

1. はじめに

粒子加速器は、常伝導加速空洞による方法と超伝導加速空洞による方法がある。ILC (International Linear Collider) では、歴史的に常伝導と超伝導の2つの方法による設計が進められていたが、2004年の秋に、国際的にILCを超伝導の方式で進めることが合意された。これ以降、KEKにおいてもILCのための超伝導加速空洞開発が活発に行われている。

ILCの超伝導空洞の製作に関して、欧州ではドイツのDESY研究所(ハンブルグ)、アメリカではJefferson研究所(バージニア)やFermi研究所(シカゴ)が活発な研究を行っている。現在のところ、DESYで開発されたTESLA型超伝導空洞がILCの超伝導空洞の基本型と考えられている。図1.1にこのTESLA型超伝導加速空洞の写真を示す。

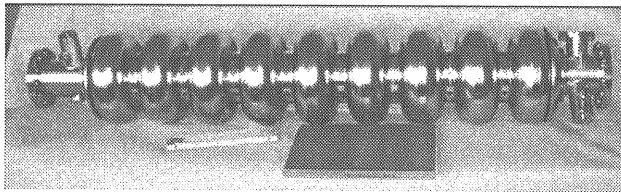


図1.1: TESLA型超伝導加速空洞

図1.1からわかるように、ILCの超伝導加速空洞は、9個のセルと両端のビームパイプとフランジで構成されている。左のビームパイプから突き出た枝管は、高調波(High Order Mode: HOM)の減衰器(Damper)、すなわち高調波減衰器(HOM damper)と呼ばれている。右のビームパイプには、高調波減衰器に加えて、空洞に電磁波を入力するためのカップラーポートの枝管が付いている。

KEKでは、このTESLA型の空洞の研究と同時に、KEK独自の案として、TESLA型よりも高電界の性能を達成できるLow-Loss(LL)型空洞の開発を行っている。このLL型空洞は、加速勾配の目標が51MV/mであるため、大リーグで活躍するイチローの背番号51にちなんで、イチロー空洞と命名された。図1.2と図1.3にイチロー型空洞の写真と図面

を示した。

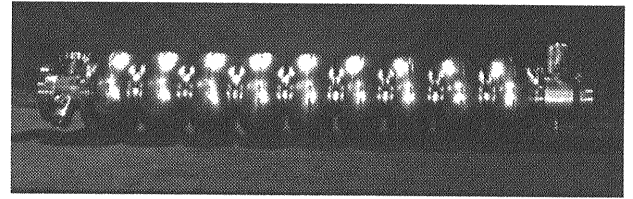


図1.2: ICHIRO型超伝導加速空洞

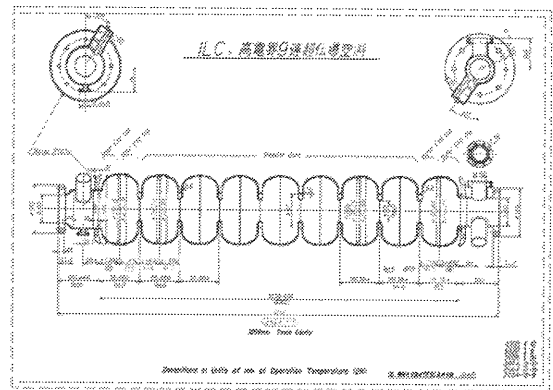


図1.3: ICHIRO型超伝導加速空洞の図面

図1.1、図1.2、図1.3をよく見比べると、TESLA型に比べ、ICHIRO型の空洞は各セルの壁がより垂直になっているのがわかる。ビームパイプの構成は、ほぼTESLA型と同じである。

本稿では、ILCにおける超伝導加速空洞の製作(材料、成形、電界研磨、クリーン作業)とその計測技術について、2005年に行われた4台のイチロー型空洞の製作を中心にして解説する。

2. 超伝導空洞の製作

2.1 空洞製作の概要と各部名称

図2.1.1にILC用超伝導加速空洞の製造過程をチャートにして示した。図2.1.1からわかるように、空洞の製作は、セル(cell)部とビームパイプ(beam pipe)周辺部分の工程に別れている。各セルの最も膨らんだ部分を赤道部(equator)、各セルの両端をアイリス(iris)部と呼ぶ。セルの製作は、

図2.1.1の左の丸線で囲まれた部分に示されるように、あたかもダンベル(dumbbell)のような形の部品（今後ダンベルと呼ぶ）を8つ製作する。ダンベルの中央がアイリス部、両端が赤道部になっており、8つのダンベルを赤道部で溶接し、空洞の中心のセル部分を製作する。ビームパイプ周辺部分は、エンドグループ(end-group)と呼ばれ、高調波減衰器やカップラーポートをビームパイプに溶接して製作する。最後に8つのダンベルを溶接したセル部分と2つのエンドグループ部分を溶接して完成する。

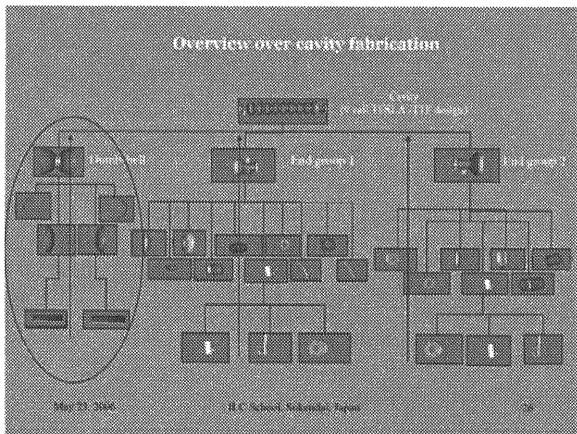


図2.1.1：ILC用超伝導加速空洞の製作過程

ILCでは、この9セル空洞を約3万本製作する必要がある。世界の3極（アジア、アメリカ、欧州）で製造を分担したとしても、アジア地域で約1万本を製造する計算になる。このため、ILCの空洞製造に関しては、量産という観点が非常に重要となる。よって、本稿では製造方法の説明のみではなく、生産効率やコストについても触れる。また、ILCはその名が表すように、国際的な計画であるため、重要な名称については英語をカッコ内に併記する。

2.2 ニオブ精製とニオブ板の加工

ILC用超伝導空洞の部品の殆どが高純度のニオブ（臨界温度 $T_c=9.3\text{K}$ ）の板から製作される。超伝導材料の純度は、RRR（残留抵抗比：室温での直流電気抵抗と超伝導状

態になる直前の電気抵抗の比）で表されることが多い。超伝導加速空洞の製造では、通常RRRが100以上のニオブを使用する。このため、まずどのようにして高純度のニオブ板を製造するかについて解説する。

ニオブ材の原料は、主にブラジル（Araxa, Catalao）やカナダ（St. Honore）などの鉱山で原鉱石中に含まれる酸化ニオブとして採取される。

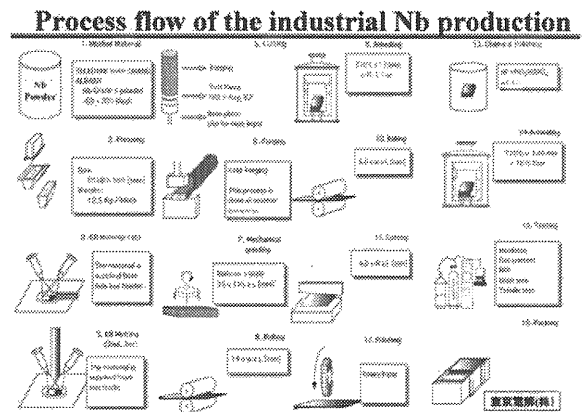


図2.2.1：ニオブ材の工業生産過程

図2.2.1に、ニオブのパウダーまで加工された材料を、超伝導空洞の製作に使用する高純度のニオブ板に加工するまでの工業生産過程を示す。この工程で、純度を高めるために、真空中において電子銃によりニオブ材を溶かし、不純物を取り除く方法が採用されている（Electron Beam Melting：EBM）。

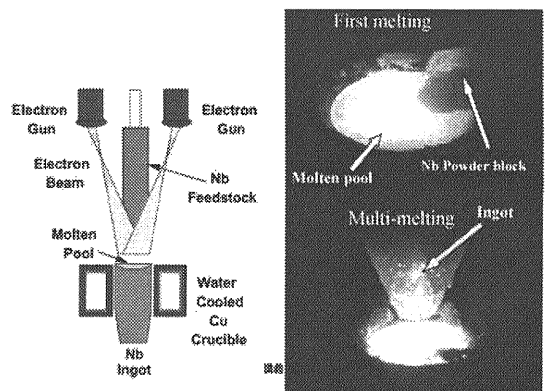


図2.2.2：ニオブ材の電子銃溶解（Electron Beam Melting）による精製

図2.2.2は、その炉の構造と実際の炉内の写真である。炉の内部は 10^{-4} から 10^{-5} Torrの真空に排気されている。炉内でニオブの原材料は電子ビームで溶解され、溶解したニオブのプールが水冷されて炉の下に連続的に成長し、インゴット (Ingot) となる。このとき、ニオブの融点は摂氏2500度と高温であるため、水素や酸素等の不純物は真空排気装置によって取り除かれる。インゴットを成長させるスピードは、純度を高めるために最適化されている。この過程を3回繰り返すことにより、高純度のニオブのインゴットができる。

ニオブのインゴットは、圧延(rolling)と焼鈍(annealing)を繰り返し、厚さ2.8mmの板に加工される。図2.2.3に、実際のニオブ材の圧延装置を示す。ニオブ材はこの段階で既に高純度であるため、圧延時に不純物が混入しないように、クリーンルーム内で圧延を行う。

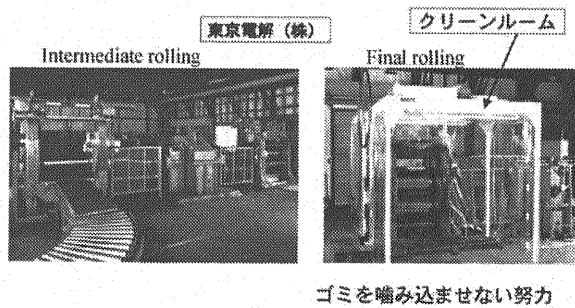


図2.2.3：ニオブ材の圧延 (Rolling)

