

超伝導加速空洞の製造

1. はじめに

国際リニアコライダー計画（ILC）では電子・陽電子の加速機構として Fig.1 に示すような TESLA 型[1]と呼ばれる形状のニオブ製 9 セル超伝導加速空洞が使用される。運転の際には空洞を液体ヘリウムで 2K まで冷却し内部は真空状態にしたうえで 1.3GHz の高周波（RF）を入力し内部に加速電場をたて荷電粒子を加速する。この形状の空洞は 1990 年頃からすでに開発が行われており、世界のいくつかの加速器にはすでに実践投入されている。例えば、2016 年に完成した DESY の放射光施設の European XFEL（EXFEL）ではおよそ 800 台の TESLA 型空洞が使用されている。超伝導空洞は純ニオブ及びニオブとチタンの合金（以下ニオブチタン）から作られているが、それぞれの部品はすべて溶接によって接続されている。ニオブの融点は 2477℃と鉄などに比べると非常に高いため、溶接には出力の高い特殊な電子ビーム溶接を用いる。溶接する際に不純物などが混入すると欠陥となり空洞の性能を著しく下げる可能性がある。また、空洞内面に傷などがあるとこれも空洞性能を下げる原因となる。このため、空洞製造はクリーンな環境下で十分に管理

された手順で製造される必要がある。更に空洞材料であるニオブは切削加工の難しい難削材であり、加工には高い技術と経験が必要となる。以上の事から、世界には超伝導空洞を製造できる企業は数えるほどしかない。

前述したように ILC では DESY の EXFEL と同じ TESLA 型空洞が使用されるが、運転条件が異なるため空洞に要求される仕様が異なる。空洞の加速勾配でいえば、DESY の要求仕様は 26MV/m だが、ILC の場合は 35MV/m である。加速勾配が高くなるということは、内部にかかる電磁場が強力になる。つまり、より些細な欠陥にも敏感になり、性能劣化を起こす可能性が高くなる。更に、ILC ではおよそ 9000 台の空洞が必要となる。このため、ILC の空洞はより細心の注意を払いつつも効率よく製造を進めていかなければならない。KEK の空洞製造技術開発施設（Cavity Fabrication Facility: CFF）ではこれまで空洞製造技術の研究開発を行ってきた。主に空洞製造技術の確立、量産に向けた技術開発、新しい材料を使った空洞試作などを行っている。ここでは空洞製造の基礎及び最近の動向に関して説明する。

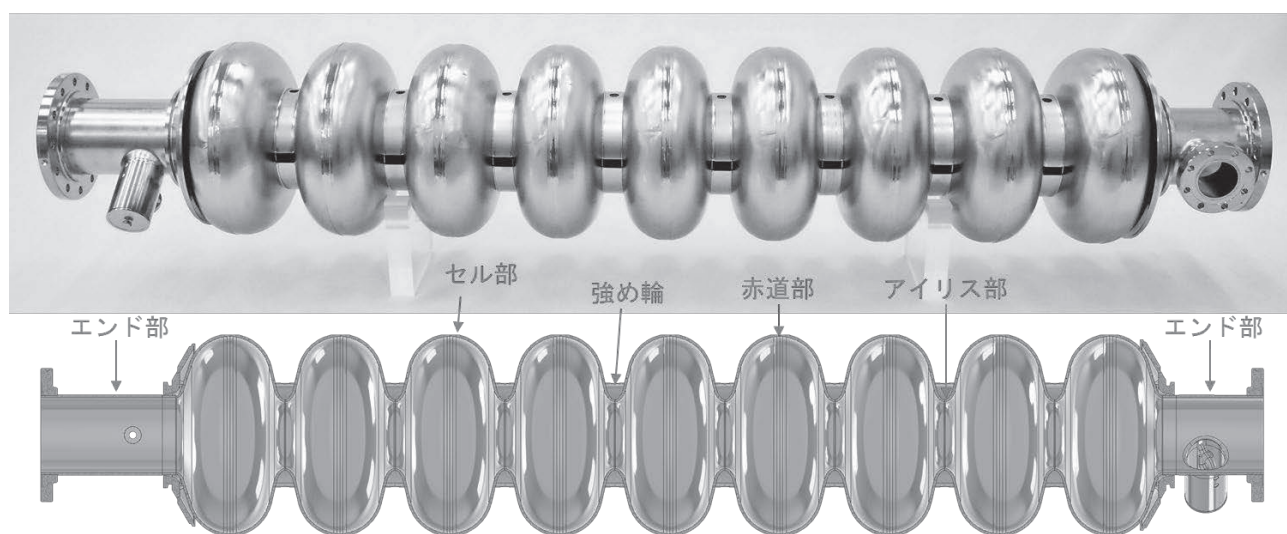


Fig. 1 超伝導空洞の写真（上）とその断面図（下）。

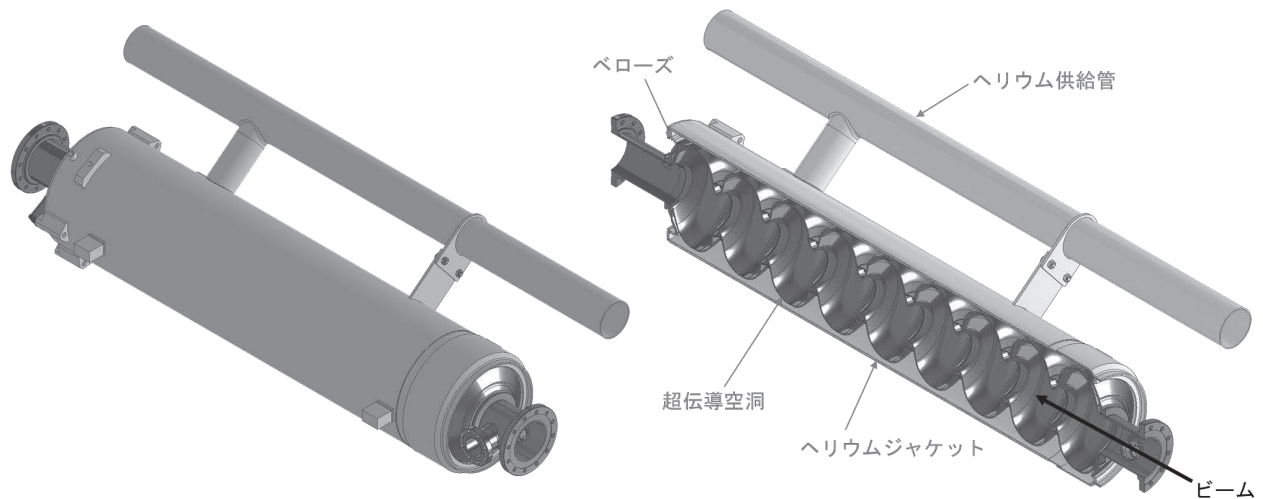


Fig. 2 空洞にヘリウムジャケットを装着した図（左）とその断面図（右）。

2. 超伝導空洞の紹介

Fig.1 に示すように TESLA 型の超伝導空洞は 9 個のセル部（膨れた部分）と両端のエンド部から成る。全長はおおよそ 1.3m ある。超伝導空洞を実際に運転する際は Fig.2 に示す様にこの空洞の周りにヘリウムジャケットと呼ばれる容器を装着し、空洞とこの容器の間を液体ヘリウムで満たし、空洞を 2K まで冷却する。空洞内部は真空状態にし、エンド部にある RF 入力ポートから 1.3GHz の RF を入力し、空洞内部に電磁場をたてる。各セルには+と-の電場が交互にたち、こ

の電場によって荷電粒子を加速する。空洞は冷却や内部に立てた電磁場によって伸縮するため、ヘリウムジャケットと空洞の間にはベローズを入れてこの伸縮を吸収する。また、この伸縮によって空洞の周波数が変わってきってしまうため、チューナーと呼ばれる機構を用いて空洞を強制的に変形させて周波数調整を行う。なお、Fig.2 にはチューナーは書かれていない。ILC で使用する空洞の詳細を Table 1 に載せる。

Table 1 ILC で使用する空洞の詳細 [2]

Type of cavity	Standing wave
Accelerating mode	TM010, π -mode
Frequency	1.3 GHz
Number of cells	9
Iris diameter	70 mm
Beam tube diameter	78 mm
Operational temperature	2 K
Operation	
-Gradient	31.5 MV/m
-Quality factor @ 31.5MV/m	$\geq 1 \times 10^{10}$
Qualification	
-Gradient	35 MV/m
-Quality factor @ 35MV/m	$\geq 0.8 \times 10^{10}$

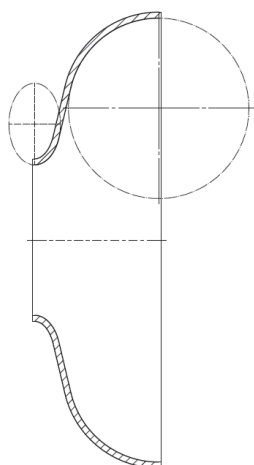


Fig. 3 ハーフセル断面図。

2.1. セル部

セル部は Fig.3 に示すお椀型形状（ハーフセル）と強め輪（Fig.1 参照）から成る。どちらも純ニオブ製である。ハーフセルは楕円と円とそれを結ぶ直線から成る。このため、この形状の空洞を楕円空洞と呼ぶこともある。ハーフセルの膨れた部分を赤道部、くびれの部分をアイリス部と呼んでいる（Fig.1 参照）。強め輪はセル部を補強し変形を防ぐための機構である。空洞内に RF を入力すると、赤道部が腹、アイリス部が節となる定常波が空洞内部にたつ。セル形状によって周波数が決まるため、製造した空洞形状が設計値から大きく外れると周波数も 1.3GHz から変わってきてしまう。よって、ハーフセルの加工は慎重に行う必要がある。それでも最終的な形状は設計値とは微小なずれがあるため、空洞完成後にチューニング機を用いて空洞を機械的に伸縮させ（塑性変形）周波数を合わせる作業が必要となる。因みに 1 セルのビーム軸方向の長さは $\lambda/2$ となっており（ λ は RF の波長）、おおよそ 115mm である。

セル内部には高い電磁場が立つが、表面に傷などの構造物があると、そこに磁場が集中し臨界磁場を越えてクエンチ（超伝導状態の破壊）してしまう。（以下、電磁場に接する面を内部、内面、RF 面と表現する。）その結果、空洞の運転が出来なくなってしまう。たとえ数十 μm の傷であっても形

状によっては大きな影響を及ぼす可能性があるため、セル内面は出来るだけ滑らかで一切傷の無い状態で仕上げる必要がある。また材料表面や内部に不純物があるとそこで発熱が続いてクエンチしてしまう。更に内部にゴミなどがあるとそこから電界放出を起こしクエンチすることもある。このため空洞内部は清浄を保たなければならない。

2.2. エンド部

エンド部は空洞の両端に来る部分で、ビームパイプや接続フランジ、RF 入力ポート、RF 出力ポート（モニターポート）、高調波カップラー（HOM カプラー）、ヘリウムジャケットのエンドプレートなどから成る。エンド部の写真を Fig.4 に示す。フランジやエンドプレートなどの強度が必要な箇所にはニオブチタン材を用いており、それ以外の箇所には純ニオブを用いている。チタンはニオブと熱膨張係数が近いので、冷却した際にひずみが生まれにくく、強度も高いため空洞の強度が必要な箇所の材料に適している。ただし、空洞完成後に行う空洞の熱処理工程などで歪む可能性があるためニオブとの合金として使用している。エンドグループは複雑な形状をしている部品や細かい部品が多い上に寸法公差も厳しい場所があり、製造する際に一番骨が折れる場所である。空

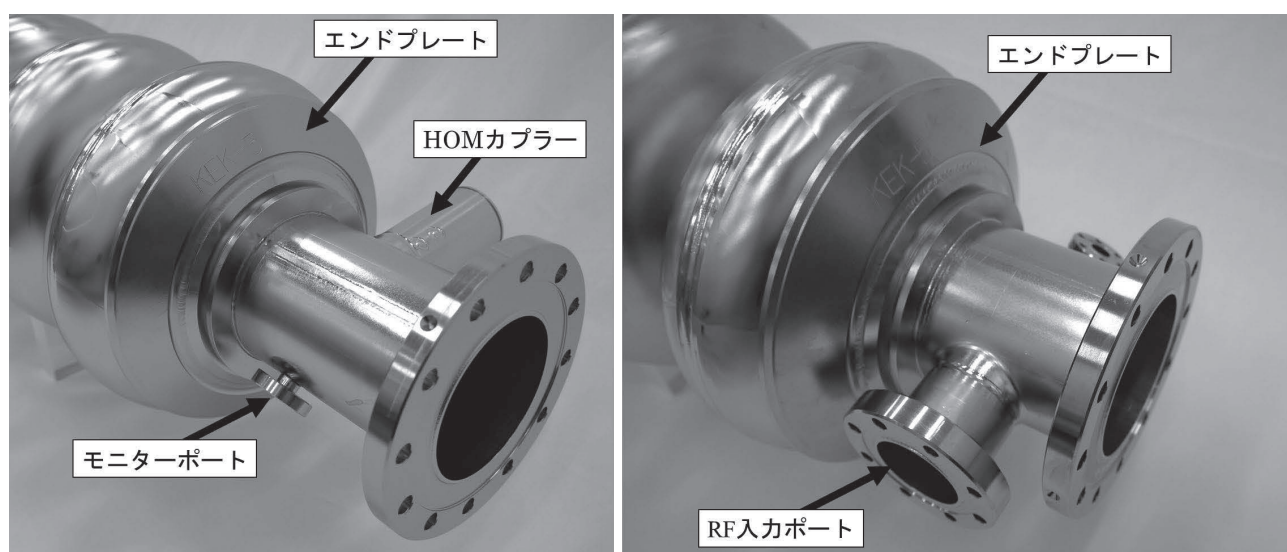


Fig. 4 エンドグループの写真。モニターポート側（左）と RF 入力ポート側（右）。

洞全体の座標基準となる部品もエンド部に含まれている。ビームパイプ部分は液体ヘリウムには直接は触れず、セル部分からの熱伝導で冷却される。

2.3. ヘリウムジャケット

Fig.2 に示す様に、空洞の外側にはヘリウムジャケットと呼ばれる純チタン製の筒を取り付け、空洞を冷却するための液体ヘリウムを溜める。空洞とは違いジャケットには熱処理は行わないため、純チタンを用いる。液体ヘリウムは高压ガス的一种であるため、ヘリウムジャケット及び空洞のセル部分は高压ガス容器に分類される。このため、高压ガス保安法に準拠した方法で製造する必要がある。ジャケットの形状は一緒に使うチューナーの種類によって大きく変わってくる。ILC 空洞用のジャケットの最終形状は現時点ではまだ決まっていない。2 章冒頭でも記載したが、ジャケットにはベローズが取り付けられており、冷却や RF によって起きる空洞の伸縮を吸収する役割を担っている。

