

話 題

ILC 用超伝導加速空洞の量産化に向けた製造の研究

佐伯 学行*

Studies on the Mass-Production Fabrication of ILC Superconducting RF Accelerator Cavity

Takayuki SAEKI *

Abstract

We had been constructing a new facility for the fabrication of superconducting RF cavity at KEK from 2009 to 2011. In the facility, we have installed a deep-drawing machine, a half-cup trimming machine, an electron-beam welding machine, and a chemical etching room in one place. We started the studies on the fabrication of 9-cell cavity for International Linear Collider (ILC) using this facility. The studies are focusing on the cost reduction with keeping high performance of cavity, and the goal is the establishment of mass-production procedure for ILC. We already finished the fabrication of two 9-cell cavities in this facility. This article reports the current status of the studies.

1. はじめに

国際線形加速器 (ILC) は、全長 31 km の直線トンネルの両端から電子と陽電子のビームを加速し、中央の衝突点に設置した測定器によって、電子・陽電子の衝突による物理現象を観測するための装置である。図 1 に ILC の概要を示した。

ILC において、電子（または陽電子）ビームを加速する主ライナックは、超伝導加速器によって構成されている。その最小構成単位は、図 1 の左中央に描かれている約 1 m の超伝導 9 セル加速空洞である。ILC では、約 16,000 台の超伝導 9 セル加速空洞を横型のクライオスタット内に設置し、液体ヘリウムで温度 2 K に冷却した状態で運転を行う。

図 2 に、ILC の主ライナック超伝導加速器の仕様と超伝導加速器を構成するクライオモジュールの概観とその構成要素である超伝導 9 セル加速空洞の概観を示した。ILC の主ライナックでは、運転時の平均加速勾配として 31.5 MV/m が必要であるが、ILC Technical Design Report¹⁾ では、空洞生産後の空洞受け入れ性能検査における合格加速電界を 28 MV/m とし、さらに、その生産におけ

る「歩留まり」として 90% を仮定している。設置に必要な超伝導 9 セル加速空洞の数は約 16,000 台であるが、歩留まりとして 90% を仮定すると、約 16,000 台の 1.1 倍、すなわち、約 17,600 台の空洞を生産する必要がある。ILC の主線形加速器とほぼ同様の超伝導線形加速器を持ち、現在その建設を行っている Euro-XFEL の規模は、空洞

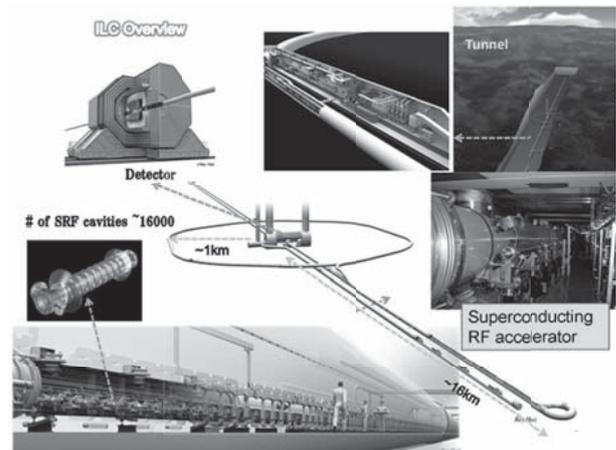


図 1 インターナショナルリニアコライダー (ILC) の概要。31 km の直線トンネル内の両翼に超伝導加速器が設置され、その中央には測定器が設置されている。加速器によって両翼から加速された電子と陽電子を測定器の置かれた中心で衝突させ、生成された粒子を精密に観測することができる。

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: takayuki.saeki@kek.jp)

の生産数として約 800 台であることを考えると、ILC の生産規模は正に桁外れに大きいと言える。しかし、Euro-XFEL の生産期間が 2 年間であるのに対し、ILC では 5 年間であること、生産はアメリカ、欧州、アジアの 3 領域で行われることを考慮すると、年間かつ一領域で必要な生産規模は、Euro-XFEL の 3 倍程度であることが解る。さらに、LHC で発見されたヒッグス粒子の質量が約 125 GeV であったことから、ILC は第一期の実験を衝突エネルギー 250 GeV で開始し、第 2 期において 500 GeV とする案が検討されている。この場合、第一期の空洞の生産規模は約 9,000 台となり、年間かつ一領域で必要な生産規模は、約 600 台となり、Euro-XFEL の年間生産台数 400 台の 1.5 倍となる。これは現在の技術で十分に実現可能な規模である。

ここで注意すべきことは、Euro-XFEL の運転加速勾配は 23.5 MV/m であり、ILC の運転加速勾配 31.5 MV/m を達成するには、更なる研究開発が必要ということである。近年の研究における ILC 空洞の生産歩留まりは、世界平均で約 94% を達成しているが、まだ空洞の統計数が十分とはいえない。また、実際の ILC 建設の際には、更なるコスト削減が必要である。このような状況において、KEK では、2009 年から新たに空洞製造施設 (Cavity Fabrication Facility / CFF) の建設を行ってきた。この施設では、超伝導加速空洞の製作のために必要な機器、すなわち、プレス機、旋盤、化学研磨室、電子ビーム溶接 (Electron Beam Welding / EBW) 機などが 1 ヶ所に集約設

置されている。我々は、この施設を使用して、2009 年から ILC のための超伝導 9 セル空洞の製作の研究を行っている。この研究は、特に ILC の超伝導 9 セル空洞の量産における高い歩留まりとコスト削減に焦点を絞って行われている。

2. 空洞製造施設の機器

図 3 に、新しく建設した空洞製造施設 (CFF) に設置した主な装置の写真を示した。

もっとも重要な装置は電子ビーム溶接 (EBW) 機である。超伝導 9 セル空洞は純ニオブ製であるが、すべてのニオブ部品の溶接組立をこの装置によって行う。電子ビーム溶接機は、溶接を行う部品をチャンバー内に入れた後、チャンバー内を真空引きして空気を排除した環境にしてから、電子ビームによって接合部の溶接を行う。これは、溶接部に酸素や窒素などの異物が混入すると空洞の超伝導性能が劣化するためである。また、溶接をした継ぎ目、いわゆるシーム部分においても空洞内面は滑らかな面でなければならない。もしシーム部に欠陥が発生すると、空洞内に高いエネルギーの電磁波を蓄積した時に超伝導状態を破るクエンチの原因となってしまう。このため、溶接時の電子ビームの電流や電圧などを適切に選んで溶接する必要がある。プレス機は、9 セル空洞のセル部 (後述) に使われるカップと呼ばれるお椀状の部品をニオブ円盤から深絞りにより製造する。プレスされたカップの開口部の端部は、縦型旋盤によって精密に機械加工される。機械加工された