圧延を繰り返した材料は、層状の構造が残ると同時に、機械的な応力歪が蓄積されている。このため、摂氏720度、2時間、真空度 $<10^{-5}$ Torrにて焼鈍(annealing)を行う。焼鈍の過程はこの後にニオブ板をカップ状に深絞り加工する際に、材料に必要な柔らかさを与えるためにも重要である。焼鈍が十分でないと、ニオブ板を深絞りする際に割れてしまう。図2.2.4に、典型的な焼鈍前と後のニオブ材の写真を示した。図2.2.4の左の写真では、焼鈍による再結晶により、きれいな粒界が形成されているのがわかる。

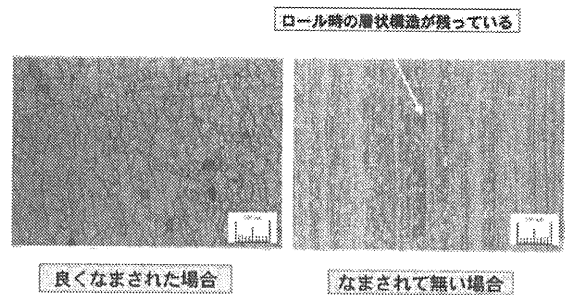


図2.2.4：ニオブ材の焼鈍(annealing)

また、図2.2.4の左の写真から、通常の超伝導空洞の材料として使用されるニオブ材の粒界のサイズは50um程度であることがわかる。最近では、この粒界の境界が超伝導空洞の性能を悪化させる原因であるという推察から、粒界のサイズを大きくすることにより、粒界境界の影響を抑え、空洞の性能を上げようという努力が試みられている。

このような工業過程で製造されるニオブ材の純度 (RRR) の経年推移を図2.2.5に示した。最近ではRRR=500に達するニオブ材も入手可能になってきているが、現在のところ、ILCで使用する超伝導空洞の材料としては、RRR=300程度であればよいと考えられている。

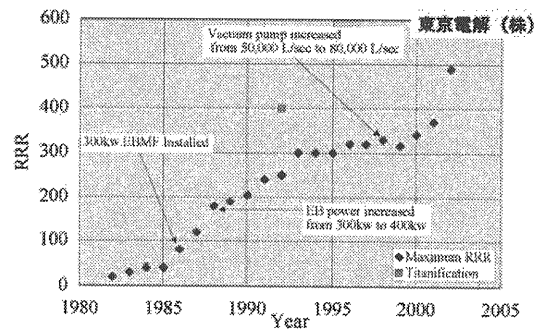


図2.2.5：ニオブ材の純度(RRR)の推移

2.3 ニオブ板の深絞り加工 (deep-drawing)

図2.1.1の左の丸線で囲まれた部分にダンベルの製造過程が示されている。ダンベルは、2枚のカップ(cup)を加工し、これをアイリス部分で溶接して製作する。厚さ2.8mm、直径270mmの円盤に加工されたニオブ板は、中心部に直径30mmの穴加工をした

後、深絞り（deep-drawing）によりカップに加工される。

図2.3.1に、ニオブ板材の深絞り加工を図示した。図2.3.1の左に示したように、ニオブ板はメス型の上に固定され、プレス機がオス型をニオブ材に押し付けて加工される。型はアルミ合金（ジュラルミン）で製作する。

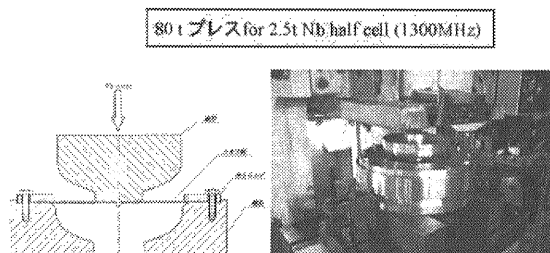


図2.3.1：ニオブ板材の深絞り加工（Deep-drawing）

図2.3.1の右に実際の深絞り加工の写真を示した。深絞り加工は、通常の工場にあるプレス機があれば容易に行うことができ、また加工時間も短い。例えばKEKで製作した4本のイチロー空洞では、56枚のカップを僅か数時間で加工できた。これは量産という観点から非常に有利である。

2.4 トリム加工 (Trimming)

図2.4.1に深絞り後のカップの写真を示した。図にあるように、深絞り後のカップの両端には実際の空洞製作には不要な部分が残っている。この部分を切り落とし、カップを設計寸法に加工する。この工程をトリム(trimming)加工と呼ぶ。

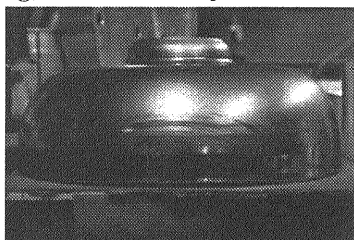


図2.4.1：深絞り加工後のカップ

実際のトリム加工の写真を図2.4.2に示し

た。深絞り後のカップは、図2.4.2の右の写真のようにジグにセットされ、旋盤で不要部分が削られる。図2.4.2の左の写真は、トリム加工が終了したカップである。このとき、カップのサイズは図1.3の図面上のカップの寸法ではない。この後でカップは溶接を行うため、溶接時に縮む長さをあらかじめ溶接代として入れておかなければならない。溶接代の大きさについては、後ほど詳しく解説する。

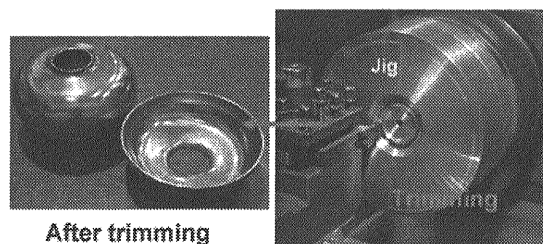


図2.4.2：カップのトリム加工

2.5 電子ビーム溶接(Electron Beam Welding : EBW)

ここで、超伝導空洞を製作する時に不可欠なニオブ材の溶接について解説する。超伝導空洞の壁面は、不純物が混入すると超伝導性能が低下する。もしニオブ材を大気中で溶接すると、溶接部に酸素等が混入する。このため、超伝導空洞のニオブ部品は、压力容器内に部品を設置した後、容器内を真空に排気し、電子ビームによって溶接する。溶接が終了した後も、部品が100°C以下に自然冷却されるまで待った後に容器を開ける。このような溶接方法を、電子ビーム溶接(Electron Beam Welding : EBW)と呼ぶ。図2.5.1に典型的な電子ビーム溶接の装置を示す。

電子ビーム溶接を行うためには、十分に大きな真空室、真空排気設備、電子銃が必要である。図2.5.1に見られる白い箱型の容器の半分は真空室である。残りの半分が真空排気装置で、図の上に僅かに青くみえる部分が電子銃である。また、真空室内では溶接部品を適切に回転、移動させて電子ビームが溶接箇所当たるよう制御しなけ

ればならない。図の右端に電子ビーム溶接装置の制御盤とオペレーターが見える。

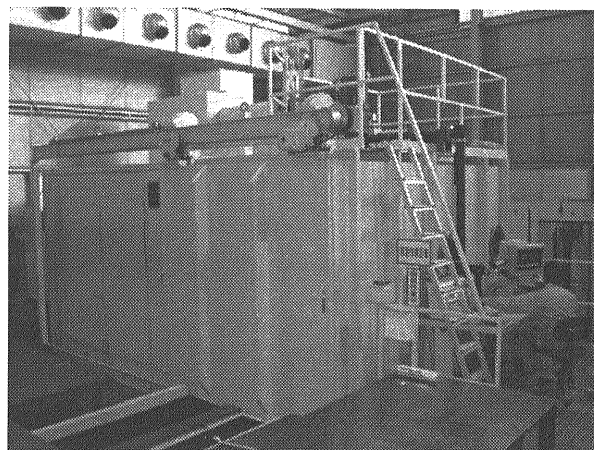


図2.5.1：電子ビーム溶接の装置

この電子ビーム溶接装置は高価であるため、空洞の製作では溶接のコストが大きな割合を占める。電子ビーム溶接においては、実際に部品を溶接している時間は短い、真空排気と部品の冷却に時間がかかり、この時間がコストを決める。例えば、2箇所の溶接を1回の真空排気で行うと、コストは大きく削減される。

2.6 ダンベルの電子ビーム溶接

図2.1.1の左にあるように、ダンベルは、深絞り加工によってできた2枚のカップをアイリス部で電子ビーム溶接して製作する。この際、アイリス部は機械的強度が弱い、強め輪 (stiffener ring) を溶接する。図2.1.1にあるように、強め輪は、2枚の短冊状のニオブ板を曲げ加工して製作する。

図2.6.1にダンベルの溶接組み立ての流れを写真で示した。左上の写真では、2枚のカップをアイリス部で合わせてジグにより固定し、これを適切な速さで回転させながら、上からの電子ビームによって溶接する。図の右上の写真が溶接後のダンベルである。

右下の写真は、2つの部品から成る強め輪と、強め輪をアイリスの中心に対して同軸になるよう配置するためのジグである。図2.6.1の中下の写真は、ダンベルのアイ

リス部分を押し広げて強め輪を挟み込んでいる様子である。挟み込まれた強め輪は、電子ビーム溶接によってダンベルに溶接される。

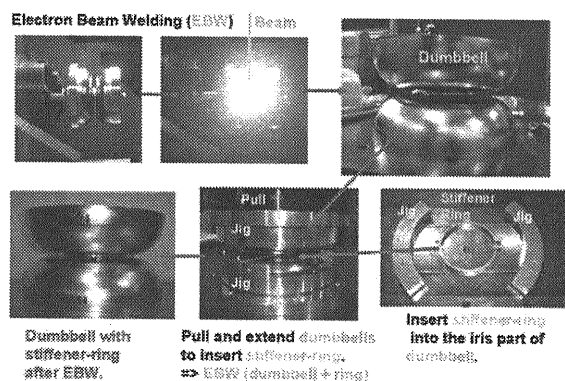


図2.6.1：深絞り加工後のカップ

図2.6.1の左下は、強め輪との溶接を終了したダンベルの写真である。この写真をよく見ると、2つの強め輪部品の間隙が開いているのがわかる。超伝導空洞は、運転時には横に置かれて液体ヘリウムに浸される。このとき、空洞壁面で発生した熱によって液体ヘリウムの泡が発生することがある。この泡は空洞から液体ヘリウムへの熱の伝導を妨げてしまう。強め輪の内側でもこの泡が発生するため、空洞を横に設置した際に、この強め輪の隙間は上下に配置され、この泡を逃がす役割を果たす。