2.4. クライオモジュール

ヘリウムジャケットを付けた空洞は 9 台（もしくは 8 台）を 1 セットとして Fig.5 に示すようなクライオモジュールと呼ばれる円筒状の真空容器に収められる。クライオモジュールの中では空

洞は 5K と 80K の断熱シールドに覆われる。クライオモジュールの中には液体ヘリウムの供給管や冷却した後に気化したヘリウムガスの回収管なども張り巡らされており、空洞と接続されている。クライオモジュール側面にはそれぞれの空洞用の RF 電力を供給するカップラーなども接続される。このため、クライオモジュールに対して空洞の位置は一意に決まるが、空洞の製造精度が悪いと空洞を設置することが出来なくなってしまう。ILC では空洞製造は海外と分担して行う予定であるが、海外で製造された空洞はクライオモジュールの形で組み上げられて輸送される。

3. 超伝導空洞の材料

前述したように、強度を必要とするフランジなどを除いて、空洞は純ニオブを用いて作られている。ニオブは成形性が良いため、プレス加工が必要となる空洞の材料に適している。また、純金属の中では比較的高い超伝導転移温度であり (9.3K)、大気中でも安定しているため超伝導材としても扱い易い。

3.1. ニオブの純度

2.1 で述べたように空洞の性能を制限するのがクエンチである。このうち、発熱によるクエンチを避けるには、発熱してもクエンチする前に冷却出来ればよい。純度の高いニオブは熱伝導率が良いため、冷却効率もよい。このため純度の高いニ

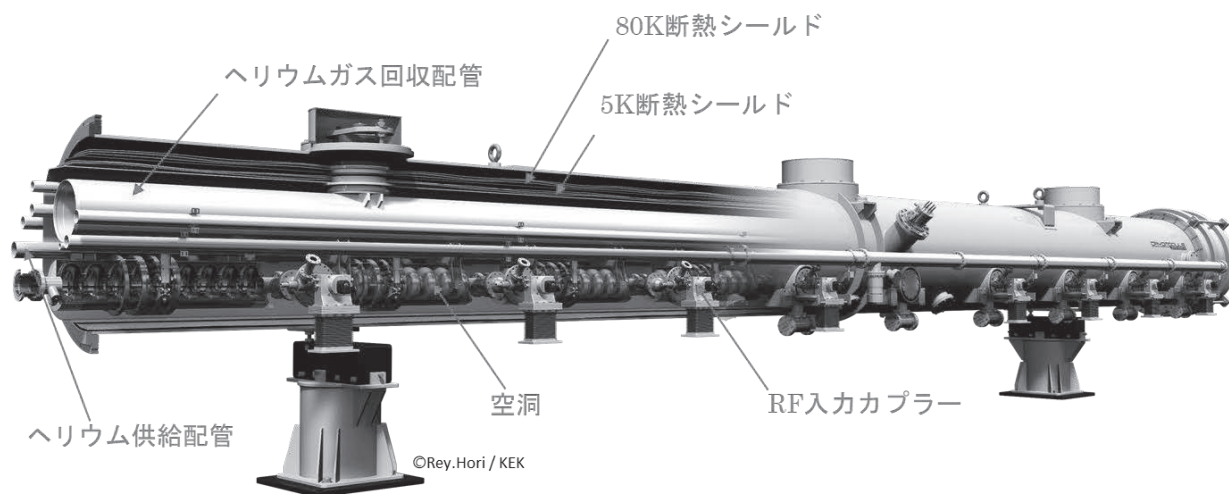


Fig. 5 クライオモジュールの図。

オブを空洞材料に使用する事によって、より高性能な空洞を歩留まりよく製造する事が出来る。ニオブの純度を表す指標として残留抵抗値比 (Residual Resistivity Ratio: RRR) という値が用いられる。RRR は室温での抵抗値と超伝導状態での抵抗値の比で表される。規格によってどの温度の抵抗値を使うか違いがあり、 $RRR = \rho(293K) / \rho(T_c)$ や、 $RRR = \rho(295K) / \rho(4.2K)$ や $RRR = \rho(273K) / \rho(4.2K)$ (ここで ρ は抵抗値、 T_c は超伝導転移温度を表す) などが散見されるが、定義によって RRR の値が 10%以上異なることもあるので注意しなければならない。ここで RRR と熱伝導率との間には $\kappa(4.2K)[W/m \cdot K] \sim RRR/4$ という関係が実験的に成り立つ [3]。(ここで $\kappa(4.2K)$ は 4.2K での熱伝導率を表す。) RRR は主にニオブ中の酸素、窒素、水素、炭素といった不純物の量に依存する。具体的には以下の式で計算する事ができる [4]。

$$\frac{1}{RRR} = \frac{O}{5800} + \frac{N}{2273} + \frac{H}{16322} + \frac{C}{8911} + \frac{Ta}{604690} + \frac{1}{1249} \quad (3-1)$$

(3-1)式中の O、N、H、C、Ta はニオブ中のそれぞれの元素の含有量 (ppm) を表す。O、N、H、C はニオブを真空中で溶解する事で除去する事が出来るため、溶解を繰り返すことで純度の高いニオブを作り出すことが出来る。逆に言えば、純度の高いニオブを生産するには溶解する回数も増えるため値段も高くなる。Ta に関してはニオブよりも蒸気圧が低いいため溶解では除去する事は出来ず溶媒抽出法での除去が必要となる。因みに ILC では $RRR \geq 300$ のニオブ材が要求される。Table 2 に例として $RRR > 300$ の標準的なニオブの化学成分を載せる。タンタルを除くほとんどの成分が 10ppm 未満であることが分かる。

一般的な金属にも言えることだが、純度が高い金属ほど機械的強度は弱くなる。ニオブも同じである。しかし、空洞は高压ガス容器となるため、材料にもある程度の機械強度が要求される。現時

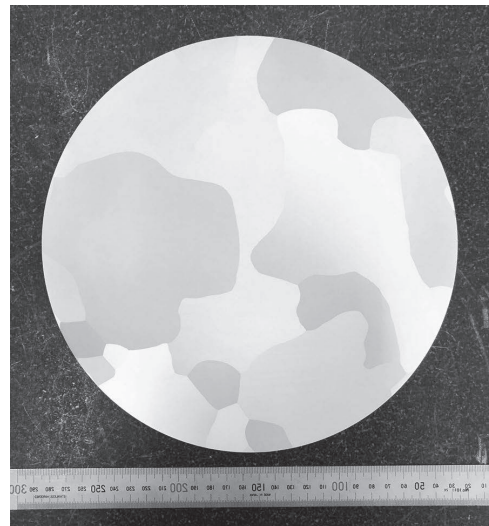


Fig. 6 インゴットをスライスした板。

点では引張強さ $120 \sim 140 N/mm^2$ 以上、0.2%耐力 $35 \sim 50 N/mm^2$ 以上が必要だと見られている。高純度かつ、上記の機械強度を持つニオブは高いノウハウを持つニオブメーカーによって賄われている。空洞材料の機械試験等に関しては本セミナーの「空洞材料シミュレーション、材料評価」で詳細を説明する。

3.2. ニオブの生産

ニオブはレアメタルの一種でタンタルと一緒に鉱石として産出される。主な産出地は大半がブラジルで次いでカナダなどがある。鉱石から得られたニオブを真空中で溶解する事で純度を上げる。溶解後に得られるニオブの円柱をインゴットと呼んでおり、非常に大きなニオブの結晶から成っている。Fig.6 にインゴットをスライスした板の写真を載せる。写真の中で板の中に見られる線は結晶粒界である。数 cm の結晶がいくつも見える。この結晶の配置や大きさはインゴットやインゴット内の場所によって異なる。それぞれの結晶は異なる結晶方位を持っており、成型した際に伸びやすい方向が異なる。このため、インゴットの

Table 2 標準的なニオブ ($RRR > 300$) の化学成分表 (in Wt ppm)

Ta	W	Ti	Fe	Si	Mo	Ni	Zr	O	N	H	C
190	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<5	<10

ままでは成型性が良くない。通常はこのインゴットを鍛造する事で結晶を細かくしていく。板状のニオブ材が必要な場合は鍛造したニオブをロール圧延して薄く伸ばしていく。この際に一方向のみに圧延していくと、板を成型した際に一方向に伸び易くなり形に歪みが出てしまうことがあるので、最低でも直角する2方向に圧延して仕上げていることが望ましい。Fig.7 はプレス成型後のハーフセル赤道部の内面形状を測定した結果である。図からも分かるように本来真円であって欲しい赤道部が楕円形状になっているのが分かる。これは圧延の方向が一方向に偏っていたためだと考えられる。こうなると、溶接の際の組み立てが困難になってしまう。

鍛造と圧延の際に機械に異物がついていてこれをニオブ内に埋め込んでしまう恐れがある。このため、鍛造と圧延の工程は異物混入に注意しながら行う必要がある。

近年の空洞製造に用いるニオブには $50\mu\text{m}$ 以下程度の結晶粒径に仕上げるのが要求されている。粒径が大きいと曲げなどの成型をした際に表面が粗くなるためである。この様に、インゴットを鍛造・圧延して得られた粒径の細かいニオブを我々は Fine Grain (FG) 材と呼んでいる。Fig.8 に FG 材の拡大写真を載せる。数十 μm 程度の結晶から構成されているのが見える。これとは対照的にインゴットをスライスした円板 (Large Grain: LG 材) を空洞のセル部の材料に使うことも研究されている。Fig.6 はまさに LG 材の写真である。LG 材は鍛造と圧延の工程を省略しているので大幅なコスト削減が期待できる。詳細は後述する。

仕上がったニオブ材（特にセル部に使用するニオブ板）の品質検査方法として渦電流探傷試験機がある。DESY では納入されたニオブ板に対して渦電流探傷試験を行い、表面に傷がないか、また内部に異物の混入がないか検査し、合格したニオブ材のみを空洞材料と使用している[5]。Fig.9 に京大と KEK で開発している渦電流探傷試験機の写真を載せる。台に載せたニオブ板が回転し、コイルの入ったヘッドがニオブ板上を径方向に動

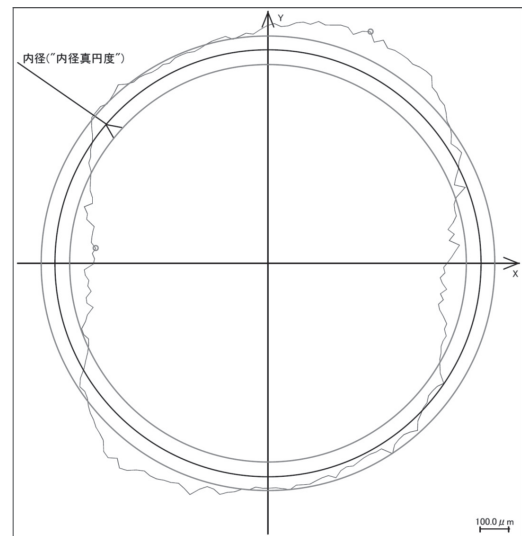


Fig. 7 プレス成型後に測定した赤道部の内径形状。(青が実測値、黒が設計値)

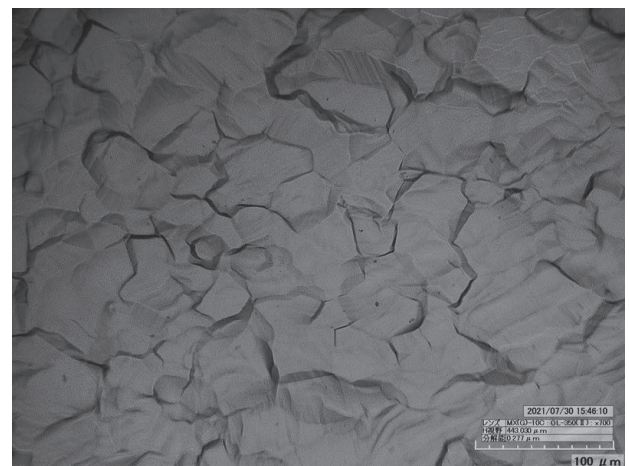


Fig. 8 FG 材の表面拡大写真。

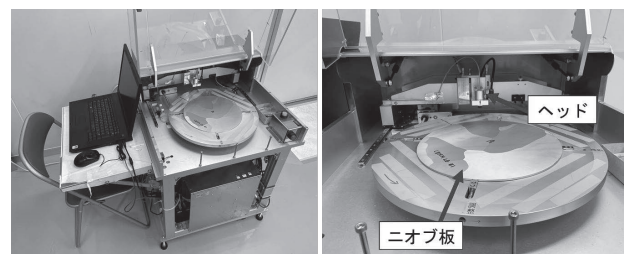


Fig. 9 渦電流探傷試験機。

く事によって板全体をスキャンすることができる。ニオブ板の表面に傷などが無い場合でも、中に不純物が混入していると空洞性能を落とす可

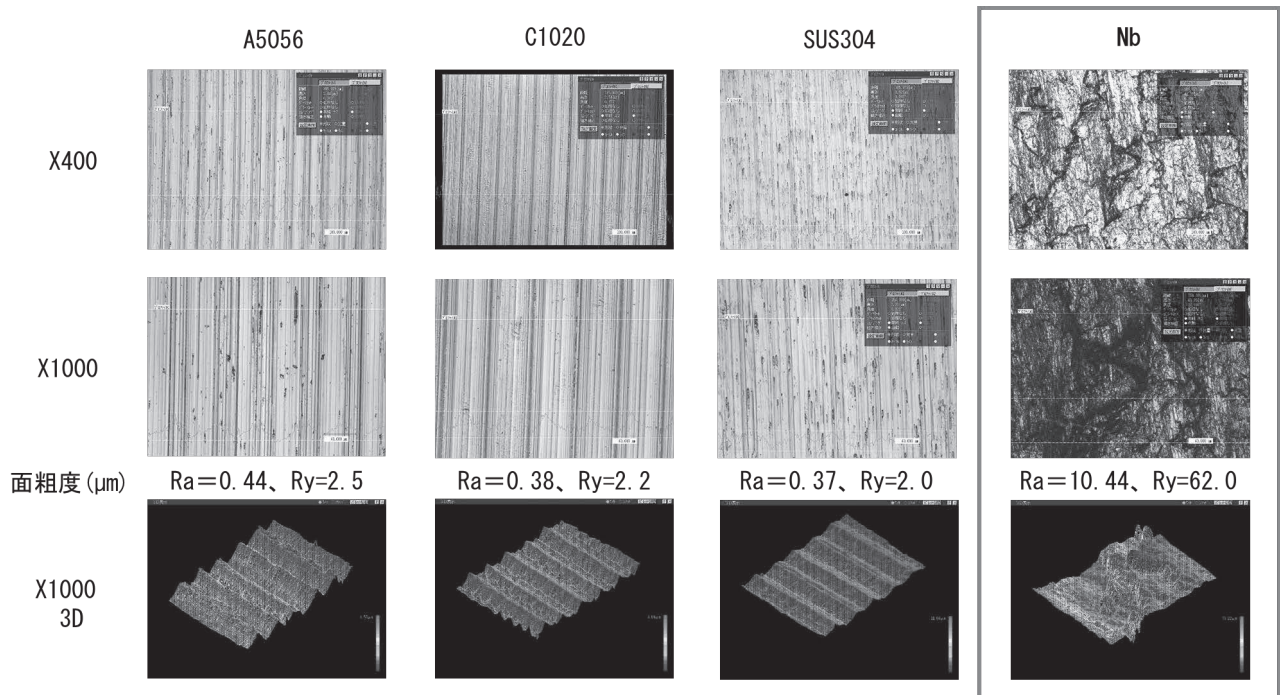


Fig. 10 アルミ合金、銅、ステンレス、ニオブを同条件で切削した後の表面の状態[6]。

能性があるので、こういった方法で材料内部まで検査を行うことが歩留まりを上げることにもつながる。

4. 空洞製造

4.1. ニオブ材の加工方法と加工機械

現在の空洞は主に、切削加工、プレス加工、化学研磨、機械研磨、溶接、バーリング加工、放電加工、といった方法を使って製造される。CFFではプレス機、旋盤、化学研磨施設、電子ビーム溶接機を所有している。以下にそれぞれの加工方法に関して簡単に説明する。

