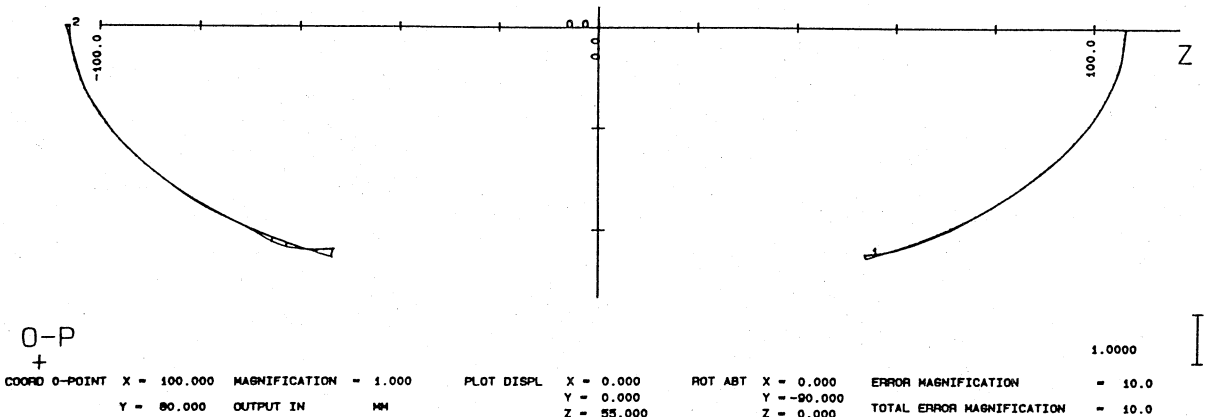


図8 トリム後のセル断面の内面寸法精度

4. 電子ビーム溶接

電子ビーム溶接

溶接方法には、TIG溶接、レーザー溶接、電子ビーム溶接等があるが、ニオブは、高融点材料(2468℃)であること、高温において酸化性が強く材料劣化を起し易い等の理由から、電子ビーム溶接が広く採用されている。10⁻⁴~10⁻⁵Torr台の真空チェンバーの中で品物をゆっくり回転させながら、電子ビームを当てることによって溶接する方法がとられている。ニオブの電子ビーム溶接において、貫通ビーム(full penetrated beam)と熱伝導ビームの2種類の性質の異なるビームを選択することが出来る。貫通ビーム溶接では、熱伝導ビームに比べ、ビード幅が狭いが、溶接面のビードの両端にアンダーカットが生じる。裏面は半球状のビードを形成する。熱伝導ビーム溶接ではビーム幅が広いのが特徴である。ビードの両端にアンダーカットは発生しにくい、ビード表面に波模様(溶融ニオブの重力による流れ模様)を描く。溶接裏面は、滑らかであるが、ビード幅が一定になりにくい。熱伝導ビームの方が素材の加工による寸法の不揃い(ミスマッチ、板厚の違い)に対する適用性に優っている。素材に及ぼす溶接施行時の熱影響は、貫通ビームの溶接時間が、熱伝導ビームの1/3~1/4(表4の溶接速度参照)であるから、貫通ビームの方がはるかに少ない。円筒形状の溶接では、溶接終端部にビードの重なる部分が生じる。貫通ビームにおいては、その部分で裏ビードの盛り上がり(通常0.3mm、ラップ部では0.5mm以上)が著しい。貫通ビーム溶接では、溶接時間の管理が重要である。

ニオブ空洞の溶接条件

電子ビームの収束状態を表わすパラメータとして、Ab値が使われる。これは、収束コイルから溶接物までの距離を収束コイルからビーム焦点までの距離で割った値である。Ab=1でjust focused beamを、Ab>1でdefocused beamを意味する。実用では、溶接真空チェンバーの天井から溶接物までの距離(ワークディスタンス=314mm)と収束コイルの調整目盛(000から999)でこの値を設定する。こうしたビーム焦点距離の調整により、focused

表4 KEK工作センターでの電子ビーム条件

	加速電圧	溶接電流	溶接速度	Ab値	プログラム
ニオブ板厚 2mm					
貫通ビーム溶接	150kV	36mA	60inch/min	1.56	2sec→(?-0.45T+0.5)→1sec
熱伝導ビーム溶接	115kV	19mA	15inch/min	1.56	1sec→(?+3)→4sec
ニオブ板厚 2.5mm					
貫通ビーム溶接	150kV	40mA	45inch/min	1.56	2sec→(?-0.45T+0.5)→1sec
熱伝導ビーム溶接	115kV	28mA	15inch/min	1.56	2sec→(?+3)→4sec

但し、プログラムの?マークは、溶接物が1回転に要する時間(sec)、Tは立ち上がり時間を表わす。

表3 空洞製作加工時間の内訳

ハーフセル2枚の製作	
深絞り成型	30分
赤道部トリム加工	60分
アイリス部トリム加工	70分
内面キズ取り	120分
ビームパイプ2本の製作	
ロール	20分
合わせめ電子ビーム溶接	50分
端面加工	30分
芯出し	30分
量端面トリム加工	60分
フランジ加工	240分
電子ビーム溶接	5箇所 175分
合計	915分