2.7 ダンベルの加工精度とチューニング

ILCの超伝導空洞の製作過程において、各制作過程の製作精度を調べるため、3次元形状測定装置を使用した。図2.7.1に、この3次元測定を使用して、イチロー空洞のフランジ形状を測定している写真を示す。この装置は、正確な球体のプローブを測定物の表面に押し当て、プローブにかかる圧力を測定しながら測定物の表面を移動することにより、曲面を含む複雑な3次元形状を測定することができる。

前節のダンベルの製作過程において、ア

イリス部分を溶接し、強め輪を付ける前のダンベルについて、その2つのカップの内面の3次元測定を行った。この3次元測定の結果を図2.7.2に示した。

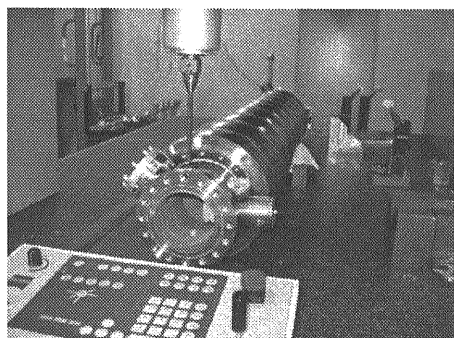


図2.7.1：3次元形状測定装置。フランジの上に見える赤い球体がプローブ。

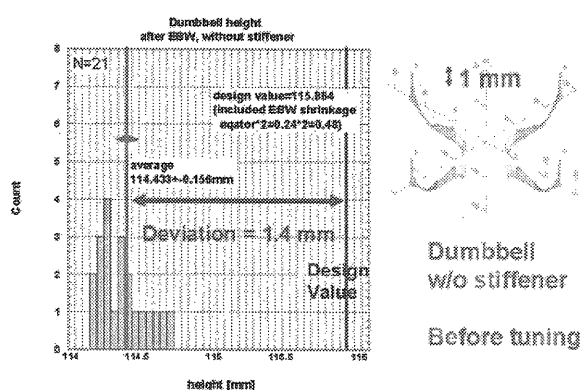


図2.7.2：強め輪を溶接する前のダンベルの3次元形状測定の結果。左：ダンベルの高さ測定。右：ダンベルのカップ内面の3次元測定の結果。黒線が設計曲線で、赤線はその設計曲線からの偏差を表している。

図2.7.2の左は、ダンベルの高さ測定の結果で、横軸は測定値、縦軸がダンベルの数を表している。この結果から、ダンベルの高さは設計値より平均で1.4mmも少ないことがわかった。また、図2.7.2の右の、カップ内面の3次元形状測定の結果を見ると、赤道部においては設計曲線からの偏差はそれほど大きくないが、アイリス部周辺では設計曲線からの偏差が1mm近くになっていることがわかる。これは、アイリス部の電子ビーム溶接の際に、熱によってカップ形状が変形したためと考えられる。すな

わち、ダンベルの高さの減少も、カップの内面が内側に変形したために起きたと考えられる。この変形は、強め輪を挟み込んで溶接することで多少改善されるが、それでもダンベルの高さの偏差は1mm近くになってしまう。

イチロー空洞の製作では、最初の1本目の空洞の全長が設計値から10mm近く短くなってしまった。このため、2本目からはダンベルの段階で形状のチューニングを行った。図2.7.3に、そのチューニング方法と、チューニング後の強め輪付ダンベルの3次元形状測定の結果を示した。

前節のダンベルの製作過程で、強め輪をダンベルに挿入するためにダンベルのアイリス部分を押し広げるために使用したジグを使い、ダンベルの高さをほぼ設計値まで引き伸ばした。この形状チューニングを行った後にダンベルの高さ測定を行ったところ、設計値からのずれは平均で僅か0.08mmであった。また、カップ内面の3次元形状測定の結果、ほとんどのカップで、設計曲線からの大きな偏差は無くなっていることがわかった。この結果、2本目からのイチロー空洞の全長の設計値からのずれは1mm以下に抑えることができた。空洞全体の形状測定の結果は後ほど解説する。

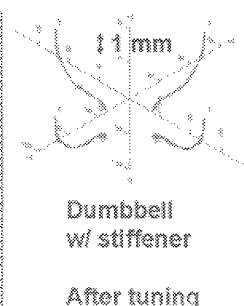
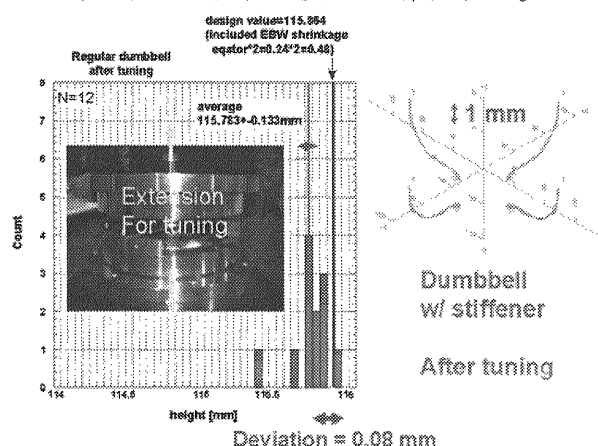


図2.7.3：強め輪を溶接して形状チューニングを行ったダンベルの3次元形状測定の結果。左：ダンベルの高さ測定。右：ダンベルのカップ内面の3次元測定の結果。黒線が設計曲線で、赤線はその設計曲線からの偏差を表している。

2.8 パイプ材の加工

図2.8.1にビームパイプのパイプ材をニオブ板から加工する過程を示した。ニオブ板を型に押し当て、パイプ状に成形した後、端部同士を電子ビーム溶接することでパイプの形状に製作する。

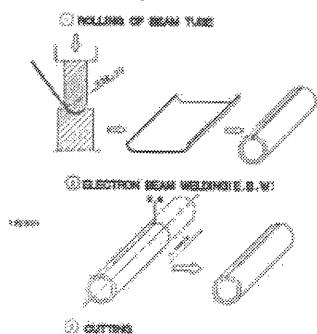


図2.8.1：ビームパイプ用パイプ材の加工

図2.8.2に、実際に加工したビームパイプの写真を示した。写真右は、電子ビーム溶接を行った後のパイプ材だが、パイプ断面がハート型になってしまい、真円になっていないことがわかる。

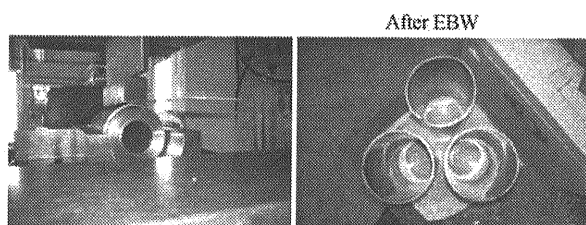


図2.8.2：ビームパイプ用パイプ材の加工

このため、パイプ内にパイプの内径よりも少し大きい型を押し込んでパイプの径を押し広げることで、パイプ形状を真円に加工する。その工程の図解と写真を図2.8.3に示した。

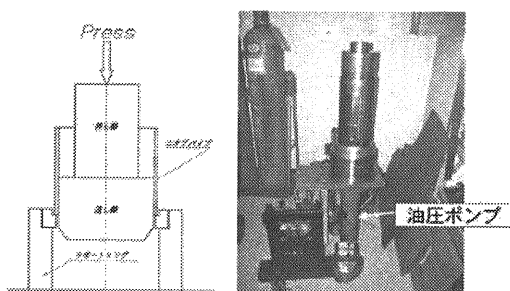


図2.8.3：パイプ材の芯出し加工

ビームパイプに枝管を溶接するには、突き出し加工が必要である。図2.8.4は、この突き出し加工を行った後のビームパイプである。

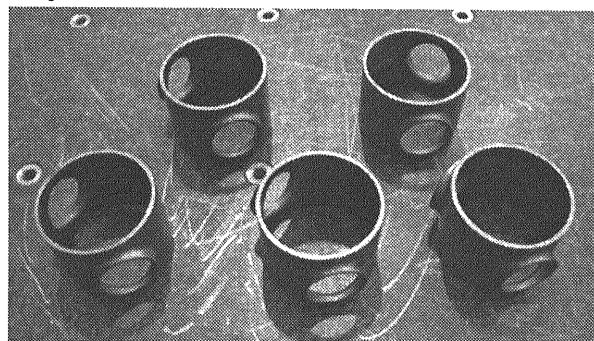


図2.8.4：パイプ材の芯出し加工

2.9 エンドグループ(End-group)

図2.9.1と図2.9.2にエンドグループの部品の写真を示した。図2.9.1の右下に、高調波減衰器の部品がある。この写真では、高調波減衰器のパイプ部分が銅によるテストモデルになっているが、実際はニオブ材で製作する。高調波減衰器は、枝管のパイプの中に、鍵型のアンテナを電子ビーム溶接して製作する。図2.9.1の右下に見える板は、このアンテナ部をニオブの板材から切り出したものである。

図2.9.2の写真で、下にある鏢状の部品はエンドプレートと呼ばれる部分である。エンドプレートは図1.1、図1.2、図1.3などにおいて、両端のセルとビームパイプの間にある傘のような形をした部品で、これは、超伝導空洞の液体ヘリウム容器への継ぎ手になる。エンドプレートはステンレスでできている。したがって、ニオブのビームパイプとこれらのステンレス部品の間には異材継ぎ手が必要になる。この異材継ぎ手の方法として熱間等方圧加圧法(Hot Isostatic Pressing : HIP)を使う。これは、高温高圧の炉内で異種金属を拡散接合する技術である。フランジもステンレス部品なので、同様にHIPによる異材継ぎ手の技術を使いニオブのビームパイプと組み立てる。これらのエンドグループ部品を電子ビーム溶接し