4.1.1. 切削加工

切削加工は文字通り加工物を切削して成形する方法である。主な加工機械としては旋盤、フライス盤、ボール盤などが挙げられる。切削加工は空洞製造に限らず機械加工の中では幅広く一般的に使われている加工方法である。しかし、ニオブの切削加工に関して言えば実は加工経験のある企業も少ない。またニオブは難削材であるためその切削加工には経験や知識が必要である。ニオブを難削材と呼ぶ理由としてその粘り強さ

がある。ニオブは所謂“粘っこい”（靱性が高い）ため切削した際にきれいな表面が出にくい。例えばナイフで木を削る場合と粘土を削る場合を考えてもらえば分かるように、“粘っこい”粘土を削る方がきれいな表面を出にくい。これと同じでニオブも切削した際にきれいな（面粗度の良い）面を出すのが難しい。Fig.10にアルミ合金、銅、ステンレス、ニオブを同条件で加工した後の表面の状態を比較したものを示す。ニオブ以外の金属はきれいな加工面になっているのに対し、ニオブの表面は荒れている。面粗度も他の金属と比べ大きく悪くなっている。これは、ニオブが刃の表面に粘着し刃の切れ味が悪くなってニオブをむしり取る形になってしまい、切削後の表面が荒れるためだと考えられる。滑らかな表面を求める空洞製造の中でこの様な荒れた表面は命とりだ。この状態を避けるためには、すくい角の大きい（鋭利な）刃を用いるのが良いが、あまり大きすぎると（鋭利すぎると）今度は刃先の強度が低下し欠けやすくなってしまう。当然、刃が欠ければ交換しなければならず時間も消費するため大量生産の現場では大きな打撃になってしまう。よって大量生産現場におけるニオブ加工では切削するための刃の選択が重要になってくる。

また、ワーク（加工物）に対する刃の速度が速すぎると加工時にニオブの温度が上がりすぎて

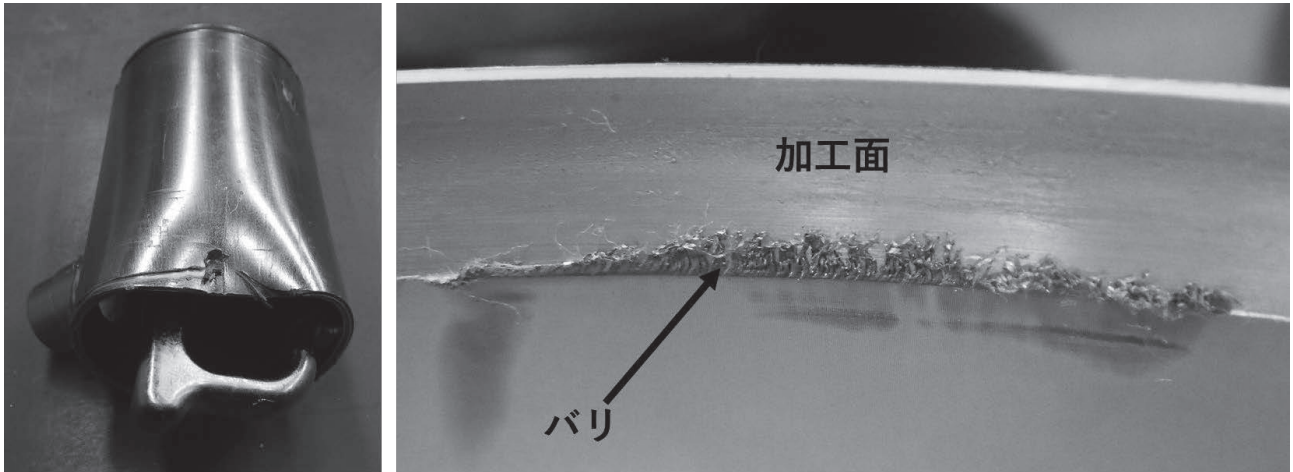


Fig. 11 ニオブ切削時の失敗例。

しまう。するとニオブ内に酸素などのガスが拡散されてしまう恐れがあるため加工速度にも注意しなければならない。更に使用する切削油も潤滑やワークの冷却といった重要な役割を果たすため、こういった切削油を使用するときれいな表面が得られるのか現在研究が進められている。

ここで切削加工の失敗例を Fig.11 に挙げる。Fig.11 (左) は加工中にチャック (掴み) から外れてしまい変形してしまった部品である。粘りの強いニオブを加工する際は刃に対する抵抗も強くなるため、ワークを強くチャッキングしておかなければならない。しかし筆者が加工した際は部品の変形を恐れチャッキングの力が不十分だったため、加工中にチャックから外れてしまい、結果として部品が変形してしまった。また、ワークに対する切込み量が大きすぎたというのも抵抗力を上げる原因となってしまった。Fig.11 の右はハーフセル赤道部内面の加工後の写真である。使用した刃の切れ味が悪かったため加工面が荒れているのが分かる。また、加工面下部には大きな“バリ”が出てしまっている。当然ながらこのような面は機械研磨しなければならないし、バリは砥石などで除去しなければならない。現在はもっと滑らかな加工面になる条件で加工されている。

4.1.2. プレス加工

金型を用いて加工材料を金型の形に塑性変形させる加工である。同じ形のものを大量に生産する場合に効果的である。Fig.12 は CFF で使用しているプレス機である。上の金型が下がり材料を下の金型と挟み込むことで変形させる。

空洞製造ではハーフセルやエンドプレートの成型で使われている。ハーフセルやエンドプレートの成型の場合、金型はオス型とメス型を用いる。ハーフセルプレス用金型の写真を Fig.13 に示す。プレスでは成型後に設計通りの形状になって

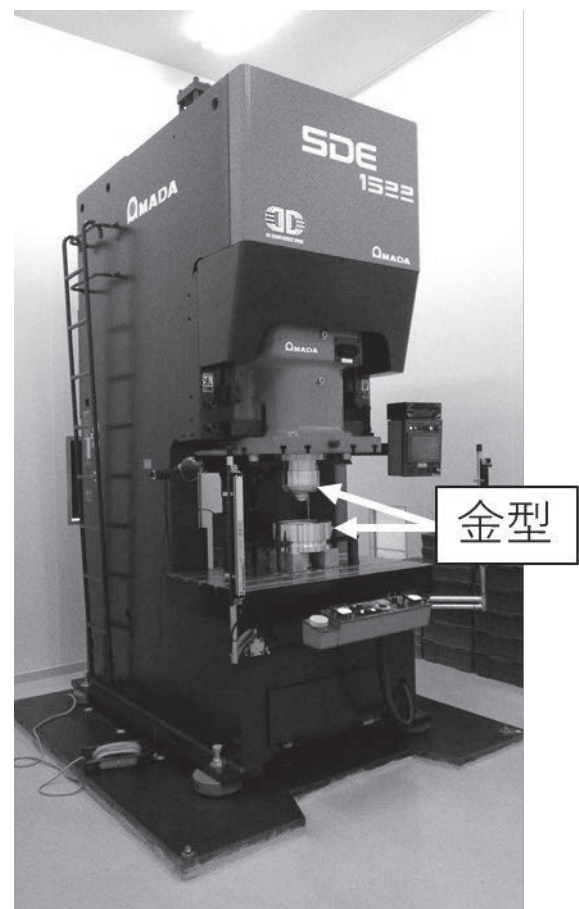


Fig. 12 CFF で使用しているプレス機。

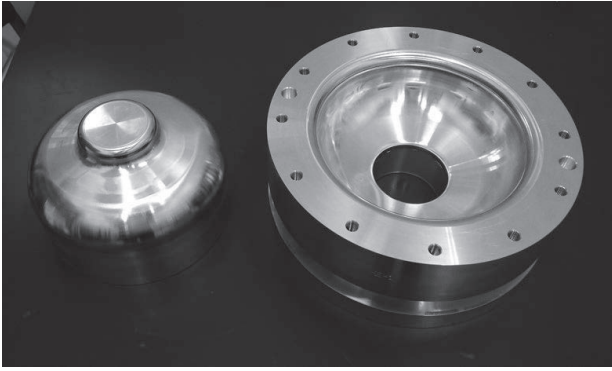


Fig. 13 ハーフセルのプレス成型用金型。

いるか注意しなければならない。プレス成型は塑性変形ではあるが、成型した後にスプリングバックによって多少形状が元の状態に戻ってしまう。このため金型の形状はこれを見越した形状にする必要がある。

また空洞製造に於けるプレス成型の際に一番気を付けなければならないのは、ニオブ材への不純物混入や傷である。プレスの際にはニオブに200～300kN程度の力が加わる。この時に金型表面にゴミや傷がついていたりすると、ゴミがニオブに埋め込まれたり、傷がニオブに転写されてしまう。このため、プレス金型表面は傷の無い状態にして、ゴミなどが入らない環境で行わなければならない。CFFではclass8 (ISO規格) 相当のクリーンルームにプレス機を設置している。最近では極薄 (30μm程度) の破れにくいウレタンシートをニオブと金型の間に敷いて金型の傷がニオブにつかない工夫もしている。

4.1.3. 化学研磨

薬品を用いて表面の不純物を取り除く化学洗浄処理方法の事で、所謂“酸洗い”である。黒ず

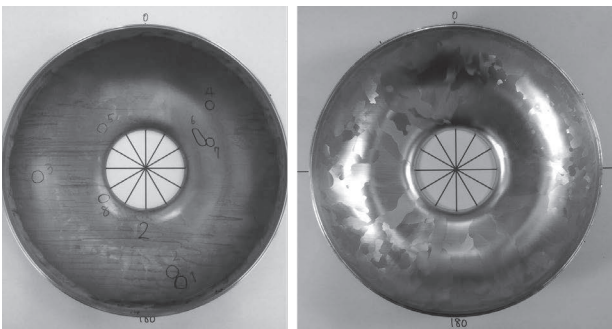


Fig. 14 ハーフセルを化学研磨する前 (左) と後 (右) の写真。

んだ 10 円をレモン汁に漬けておくときれいになるのを経験した方も多いのではないだろうか。空洞製造に於けるニオブやニオブチタンの化学研磨の場合、CFFではフッ化水素酸 (48wt%)、硝酸 (69wt%)、リン酸 (85wt%) を体積比 1:1:1 もしくは 1:1:2 の割合で混合した溶液にワークを浸すことで表面を研磨する。この場合、硝酸がニオブ表面を酸化し、フッ酸が酸化膜の溶解を行う。リン酸は反応速度を遅くすることで処理を制御しやすくする役割を担っている[7]。Fig.14は化学研磨する前 (左) と後 (右) のLG材のハーフセルの写真である。化学研磨後は表面の汚れが除去されニオブの結晶が見えるようになっている。この研磨方法は Buffered Chemical Polishing (BCP) とも呼ばれている。浸す時間はリン酸の量や研磨液の温度や研磨力によって変える。当然、何度も使用している研磨液は研磨力が弱い。実際に空洞部品を研磨する前は、テストピースなどを用いて時間当たりの研磨量を確認しておかなければならない。

化学研磨の主な長所としては、研磨速度が速い、装置が簡単である、などが挙げられるが、研磨速度や研磨量の制御が難しい、危険な薬品を使用しなければならない、表面に粒界の凹凸が現れる、有毒な二酸化窒素ガスを発生するなどの短所もある[8]。研磨速度は薬品の配合割合だけでなく、研磨液の温度によっても変わってくる[9]。研磨液の温度は研磨中にも上昇するため、研磨中も注意してモニターしておかなければならない。

また、使用するフッ化水素酸は毒物及び劇物取締法において毒物と定められており、過去にはフッ化水素酸による死亡事故も起きている。このため取り扱う際は完全な防護装備をし、充分注意しなければならない。Fig.15にCFFでの化学研磨の様子。



Fig. 15 CFFでの化学研磨の様子。

の様子を載せる。CFFで化学研磨を行う際は防護マスク、防護服、防護手袋を着用した上で薬品はドラフターの中で扱っている。

同じように薬品を使用する研磨方法として電解研磨というものがある。空洞開発の場合は、空洞が完成した後に行うことが多い。電解研磨では空洞内に溶液と陰極となる金属棒を入れ、空洞を陽極と見立てて電流を流し溶解させることで空洞内を研磨する方法である。（詳細は本セミナーの「超伝導空洞の表面処理：電解研磨」で説明する。）この方法は滑らかな表面が得られる長所もあるが、装置が大規模になってしまうため、空洞製造段階では用いられることが少ない。

後述するが空洞製造では溶接の前に部品を必ず化学研磨する。これは部品表面の汚れを落とし溶接不良を防ぐためである。化学研磨した後は純水で何度もすすぎ研磨液をしっかりと落とす必要がある。研磨液は粘性が強く落ちにくいいため、高圧洗浄ガンや超音波洗浄機を使うこともある。CFFではすすぎの後にクリーンな圧縮エアを使って水分を飛ばすことも行っている。その後は部品の乾燥である。部品表面が再び汚染されるのを防ぐために乾燥はクリーンな環境で行わなければならない。また、ペーパータオルなどで表面を拭ってはいけない（例え粉塵の出にくいものとしても）。化学研磨後にはニオブ表面に再び酸化層が形成されていくため、研磨から8時間以内に