SCRF Industrialization required for ILC

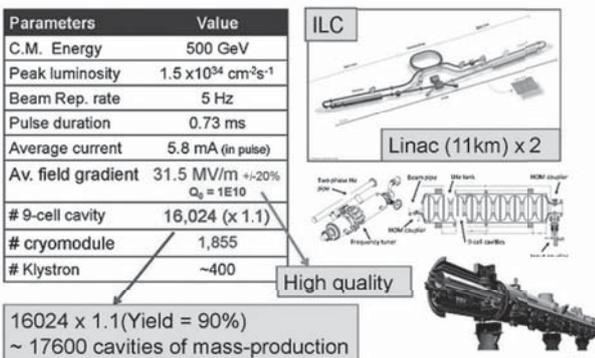


図 2 ILC 主線形加速器の仕様 (左)。超伝導加速器を構成するクライオモジュールの概観 (右下) とその構成要素である超伝導 9 セル空洞の概観 (右中央)。

Main Equipment of Cavity Fabrication Facility

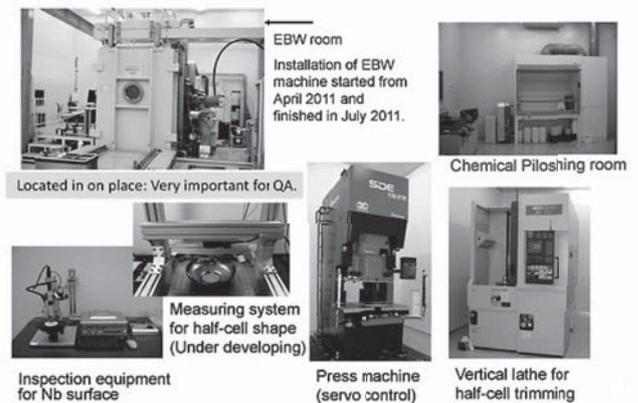


図 3 空洞製造施設 (Cavity Fabrication Facility / CFF) に設置された主な製造装置の写真。電子ビーム溶接 (EBW) 機、化学研磨室、プレス機、縦型旋盤、部品の精密形状測定器などが設置されている。

部品は、機械油などで汚れているため、化学研磨室においてフッ酸、硝酸、リン酸の混合液にて化学研磨され、純水で洗浄した後に乾燥する。このように、清浄な状態にある部品を、電子ビーム溶接機で組立溶接する。また、製造した部品の寸法測定をする装置や、部品表面を観察する顕微鏡なども設置されている。これらの装置は、Class 100,000のクリーンルーム(19 m × 14 m × 5 m)内に集約されている。

空洞製造施設(CFF)においては、空洞製造のための材料、すなわち、純ニオブの板材やパイプ材などを施設内に搬入した後は、施設内においてすべての空洞製造工程、すなわち、材料の加工から空洞の最終組み立て作業までを一貫して行うことができる。超伝導空洞の製作においては、部品溶接の作業時に、ニオブ以外の異物が混入することで超伝導性能が劣化するため、クリーンルーム内の清浄な環境においてすべての製造工程が一貫して行われることが高い歩留まりの達成において非常に重要である。

3. 超伝導 9 セル加速器空洞 KEK-00 号機 (高調波減衰器無) の製造

3.1 KEK-00 号機の主要な部品

空洞製造施設の装置設置作業は、2011年7月におおよそ完了した。しかし、それに先立って、超伝導9セル空洞KEK-00号機の製作を、2010年の中ごろから、溶接作業を請け負う企業の工場(ジョブショップ)で開始した。KEK-00号機の製作では、製作工程を簡素化するために、複雑な形状の高調波(Higher Order Mode / HOM)減衰器(後述)と呼ばれる部品を省略した設計とした。図4に、KEK-00号空洞の完成後の写真と、その主要な部品の写真を示した。

図4の中央に示した空洞の写真を見ると、その中央部に9つのセルと呼ばれる膨らみ(もっとも膨らんだ部分を赤道部と呼ぶ)がある。各セルの膨らみは、空洞内に蓄積される1.3 GHzの電磁波による定在波の腹に相当し、セル間のくびれ(アイリスと呼ぶ)は定在波の節に相当する。空洞内に入射された電子(または陽電子)ビームはこの定在波によって加速される。図18に示すように、空洞のセル部分は最終的にチタン管によって覆われ、加速器の運転時には、空洞の冷却のためにチ

Fabrication of KEK-00 Cavity (w/o HOM)

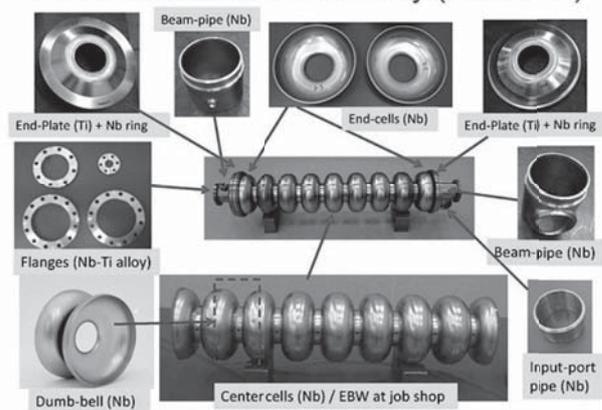


図4 完成したKEK-00号(中央)と主な組立部品。空洞内面を構成する部品は、超伝導特性を得るため全て純度の高いニオブ金属で製作される。中央部は、カップと呼ばれるお椀状の部品を背中合わせに溶接してダンベルと呼ばれる部品を作り、これを8個接合して構成する。その両端にエンドプレート、エンドカップ、ビームパイプ等が接合される。