た後の写真を図2.9.3に示した。

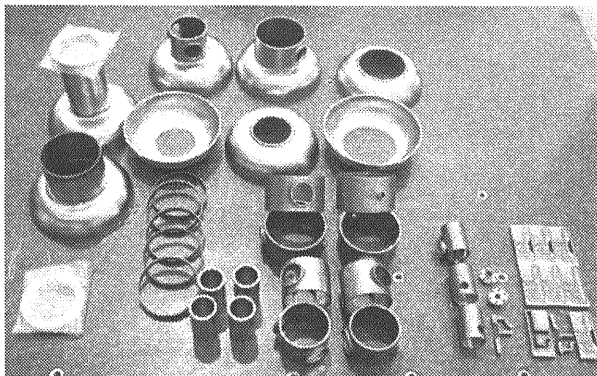


図2.9.1：エンドグループの部品(その1)

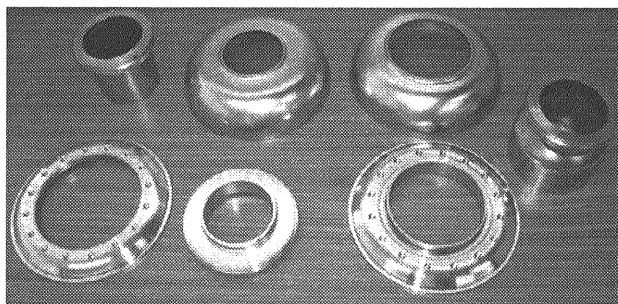


図2.9.2：エンドグループの部品(その2)

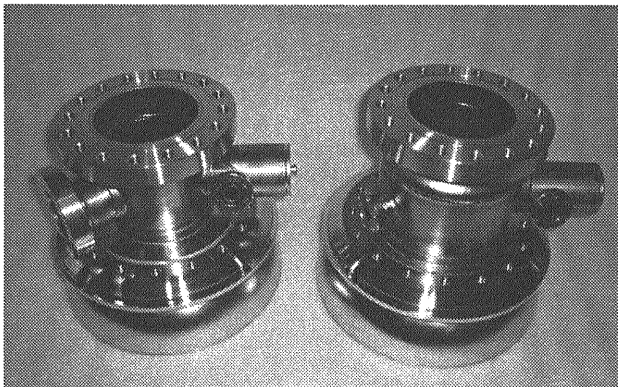


図2.9.3：電子ビーム溶接後のエンドグループ

2.10 ダンベルとエンドグループの溶接

図2.10.1にダンベルを積み重ねて電子ビーム溶接していく様子を示した。ダンベルの中心に棒を通し、その棒の両端にある円盤状のジグで積み重ねたダンベルを押さえつける。電子ビーム溶接装置の真空室の中でダンベルを水平にして、この棒を軸にして回転させる。これにより、電子ビームによる溶接箇所が赤道部を一定の速度で移

動し、全周が溶接される。



図2.10.1：ダンベル同士の赤道部の溶接

図2.10.2に、積み重ねたダンベルの溶接、エンドグループの溶接、ダンベル部とエンドグループの溶接の様子と、完成したイチロー空洞の写真を示した。これらの溶接では、KEKでのILC空洞の最初の製作であったため、1回の溶接毎に真空室を開けて溶接の具合を確認した。しかし、量産の過程では、8個のダンベルと2つのエンドグループを全てジグで固定して点溶接した後、真空室を開けてジグを交換して、次の溶接で9セル分の赤道部の溶接を1回の真空排気で行うことでコストを抑えることができる。DESY研究所では、既にこのような方法での溶接を試みている。

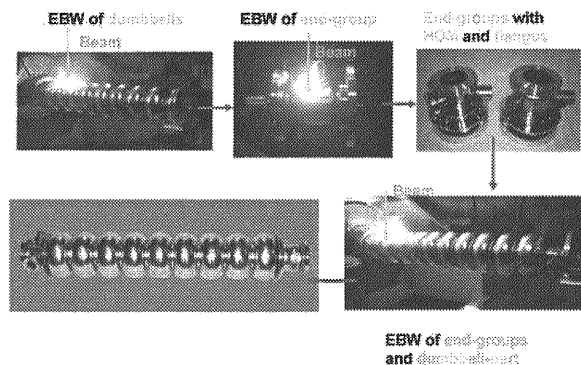


図2.10.2：ダンベル部とエンドグループの溶接

2.11 溶接による縮み

電子ビーム溶接をした部分は、溶接後に長さが短くなる。このため、空洞の製作をする際には、あらかじめこの分を想定して部品の寸法を決めなければならない。この縮みは電子ビーム溶接のパラメーターや、部品の熱容量などで微妙に変化する。このため、今回のイチロー空洞の製作では、ア

アイリス部と赤道部の溶接に関して、溶接縮みを測定した。

測定の方法として、カップのトリミングの後で、図2.11.1の左の写真にあるケガキ道具を使い、赤道部とアイリス部の端から一定の距離でケガキ線を入れ、溶接部を挟んで2本のケガキ線の距離を溶接の前後で測った。図2.11.1の右の写真は、ダンベルの中心に45度の角度で鏡を設置し、アイリス部の内側に入れたケガキ線間の距離を顕微鏡で測定している様子である。

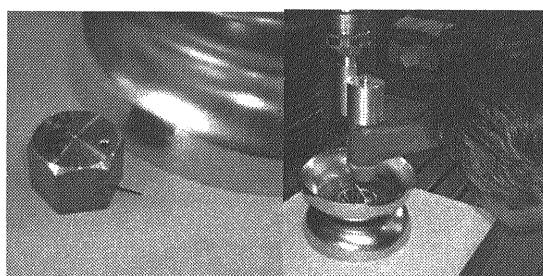


図2.11.1：左：ケガキ線を入れる道具。銅製のテスト用カップにケガキ線を入れるテストをしたときの写真。右：アイリス部の内側に入れたケガキ線間の距離を顕微鏡で測定している様子。

表2.11.1にその測定結果を示した。表からわかるように、アイリス部では溶接縮みは0.15mmと小さく、赤道部では0.42mmと大きな値になっている。溶接縮みは、溶接パラメーターと共に溶接する部位の形状や熱容量などで大きく変わる。前述したカップのトリミングの際には、この溶接縮みを想定してカップのトリミングサイズを決めている。

表 2.11.1: 溶接による縮み. (単位: mm)

溶接箇所	平均	標準偏差	サンプル数
アイリス部	0.148	0.044	32 (ダンベル)
赤道部	0.424	0.125	27 (セル)

2.12 製作精度の測定

2.7節の図2.7.1で示した3次元形状測定

装置により、4本のイチロー空洞について9セル部分の長さを測定した。その結果を表2.12.1に示す。

表 2.12.1: イチロー空洞の長さ測定 (単位: mm)

空洞	9セル部の設計値からの偏差 (設計値=1038.5 mm)
1 st	-10.0
2 nd	-0.7
3 rd	-0.1
4 th	-0.1

1本目のイチロー空洞は、2.7節で説明したダンベルのチューニングを行わなかったため、設計値から10mmも短くなってしまった。チューニングを行った2本目からは設計値に対して1mm以下の偏差に収まっている。2本目では作業者がまだチューニングについて不慣れだったが、3本目と4本目では学習効果が現れている。ダンベルのチューニングを行えば、9セルの部分（設計値=1038.5mm）に対して、僅か0.1mmの誤差で製作できることがわかる。

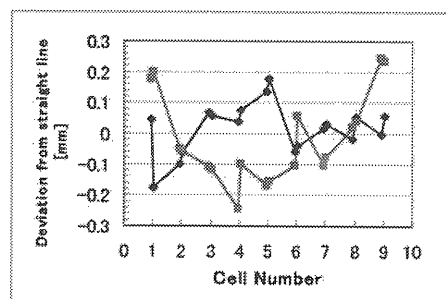
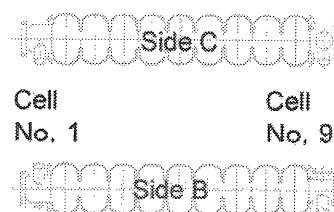


図2.12.1：空洞の真直度の測定。下のプロットで赤がside B、青がside C へのセル中心座標の射影を表す。

次に、空洞の真直度を測定する方法について述べる。各セルの赤道部の円周を3次

元形状測定装置で測定し、円周の中心を3次元座標として求め、9つのセル中心座標の真直度を空洞の真直度として測定を行った。実際の測定では、赤道部は溶接のため表面が荒れているので、溶接部を挟む2本のケガキ線に沿って円周を測った。溶接が終わった直後の空洞について、この方法で真直度を測定した結果を図2.12.1に示す。

セルの中心座標は3次元なので、図2.12.1では、これを2次元に射影している。図中の上に空洞の射影面をside B, Side Cとして表している。Side B から空洞を90度回転するとside C となる。図2.12.1下のプロットから、空洞はおおむねバナナ型に変形しているのがわかる。また、理想的な直線から最も離れている点の、直線からの距離は、0.24mmであることがわかる。

この測定を4本のイチロー空洞で行った結果を表2.12.1に示す。この表から、溶接が終わった直後において、理想的な直線からのずれは0.4mm程度に収まっていることがわかる。このずれは、空洞のバナナ型の変形の頂点を機械的に押すことによって、0.1mm程度まで修正できることが確認されている。

したがって、ILC用超伝導空洞に関する製作精度はおおよそ0.1mm程度と考えられる。しかし、ダンベルのチューニングやバナナ型の修正には、かなりの時間と手間が必要で、これをどのように量産過程で実現するかはこれからの課題である。