溶接するのが望ましいとされている。これが難しい場合は研磨後に真空中もしくは窒素雰囲気中で保管するのが望ましい。

4.1.4. 機械研磨

機械研磨は砥石や研磨材を用いて物理的に磨き上げていく方法である。空洞部品のRF面に傷があった場合は研磨材を用いてこれを除去する。ここで注意しなければならないのは、研磨によって更に新しい傷をつけてしまうことである。番手の粗い研磨材を用いて研磨した際には研磨痕自体が空洞にとっては傷になってしまうことがある。このため、最後は番手の細かい研磨材を用いて表面に傷のないよう仕上げなければならない。また、仕上げの研磨痕はその後の化学研磨や電解研磨で消えるような粗さでなければならない。Fig.16は研磨痕がどれくらいの化学研磨量で消えるかを実際に試験した結果である。Fig.16の中で左上は研磨前の板の参考写真である。板を800～1000番手の研磨材を用いて研磨を行い（上段中）、少しずつ化学研磨していったときの表面状態を観察したものである。これを見ると125 μm 程度の化学研磨で研磨前と同等の表面が得られることが分かった。空洞は完成した後に合計120 μm 程度の電解研磨を行う。電解研磨と化学研磨で表面の仕上がり方に多少の違いはあるが、少なくとも

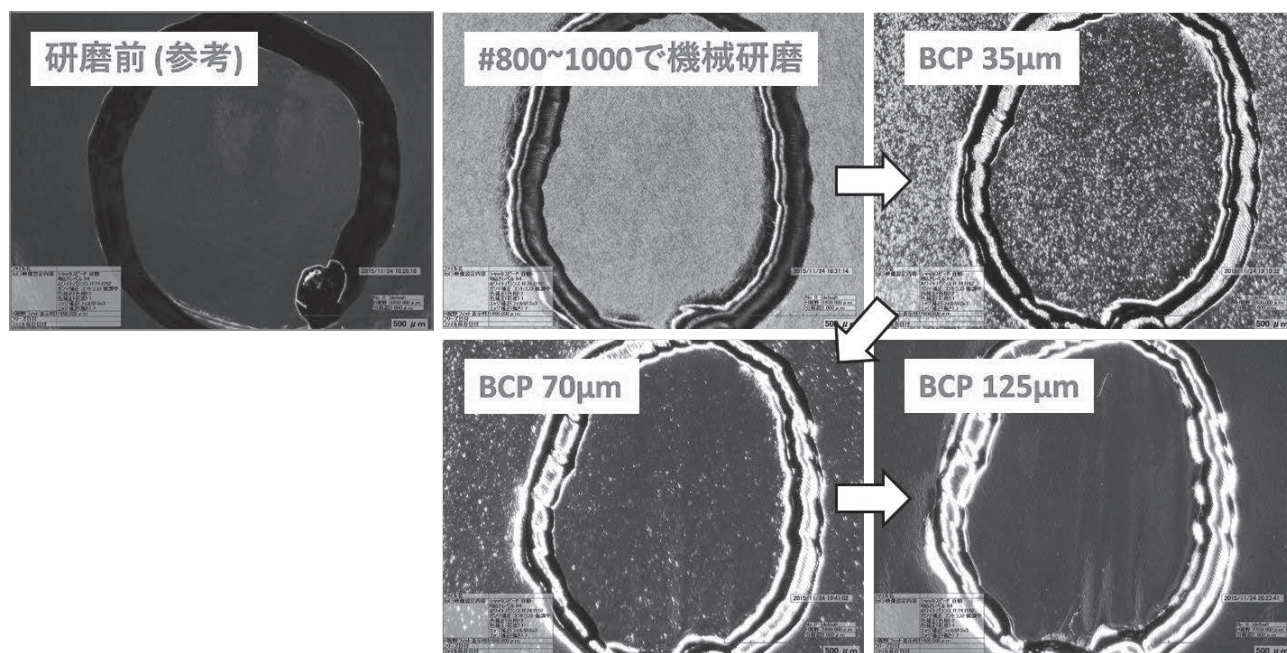


Fig. 16 機械研磨痕がどれくらいの化学研磨量で消えるのか試験した結果。尚、研磨前（左上）は右四つとは同じ板だが違う場所である。参考のため掲載した。

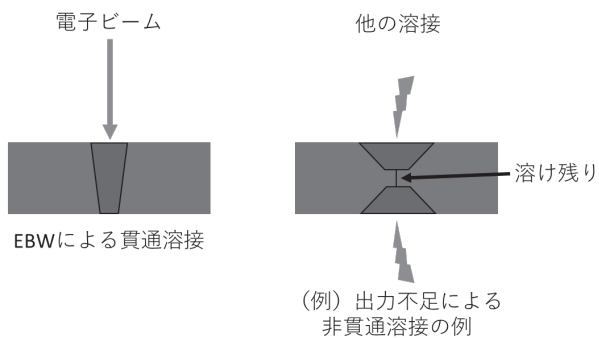


Fig. 17 貫通溶接と非貫通溶接のイメージ。

も 800～1000 番手の研磨材で仕上げればその後の表面処理で研磨痕が消えるので CFF で機械研磨を行う際はこれくらいの面粗さに仕上げる様にしている。

また研磨の際は出てくる粉塵で傷が埋まってしまう、傷を除去できた様に見えることがある。このため研磨を行った後は化学研磨を行い、本当に傷を除去できたのか確認しなければならない。

4.1.5. 溶接

溶接は 2 つ以上のワークの接合部に熱や圧力などを加えて一体化させる加工である。溶接には様々な種類のものがあるが、空洞製造では主に電子ビーム溶接 (Electron Beam Welding: EBW) や TIG 溶接を用いる。EBW は空洞の溶接に、TIG 溶接はヘリウムジャケットの溶接に用いる。

空洞溶接

空洞は高圧ガス容器であるため、溶接部にも十分な強度が必要となる。十分な強度を担保するために溶接による接合部はワークが完全に溶けて一体化している状態 (完全溶け込み) が望ましい。空洞製造 (ジャケットを除く) に於いて完全溶け込みを要求される際は表から溶接して裏まで貫通して溶けていなければならない。Fig.17 に例となる図を示す。Fig.17 の左は一方向 (図中の上部) から溶接して裏まで溶け込んでいる例である。Fig.17 の右は非貫通溶接の例である。表と裏の両面から溶接したとしても、溶け込みが浅いと中央に溶け残り部分が出来てしまい強度が落ちてしまう。

ニオブの融点は 2477°C と高温なため、一般的な TIG 溶接などでは出力が足りず貫通溶接や滑らかな溶接ビードを出すのが難しい。また、TIG 溶接は大気中やアルゴン雰囲気の中でやる事が多く、ニオブ表面の酸化や内部への不純物の混入が危惧される。そこで、出力が高く、深くなめらかな溶接ビードの得られる EBW を用いる。また EBW は真空チェンバーの中で行うためニオブへの不純物の混入 (コンタミ) も防ぐことが出来る。

電子ビーム溶接機はフィラメントに高電圧をかけ電子群を発生させて高電圧で加速させた後、電磁石を用いて絞る事によって一点に高出力の電子ビームを充ててワークを溶解させる。EBW の主なパラメーターとしてはビームの加速電圧値や電流値、ビームフォーカス値 (電磁石の電流

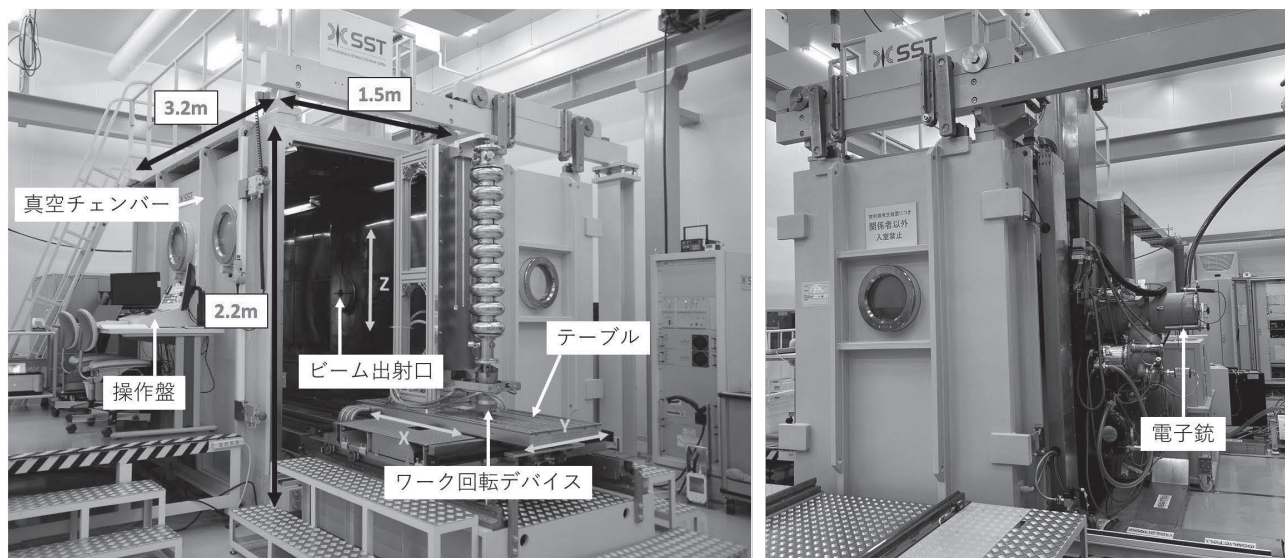


Fig. 18 CFF で使用している電子ビーム溶接機の写真。チェンバーの扉を開いて空洞をセットしている状態 (左)、と扉を閉じた状態 (右)。

値)、ワークの移動速度がある。電圧値や電流値を上げる、またはワークの移動速度を遅くするなどして単位時間あたりに単位面積に与えるエネルギーが大きくなるほど深く広い溶け込みが得られる。

Fig.18 に CFF で使用している電子ビーム溶接機を示す。チャンバーの大きさは横 1.5m、高さ 2.2m、奥行き 3.2m 程度で 9 セル空洞が縦に入る大きさである。チャンバー横には電子ビームを発生させる電子銃が取り付けられており、水平方向に電子ビームを出射する。電子銃は上下方向(Z 方向)にのみ移動する事ができる。必要に応じて電子銃はチャンバー上にも取り付けることが可能である。円形の溶接物に関してはワークを回転デバイスに取り付け回転させることによって周溶接を行う。ワークを設置するテーブルは X、Y 方向に移動する事が出来る。溶接中の X、Y、Z の移動および回転はプログラミングで制御している。チャンバーは $2\sim 3 \times 10^{-4}$ Pa 程度まで真空引きする事ができるが、15~20 分程度を要する。また、チャンバーのベントには 5 分程度かかるため、量産をする場合はなるべく多くのワークを一度の真空引きで溶接することが時間の節約 (=コストの削減)につながる。CFF の電子ビーム溶接機では空洞材料へのコンタミを避けるためにニオブ、ニオブチタン、チタンの溶接以外は極力行わない様にしている。また、プレス機と同じく電子ビーム溶接機も class8 のクリーンルームに設置している。

チャンバー真空度が悪い中で溶接を行うとニオブ内へガスが混入し RRR の低下につながる。Fig.19 は溶接時のチャンバーの真空度と溶接ビード部の RRR の関係を示したものである。RRR 低下を防ぐためには 5×10^{-6} mbar (5×10^{-4} Pa) 以上の真空度である必要がある。しかし Fig.20 で示すように溶接エリア周辺(特に溶接部から 5~15mm のエリア)に関しては真空度が良い場合 (6.5×10^{-8} mbar) でも RRR が低下する事が報告されているため、むやみに溶接回数を増やす事は避けた方がよい。

溶接の際はワークを焦点位置に近づけるほど当然エネルギー密度は強くなる。このため焦点に近い位置での溶接は細く深い溶接ビードを得られる。ただしに焦点に近づけて溶接すると溶けた金属が急激に蒸発し、その蒸気圧により金属が飛散しスパッタが発生する[11]。スパッタとは溶解した金属が溶けて小さな粒となり溶接周りに付

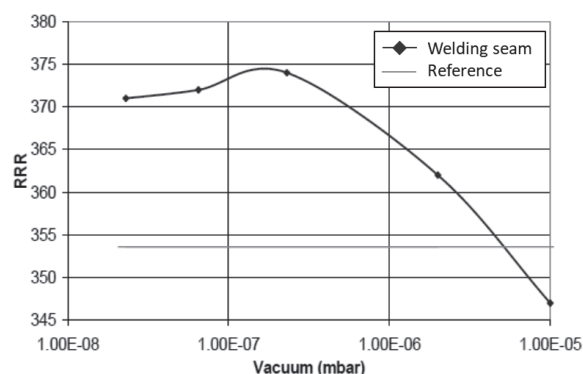


Fig. 19 溶接時の真空度と溶接ビード部の RRR の相関[10]。

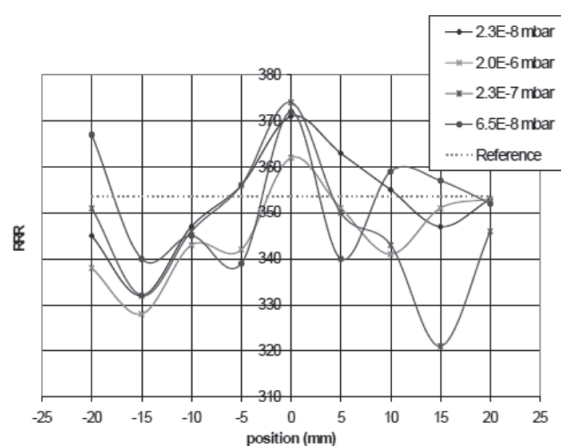


Fig. 20 溶接時の真空度と溶接エリア周辺の RRR の相関[10]。

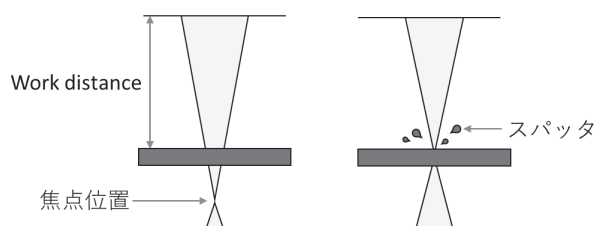


Fig. 21 デフォーカスした位置での溶接と焦点位置での溶接のイメージ。

着するものである。スパッタの大きさは大きいものでは 1mm 程度のものもある。当然、空洞内部にこのスパッタが付着すれば空洞性能を著しく低下させる。また溶接ビードも荒れた表面になってしまい、これも空洞性能を落とす原因となる。このため、空洞(特に電磁場に接する箇所)の溶