タン管とセル部分の間に液体ヘリウムが充填され、空洞全体が超伝導状態となって電磁波を蓄積する。このため、空洞の内面を構成するすべての部品は、超伝導材料である純ニオブ材料で製作される。純ニオブは比較的柔らかいため、硬さが必要なフランジ部はニオブとチタンの合金が使用されている。KEK-00号機の製作では、図4の中央下に示されたセンターセルと呼ばれる空洞中央の部分は、ジョブショップにて溶接を行った。その両端にあるエンドグループと呼ばれる部分は、空洞製造施設(CFF)の電子ビーム溶接(EBW)機の設置が完了した後、KEK/CFFにおいて溶接を行った。

3.2 KEK-00 号機の製作と表面処理

センターセル部分を製作するため、まずは深絞り加工と旋盤加工によってカップ(あるいはハーフセル)を製作する。カップの底は開口になっており、2つのカップの底の開口部を溶接により接合して、ダンベルと呼ばれる部品を製作する。ダンベル部品の形状については、図4の左下の写真を参照されたい。8個のダンベル部品の開口部を溶接して接合することでセンターセル部が完成する。この溶接作業は、前述したように、ジョブショップにて行った。

図5に、CFF/KEKにおけるKEK-00号機のエンドグループの組立溶接作業の写真を示した。エ



図5 KEK/CFFにおけるエンドグループの組立作業。溶接前の部品を組み立てて治具で固定し、電子ビーム溶接 (EBW) 機のチェンバー内に入れ、電子ビームで溶接を行う。組立溶接後の電力インポート側のエンドグループ (右下) と電界モニター側のエンドグループ (左下) の写真。

エンドグループは部品を治具で拘束し、それらを電子ビーム溶接 (EBW) 機のチェンバー内で回転させながら電子ビームで溶接する。空洞の片方のエンド部には、ビームパイプに電力を入力するための電力インポートポート (枝管) があり、もう片方のエンド部には、空洞内の電界をモニターするための電界モニターポート (枝管) がある。図5の下2つの写真が、組立溶接後の電力インポート側のエンドグループ (右) と電界モニター側のエンドグループの写真 (左) である。

最後に、センターセル部の両端にある開口部にエンドグループの開口部を溶接して接合する。この溶接は、センター部の溶接と同じ条件で行われるため、再度ジョブショップにて行った。最初に電界モニター側のエンドグループをセンターセル部に溶接し、この溶接作業は成功した。しかし、電力インポート側のエンドグループをセンターセル部に溶接する作業中に、溶接部に穴が開いた。図6の左上の写真がその穴を示している。穴が開いた原因を正確に特定することは困難だが、接合面に工場内でゴミが付着したために、溶接作業中にそのゴミが高温でガス化して穴が開いた可能性が考えられる。このような事例からも分かるように、超伝導空洞の製作時において、環境の清浄度は非常に重要なポイントである。KEKの空洞製

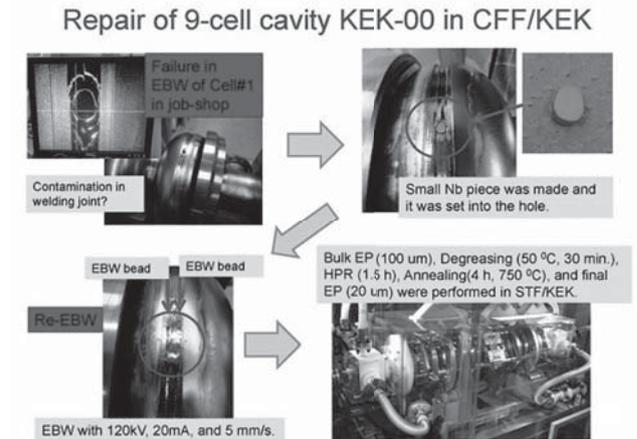


図6 ジョブショップにおけるセンターセル部とエンドグループの組立溶接作業中に空いた穴 (左上) とその修復作業 (右上と左下)。KEK-00号機の電解研磨による表面研磨作業 (右下)。

造施設 (CFF) において、電子ビーム溶接 (EBW) 機を含めたすべての機器をクリーンルーム内に設置したのはこのような理由による。

さて、このセル部の穴を修復する作業は、CFFのEBW機によって行った。図6の右上の写真に示したように、純ニオブ板材から純ニオブ片を穴の形に切り出して、これを穴に埋め込み、再溶接した。溶接により修復した個所の内面は、部分的に研磨を行い、滑らかな状態として修復を完了した。KEK-00号機の製造に関する詳細は参考文献2)を参照されたい。

図6の右下に、KEKの超伝導空洞テスト施設 (Superconducting accelerator Test Facility / STF) における、KEK-00号機の表面処理作業 (電解研磨処理, Electro-chemical Polishing / EP) の写真を示した。KEK-00号機に行われた表面処理は、現在のKEK/STFにおける標準的な内面処理の手順を適用した。電解研磨処理 (EP) により、内面を $100\ \mu\text{m}$ 研磨した後、脱脂洗浄 (Degreasing) と純水による高圧洗浄 (High Pressure Rinse / HPR) を行った。さらに焼鈍 (Annealing) を 750°C で4時間行い、再度、最終電界研磨 (EP) を $20\ \mu\text{m}$ 行った。その後、ビームパイプの開口部周辺をブラシにより洗浄し、脱脂洗浄 (Degreasing) を行った後に、純水による高圧洗浄 (HPR) を7時間行った。これらの内面処理により、空洞内面は十分に滑らかかつ清浄な状態になる。次に、Class 10のクリーンルー

ム内で、性能測定試験に必要なアンテナ類の取り付け作業を行い、空洞内を真空引きしながら、120°Cで48時間のベーキングを行った。

3.3 KEK-00 号機の性能測定結果

図7に、KEKの超伝導空洞テスト施設(STF)における、KEK-00号機の性能測定の結果を示した。

左下の四角のプロットは、温度4 Kでの測定データである。丸のプロットが温度1.5-1.8 Kの測定データで、最大電界は29 MV/m (Quality factor : $Q_0 = 9.5 \times 10^9$) に達した。性能を制限した原因は8番目のセルでのクエンチだった。白抜きのデータはその時のX線の発生量を表しており、約70 μ Sv/hに達した。これは、他の空洞と比較して、それほど多くない値である。各セルに強度の違う電界を発生させるモード解析という手法で測定を行ったところ、穴の修復を行った1番目のセルの加速電界が42.7 MV/mに到達していることを確認した。これにより、穴の修理は成功し、空洞性能に影響を与えなかったことが確認できた。この結果は、ILCの受け入れ性能試験の閾値である28 MV/mをこらうじて上回るものだった。著者以外のスタッフ全員が9セル空洞の製作はまったく初めてだったことや、途中の溶接工程でセルに穴が空くなどのトラブルがあったことを考慮すると、まずまずの成果だったといえる。