表 2.12.1: 真直度の測定

空洞	直線から最も離れたセル中心座標の直線からの距離 (mm)
1 st	0.33
2 nd	0.24
3 rd	0.27
4 th	0.38

2.13 プレチューニング(Pre-tuning)

超伝導空洞は、空洞内で共振する電磁波

の定在波によって粒子を加速する。9セル空洞の場合、セルの赤道部が定在波の腹になり、アイリス部が節となる電磁波の共振を使って粒子を加速する。このような共振状態は π モードと呼ばれる。完成した空洞は、ネットワークアナライザなどによりまず低電力でRF特性を測定する。

製作後の空洞は、 π モードの共振周波数で共振させた場合、各セルの電場の強さが大きくばらついている。このばらつきを測定する典型的な方法としてビードプル (bead-pull) 法がある。その方法を図2.13.1に示す。この方法の詳細については文献[1]を参照されたい。

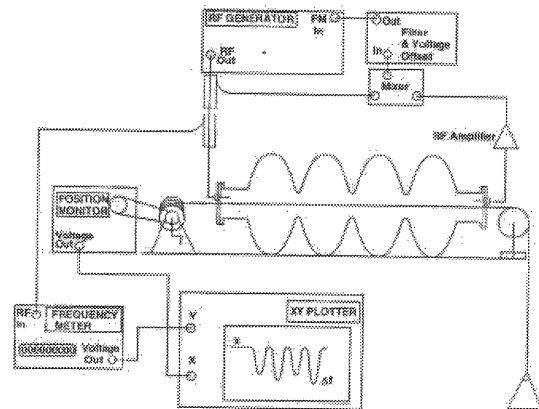


図2.13.1: ビードプル (bead-pull) 法による各セルの電場測定

以下でビードプル法を簡単に説明する。空洞の両端のフランジにアンテナを設置し、片方のアンテナ (図中では左) から π モード共振周波数でRF信号を入力する。それと同時に空洞の中心軸に直径数mmの金属の球体を1つ付けたビニール製の線 (釣り糸など) を図2.13.1のように通しておく。線に付けた球体は、線を押し引きすることで空洞の中心軸上を自由に移動できる。この方法で、金属球を空洞の端から一定の速度でゆっくり移動していくと、金属球が押しつけた電場の体積に関して、 π モード共振周波数が変化する。この周波数の変化量は、もう一方の端に取り付けたアンテナ (図中では右) から出力されたRF信号と入力信号をミキシングすることで測定できる。この

測定で、9つのセルで起こる周波数の変化が同じであれば、9つのセル内の電場の強さも同じということになる。この方法は、糸に通した金属球が数珠球 (bead) のようなので、数珠球を引っばるということでビードプル (bead-pull) 法と呼ばれている。

さて、この方法で製造直後のイチロー空洞内の電場を測定した結果が図2.13.2の左のプロットである。9個の谷の深さが9つのセル内の電場の強さの2乗に比例しており、この測定では、9つのセルの中で最小電場と最大電場の比が0.1%という結果であった。すなわち、最も左の谷と最も右の谷の深さの比の平方根が0.1%ということである。

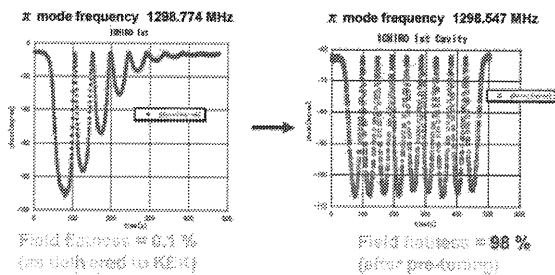


図2.13.2：プレチューニング前後のセルの電場のばらつきの測定結果

この比、すなわちセル間の電場のばらつきは、通常98%程度までそろえる必要がある。セルを適切に変形させることで電場の強さをセルごとに変えることができるため、この方法で電場を整える。図2.13.3に、ビードプル法の測定をしながらセルに塑性変形を与える装置の写真を示した。図中右の写真で、1つのセルの両端のアイリスに挿入する爪状の金属板が示してある。この爪状の板をアイリス部に挿入した後に、ステッピングモーターで板の間隔を狭めたり広げたりすることで、セルをつぶしたり押し広げたりして塑性変形させる。このとき、ビードプル法によって電場がどのように変化したかをモニターしながら変形を加え、これを繰り返すことで電場の強さをそろえる。

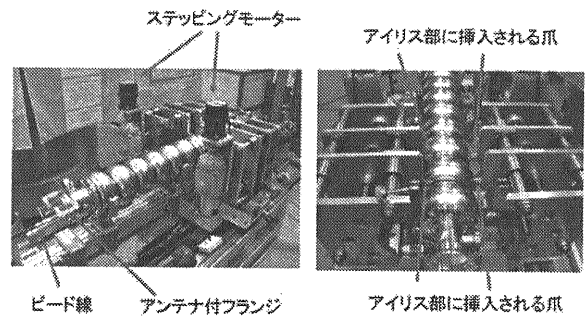


図2.13.3：プレチューニングのセットアップ

この装置によって、イチロー空洞の各セルの電場を整えた後のプロットを図2.13.2の右に示した。このプロットでは電場の強さを示す谷の深さがほぼそろっていることがわかる。この例では、最小電場と最大電場の比は98%であった。

プレチューニングは製造した全ての空洞について必要な工程である。また、一度プレチューニングをした空洞でも、輸送する際に配慮を怠ると振動などで空洞が変形し、再度プレチューニングが必要になる。これから解説する空洞の表面処理の過程でも、空洞は変形する可能性がある。よって、量産の工程でいかに簡単迅速な方法でプレチューニングを行うかは、これからの重要な課題である。

3. 超伝導空洞の表面処理

超伝導空洞は、超伝導状態で運転を行うため、空洞内面が非常に滑らかでかつ清浄に保たれていなければならない。空洞内面が滑らかでない場合、フィールドエミッション (Field Emission) によって暗電流が増加したり、クエンチ (Quench) によって超伝導状態が破れるため、粒子の加速ができない。従って、空洞の内面をいかに滑らかに処理し、清浄に保つかが重要になる。これらの処理の内容は、料理のレシピに例えられ、表面処理のレシピ (surface preparation recipe) と呼ばれている。レシピが良ければ美味しい料理ができるように、表面処理のレシピがよければ、滑らか

で清浄な表面が得られ、その結果、よい超伝導空洞の性能が得られるというわけである。

KEKでは、トリスタン建設の時に開発された超伝導空洞の表面処理技術があり、その後もこの技術の研究を続けてきたため、世界でもトップレベルの表面処理レシピを確立している。このKEK独自の表面処理をKEKレシピ (KEK recipe) と呼んでいる。この章では、このKEKレシピについて解説する。

3.1 KEKレシピの概要

図3.1.1にKEKレシピの概要を、処理を行う順番で示した。溶接を終わった空洞は、空洞内に水と石を入れて蓋をし、特殊な装置で空洞を揺り動かして内面を機械研磨する。これを遠心バレル研磨 (Centrifugal Barrel Polishing : CBP) と呼んでいる。この処理の目的は、ニオブ材にある欠損の除去や、電子ビーム溶接の継ぎ目部分の平坦化である。この処理で除去されるニオブの厚さは通常135 μm 程度である。次に、化学薬品によって、空洞の内面をエッチングする。この処理の目的は、機械研磨の研磨石の粉などの除去と、後で行う電界研磨処理の前に、ある程度滑らかな表面を準備することである。化学研磨では通常10 μm 程が除去される。次に、空洞全体を真空炉において、摂氏750度で3時間の焼鈍を行う。この処理では、機械研磨で材料内に蓄積された応力の開放と、水素の脱ガスが行われる。次に、電界研磨 (Electro-Polishing : EP) を行う。電解研磨は、元々海外で考案された研磨方法であるが、トリスタンの研究開発の時にKEKが独自の方法を考案し、これを発展させた。この方法がKEKレシピの本質的な役割を果たしている。電界研磨では、化学反応と同時に、電極と空洞の間に電解液を解して電流を流す。この処理では、約80 μm が除去される。

処理名	処理内容	除去厚み (μm)	目的
遠心バレル研磨 (CBP)	水と石による機械研磨	135 ~ 235	ニオブ材料の欠損の除去や、溶接部分の平坦化
化学研磨 (CP)	化学反応、エッチング	10	機械研磨の汚れ除去、EP前にある程度スムーズな表面を準備
焼鈍	750 $^{\circ}\text{C}$ 、3時間 真空炉にて焼鈍	-	機械研磨などで蓄積されたストレスの開放、Hガスの脱ガス
電界研磨 (EP)	化学反応と電気反応	80	非常にスムーズな表面を作る
高圧洗浄 (HPR)	超純水 (UPW) による 高圧洗浄	-	表面の異物の除去、清浄化
ベーキング	120 $^{\circ}\text{C}$ 、48時間 空洞内を真空排気	-	酸素の拡散

図3.1.1 : KEK レシピの概要

電解研磨を終えた空洞は、クリーンルーム内で超純水を使用して高圧洗浄される。この処理の目的は、電解研磨の時に付着した化学薬品の除去や、空気中であって空洞の内面に付着した微粒子などの除去である。この処理の後、クリーンルーム内で、空洞の両端のフランジに、アンテナと真空排気用のポートが付いたフランジを取り付ける。空洞を真空排気装置で排気した後、摂氏120度で48時間のベーキングを行う。この処理の目的は、空洞内面にある酸素を拡散させることである。これらの処理が終わって初めて空洞は液体ヘリウムに浸した状態で性能の測定を行う。

以下では、KEKレシピの各処理の詳細を解説するが、空洞性能の評価については解説していない。KEKレシピと空洞性能の関係については文献[2]を参照されたい。

3.2 遠心バレル研磨 (CBP)

図3.2.1の左上に遠心バレル研磨装置の解説図を示す。遠心バレル研磨では、研磨石と水を空洞の中に入れ、図のように回転することで研磨石が空洞の内面を研磨する。この図からわかるように、公転と自転で回転方向が逆になっているため、研磨石が効率よく内面を削ることができる。図3.2.2に、実際の遠心バレル研磨装置の写真を示した。