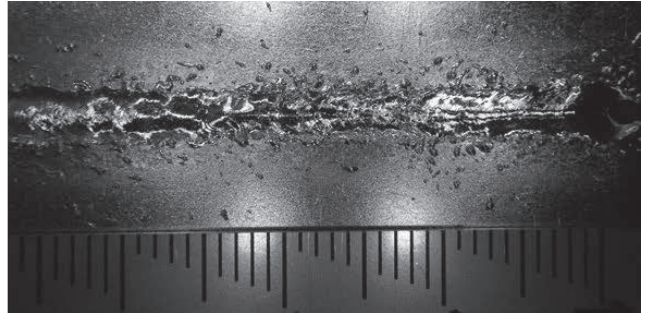
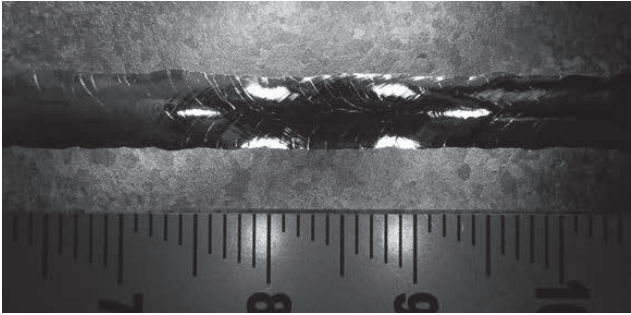


Fig. 22 デフォーカスした位置での溶接ビード（左）と、焦点位置での溶接ビード（右）。

接時は焦点からずらした（デフォーカスした）位置で溶接を行う。デフォーカスした位置で溶接するとスパッタも発生しにくくなり、滑らかな溶接ビードが得られる。

デフォーカスした位置で溶接する方法は2通りあり、一つはワークの位置（work distance）を焦点位置から遠ざける方法、もう一つはビームフォーカス値を変えて焦点位置をずらす方法である。CFF では後者の方法で焦点位置を調整している。以上のイメージを Fig.21 に示す。図中でどちらも work distance は一定に保っている。左はマグネットを使って焦点距離をずらしデフォーカスした位置で溶接しており、右は焦点位置ちょうどで溶接しているイメージである。Fig.22 にそれぞれの位置で溶接した時の溶接ビードの写真を載せる。左がデフォーカスした位置での溶接ビードで右が焦点位置での溶接ビードである。左は光沢があり滑らかな溶接ビードであるのに対し、右はスパッタが周辺に付着し溶接ビード表面も荒れて光沢がないのが分かる。空洞を溶接する際は左の様な溶接ビードが得られるようなパラメーターを使用する必要がある。スパッタがなく滑らかな溶接ビードが得られたとしても、ビード内部に気泡（ボイド）が出来てしまう場合がある。なぜボイドが出来てしまうのか原因はまだ解明されていないが、空洞内面近くのビード内部にボイドが出来てしまうと空洞完成後に行う電解研磨によってボイドが表面に出てきてしまう。するとこれが立派な欠陥となってしまう。また、溶接ビード表面にボイドが出来てしまうと高圧ガス容器を扱う法令の基準を満たさなくなってしまうこともあるので注意が必要である。

スパッタが発生する原因としてビームフォーカス値があるが、その他にワーク表面の汚れが挙げられる。空洞部品で溶接する部品はすべて機械加工されており表面には機械油などが付着している。こういった油の沸点はニオブより低い

め、表面に油が残ったまま溶接してしまうとニオブより先に気化しニオブが溶けた際に噴き出しスパッタの原因となる。下手をすると穴が開いてしまうこともある。また、ニオブより沸点が高い物質が付着していればニオブが溶けた際に内部に混ざり込み不純物として残ってしまう。このため溶接前の部品はしっかりと脱脂し、更に化学研磨を行って表面を十分クリーンな状態にしなければならない。化学研磨後の部品を扱う際は決して溶接部（開先）は触ってはいけない。溶接前に部品を組み立てる前にはそれぞれの部品をクリーンな圧縮エアでブローして表面のごみを取り除いた上で組立を行う。CFF では静電除去機能を持つエアガンを用いてブローしている。

同じニオブでも純度や製造者によって若干の溶け具合の差が出ることがあるため、新しい材料で空洞を製造する際はダミーの部品を用いてパラメーターサーチのための溶接試験を行うことが望ましい。Fig.23 は実際にパラメーターサーチを行ったテストパーツの写真である。最適な条件を探すために何度もテスト溶接を行わなければならない場合もある。パラメーターサーチは非常に重要な工程であり、一つ間違えるだけで空洞丸ごと使えなくしてしまう可能性もあり得る。Fig.24 に溶接の失敗例を示す。これは赤道溶接の

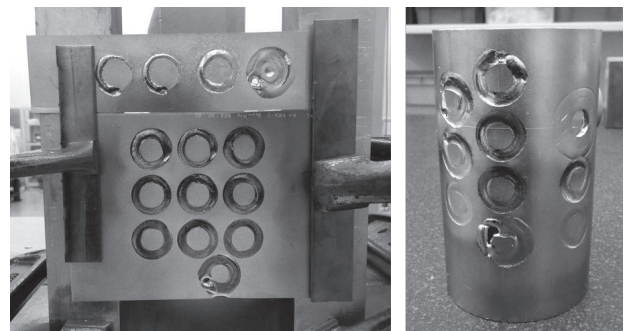


Fig. 23 パラメーターサーチを行った跡。

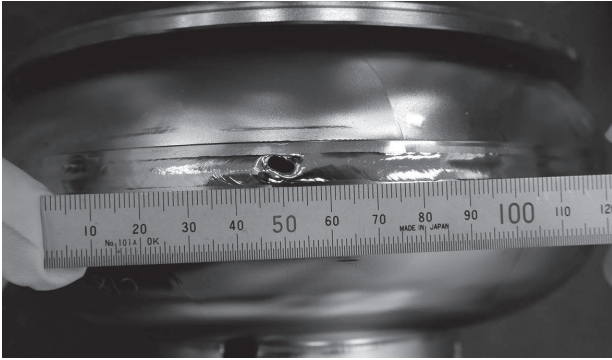


Fig. 24 赤道溶接の失敗例。

際にビーム出力が強すぎて穴が開いてしまった事例である。この後は、穴の形を成形し補修ピースを埋めて上から溶接する事で事なきを得たが、失敗していたら9セル空洞1台が無駄になるところだった。パラメーターサーチの際は実際の溶接物の形状とは異なる簡単な形状のテストピースを使うことが多い。溶接物の容積が異なると熱容量も異なりパラメーターも変化してくるので注意しなければならない。

溶接する際はそれぞれの部品を治具で固定するが、溶接中に部品がずれるのを防ぐためばねで押さえつけることがある。Fig.25は単セル空洞のアイリス部溶接の際のセットアップの写真であるが、上端にばねを入れ端部から押さえつけている。このセットアップで溶接した場合、軸方向(縦方向)に縮みが生じる。こういった縮みはばねの強さや溶接の強さなどによって変わってくるので事前に溶接試験を行いどれくらい縮むかを把握しておく必要がある。また、ばねも使用しているうちに弱くなっていくため、定期的にはばね定数を測り管理しなければならない。ばねで固定していない場合でも溶接による縮みは発生する。このため溶接する部品は縮み代を含んだ寸法に加工をしなければならない。寸法公差が厳しい箇所に関しては溶接した後に更に機械加工を行うこともある。

空洞を溶接する際の治具はアルミやステンレスを用いることが多いが、気を付けなければならないのは貫通溶接を行う際の治具である。溶接が貫通しているという事はつまりビームも貫通しているということである。溶接部の裏に治具などがあると、貫通したビームによって治具が溶けてしまう恐れがある。すると溶けて蒸発した金属がニオブに混入してしまうので、貫通溶接をする際は裏側にくる治具はニオブで覆わなければなら

ない。このためのニオブを我々はバックングプレート、バックングリングなどと呼んでいる。赤道溶接やアイリス溶接の際は空洞内部にシャフトを通すが、シャフトの溶接部分はバックングリングで覆っている。

溶接中の溶接部は局部的に非常に高温になる。すると熱膨張およびその後の収縮が均一にならず溶接歪みが生じることがある。Fig.26(左)は実際に溶接によって歪んでしまった部品の写真である。真円のカップ状の部品にアンテナとノズルをそれぞれ溶接するとカップが楕円上に歪んでしまっていた。図中で点線の円に対して点線矢印部分(溶接部)が膨らんでいるのが分かる。実際に真円度を測定してみた結果(Fig.26右)を見ても楕円形状に歪んでいるのが分かる。溶接歪みを防ぐためには、単位時間当たりの入熱を減らす、治具で固定する、溶接手順を工夫するなどがある。Fig.26の場合は溶接後に気づき上記の対策が出来なかったため仕方なく板金して修正を行った。

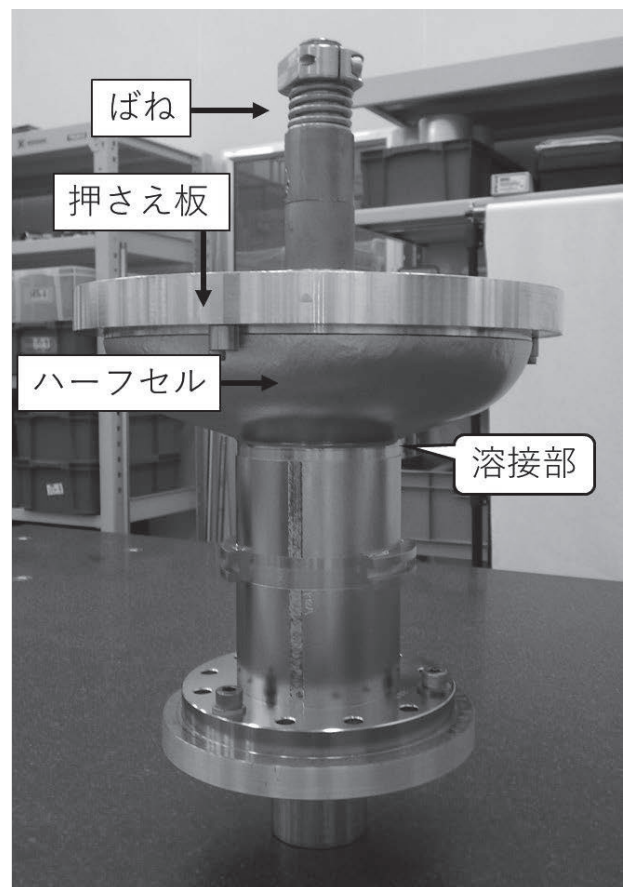


Fig. 25 溶接セットアップの例。

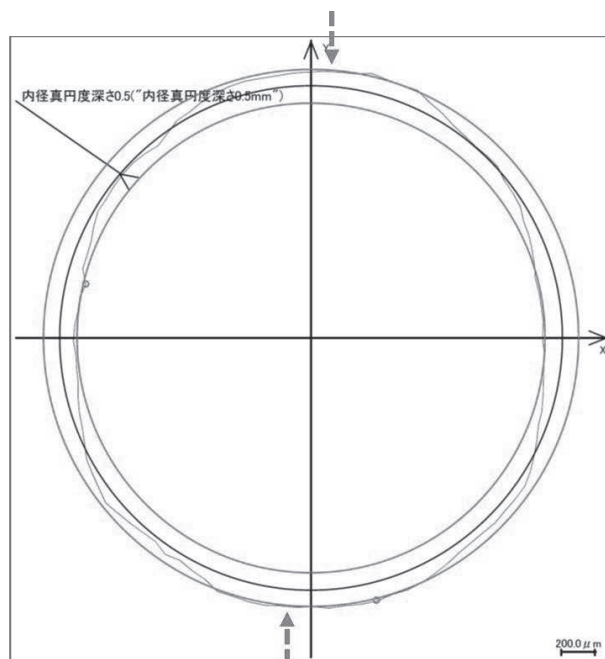


Fig. 26 溶接によって歪んでしまった部品（HOM カプラー）の写真（左）と部品の真円度を測定した結果（右）。左写真で点線円は真円を表す。右写真で青線が実測値。

ヘリウムジャケット溶接

ヘリウムジャケットを製造する場合とジャケットを空洞に装着する場合の溶接は TIG 溶接を用いる。ジャケットは直接電磁場に接するわけではないので空洞製造ほどコンタミにうるさくないがスパッタなどは出来るだけ抑えた方がよい。また、ジャケットを空洞に取り付ける際に溶接による入熱が大きすぎると空洞に熱が伝わり内部表面の状態を変化させてしまう恐れがあるため注意が必要である。ジャケットに関わる溶接は溶接棒を使った肉盛り溶接がほとんどである。溶接の際は大気中の酸素や窒素による溶接不良を防ぐためアルゴンなどによるシールドガスを吹き付けながら溶接を行う。重要な箇所の溶接はグローブボックスの様なチェンバーを使い、不活性ガス雰囲気の中で行うこともある。

4.1.6. その他の加工

ここでは空洞製造に使用する上記以外の加工方法をいくつか紹介する。

バーリング加工

板金に下穴を開けておき、下穴にパンチを押し込み、立ち上がりを作る加工である。Fig.27 に概念図を示す。空洞製造ではビームパイプの分岐部を成形するのに利用する。ビームパイプの場合、

下穴は楕円形状に開ける。下穴が小さすぎるとパンチを通した際に立ち上がり部が割れてしまうので下穴形状の最適化が重要である。ビームパイプの場合、バーリングを行った後端部を機械加工

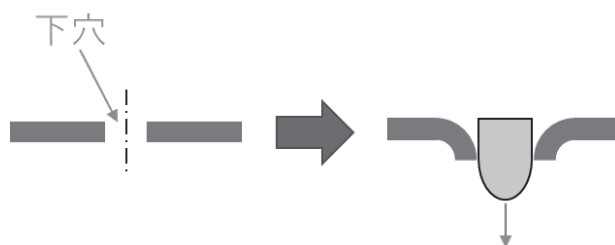


Fig. 27 バーリングの概念図。

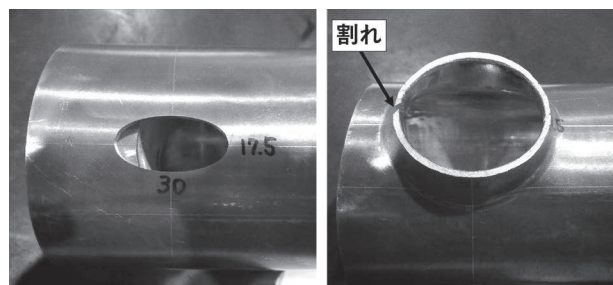


Fig. 28 ビームパイプのバーリング加工の写真。ビームパイプに下穴を開けた状態（左）とパンチを通した後の状態（右）。

し、HOM カプラーや RF 入力ポートを接続する。Fig.28 にビームパイプのバーリング試験の写真を載せる。左はビームパイプに下穴を開けた状態、右側は実際にパンチをパイプ内部から外側に引き抜き立ち上がりが出来た状態である。この写真の場合、下穴が小さすぎたため立ち上がり部分が割れてしまっている。