Vertical Test of 9-cell cavity w/o HOM (KEK-00) at STF/KEK

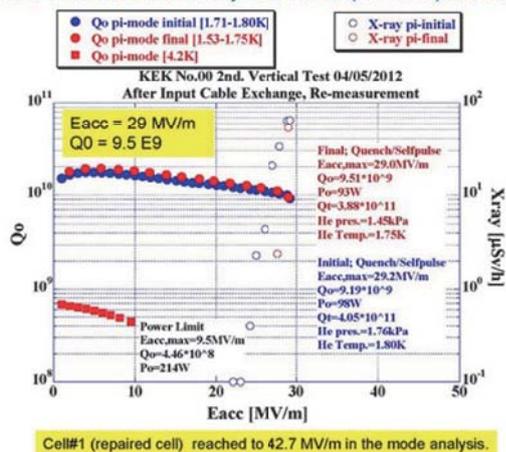


図7 KEK/STFで行われたKEK-00号機の性能測定の結果。左下の四角のプロットは、温度4 Kでの測定データである。丸のプロットが温度1.5-1.8 Kの測定データで、加速電界29 MV/mを達成した。また、特定のセルに高い電界を発生させるモード解析という手法により、穴の修復を行ったセルにおいて、電界が42.7 MV/mに達することを確認した。

4. 超伝導9セル加速器空洞KEK-01号機(高調波減衰器有)の製造

4.1 KEK-01号機の製作と表面処理

KEK-00号機の縦測定の結果が、最大加速電界 = 29 MV/mだったこと、修復したセルは最大加速電界 = 43 MV/mに到達していたことから、その製作方法に大きな間違いがないことが確認できた。このため、我々は、次に高調波(Higher Order Mode / HOM)減衰器を持つILC用の設計形状のKEK-01号機の製作を開始した。

図8に、空洞のエンド部にある高調波(HOM)減衰器の構造を示した。エンド部には、電力の入力やモニターのためのポートの他に、高調波(HOM)減衰器と呼ばれる部品が必要である。ビームは1.3 GHzの電磁波で加速されるが、ビームが空洞内を通過する時に、その高調波(HOM)を励起してしまう。この高調波(HOM)成分は、ビームの加速を妨げるため、空洞外に吸い出して減衰させる必要がある。これが高調波(HOM)減衰器の機能である。これらの部品は、図8からも分かるように複雑な形状のため、製造コストが大きく、製造方法を工夫することによりコストの削減が期待できる。

例えば、図8の右下に示した複雑な形状の部品は、通常、ニオブ材からの削り出し加工で製造するため、数時間を要する。これに対し、我々は図9に示したように、ニオブ材料をウォータージェット

Complicated structure of cavity end-group

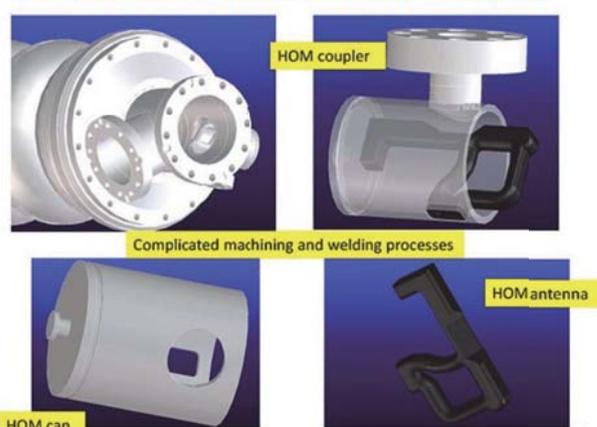


図8 空洞のエンド部にある高調波(HOM)減衰器の構造(右上)。高調波(HOM)減衰器の外導体カップ部品の形状(左下)と内導体アンテナ部品の形状(右下)。

Fabrication of HOM antenna by water-jet cutting and press-forming for KEK-01

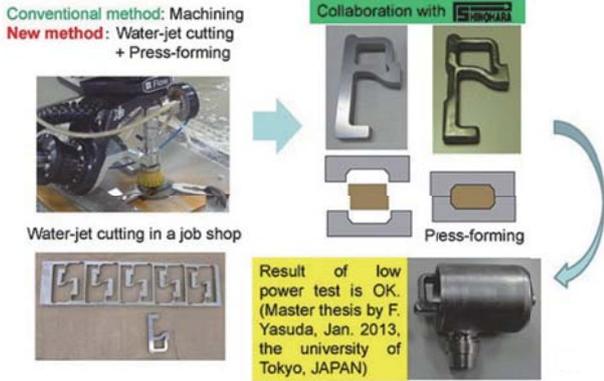


図9 高調波 (HOM) 減衰器の部品の新しい加工方法. 内導体アンテナ部品をウォータージェットカットとプレスにより製造し, 外導体カップ部品を新たな先進深絞り法により1回の深絞りで製造した.

カッターによって切り出し, それをプレス加工する方法を研究している. ウォータージェットカッターでの切り出しに要する時間は10分間程度であり, さらにプレス加工は数秒間で完了する. このため, 製造時間が大幅に短縮されて, コストの削減が期待できる. 図9に, この方法により製作した高調波 (HOM) 減衰器の内導体アンテナの写真を示した. 図8の左下にその部品形状を示した高調波 (HOM) 減衰器の外導体カップは, 通常, 複数回の深絞りで作成するが, 我々は新たな先進プレス絞り加工方法により, 1回の深絞りで作成する方法を開発した. これらの内導体アンテナと外導体カップを電子ビーム溶接で接合して製作した高調波 (HOM) 減衰器の写真を図9の右下に示した³⁻⁵⁾. KEK-01号機は, この方法で製作した高調波 (HOM) 減衰器を組み込んだ.

また, 量産という観点では, 溶接の工程でも工夫の余地がある. 図10は, センターセル部とエンドグループの溶接において, 空洞姿勢と電子ビームの方向について2つの可能なパターンを示している. 左の写真は, 空洞を水平に設置して回転しつつ, 電子ビームを上から下に向けて照射して溶接する場合である. 右の図は, 空洞を垂直に設置して回転しつつ, 電子ビームを水平に照射して溶接する場合である.