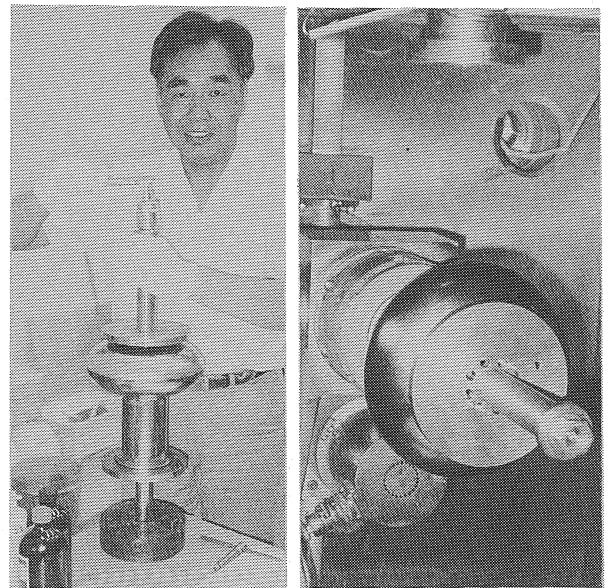


図9 KEK工作センターでの電子ビーム溶接

左の写真は、セルとビームパイプの溶接治具を、右の写真は、溶接チェンバーに空洞がセットされた状態を示す。電子ビームは、写真上部のパイプより垂直に出射する。

beam, defocused beamが得られる。ニオブ空洞の溶接で defocused beamが使われている。

電子ビーム溶接の他のパラメータとして、ビーム加速電圧、溶接電流、溶接速度、溶接プログラムの4種類がある。本所で製作されるニオブ超伝導空洞に使用される代表値を表4に示す。今回のL-バンド空洞(板厚2.5mm)の溶接では、空洞赤道部に対しては、熱伝導ビーム溶接を、セルとビームパイプの溶接では、貫通ビーム溶接を使用した。図9(右)にセルとビームパイプの溶接時のセットアップの写真を示す。

溶接治具

L-バンド超伝導空洞の溶接治具の写真を図9(左)に示す。ビームパイプ単管とフランジの溶接、半割セルどうしの赤道部での溶接には、熱伝導ビームによる内側溶接を試みた。溶接物を垂直軸から30度傾け、セルあるいは、ビームパイプの内面にビームが当たるように治具を工夫した。こうすることにより、非常に滑らかな溶接面が得られ、溶接面の機械研磨が不要となった。ビームパイプとセルの溶接では、溶接物の全長が長すぎて、品物を傾けても溶接面に直接ビームを当てることが不可能なので、空洞を水平にして、垂直ビームを外側から当て、貫通ビーム溶接した(図9右)。この時、貫通ビームが他の面に当たるのを防ぐために空洞の中にニオブ製のビームストップを設けた。

溶接精度と溶接作業時間

溶接箇所の寸法の縮み代は、貫通ビームで0.3mm~0.5mmであった。また、熱伝導ビームでの値は、0.5mm~0.7mmであった。空洞のビームパイプの両フランジ間の平行度は、0.1mm以内であった。この空洞の溶接一箇所当たり、31分の作業時間(真空排気、溶接後のクールダウンを含む)を要した。

5. 製作コストダウン化の対策

表3に示したように、空洞製作の全作業時間は、単セル空洞に対して15.3時間である。マンパワーコストは、大企業並みに1万円/hrを仮定しても、15万円程度である。この空洞製作で使用したニオブ材は、総量で6.5kgで、材料費は、33万円である。材料費が製作マンパワーコストの約二倍を占めている。

TESLA計画では、9連の超伝導空洞を200~300万円で作成しなければならない。単セル空洞の結果を9セルに単純にスケールすると、その製作作業時間は60時間と見積られる。又、ニオブ材料費は、150万円である。さらに、表面処理費(150万円、外注)、熱処理費(150万円、外注)を考慮すると、500万円程度と見積られる。現状では、9セル空洞を所内製作しても、目標値の二倍のコストとなる。量産になった場合、表面処理費、熱処理費は、現状の1/5以下に安くできるであろう。また、ニオブ材の板厚、及び、サイズの適性化により、材料費は30%低減可能である。以上のことを考慮に入れれば、量産で

は、9セルのL-バンド超伝導空洞を200万円程度で作成することは、十分可能である。但し、この議論には設備投資、維持費が含まれていないので、それらを含めると、空洞そのものは150万円程度で作成しなければならない。その場合、ロボット化による製作作業時間の短縮化、表面処理では、水洗工程の簡素化、熱処理では、真空排気時間、炉のクールダウンの待ち時間の短縮化をはからなければならない。ニオブ材料に関しては、現在採用している板材製作工程を抜本的に見直し、シリコンウエハーのスライサーのようなものを開発して、大径のインゴトから直接円板を製作するようなことを考えなくてはならないだろう。また、電子ビーム溶接では、真空待ち、クールダウン待ちが、作業時間のほとんどなので、システムを小型化して時間短縮を図る必要がある。

6. まとめ

以上、議論してきたように、高エネルギー物理学研究所でも、ニオブ超伝導空洞の製作技術の蓄積により、所内で空洞を製作できるようになった。特に、深絞り成型法の採用により、これまで、ニオブ空洞製作に関して、ノウハウと思われていた非科学的な所を排除して、今や、誰にでも製作できるレベルにある事を証明した。また、そうした簡単な製法で、0.1mm程度の製作精度が得られる事を示した。製作コストについては、現状では、TESLAの目標価格の二倍であるが、量産に移行すれば、十分、目標価格内で製作可能であることが示された。

参考文献

- [1] E.Kako et. al., "High Field Tests of 1.3GHz Niobium Superconducting Cavities", presented at this meeting.
- [2] K.Saito et. al., "Study of Ultra-clean Surface for Accelerator Structures", to be published in the proc. of the 9th Symposium on Accelerator and Technology.