焼鈍

材料を高温に熱した後冷却する熱処理である。空洞完成後は加工で生じた残留応力の除去、および脱ガスを目的として真空炉で焼鈍を行う。空洞製造では加工硬化や残留応力の除去のために行うことがある。このような目的の場合、温度はおおよそ 800℃前後まで上げることが多い。冷却は自然冷却である。鍛造や圧延をして製造されたニオブは加工硬化しており硬く脆い状態である。このままだと加工をしにくいので焼鈍する事が多い。ニオブを焼鈍処理すると柔らかくなり加工がし易くなるが、やりすぎると高圧ガス保安法の規定を満たさなくなる可能性もあるため注意しなくてはならない。

放電加工

放電加工はワークと電極の間で放電させることによってワーク表面を融解して加工する方法である。当然のことながら金属にしか使えない。空洞製造では材料の切り出しに使用する事が多い。ワイヤーカットで材料を切った場合、切断面及びその付近の材料表面が著しく酸化する。また表面には加工くず（スラッジ）が付着しアルコールなどで拭っただけでは除去しきれない。このためワイヤーカットで切り出した材料を空洞に使用する場合は酸化層やスラッジを化学研磨や機械加工で十分取り除いた上で使用しなければならない。またワイヤーカットは水中で加工するため、ニオブに多量の水素が入り込むことも留意した方がよい。

4.2. 空洞製造手順

空洞は主に以下の手順で製造される。

1. ニオブ板中央に穴を開ける。
2. 1 の板をプレスしてハーフセルを作る。
3. ハーフセル端部を切削加工する。
4. ハーフセルを化学研磨する。
5. アイリスの溶接を行う。
6. 強め輪の挿入、溶接を行う。

7. ダンベル内面を機械研磨する。

8. ダンベルを化学研磨する。

9. 赤道の溶接を行う。

上記の工程と平行してエンド部の製造も行い最後の工程「9.赤道の溶接を行う」でセル部と一体化させる。（実のところエンド部の製造の方が複雑で面倒である。）

工程 7 と 8 の間でダンベルの周波数測定を行うことがある。その際は[12]で紹介する様な装置を使って測定を行う。プレス成型した後のハーフセル形状が設計通りだとしてもアイリスや強め輪を溶接すると溶接歪みで形状が変化する。当然これに併せて周波数も変わってしまう。そのため、ダンベルの状態でも周波数を測定し、目標の周波数になるように赤道を切削加工する。こうする事によって設計した周波数に近い空洞を製造する事が出来る。KEK ではまだダンベルの周波数測定装置を開発中なため、現時点ではダンベルの周波数測定は行っていない。

何度も述べているが、空洞内面の傷や表面の汚染、ニオブ内部への異物の混入は空洞性能を落とす原因となり得る。このため、空洞製造はクリーンな環境で行うことが望ましい（必須と言っても過言ではない）。また空洞材料を扱う際には皮脂の付着を避けるため常に手袋を着用する。溶接前の組み立てに関しては溶接欠陥を避けるためにも特に注意をはらわなければならない。CFF では工程 3 以外はすべて class8 のクリーンルームで行っている。また、溶接前の部品の組み立ての際はクリーンウェア、防塵帽子、マスクを着用して作業を進めている。

空洞製造を進める際は加工条件や材料詳細、部品寸法などをそれぞれの工程毎に常に記録しておくことが望ましい。こうする事によって問題が起きた際に原因を特定し改善するのが容易になる。量産の際は特に注意すべき点である。

4.3. 空洞製造

以下にそれぞれの工程に関して詳細を説明する。

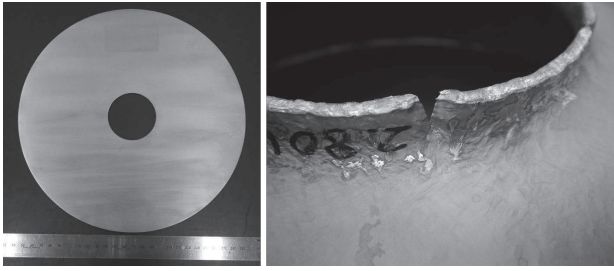


Fig. 29 プレス前の穴を開けた状態のニオブ円板（左）と、プレス後に亀裂が入ってしまったアイリス部（右）。

4.3.1. 穴あけ

ニオブ円板をプレスしてハーフセル状に成型する前に円板の中央に穴を開ける。穴の径が小さすぎるとプレス成型の際にアイリスが割れるので注意しなければならない。逆に穴径が大きすぎるとアイリスの立ち上がり代が少なくハーフセルとして使えない。**Fig.29** に穴を開けた状態のニオブ円板（左）とプレス時に割れてしまったアイリス部（右）の写真を載せる。

穴を開ける方法としてはワイヤーカットやウォータージェット（高圧の細い水流でカットする方法）などがあるが、どちらも時間がかかってしまう。近年、CFF ではパンチによる穴あけを採用し大幅な加工時間の短縮に成功した。

4.3.2. プレス

穴を開けたニオブ円板をハーフセル状にプレス成型する。CFF でのプレスの様子を **Fig.30** に載せる。押さえリングを使って円板を中央にセットし材料を抑えた後にプレスする。CFF でハーフセルをプレスする際はプレス圧が 200～300kN 程度になるように調整している。4.1.2 でも書いたが、プレスの工程は空洞内面に傷をつける可能性が空洞製造の中でも一、二番に高い。このためプレス前に円板表面及び金型にゴミが付着して

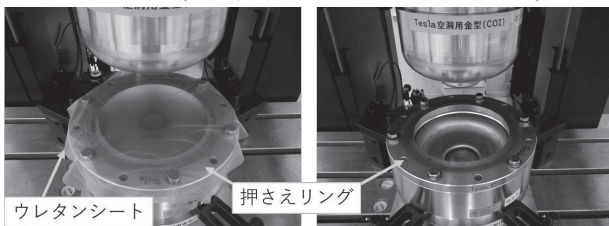


Fig. 30 CFF でのプレスの様子。プレス前（左）とプレス後（右）。

いないか、金型に傷などがついていないかを十分確認する。またプレス前には円板表面を確認し、なるべく傷などのない面が RF 面に来るようにセットする。CFF ではプレスの際にニオブ板と金型の間に 30 μ m のウレタンシートを挟む事によってハーフセル内面に傷が出来るのを防いでいる。プレスを行うとニオブがアイリス側から赤道側に流れる。実際にプレス後のアイリスと赤道の肉厚を測ってみると、アイリスが 0.3mm 程度薄くなり、赤道が 0.3mm 程度厚くなっている。プレス金型を設計する際はこの材料の流れも加味した形状にしないとプレス後の形状が設計通りにならない、ハーフセルが金型から外れない、金型を傷つけてしまう、などの問題が起きてしまうので注意する。

材料によっても成型性は大きく変わってくるため、成型後は 3 次元測定器などを用いてセル形状を測定し、設計値通りの形状が出ているが確認した方がよい。

4.3.3. トリミング

プレスした後のハーフセルはそのままと空洞に使えない。アイリス側と赤道側の端部を切削してハーフセル長を調整すると同時に、プレス後にばらつきのあるアイリスと赤道の肉厚をそろえて溶接し易くする。（厚みにばらつきがあると溶接時に貫通しない、もしくは穴が開く可能性がある。）更に CFF では赤道部を嵌め合い（段差）形状に加工する事によって溶接の際の組み立てを簡便にしている。この切削加工は旋盤を用いて行っており、“トリミング”と呼んでいる。旋盤の加工ではチャックによってつかまれたワークが

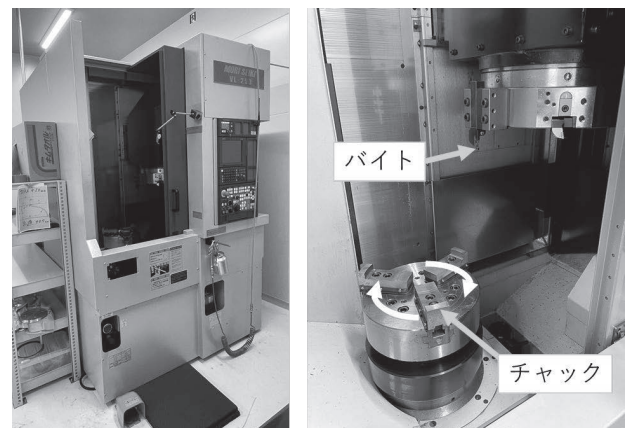


Fig. 31 CFF で使用している縦型旋盤。

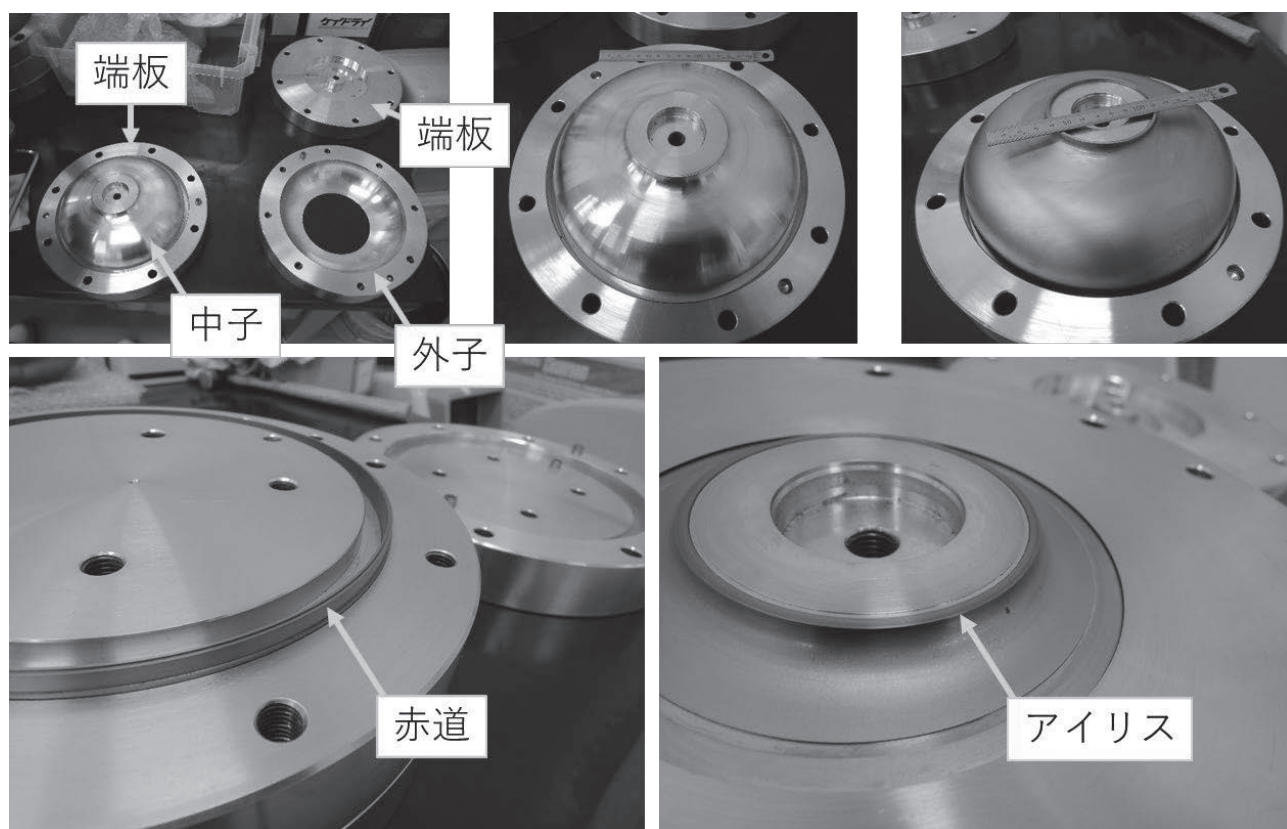


Fig. 32 ハーフセルとトリムするための治具一式とセットアップ（上段）。実際にトリミングを行う際の状態（下段）。

回転し、そこにバイトと呼ばれる刃を当てることによってワークを切削していく。

CFF で所有している縦型旋盤の写真を Fig.31 に載せる。後述するがハーフセルを加工する際はしっかりとした治具でハーフセルを固定しなければならない。そのため、治具にセットしたハーフセルが重くなってしまう。そこで CFF では Fig.31 で示すようなワークが水平方向に回転する縦型旋盤を用いている（一般的な旋盤はワークが垂直方向に回転する）。

トリミングの際はハーフセルをしっかり固定しないと加工中にチャックから外れて飛んでいってしまう。しかし、しっかりと固定しようと強い力をかけると形状が歪んでしまう。また、チャッキングできたとしても切削の際にハーフセルが震えてしまい（ビビる）きれいな加工面にならなくなってしまう。そこで Fig.32 に示すような治具を用いてハーフセルを固定する。現在、CFF で使用している治具は中子、外子、両端板の四つから成り立っており（Fig.32 左上）、中子と外子でハーフセルを挟み込んで端板で固定する。加工の際は治具ごとチャックして加工する。赤道を加

工する際は赤道だけ出して（Fig.32 左下）、アイリスを加工する際はアイリスだけ出して（Fig.32 右下）加工を行う。治具をセットアップする際もハーフセル内面を傷つけない様十分に注意しなければならない。

4.3.4. 化学研磨

4.1.3 で述べたように溶接前の部品には必ず化学研磨を行い、表面の汚れを落とさなければならない。研磨量はおおよそ 10～20μm 程度である。研磨後は純水もしくは超純水ですすぎを行い、研磨液を十分落とさなければならない。CFF では超音波洗浄やブラシ洗浄を用いてすすぎを行っている。十分すすげたかどうかを確認するためにすすぎ液の抵抗値を測定する方法もある。すすぎ後は部品を乾燥させるが、乾燥中に埃が付着し固着するのを防ぐため、CFF ではあらかじめクリーンな圧縮エアを用いて水分を飛ばしている。また、十分乾燥させずに溶接を行うと溶接欠陥となる可能性があるため注意しなければならない。化学研磨後は開先部分を触らない様注意する。

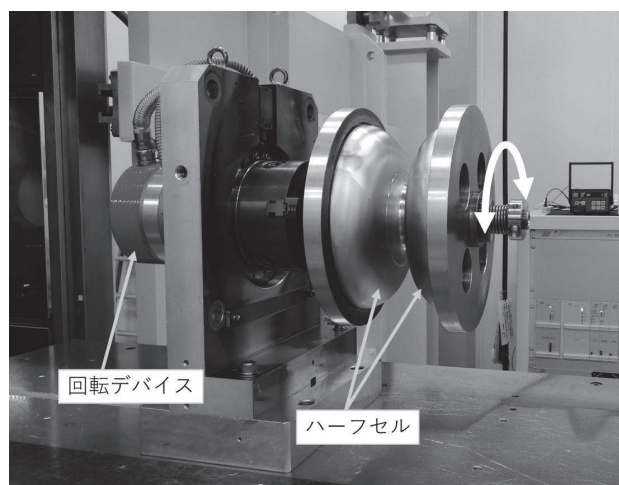


Fig. 33 アイリス溶接時のセットアップ。

4.3.5. アイリス溶接

ハーフセルをトリムした後は化学研磨を行い、いよいよアイリス部の溶接を行う。それぞれのハーフセルを合わせる前にアイリス部をクリーンな圧縮エアで吹いて表面のごみを十分飛ばす。アイリス溶接時のセットアップを Fig.33 に示す。ハーフセル内部にシャフトを通し、両端板で押さえている。この時シャフトにはニオブ製のバックリングを取り付けておく (4.1.5 参照)。溶接中は軸方向に縮むため、端板はばねで押さえつけておく。ハーフセルを回転させることによって全周に渡り溶接を行う。