溶接前にセンターセル部とエンドグループ部品を仮組するので, 空洞を水平に設置する場合は, 重力で接合部が離れるような力が働く. これに対

Configuration choice of cavity attitude and gun position

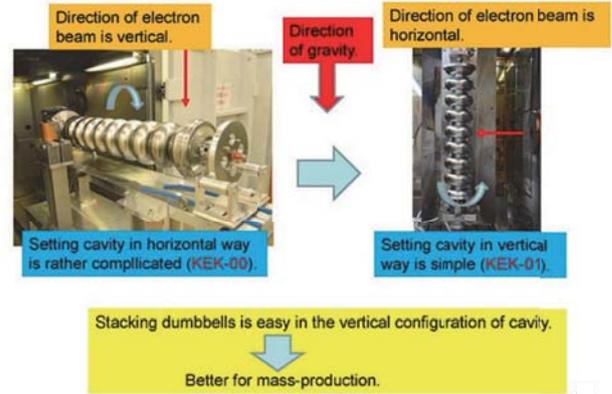


図10 空洞を溶接する時の空洞姿勢と電子ビームの方向についての考察. 空洞を横にして回転し, 電子ビームを垂直に照射する場合は, 重力で空洞部品が離れる可能性があるため, 空洞組立治具のセットアップが複雑になる. これに対し, 空洞を縦にして回転し, 電子ビームを横に照射する場合は, 重力で空洞部品が密着するため, セットアップは比較的容易である.

し, 空洞を垂直に設置する場合, 積み重ねるだけなので重力に対して自然な設置姿勢となり, 組立作業は比較的容易である. KEK-00号機では, ジョブショップの電子ビーム溶接機の電子銃の方向が垂直であったため, 空洞を水平に設置する方法を採用した. しかし, 量産においては, 作業の単純さは, 直接的にコストやクオリティーコントロールに反映されるため, 我々はKEK-01号空洞の製作では空洞を垂直に設置する方法を選択することにした. ただし, この場合, 電子銃をEBW装置の天井から横側面の壁に移動設置し, 電子ビームの方向を水平にする必要がある. この時, 電子ビームが垂直の場合と比べて, 溶接時の金属溶融部の様相が違って来るため, 適切な溶接シームを形成するビームパラメーターの探索が必要となった.

図11に, 電子ビーム溶接における, 電子ビームの方向と溶接部品面の配置, さらに, 電子ビームの移動方法に関して様々な組み合わせを示した. KEK-00号機のセル赤道部の溶接は図11の左から1番目の組み合わせ, KEK-01号機のセル赤道部の溶接は図11の左から2番目の組み合わせに相当する. 様々な溶接条件による溶接シーム形状の傾向に関する解説に関しては参考文献6)を参照されたい.

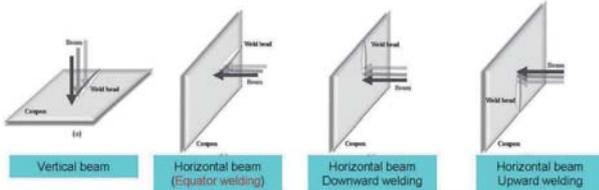
さて, 電子ビーム溶接において適切な溶接シ

ムを形成するための条件探索に関して説明をする。図 12 は、ニオブ板の試験片による溶接パラメータの探索の例を示している。図の右側に電子銃とニオブ板の位置関係と電子ビームのフォーカスパターンが示されている。右上の図は、電子ビームの焦点がニオブ板の上にある場合、右下の

図は焦点がニオブ板の下にある場合を示している。左のプロットの横軸は電子ビームの電流を表し、縦軸は電子ビームをフォーカスする電磁石の電流の大小を表している。縦軸が 0 の時が電子ビームのフォーカスがニオブ板と重なる場合に相当するように表記している。さて、電子ビームのフォーカス電磁石の電流を上げるとフォーカス点がニオブ板から離れていくため、ニオブ板には広がってエネルギー密度が低いビームが当たる。このため、ニオブ板は比較的広い領域で表面部分が溶けるだけで裏面まで溶けないという現象が起きる。逆にフォーカス点がニオブ板に近すぎると絞られたビームによって狭い領域が深く溶融するため、極端な場合は穴が空いてしまう。よってその中間の程よいフォーカス電流を選ぶと滑らかな溶接シームが得られる。図 12 のプロットでは、よい条件が緑の点で示されている。さらに、空洞の電子ビーム溶接において通常の溶接と違う特殊な点は、空洞の外面から電子ビームを照射して、溶接シームの内面がスムーズになる条件が求められることである。これは、電磁波が蓄積されるのは、

Studies on EBW parameter

Search for good EBW parameter was done by changing the welding beam-voltage, beam-current, focus-current, working-piece distance from gun, working-piece moving speed, Nb-plate thickness, and the gun and working-piece configuration.



In particular, the gun and working-piece configuration affects the results of welding seam.

For more details of studies on EBW parameters, see following presentation.
 ID: 3364 - WEPWO015 / 15th May (Wed.), poster session by T. Kubo (KEK);
 Title: Electron Beam Welding Parameters for High Gradient Superconducting Cavity