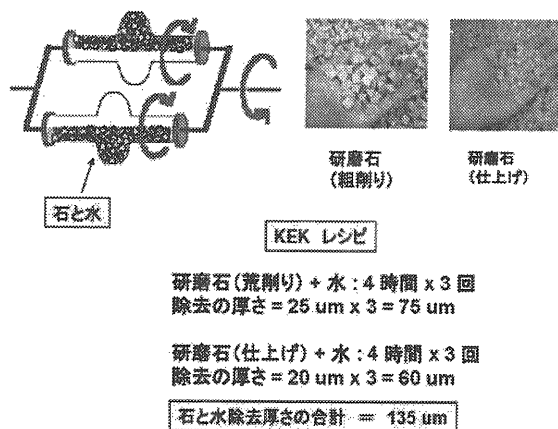


図3.2.1 : 遠心バレル研磨

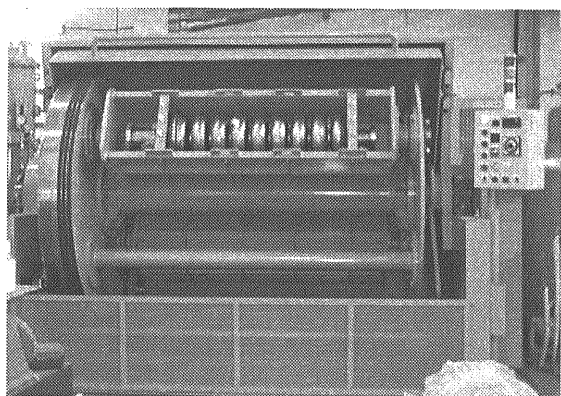


図3.2.2 : 遠心バレル研磨装置

遠心バレル研磨では、荒削り用研磨石が1種類、仕上げ用研磨石が3種類、合計4種類の研磨石を使用する。図3.2.1の右上に研磨石の写真を示した。荒削り用研磨石を使用した場合、1回の遠心バレル研磨（4時間）で、25 umほど削れる。通常、KEKレシピでは、荒削りを3回行う。これにより、材料にある深い欠損や、電子ビーム溶接箇所荒れた面を取り除く。仕上げ用研磨石の場合、除去厚みは1回で20 - 10umほどである。KEKレシピでは、仕上げ研磨を研磨石の種類を変えつつ3回行う。荒削り研磨と仕上げ研磨を合計して、除去厚みは約135 umほどになる。

電子ビーム溶接箇所が通常よりも荒れている場合や、大きな欠損がある場合には、荒削りの回数を増やさなければならない。図3.2.3にセルの赤道溶接部を遠心バレル研磨で削った時の表面の変化を示した。良

い溶接であれば、2回目の荒削りで滑らかな面が得られることがわかる。一方、溶接が良くないと荒削りの回数が10回にも及び、除去厚みは200umを超えてしまう。このため、電子ビーム溶接の時に適切なパラメーターでなるべく凹凸の少ない溶接を行うことが重要である。

遠心バレル研磨装置はKEK独自の機械研磨装置で、他の研究所では機械研磨を省くレシピが一般的である。DESY研究所では、このような機械研磨装置を使って欠損を除去する代わりに、ニオブ板材の段階で欠損がないかをエディーカレントを利用した検査装置を使って全数調べている。これは非常に時間と手間がかかる工程である。また、溶接箇所を機械研磨しない場合には、よい溶接の場合でも凹凸を除去しきれないため、赤道の溶接箇所ではクエンチが多く発生する。遠心バレル研磨では、材料にある欠損と電子ビーム溶接箇所の凹凸を同時に削って平坦で一般的な表面を準備することができる。

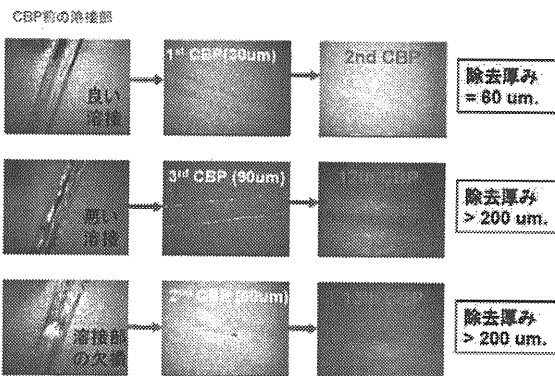


図3.2.3 : セルの赤道溶接部の遠心バレル研磨装置による研磨表面

3.3 化学研磨 (CP)

図3.3.1に単セル空洞の化学研磨 (Chemical Polishing: CP) の写真を示した。化学研磨液の組成は、フッ酸 (HF, 46%) : 硝酸 (HNO₃, 60%) : リン酸 (H₂PO₄, 85%) = 1:1:1(体積比)である。図3.3.2に、化学研磨をした後のニオブの表面の写真と、化学研磨の反応式を示した。化学研磨は、次に解説する電解研磨に比べると研磨面が粗い

が、研磨液を注ぎ込むだけで簡単に処理ができ、電解研磨装置を持たない研究所などでもある程度の性能を達成できる。このため、最終的な表面処理として数十um近く大量に化学研磨する方法は広く行われている。

KEKレシピでは、通常、化学研磨の除去厚みは10 um程度である。この処理の目的は、機械研磨の研磨粉などを除去すると同時に、次の電解研磨の前に表面をある程度滑らかにしておくことである。

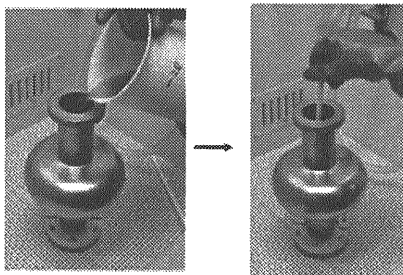
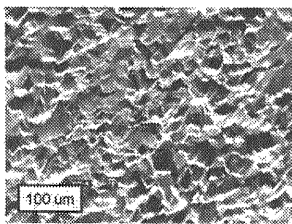


図3.3.1：単セル空洞の化学研磨



・簡単、研磨速度が速い

CPの問題点：研磨面が荒い。

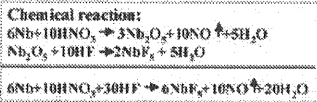


図3.3.2：上：化学研磨で処理されたニオブ表面。

下：化学研磨の反応式。

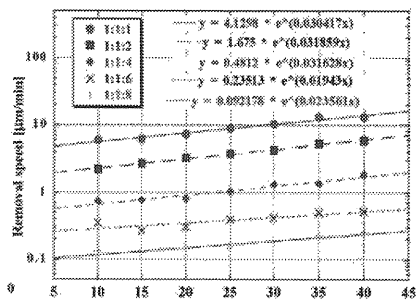


図3.3.3：化学研磨の研磨速度

には関与していないことがわかる。リン酸は、研磨液に粘性を与えると同時に、反応速度を和らげる働きをしている。図3.3.3に、研磨液のリン酸濃度を変えたときの研磨速度を、温度の関数として示した。通常使用する(1:1:1)の体積比の場合は赤丸で示してあり、常温(摂氏25度)で10 um/min程度の反応速度である。

9セル空洞を処理する場合は、大量の研磨液を扱うため、作業の安全性を考えて体積比(1:1:3)の研磨液を使用し、反応速度を遅くして研磨を行う。この場合も除去厚みは10 umである。

3.4 焼鈍 (Annealing / Degassing)

化学研磨を行った空洞は、真空炉により摂氏750度で3時間の焼鈍(Annealing)を行う。真空炉の真空度は10E-6 Torr程度である。図3.4.1にイチロー空洞を真空炉に入れる様子を示した。この処理の目的は、摂氏700度程度で起こる水素の脱ガス(Degassing)である。図3.4.2に、焼鈍の時の温度と圧力の変化を示した。図中の圧力の変化に水素脱ガスのピークがはっきりと現れている。機械研磨や化学研磨において、材料の欠損から水素が吸蔵されるが、これを脱ガスしないと、超伝導状態でQ値が下がってしまう病気、いわゆる水素Q病(Hydrogen Q-disease) [1]の原因となる。摂氏750度程度の焼鈍では、材料の軟化はそれほど問題にはならない。

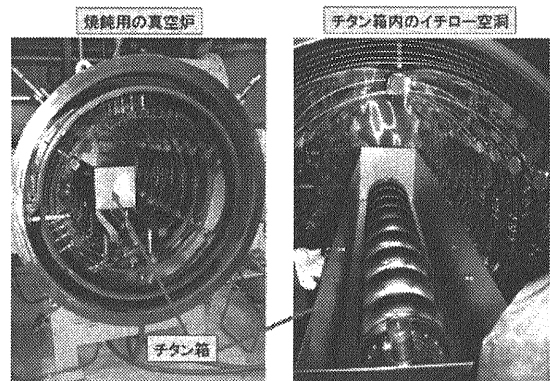


図3.4.1：焼鈍用真空炉内のイチロー9セル空洞

図3.3.2の反応式をみると、リン酸は反応

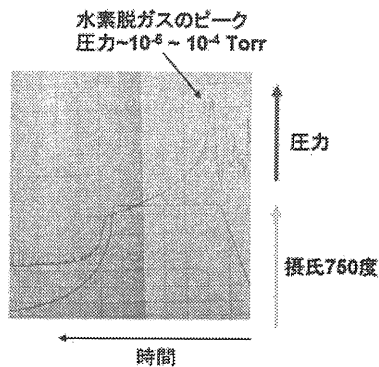


図3. 4. 2 : 焼鈍時の温度と圧力の関係。水素脱ガスのピークがはっきりとわかる。

3.5 電解研磨 (Electro-Polishing: EP)

図 3.5.1 に、電解研磨 (Electro-Polishing: EP) で使う化学反応と電気反応を示した。電解研磨液 (EP acid) を電解液として、ニオブ陽極と純アルミ陰極に電圧を印加すると、陽極のニオブが電解液に溶解出して研磨され、陰極では水素が発生する。EP 液の組成は、 H_2SO_4 (>93%) : HF(46%) = 10:1 (体積比) で、その反応式を図3. 5. 1に示した。