実際の溶接は「仮付け溶接」→「表面溶接」→「本溶接」の順で行っていく。

仮付け溶接は文字通り 2 つのハーフセルを仮付けするための溶接であり、アイリスの場合は 2cm 程度の長さの溶接を 90° 毎に 4 カ所行う。いきなり全周に渡って溶接を行うと溶接中にハーフセルがずれてしまう恐れがあるからである。仮付け溶接は貫通溶接ではなく表面のみ溶かして接合する。溶接する部品によっては点付けにする場合もある。

表面溶接は貫通溶接ではなく板厚の半分程度まで溶け込む溶接を全周に渡って行う溶接である。2 つのパーツの隙間を埋め、不純物を前もってとばすための溶接である。

本溶接は最終的な溶接で、貫通溶接を全周に渡って行う。

Fig.34 に表面溶接と本溶接の際のワークの回転角度と電流値の関係の例を示す。溶接開始後は 90° 程度回して徐々に電流値を上げていく

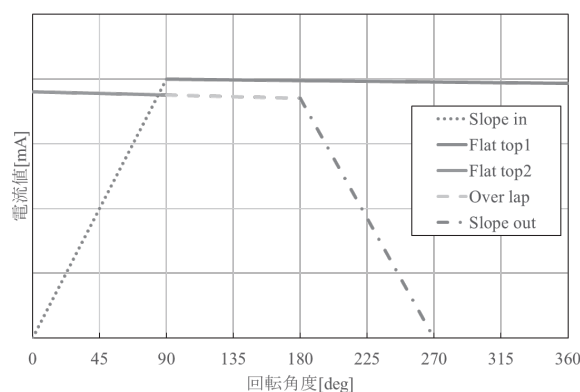


Fig. 34 ワークの回転角度と溶接電流値の関係の例。

(slope in)。電流値が上がったところから 450° 程度回す (flat top)。この際 360° のみではなく +90° 余計に回すのは重複部分 (overlap) を作るためである。特に本溶接の際に言えることだが、溶接開始から 90° かけて電流値を上げていったときに 90° の場所ではまだ貫通していない場合が多い。このため overlap 領域を作り確実に全周に渡って貫通させる。また、溶接している最中にワークの温度が上がっていき溶けやすくなるため flat top の領域では回している間に電流値を 5% 程度下げることが多い。例えば溶接開始から 90° 回して電流値を 20mA に挙げた後に 450° 回しつつ電流値を 19mA に下げる。Flat top と overlap が終わった後は徐々に電流値を下げていく (slope out)。この際にビームフォーカス値も徐々にデフォーカスしていくと滑らかな溶接終わりのビードとなる。(元々デフォーカスしているものを更にデフォーカスさせる。) 上記はあく

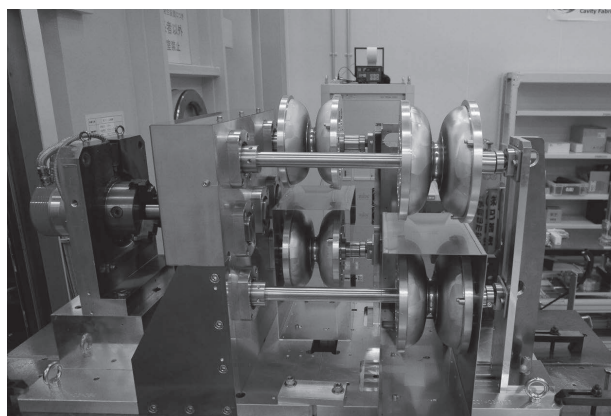


Fig. 35 アイリスの同時溶接治具。

まで例であり、溶接時の電流値や回転角度は溶接の仕上がりや材料などによって最適化を行う。

Overlap 領域は他の部分に比べ溶接による縮みが大きくなる。そのため表面溶接と本溶接の overlap 領域はずらした方がよい。CFF では Fig.33 に示すようにアイリス溶接は外側からビームを照射するが、内側から外側に貫通させる照射方法もある。また最近では時間短縮のために表面溶接を省略する事も試されている。

4.1.5 で述べたように電子ビーム溶接機のチェンバーの真空引きには 15 分～20 分程度要する。このため、一度の真空引きでなるべく多くのワーク溶接した方が効率がよい。CFF では Fig.35 に示すような一度の真空引きで4つのアイリス溶接を行える治具を開発し量産に向けた溶接方法を試している。

4.3.6. 強め輪挿入と強め輪溶接

アイリスを溶接した後はアイリス周りに強め輪を挿入する。Fig.36 に示すようにハーフセル外面には強め輪を嵌めるための段差が加工されている。たいていの場合、強め輪はそのままでは嵌められないので治具を使って Fig.36 で示す太い矢印の方向にハーフセルをそれぞれ引っ張って挿入する。強め輪を組み込んだ後は溶接を行う。

溶接後の写真を Fig.37 に載せる。液体ヘリウムでアイリス部を直接冷却すると空洞を外面洗浄した際の水抜きのため、二つの半割りの強め輪が間を開けて装着される。この強め輪が付いた状態の物を我々は“ダンベル”と呼んでいる。強め輪は空洞の中でも大きな力のかかる箇所であるため、溶接は十分溶け込んでいなければならない。高圧ガス保安法に準拠させるため、ダミーのダンベルを作製し、実際にカットして溶け込み具合を確認する必要がある。

強め輪を溶接する際にハーフセルへの入熱が大きいと Fig.38 に示すように強め輪を支点としてハーフセルが歪むことがある。Fig.38 は溶接前(実線)と後(点線)のハーフセルの断面図を表す。(図中で縦線は強め輪を表す。) この場合ダンベル高さも低くなってしまうため、強め輪を組み込む際に使用するような治具を用いてダンベルを引き延ばす必要がある。

4.3.7. 機械研磨

ダンベル内面に傷がついている場合はこれを取り除かなければならない。ただし、機械研磨は

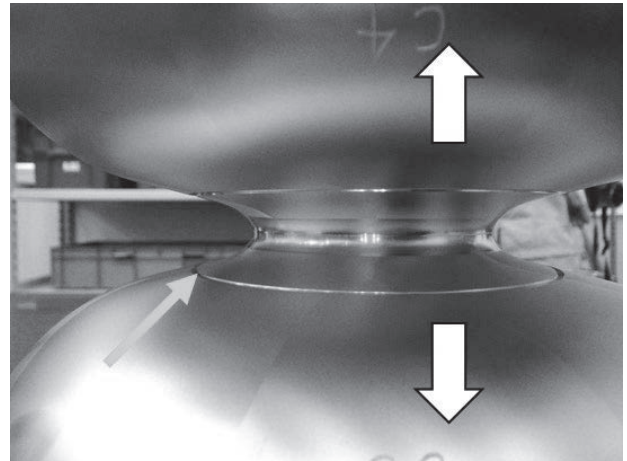


Fig. 36 強め輪を挿入する段差（細い矢印部分）。

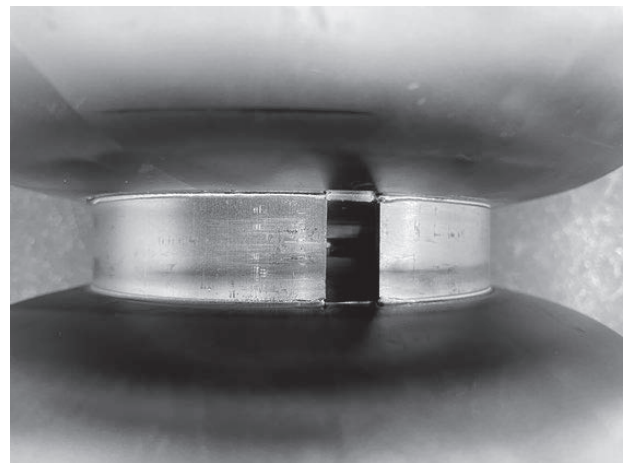


Fig. 37 強め輪溶接後の状態。



Fig. 38 アイリス溶接後の歪み。実線が溶接前、点線が溶接後のハーフセル形状を示す。

空洞内面を傷つける可能性があるため出来る限り実施しない方がよい。また製造効率の面から見ても研磨は行わない方がよい。このためにニオブ円板の時点から取り扱いに充分注意しなければならない。

どうしても研磨しなければならない場合は大きな研磨痕が残らない様十分注意する。研磨痕の

端は微視的に見ると鋭く尖っていることが多く、こういった形状は空洞内面の状態として一番好ましくない。逆に滑らかな表面の変化は悪い影響を与えることは少ない。CFF では 800 番以上の研磨材を用いて仕上げ研磨を行っている。また、前述したように、研磨の後は研磨粉で傷が埋まって一見傷が消えたように見えることがあるので、化学研磨を行い傷が消えたか確認をした方がよい。

CFF では少なくとも 0.1mm 以上の傷は除去するようにしているが、現状では目視判定のみで定量的な判定が出来ていない。また、目視だけだと見逃しも発生するため自動的に判断する装置の開発を進めている。

4.3.8. 赤道溶接

赤道溶接は空洞溶接の中で一番重要な溶接と言っても過言ではない。赤道は空洞運転中に最も磁場の強くなる箇所であり、より小さな欠陥でもクエンチを引き起こす可能性がある。このため赤道の溶接で欠陥などを作らない様、注意しなければならない。また空洞製造で最後の溶接となるため、この溶接を失敗すると空洞全体がだめになってしまう恐れがある。

赤道を溶接する前はダンベルを化学研磨し十分にすすぎをして清浄にしておく。Fig.39 に CFF での赤道溶接前の組み立て風景を載せる。CFF の場合はダンベルを縦に積み上げていく。他の溶接の時と同じくダンベルを積み上げていく際は赤道部分をクリーンな圧縮エアで十分吹いて埃をとばしておく。



Fig. 39 赤道溶接時の組み立ての様子。

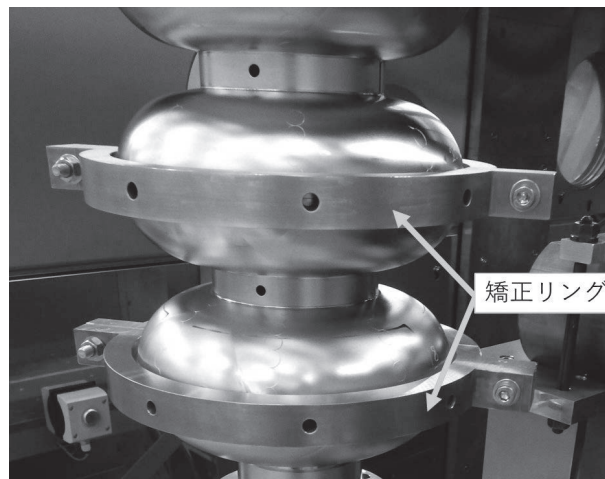


Fig. 40 赤道に矯正リングを嵌めた状態。

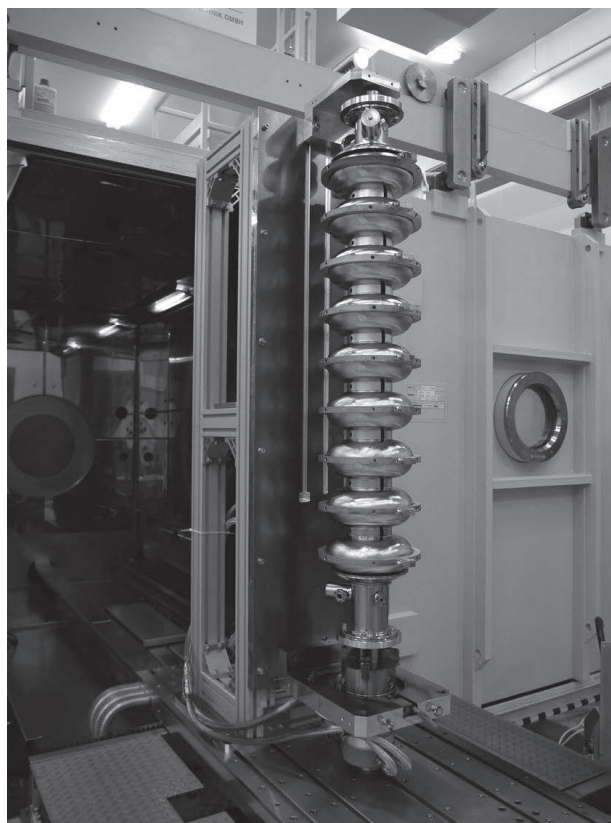


Fig. 41 赤道溶接に向けてすべてのダンベルを積み終わった状態。

赤道部分は嵌め合い形状になっているが歪みがあると入らない場合がある。その時は Fig.40 で示すような矯正リングを赤道部に嵌めて真円に矯正してそれぞれのダンベルを嵌め込む。矯正リングを付けた状態でリングに開けた穴から点付