図 11 電子ビーム溶接における、電子ビームの方向と溶接部品面の配置、さらに、電子ビームの移動方法に関する様々な組み合わせがある。

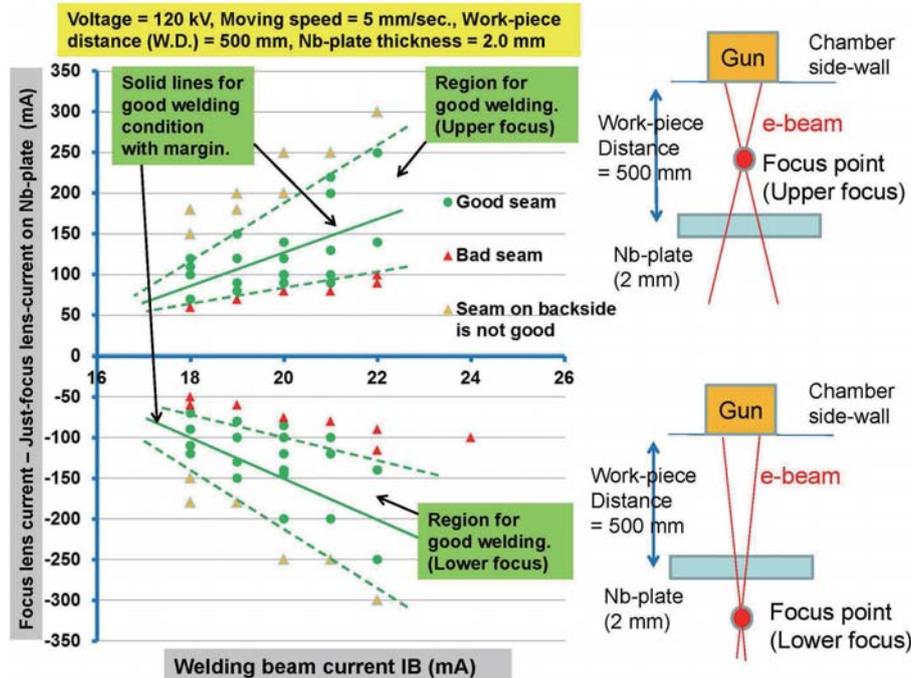


図 12 ニオブ板を用いた電子ビーム溶接の条件探索。右上の図は、電子ビームの焦点がニオブ板の上にある場合、右下の図は焦点がニオブ板の下にある場合を示している。左のプロットの横軸は電子ビームの電流を表し、縦軸は電子ビームをフォーカスする電磁石の電流の大小を表している。緑の点で示されているのが良い溶接ができる条件。

空洞の内側であり、空洞の内表面の欠陥が超伝導状態を破る原因となるからである⁷⁾。

KEK-01号機の溶接においては、すべての溶接箇所について、上記のように、ニオブ板の試験片を使用して、様々なパラメーターを変えて適切な条件を探索してから溶接を行った。その結果、KEK-01号機は、すべての溶接において失敗することなく、2014年の3月に製造を完了した(図13)。



図13 完成したKEK-01号機と製作スタッフの写真。

KEK-01号機の表面処理は、KEK-00号機と同様に、現在のKEK/STFにおける標準的な内面処理の手順を適用した。

4.2. KEK-01号機の性能測定結果

図14に、KEKの超伝導空洞テスト施設(STF)において2014年5月に行われた、KEK-01号機の性能測定の結果を示した。

左下の四角のプロットは、温度4Kでの測定データである。丸のプロットは温度1.5-1.8Kの測定データで、最大電界は36 MV/m (Quality factor: $Q_0 = 6.1 \times 10^9$)に達した。性能を制限した原因は1番目と6番目のセルでの発熱だった。白抜きのプロットはその時のX線の発生量を表しており、約1 mSv/hに達した。これは、高電界を達成した他の空洞と比較して、それほど多くない値である。この結果は、ILCの受け入れ性能試験の閾値である28 MV/mを大きく超えるものであった。よって、KEK-01号機に取り入れられた数々の先進的な空洞量産化に向けた製造方法は、原理的には全く問題が無いことが実証された⁸⁾。

Results of 1st vertical test of KEK01 cavity

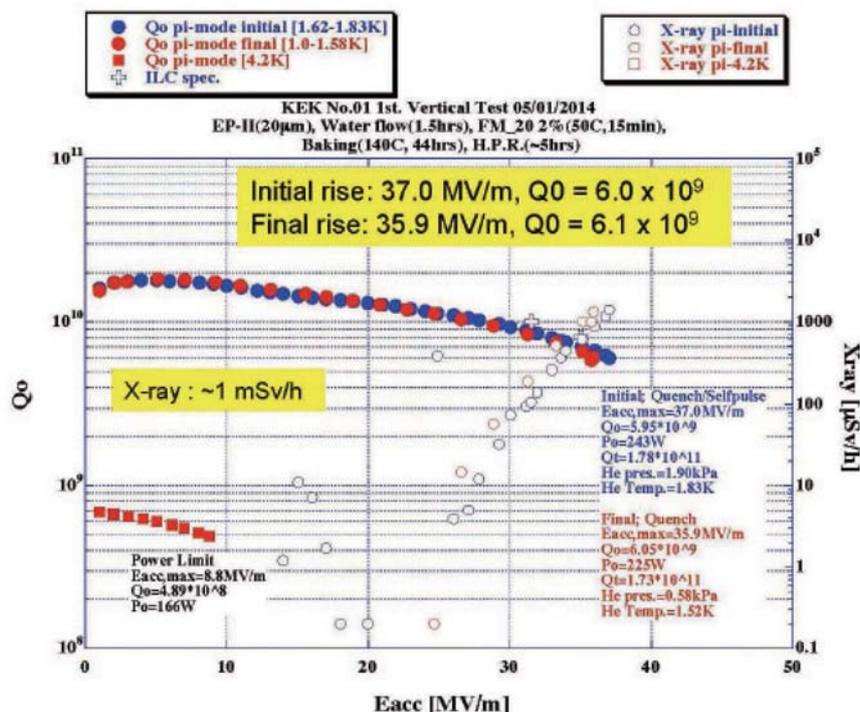


図14 KEK/STFで行われたKEK-01号機の性能測定の結果。左下の四角のプロットは、温度4Kでの測定データである。丸のプロットは温度1.5-1.8Kの測定データで、加速電界36 MV/mを達成した。

5. 空洞量産化のための治具設計

空洞の製作と並行して、ILCにおける空洞の量産を想定して、空洞部品や空洞の溶接を効率的かつ低コストで行うための部品ローダーなどの設計研究を行っている。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、長くても数分である。一方、溶接部品を電子ビーム溶接機のチェンバー内に設置して、真空引きを行う作業に約30分を要する。その後、電子ビームのアライメントと実際の溶接に約30分を要する。溶接された部品は高温になっているため、そのまま大気中に搬出すると酸化して超伝導特性が劣化する。このため、部品の温度が100°C以下に低下するまで待つ必要があり、これに約30分を要する。このため、1カ所の溶接をするたびに部品の出し入れを行っているとは非常に効率が悪く、コストが高くなってしまふ。

図15に、ダンベル部品を1回の真空引きで大量に溶接するダンベル部品ローダーの概念設計図を示した。図の左にある大量のダンベル保持治具から1つのダンベルを遠隔操作で掴み取って、真空チェンバー中央の溶接位置に移動し、順次、自動的に溶接を行っていくことを想定している。図15の右下に、既に製作して試験を行っている小型のダンベル部品ローダーの写真を示した。