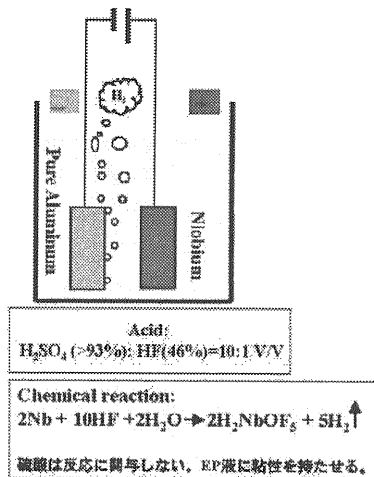


図3. 5. 1 : 電解研磨の原理

電解研磨の反応は、詳しくは2段階で起こっている。第1段階では、電気反応によりニオブの表面に酸化膜が形成され、第2段階でその酸化膜が電解液中のフッ酸 (HF) により溶かされる。実際の電解研磨では、

ニオブ陽極を電解液内で揺り動かし、この第2段階の反応を促す。この時、もしニオブの表面に凹凸があると、凸の部分で第2反応がよく起こるために凸部分を選択的に研磨することができる。このため、電解研磨では化学研磨に比べてより滑らかな面が得られる。

図3. 5. 2にKEKで使用している電解研磨装置 (EP facility) の解説図を、図3. 5. 3に単セル空洞用の電解研磨装置の写真を示した。この装置では、空洞を横に設置して回転させるため、横型回転電解研磨法 (Horizontally Rotated EP Method) と呼ばれている。これはトリスタンの研究開発で考案されたKEK独自の方法である[3]。図3. 5. 1の中央、図3. 5. 2の左下に見えるリザーバータンク内に電解研磨液が蓄積されている。図3. 5. 2の装置は単セル空洞用で、タンク容量は100Lである。リザーバータンク内のEP液は、ポンプによって空洞内に送り込まれ、循環してリザーバータンクに戻ってくる。危険な電解液は全て密閉系に閉じ込められており、作業性や安全性の面で利点となっている。しかし、これらの配管、ポンプ、リザーバータンクはフッ酸に腐食されないために、全てテフロン製かテフロンライニングされた製品を使用しなければならない。このため、設備は非常に高価である。

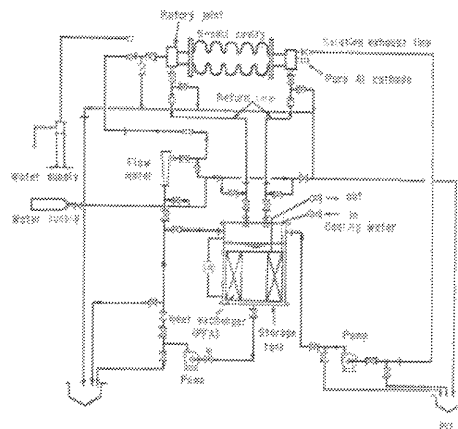


図3. 5. 2 : 横型回転電解研磨装置の解説図

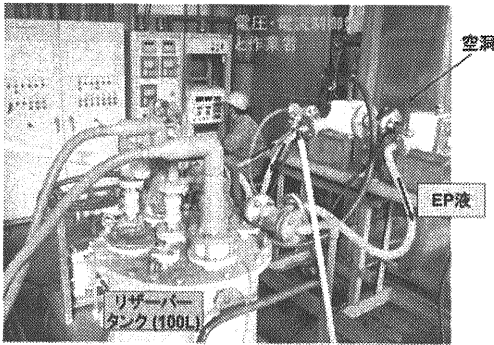


図3.5.3：単セル空洞の横型回転電解研磨装置の全体システム

図3.5.4に、空洞周辺の詳細図を示した。上の図をみると、EP液は純アルミの電極の中を通り、空洞の中心部にある上向き噴出孔から空洞内に送り込まれている。空洞内のEP液は両端のビームパイプから出てリザーバーバンクに戻る。このとき、陰極パイプは固定された状態で、空洞だけが図に示したように1rpmで回転する。この回転が、前述した電解研磨の第2段階の反応を適切に促す。図3.5.4の左下の写真に、電流の流れを示した。空洞は回転しているため、架台に設置したブラシと空洞が接触して電流が伝わり、陰極パイプから電源に戻る。単セル空洞の場合、典型的な電圧は約20V、電流は約40A程度で、80umを削るのに3時間半を要する。

図3.5.4の右下に、空洞の赤道部分での断面図を示した。パイプ状の純アルミ陰極はEP液面より下に設置されている。これは、陰極が液面から出てしまうと腐食されるためである。また、陰極パイプの上には、テフロン布で製作された陰極バッグが覆っている。これは陰極で発生する水素を空洞壁面に触れさせないため、陰極バッグ内の水素はビームパイプを通して空洞外に排出される。また、陰極パイプの噴出孔の下付近に温度計が設置されており、EP液の温度をモニターしている。電解研磨の反応は発熱反応であるため、EP液を適当な流量で流して液温を制御する。もしEP液の温度が35度を超えて、水素ガスの排出が十分でない

と、ニオブ材に水素が吸蔵され、水素Q病を発症する。このため、電圧値と電流値に加え、EP液の温度が研磨中に常時モニターされている。

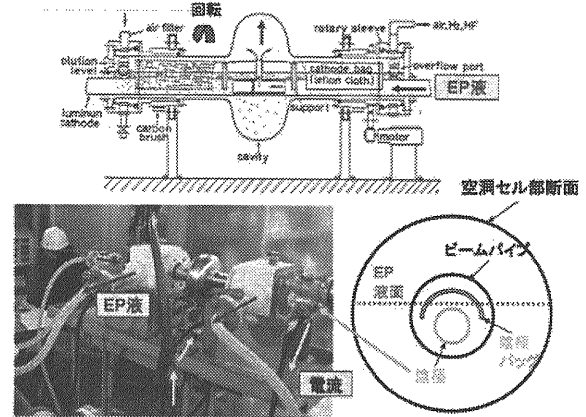


図3.5.4：単セル空洞用の横型回転電解研磨装置の空洞内の構造

図3.5.5に、電解研磨による処理表面の写真を示した。図3.3.2の化学研磨の写真に比べると、滑らかな表面であることがわかる。

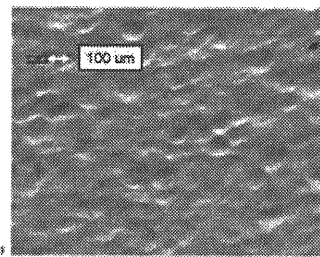


図3.5.5：電解研磨による表面

電解研磨において、EP液内に硫黄が析出することが知られている。この硫黄は、空洞の表面に付着するとフィールドエミッションの種になる。このため、次の工程の高圧洗浄で空洞表面の不純物をすべて取り去る必要がある。

9セルのイチロー空洞4本の内、3本は既に電解研磨処理を行った。図3.5.6に、9セル空洞での電解研磨処理の写真を示した。9セルの空洞の場合、リザーバーバンクの容量が1000Lとなり、電流が約200Aになることを除くと、単セル空洞の装置と全く同じ構成となっている。

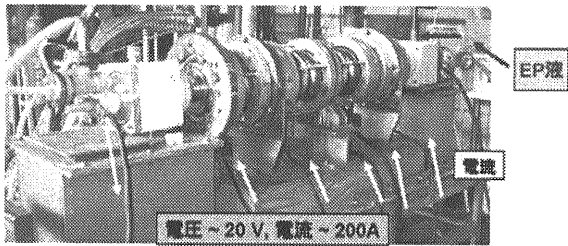


図3.5.6：9セル空洞の横型回転電解研磨装置

横型回転電解研磨は、KEKにおいてトリスタンの研究開発の時に考案されたものであるが、その後DESY研究所やJefferson研究所がこれを取り入れ、現在ではILC空洞の標準的な最終研磨工程となっている。

3.6 高圧洗浄 (High Pressure Rinse: HPR)

電解研磨が終わった空洞は、純水で洗浄された後、超純水で高圧洗浄される。図3.6.1に、高圧洗浄 (High Pressure Rinse: HPR) の解説図を示した。

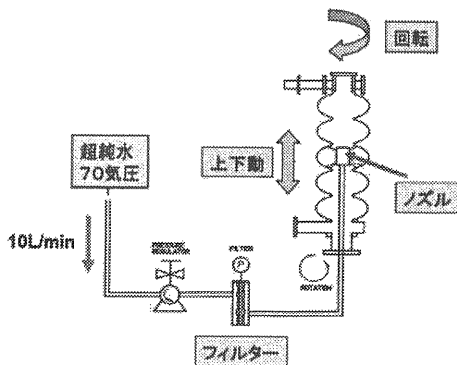


図3.6.1：高圧洗浄の解説図

この段階で、空洞の中には電解研磨液の汚れや析出した硫黄が付着している。また、空気中には多くの粒子が浮遊しているため、これらの粒子で汚染されている。高圧洗浄では、図3.6.1のように空洞の中にノズルを挿入し、70気圧の圧力で超純水を空洞内面に吹くつけることで付着物を完全に除去する。超純水の流量は10L/min程度である。空気中の粒子の付着を避けるため、高圧洗浄はクリーンルーム内で行われる。図3.6.2に、9セル空洞を高圧洗浄している写

真を示す。KEKレシピでは、9セル空洞に対して6時間の高圧洗浄を行う。

高圧洗浄では、超純水が汚れていると空洞は十分な性能が得られない。洗浄中は、超純水が電気伝導度 $> 18 \text{ M ohm cm}$ であること、Total Organic Carbon (TOC) の濃度が $10 \sim 20 \text{ ppb}$ であることをモニターしている。また、洗浄を始めた時と終わった時に水を採取し、バクテリアの数を数えている。通常は $0 - 3 \text{ 個/mL}$ 程度の値である。現在のところ、以上のようなパラメーターであれば十分な空洞性能が得られることがわかっている。しかし、超純水は非常に高価であるため、量産を考えると、今後、これらのパラメーターを、コストを考慮した上で最適化する研究が必要である。