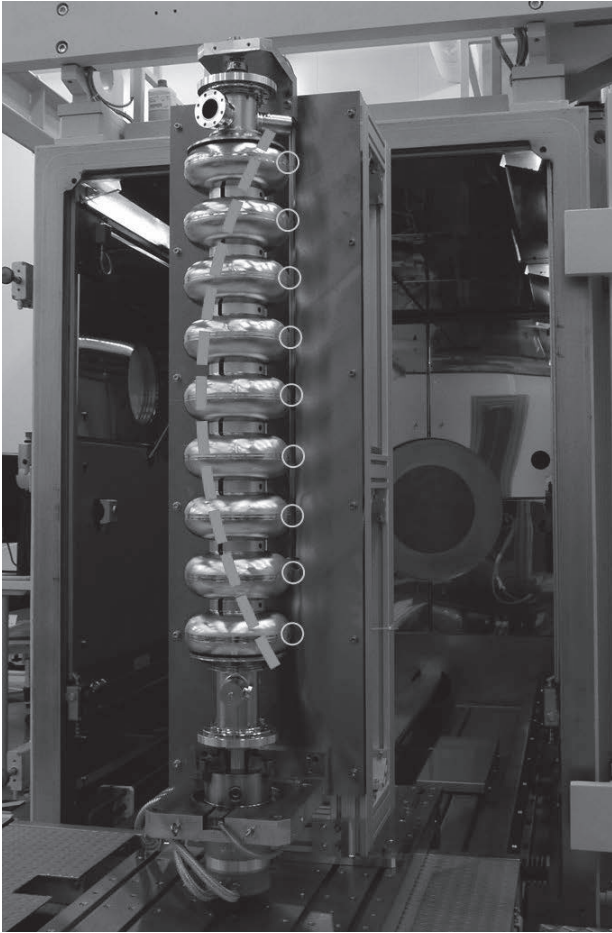


Fig. 42 空洞がバナナ形状になってしまう例。

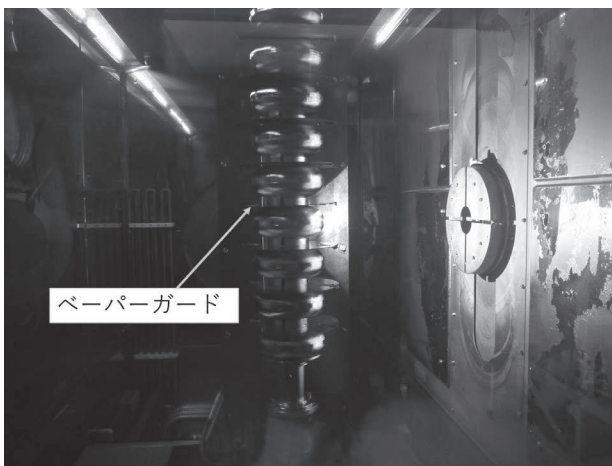


Fig. 43 赤道溶接の様子。

け溶接を行い仮付けする。その後、一旦チェンバーから取り出しリングを外して次の溶接に進む。ただしこの方法は時間がかかるため改善の必要がある。

Fig.41 はダンベルをすべて積み終わった状態の写真である。

溶接はアイリス溶接の時と同じく仮付け溶接、表面溶接、本溶接の順に行っていく。この時、表面溶接、本溶接の際の overlap 領域を各セルで同じ位置に来るように溶接してしまうと、溶接後に空洞全体が曲がったバナナ形状になってしまう。その例を Fig.42 に示す。Fig.42 の丸で囲んだ部分をすべて overlap 領域にってしまうと、overlap 領域の方は溶接縮みが大きいので空洞全体が点線のように曲がったバナナ形状になってしまう。このため overlap 領域はそれぞれのセルで違うところに来るようにしなければならない。

赤道溶接の様子を Fig.43 に載せる。溶接時は蒸発したニオブが酸化して溶接部付近に蒸着してしまう。まだ溶接していない赤道部分に蒸着するのを防ぐため CFF では Fig.43 にあるような円板状のペーパーガードをアイリス部に取り付けている。溶接はスパッタが発生しない条件で行わなければならない。溶接を重ねていくうちに空洞全体が熱くなり溶けやすくなるため、これを考慮したパラメーターを使うか、毎回の溶接後に冷却時間を取るなどの対処が必要である。

アイリス溶接の時と同じく赤道溶接も一度の真空引きで複数本の空洞を溶接した方が効率的である。施設によっては一度に 4 本程度の空洞をチェンバーに入れて溶接する事もある[13]が、CFF ではまだ実施できていない。

溶接後は亀裂や溶接漏れがないか確認するためにリークテストを行う。CFF では真空吹き付け法及び真空フード法を用いてリークテストを行っている。

4.4. ジャケットの取り付け

空洞が完成したら、電解研磨や焼鈍などの表面処理を行った後に縦型クライオスタットで空洞を冷却し RF 試験を行う。RF 試験で仕様を満たす結果が得られた空洞にはヘリウムジャケットを装着する。ヘリウムジャケットを装着する前の空洞はチューニングを行い目標値の周波数に併せると共に各セルに立つ加速電場の強さ (Field

Flatness) も均一になるように調整されている。ヘリウムジャケットの溶接の際は溶接による熱負荷によって空洞の変形、それに伴う周波数の変化などがないか観察しておかなければならない。

4.5. メンテナンス

歩留まりよく空洞を製造するには使用する機器のメンテナンスは必須である。電子ビーム溶接機やプレス機など加工機器のメンテナンスや測定器の校正は当然だが、クリーン環境関係のメンテナンスも忘れてはいけない。クリーン環境関係のメンテナンスとしては、HEPA フィルターの交換や圧縮エアのフィルター交換、純水製造装置の点検などがある。どんなにうまく空洞部品を製造できたとしても汚染された圧縮エアを吹き付けて部品表面を汚してしまつてはすべてがだめになってしまうので気を付けなければならない。CFF では電子ビーム溶接機の壁面の清掃も行っている。また、溶接に使う治具は定期的に清掃を行い、清浄を保つことが望ましい。

5. 高圧ガス保安法

前述したように、空洞およびそれを取り巻くヘリウムジャケットは高圧ガスを扱う容器に含まれる。このため空洞及びヘリウムジャケットは高圧ガス保安法に基づく基準を満たした材料と製造方法で製造しなければならない。しかし、空洞の場合は特殊な材料、形状、使用方法であるため指標となる例示基準がない。そこで材料の機械強度試験（低温、室温）、応力解析及び座屈解析による安全性の確認などを行わなければならない。（材料試験及び解析に関しては本セミナーの「空洞材料シミュレーション、材料評価」を参照。）空洞完成後は高圧ガス設備試験申請を行い、肉厚測定、耐圧試験、気密試験などを受ける。合格すれば成績証明書が交付される。

高圧ガス設備試験申請を行う際は、溶接品質の保証も併せて必要になる。高圧ガス容器の溶接は溶接施工法確認試験に合格した事業所でなければ行うことが出来ない。溶接施工法確認試験では試験官立ち合いの元、定められた大きさ・厚さの材料の溶接を行い、そこから切り出したサンプルを用いて、曲げ試験や引張試験などを行う。その際に機械強度が基準を満たさない場合や、曲げ試

験で溶接不良が見つかりと合格は出来ない。このため、熟練した溶接の技術が必要となる。溶接施工法確認試験は材料の組み合わせ及び溶接方法毎に合格しなければならない。例えば空洞の溶接の場合はニオブーニオブ (EBW)、ニオブーニオブチタン (EBW)、ニオブチタンーチタン (EBW)、チタンーチタン (TIG) の全部で 4 種類の材料の組み合わせがある。この場合は 4 種類すべての組み合わせで溶接施工法確認試験に合格しなければならない。

ILC に使用する空洞は世界で分担して製造する予定であるが、使用する場所が日本の場合は当然高圧ガス保安法に準拠した製造方法で作られなければならない。海外にも類似した基準はあるが、海外のメーカーは日本の基準は理解していないため、まずは日本側で前例を作り、それに準拠する形で進めるのが良い。このため、CFF では現在高圧ガス保安法に準拠する空洞製造を進めている。

6. 最近の動向

現在、ILC での建設費用を抑えるため空洞製造に於けるコスト削減が求められている。このため新しい材料を用いたコスト削減を検討している。検討している材料の一つが LG 材である。前述したように LG 材はニオブのインゴットを直接スライスしたものであり、通常の FG 材の生産で必要となる鍛造と圧延の工程を省略している。このため材料の生産コストを抑えることが出来る。また圧延工程がないため異物が混入する可能性を低く抑えることが出来る。

CFF ではすでに LG 材を用いた空洞を複数台製造しておりそのうちの何台かは加速勾配、Q 値共に ILC 要求 (Table 1 参照) も満たしている [14][15]。ただし LG 材は結晶粒径が大きく異方性が強いいため成型した際の歪みが大きく、また歪み方も材料によって異なるため空洞製造が難しくなる。更に同じ板でも場所によって機械強度も異なるため高圧ガス保安法にどう準拠させるかが難しい課題である。現在 CFF では低温に於ける引張試験や LG 材の空洞を実際に用いた破裂試験などを行い [16]、この課題をどうクリアするか検討中である。

もう一つの材料がニオブのインゴットを鍛造して直接スライスしたものである。我々はこれを Medium Grain (MG) 材と呼んでいる。LG 材の

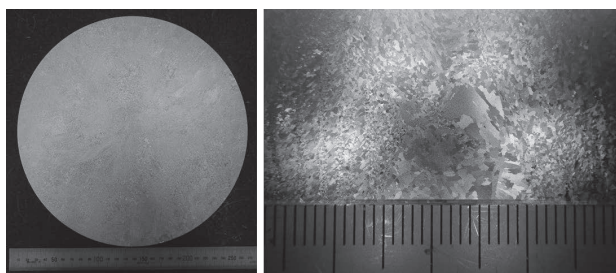


Fig. 44 MG 材（左）とその拡大写真（右）。

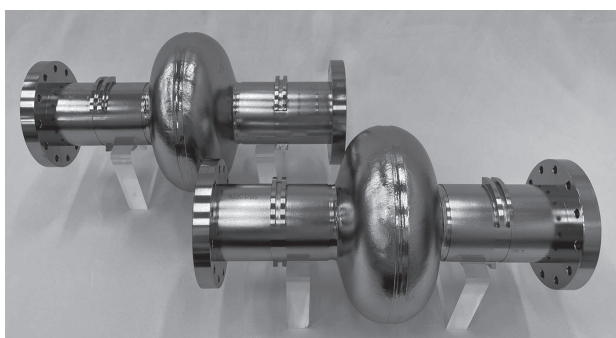


Fig. 45 MG 材を用いた単セル空洞。

結晶粒径が数 cm なのに対し MG 材は鍛造工程を経ているため平均粒径で 100~300 μm （大きいもので数 mm）に仕上がっている。このため、LG 材に比べて成型性が良くなるが、成型した際に曲げの大きなところでは粒界が盛り上がる、または凹むため面が荒れるという難点もある。MG 材の写真を Fig.44 に載せる。機械強度に関しては LG 材よりも結晶配列が均一なため LG 材より均一な結果が得られている[17]。生産コストは圧延工程を省略している分 FG 材より安価になる。また圧延による異物混入もない。

CFF ではこの材料を用いて Fig.45 に示すような単セル空洞を 2 台製造した。1 台はすでに性能測定を終えて ILC 要求を満たす結果を得ている[18]。CFF では現在この材料に関して更なる研究を進めている。

CFF では新しい空洞材料の検討の他にも ILC に向けた空洞量産技術の研究開発を行っている。ニオブ板のパンチによる穴あけ（4.3.1 参照）や同時溶接治具（4.3.5 参照）も量産に向けた技術である。同時溶接治具はアイリス溶接だけではなくエンドグループの部品溶接にも活用する事ができ

る。その他にも新しい溶接方法の検討や部品加工技術の研究、傷検出方法の検討なども行っている。

7. 終わりに

ここでは ILC に向けた空洞製造に関して説明した。ILC では高い空洞性能が求められるため、厳格に管理された製造体制を整える必要がある。現状では空洞製造は主に企業が請け負うことが多く、製造技術の開発を行っている研究所は少ない。そのため、空洞製造の技術は各社のノウハウとなっておりなかなか表には出てこない部分が多い。企業は所謂工業製品製造の“プロ”であるため、我々研究所が持っていないノウハウも多々ある。恐らくここで紹介できたのも数あるノウハウの中のごく一部に過ぎないだろう。しかし、空洞製造の基礎部分はなるべく余すことなく説明したつもりである。本稿が読者の皆様にとって少しでも参考になれば幸いである。

参考文献

- [1] B. Aune *et al.*, “Superconducting TESLA cavities”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol. 3, 092001, 2000. doi: 10.1103/PhysRevSTAB.3.09200
- [2] “The International Linear Collider”, Technical Design Report, Volume 3.2, Accelerator R&D, 2013
- [3] H. Padamsee, “Purification of Niobium”, United States Patent, Patent Number: 4487637, Date of Patent: Dec. 11, 1984
- [4] 梅澤 裕明, “純ニオブに含有される不純物に関する研究”, 低温工学, 52 巻 2 号, p.79-84, 2017, <https://doi.org/10.2221/jcsj.52.79>
- [5] A. Brinkmann *et al.*, “Statistic to Eddy-Current Scanning of Niobium Sheets for the European XFEL”, in Proc. SRF2013, Paris, France, Sep. 2013, pp. 171-173, MOP032
- [6] 井上 均, “Nb の切削と成形について”, SRF 材料研究会, 2015 年 3 月
- [7] 後藤 剛喜, “超伝導空洞の表面処理: 電解研磨”, OHO'21 受講用テキスト, 2021 年 9 月

- [8] 沢辺 元明, “超伝導空洞の表面処理”, OHO’14 受講用テキスト, 2014 年 9 月,
http://accwww2.kek.jp/oho/oho14/OHO14_txt/07_Sawabe_Motoaki.pdf
- [9] Yoochul Jung *et al.*, “Analysis of BCP Characteristics for SRF Cavities”, in *Proc. IPAC2014*, Dresden, Germany, Jun. 2014, pp. 2549-2551, WEPRI034
- [10] W. Singer, “Metallurgical and Technological Request for High Purity Niobium in SRF Application”, AIP Conference Proceedings 837, 51 (2006),
<https://doi.org/10.1063/1.2213059>
- [11] 木谷 靖 他, “大出力真空レーザ溶接技術の鉄鋼製造工程への適用”, JFE 技報 No. 46, p. 57-63, 2020 年 8 月
- [12] J. Iversen, “Development and Design of a RF-Measurement Machine for the European XFEL Cavity Fabrication”, in *Proc. SRF2009*, Berlin, Germany, Sep. 2009, pp. 786-790, THPPO071
- [13] 原 博史 他, “ILC に向けた超伝導加速空洞の開発状況”, in *Proc. 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aomori, Japan, Aug. 2014, pp. 1088-1090, PASJ2014-SUP047
- [14] T. Dohmae *et al.*, “Investigation of in-house superconducting radio-frequency 9-cell cavity made of large grain niobium at KEK”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 875 (2017) 1–9
- [15] T. Dohmae *et al.*, “Investigation on 1, 3 and 9-cell SRF Elliptical Cavities Made of Large Grain Niobium”, in *Proc. SRF2019*, Dresden, Germany, Jul. 2019, pp.1215-1217, FRCAA6
- [16] M. Yamanaka *et al.*, “Pressure Test for Large Grain and Fine Grain Niobium Cavities”, in *Proc. IPAC2021*, Campinas, SP, Brazil, May. 2021, MOPAB383
- [17] A. Kumar *et al.*, “Mechanical Properties of Directry Sliced Medium Grain Niobium for 1.3 GHz SRF Cavity”, in *Proc. SRF2021*, Jun. 2021, Virtual Conference, MOPCAV004
- [18] T. Dohmae *et al.*, “Fabrication of 1.3GHz SRF Cavities Using Medium Grain Niobium Discs Directry Sliced from Forged Ingot”, in *Proc. SRF2021*, Jun. 2021, Virtual Conference, MOPCAVV012