また、同じ観点で、8個のダンベル部品と2個のエンドグループを治具で固定して、9つの接合部を連続的に溶接すれば大変効率が良い。チェンバー内部に複数本の空洞を入れることができると

更に効率が上がる。このコンセプトを基にした空洞リボルバー治具の設計概念図と、実際に製作した空洞リボルバー治具の試作機の写真を図16に示した。

これらの量産用治具を使うことによって、一日に複数台の空洞を製造することを目指している。

6. 空洞製造工場のシミュレーションの研究

CFEでは、実際の空洞の製作から得られたデータから、ILCの空洞製造工場を建設した場合に、どのような生産ができるかをシミュレーションする研究を企業と共同で行っている。図17はその研究で想定した工場内の機器のレイアウトを示している。この場合、EBW機を2台(図の左上)使用している。また、作業者の配置、シフト構成、ガントチャートなどをシミュレーションで検討した結果、この規模で、2,650台の空洞を5年間で製造できるという結果が得られた。

7. 高圧ガス保安法について

図18に、ILCの超伝導空洞をどのように液体ヘリウムで冷却するかを示した。空洞中央のセル部と外側のジャケットと呼ばれるチタン管との間に液体ヘリウムが供給・充填され、これにより空洞は温度2Kに冷却される。

さて、日本における高圧ガス保安法では、この液体ヘリウムは高圧ガスであるため、それを充填する空洞とジャケットの間の空間は高圧ガス容器となる。従って、もしILCを日本に建設する場合、

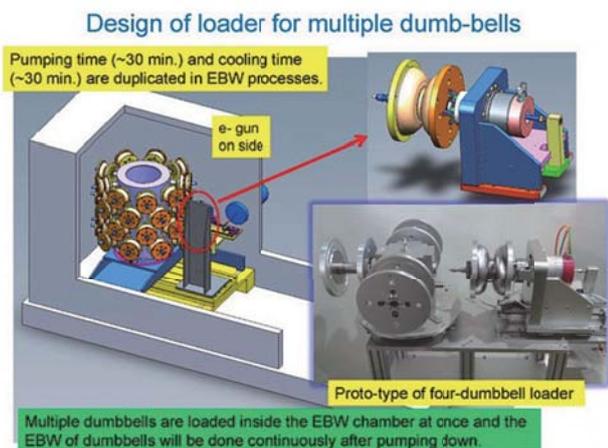


図15 電子ビーム溶接における量産化を想定したダンベル部品ローダーの概念設計図と小型試作機の写真。

Design of 9-cell cavity fixture for EBW machine

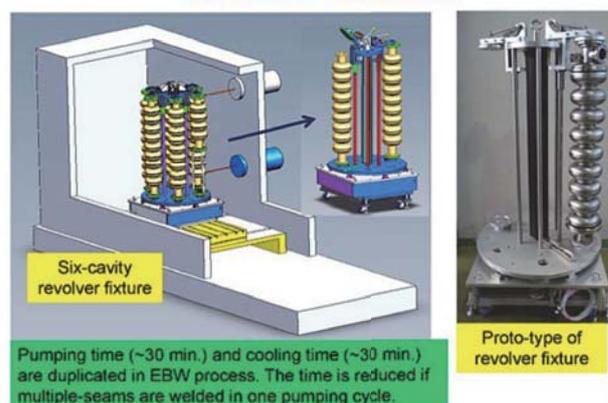
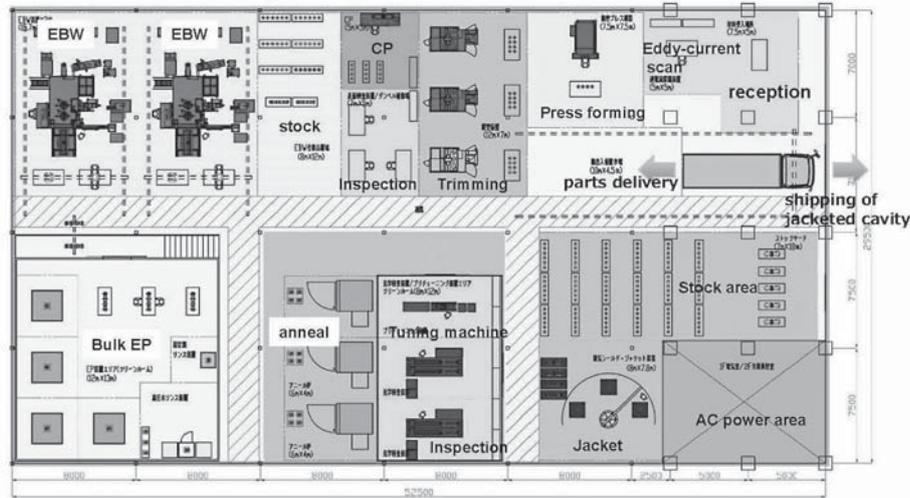


図16 電子ビーム溶接における量産化を想定した空洞リボルバー治具の概念設計図と試作機の写真。

Estimation of cavity production plant KEK-MHI

Simulation study assuming CFF housing area (53m x 30m)



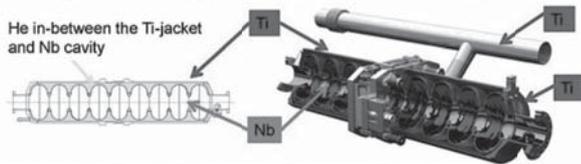
Assuming Nb plates for cell, fabricated end-group parts are input, 200 working days/year, 2 shifts/day with 30 people times 2 shifts

Max. production rate will be ~530 cavities/year, ~2650 cavities for 5 years.

Assuming that final treatment and vertical test will be done in other place.

図 17 シミュレーション研究における空洞量産工場の機器レイアウト。左上に電子ビーム溶接 (EBW) 機が 2 台設置されている。

Japanese High-Pressure Gas safety act



One must fabricate cavities complying with Japanese High-Pressure Gas (J-HPG) safety act if we use the cavities in accelerators.

For cavities by vendors, Manufacturer: KEK Applicant: vendors

For cavity KEK-03 in CFF, Manufacturer: KEK Applicant: KEK/CFF

In case of ILC in Japan, a significant fraction of cavities might be imported from foreign vendors. KEK/CFF can guide them for the procedures of J-HPG safety act.