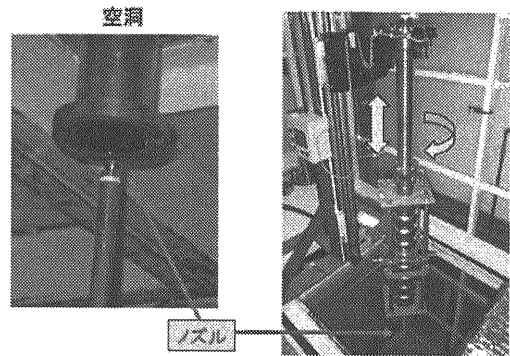


図3.6.2：高圧洗浄の解説図

3.7 空洞の組み立て

高圧洗浄を終わった空洞を、クリーンルームに移動し、真空ポートやアンテナが付いたフランジを空洞に取り付ける。

図3.7.1にKEKのクリーンルームの写真を示す。クリーンルーム内では、天井部分に高性能フィルターが設置されており、このフィルターから清浄な空気が上から下に向かって吹き付けられている。写真右の壁の下部に通風孔が見えるが、下に吹き付けられた空気はこの穴から出て天井のフィルターに戻り循環を繰り返す。

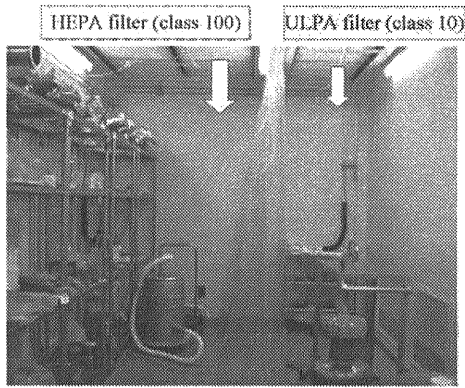


図3.7.1: クリーンルーム

クリーンルームの清浄度を表すためにクラスという単位を使うが、これは1立方フィートあたりに、直径0.5 μm 以上の粒子が何個以下に保たれているかで表わされる。例えば、クラス100のクリーンルームといった場合には、粒子が多く発生するような作業をしても、その作業を数十秒間止めれば、上からの清浄な空気の流れによって粒子が除去され、直径0.5 μm 以上の粒子が1立方フィートあたり100個以下の環境に回復することが保障される。

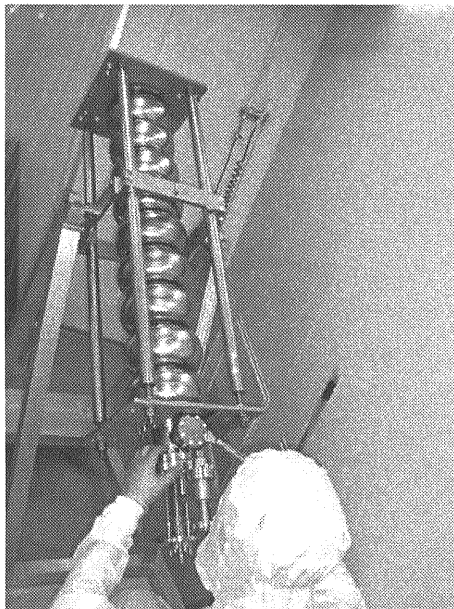


図3.7.2: クリーンルーム内での作業

図3.7.1のクリーンルームは、ビニールシートによって2つの部分に仕切られており、右側の清浄度がクラス10、左側の清浄度がクラス100となっている。クリー

ンルーム内で作業を行う場合は、粒子計測器によって常に作業領域周辺の粒子数を計測しながら作業を行う。

図3.7.2に、クラス10の環境でイチロー空洞に真空ポートとアンテナ付のフランジを取り付けている様子を示した。作業者はクリーン服を着用している。写真右の壁際に青く見えるパイプの先端が粒子計測器の空気吸い込み口である。

フランジを取り付けた後、空洞内は真空に排気され、その後の測定テストでは空洞を超流動状態の液体ヘリウムに浸して測定を行う。このため、フランジと空洞のシール部分は、真空シールだけではなく超流動の液体ヘリウムに対してもシールされる必要がある。この条件を満たす典型的なシール方法として、インジウム線をOリングのようにして使い、これを押しつぶしてシールする方法がある。図3.7.3に、インジウムのリングをフランジの面に載せた状態の写真を示した。インジウム線は非常に柔らかいため、図のようなポリエチレンの円筒にインジウム線を巻きつけてリング状に成形し、ポリエチレンの円筒をとりぞいた後に、空洞ビームパイプのフランジ面との間でインジウムを押しつぶしてシールする。この方法は十分な経験があり信頼性も高い。しかしインジウムは高価であるため、DESY研究所やKEKではILCのためにアルミや銅のガスケットを使用する方法を研究している[4]。

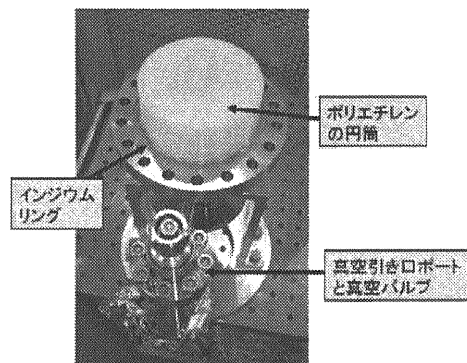


図3.7.3: フランジをシールするためのインジウムリングの準備

図3.7.4に、空洞の組立作業中の粒子数の時間変化を表すプロットを示した。縦軸は1立方フィート内の直径0.3 μm 以上の粒子の計測数を表している。赤い横線がクラス10の環境を表している。クリーンルーム内の作業といえども、作業者が動いたり部品が擦れたりすると粒子が発生す。このため、空洞のビームパイプの口には仮蓋をして粒子が空洞内面に入らないようにする。インジウムシールの準備が整った段階で作業を止めて数十秒待ち、清浄な環境であることを確認した後、仮蓋を取って即座にシールを挟んでフランジで蓋をする。図3.7.4で「インジウムシール」と示してあるのがこの作業を表しており、クラス10の環境でシール作業が行われたことがわかる。

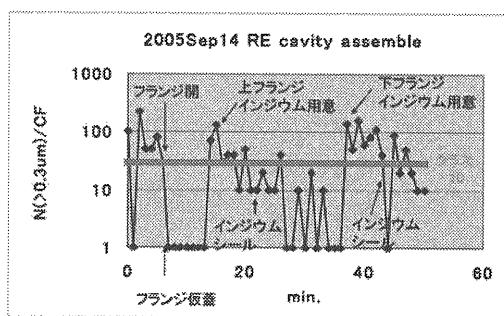


図3.7.4：クリーンルームでの作業中の粒子計測数の推移

3.8 ベーキング(Baking)

クリーンルーム内での組み立てを終わった空洞は、空洞内を真空に排気した後、摂氏120度で48時間のベーキングを行う。図3.8.1に9セル空洞用のベーキング装置の写真を示した。空洞の左のフランジにある真空引き口ポートが真空排気装置に接続されており、真空排気とベーキングが同時に行える。

この処理の目的は、空洞内面のごく表面にある酸素を拡散させることである。空洞の内面に酸素が存在すると、空洞に電磁場を入力した際に電界が高くなるにつれてQ

値が落ちる現象が発生する。摂氏120度でベーキングすると、酸素が空洞の壁面の奥深くに拡散する。超伝導電流は空洞の内面の深さ40 nmにしか流れないため、48時間のベーキングにより元からあった酸素は40 nmより深く拡散し、Q値が落ちる現象は現れない。一方、48時間以上のベーキングを行うと、空洞表面に形成されている Nb_2O_5 の酸化膜が分解され、新しく酸素が発生してしまい逆効果となる。

ベーキングに48時間を要するという事は、量産する時には、2日間に製造される空洞の数だけ真空排気装置付のベーキング装置が必要ということになる。ベーキングを不要にするような処理の開発や、ベーキング時間を短くすればコストの削減に繋がるため、ベーキングによる酸素の拡散と空洞性能の関係についてより詳しい研究が進められている。[5]

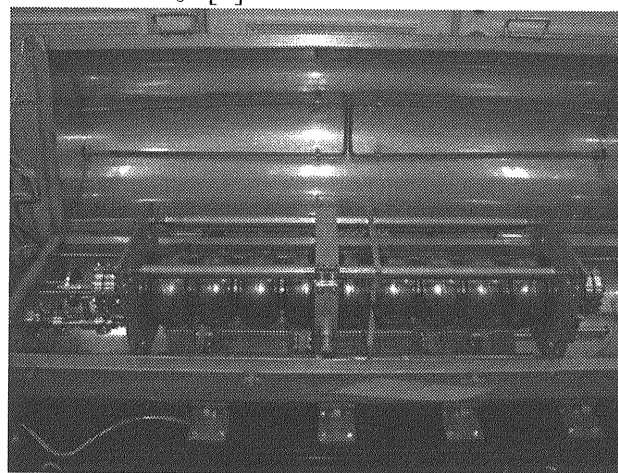


図3.8.1：9セル空洞のベーキング装置。空洞の左のフランジに付いている真空ポートが真空排気装置に接続されている。

参考文献

- [1] H. Padamsee et al., “RF Superconductivity for Accelerator”, Wiley Series in Beam Physics and Accelerator Technology, A Wiley-Interscience Publication, JOHN WILEY & SONS, INC.
- [2] T. Saeki, “Series tests of high gradient single-cell superconducting cavity for the establishment of the KEK recipe”, Proc. of EPAC06, Edinburgh, June 2006.
- [3] K. Saito et al., “R&D of Superconducting Cavity at KEK”, Proceedings of 4th Workshop on RF Superconductivity, Vol. 2, Aug. 1989, KEK, Japan. .
- [4] H. Matsumoto et al., “Experience with a zero impedance vacuum flange at He super-leak temperature for ILC”, Proc. of EPAC06, Edinburgh, June 2006.
- [5] G. Ciovati. “Improved oxygen diffusion model to explain the low temperature-baking on high-field losses in niobium superconducting cavities”, Applied Physics Letters 89, 022507, 2006, URL: <http://apl.aip.org/apl/copyright.jsp>.