図 18 ニオブで製作された超伝導空洞は、ジャケットと呼ばれるチタン管で囲まれ、空洞とジャケットの間に液体ヘリウムが充填される。液体ヘリウムは高圧ガスであるため、それを充填する空洞とジャケットの間の空間は高圧ガス容器となる。このため、日本における高圧ガス保安法に順守した空洞の製造が必要である。

う施設において事故を起こさないための仕組みであるから、当然、通らねばならない道ではあるが、この申請に関する事務処理と圧力試験の実施は大変な労力を伴い、もちろん、ILC のコストにも影響を与える。国内の研究者や企業にとっても厄介なことであるが、国外の研究者と企業にとってはさらに日本語と日本の法律順守が大きな壁になり得る。このため、CFF において空洞を高圧ガス保安法に順守して製造し、これを高圧ガス保安法の下で KEK/STF においてクライオモジュールに組み込んで運転することで、研究者がこの処理手順をすべて理解し経験することを目指している。これは、新規に空洞製造に参入する企業や、外国の企業が ILC に空洞を設置する際に、KEK/CFF が高圧保安法に順守した空洞の製造をガイドするための準備となる。

8. ま と め

International Linear Collider (ILC) における約 16,000 台の超伝導 9 セル空洞の量産化技術を実現するため、KEK において空洞製造施設 (Cavity Fabrication Facility / CFF) を建設し、すべての機器の設置を 2011 年 7 月に完了した。この施設では、材料搬入後に行う空洞製作に必要な装置が

1カ所に集約して設置されている。ジョブショップと CFF において溶接作業を行って製作した超伝導 9 セル空洞（高調波減衰器無）KEK-00 号機を KEK/STF にて性能試験した結果、最大加速電界 29 MV/m を達成した。これに引き続き、量産化に適した製造方法を取り入れ、かつ、すべての製作工程を CFF 内で行った超伝導 9 セル空洞（高調波減衰器有）KEK-01 号機の製作を 2014 年 3 月に完了した。この KEK-01 号機を KEK/STF にて性能試験をした結果、最大加速電界 36 MV/m を達成した。また、空洞製造の量産化を想定した製造治具の研究開発や実際の ILC 空洞工場のシミュレーション研究なども並行して進めている。今後、高圧ガス保安法に順守した製造方法で空洞の製作を行い、その空洞を横型のクライオスタット（クライオモジュール）に組み込んで、KEK/STF において運転を行うことも計画している。

LHC におけるヒッグス粒子の発見に続いて、ILC の Technical Design Report (TDR)¹⁾ が完成し、ILC 実現に対する期待が日々高まっているのを感じる今日この頃である。このような状況で、ILC の実現において最も難関といわれている超伝導空洞の量産化について、一刻も早く確固とした目途をつけ、その実現にまた一歩近づくことができると考えている。

9. 謝 辞

CFF における空洞製造に関わったすべての方々と STF における空洞の内面処理と性能試験に関わったすべての方々に感謝申し上げます。また、KEK 機構長 鈴木厚人先生、研究担当理事 岡田安弘先生、LC 推進室長 山本明先生からは常に大局的見地からのご指導をいただいております。そして KEK 加速器施設長 生田勝宣先生、KEK 加速器施設第 6 研究系主幹 山口誠哉先生、KEK 機械工学センター長 山中将先生には、本設備の人員・予算・設備支援などの面で、多大なご支援をいただいております。ここに深くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) ILC Technical Design Report (TDR), <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>; ILC Reference Design Report (RDR), <http://www.linearcollider.org/about/Publications/Reference-Design-Report>.
- 2) T. Saeki et al., “Study of the fabrication of superconducting 9-cell cavity for ILC at CFF/KEK”, paper ID THPS089, 第 9 回日本加速器学会, 大阪大学, Aug. 2012.
- 3) Master thesis by F. Yasuda, the University of Tokyo, Japan, Jan. 2013.
- 4) K. Nohara et al., “Basic Experimental Studies on Advanced Press Forming of End Group Components with pure Nb for Superconducting Accelerator Cavity. —Application to HOM cup Trial Production—”, in the proceedings of the 14th KEK Mechanical Engineering Workshop, KEK, Japan, June 2013; K. Nohara et al., “From the view point of material properties / metal formabilities of pure niobium”, Workshop on SRF material Research - 1, KEK, Japan, November 2013; N. Kawabata et al., “Research and Development Work on New Fabrication Process of End Group Component with Pure Nb for Superconducting Accelerator Cavity. —Aiming at It’s Application to HOM Antenna on Experimental Phase for Mass Production—”, in the proceedings of the 15th KEK Mechanical Engineering Workshop, KEK, Japan, June 2014.
- 5) Shinohara Press Service Co. Ltd. and Inter-University Research Institute Corporation High Energy Accelerator Research Organization: PCT/JP2013/052516, WO2013/115401, “Method of manufacturing end-group components with pure niobium material for superconducting accelerator cavity”.
- 6) T. Kubo et al., “Electron beam welding for high gradient superconducting cavity”, WEPWO015, in the proceedings of IPAC13 at Shanghai, China, May 2013; T. Kubo et al., “Study on electron beam welding conditions for superconducting accelerating cavities”, TUIOC06, in the proceedings of SRF2013 at Paris, France, September 2013; T. Kubo et al., “In-house production of a large-grain single-cell cavity at Cavity Fabrication Facility and results of performance tests”, in the proceedings of IPAC14 at Dresden, Germany, June 2014.
- 7) K. Watanabe, H. Hayano and Y. Iwashita, “Cavity Inspection and Repair Technique”, WEIOB02, in the proceedings of SRF2011 at Chicago, U.S.A, June 2011; Y. Iwashita, Y. Fuwa, H. Tongu, H. Hayano, “Update on Study of Welding Porosity in Nb EBW”, TUP061, in the proceedings of SRF2013 at Paris, France, September 2013; T. Kubo, “Review on physics of the superconducting accelerating cavity and studies on electron-beam welding”, in the proceedings of the 15th KEK Mechanical Engineering Workshop, KEK, Japan, June 2014.
- 8) T. Saeki et al., “Studies of Fabrication Procedure of 9-cell SRF Cavity for ILC Mass-Production at KEK”, WEPRI025, in the proceedings of IPAC14 at Dresden, Germany, June 2014.