

## CONSTRUCTION OF CAVITY FABRICATION FACILITY IN KEK (II)

Kenji Ueno <sup>#,A)</sup>, Yasuo Ajima <sup>A)</sup>, Hitoshi Inoue <sup>A)</sup>, Yuichi Watanabe <sup>A)</sup>,  
Kazuhiro Enami <sup>A)</sup>, Takayuki Saeki <sup>A)</sup>, Seiya Yamaguchi <sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

In developing superconducting cavities for accelerator which are major components of the International Linear Collider (ILC), electron beam welding (EBW) is absolutely necessary because Nb material is used for cavities. The technology of EBW influences the cavity performance that is cavity accelerator gradient. Because of EBW in the equator part of cavities and large amount of process is needed for cavity manufacturing process. In KEK we constructed the cavity fabrication facility which is a pilot plant for the superconducting cavity processing technology. As of March in 2010, clean room was completed and the major equipment, the EBW and CP treatment equipment, have been installed in the clean room in April, 2011.

## 空洞製造技術開発施設 (CFF) の建設 (II)

### 1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) 用の空洞製造技術開発は、電界性能上、製造コスト上から非常に注目されている。空洞の電界性能については、近年著しく改善が進んでいるものの、その性能を左右する要因が数多くあること、空洞完成までに多くの工程を経ているため、十分満足できる値ではなく、まだ改善しなければならない。この工程中、電子ビーム溶接 (以後 EBW という) についても、特有のビード幅の一定化、溶接部及びその付近にピットがないこと、安定したバンプであること等、まだ技術的に検討、すなわち R&D 要素を解決しなければならないことがあり、製造コストについても、現状の空洞製造における EBW 工程の費用が、相当の割合を占めていることから早急に検討することは急務である。

このような背景を踏まえて、高エネルギー加速器研究機構 (以後 KEK という) においては、空洞製造上の技術的改善を目的とした空洞製造技術開発施設の建設を進めており、平成 21 年度から取り組んでいる。この施設の目的は、空洞の製造技術の確立、製造コスト低減の他、日本国内に EBW 技術、空洞に関する製造技術を広めることである。例えば、空洞製造に関する共同開発を行なえる場を具体的に準備することであり、さらには、共通の場で R&D 活動を共有し、将来空洞製造の工業化のきっかけを目指すものである。

本報告において平成 22 年度の空洞製造技術開発施設の活動状況及び新たに設備した核となる電子ビーム溶接機の状況について報告する。

### 2. 建設の背景

#### 2.1 ILC 計画の実現にむけて

ILC 空洞製造技術は、35MV/m の縦測定基準電界値に対して、現在世界で開発に取り組んでいる研究機関においては、50% レベルであり、これを 2012 年末までに 90% のレベルへ向上しなければならない。空洞の製造については、空洞製造後の後工程である空洞内面電解研磨工程があり、さらには空洞組み立て工程等の多くの工程がある中でこの歩留まり値を高めるためには、空洞製造技術の最適な手法を求めることが重要である。超伝導空洞は素材に Nb 材を用いるが、溶接による接合方式の場合 EBW 方式が採用されている。空洞自体は、機械的な溶接強度のみならず、高度な真空度が維持されること、溶接部にボイドが無いこと、異物を含まないこと、溶接付近の結晶構造との整合が取れていることなど、要求仕様を満足しなければならない。

さらに、技術的な観点以外に、ILC 計画そのものが巨大であることから、空洞製造分野における人材育成を積極的に行うことも急務である。

これらの条件を満足するには、KEK 内に空洞製造技術開発施設を建設し、開発活動することが必須と判断し取り組んだ<sup>[1]</sup>。

#### 2.2 対象空洞

EBW の対象空洞は、図 1 に示す空洞である。この空洞は、大きく分けて中央 9 セルの本体部と両端におけるエンドグループ部に分けられる。中央部の空洞の 8 セル分は同一仕様の EBW 作業となる。具体的な EBW 部は赤道部、アイリス部、及び空洞の剛性を高めるスティフネスリングの固定部である。本体部の EBW 箇所は、合計で 24 箇所存在する。両端のエンドグループの EBW 部は、12 箇所、左右

# kenji.ueno@kek.jp

2 個のエンドグループのため、計 24 箇所 of EBW 箇所が存在する。全てを併せて 48 箇所である<sup>[2]</sup>。

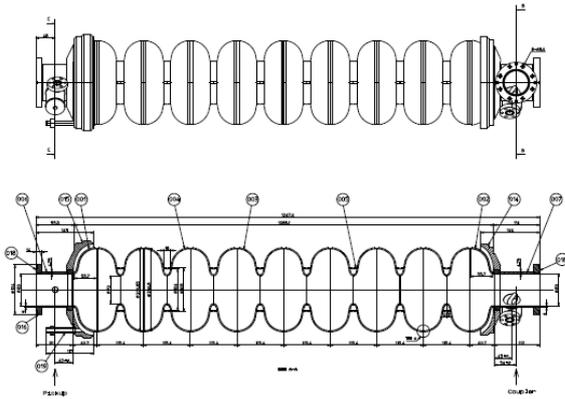


図 1 : ILC 用超伝導空洞

全長 1247.6 mm、大径  $\phi 206.85$  mm

### 3. 超伝導空洞製造施設

超伝導空洞製造施設は、開発共用棟の中に建設した。具体的には、19 m×14 m×高さ 5 m（一部 3.5 m）のクリーンルームを設備し、その中に表 1 に示す関連設備を設置した。そのレイアウト図を図 2 に示す。図 2 中の右側、EBW と表示されたエリアの EBW マシンを核にして、このクリーンルーム内で空洞の製造が可能のように計画し実現できた。

空洞製造技術は、EBW 技術が中心技術であるが、その前後にいくつかの工程（技術）を必要としており、一箇所で空洞製造するというコンセプト実現のために、必要な工程（マシン、装置）を計画した。具体的には、表 1 に示す装置・機器類を設備し、あるいは再構築した。本施設はモデルルームとしても意義があると考えられる。図 2 の中、EBW 直前の CP 処理装置が隣接する部屋に設備できている。これまで、CP 処理装置は、環境上 EBW マシンから遠距離に設置されていることが多く、CP 処理後に EBW する時間まで最短でも数時間を経過していることがあった。本施設では、この点を改善する目的から、専用設備として EBW 隣室に CP 処理装置を準備した。

### 4. EBW マシン

半年間の調査、研究会等の議論の結果、KEK が求める EBW マシンの主仕様は、表 2 に示す仕様である。

EBW マシンの主仕様中最も重要と判断した項目は、ビーム品質である。これに大きく影響する項目として、出力電力と加速電圧がある。空洞部の Nb 板の EBW あるいはエンドグループの Nb 部品の EBW の電力は、6 kW 程度でも十分対応できると判断しているが、対象 EBW マシンの将来一定の制限の中でどのような部品の EBW を求められても可能なように 15kW とした。また、加速電圧に関しては、高電圧 150kV と低電圧 60kV との比較を行い、それぞれに

表 1 : 超伝導空洞製造技術開発施設の設備

EBWマシン
プレス機:サーボ式プレス150トン
縦旋盤
CP装置:ドラフト+純水製造装置+スクラバ(内部)+排気設備
表面検査装置
ハーフセル形状測定器
空洞内面検査装置
N2発生装置(素材冷却取り出し時に使用)
ワイヤカットマシン
ヘリウムリークディテクター
レーザ顕微鏡(既存)
クレーン 2.8t
コンプレッサ
冷却水
EBW用ジグ
空洞バナナ形状矯正装置(既存)
バーリング機(カプラー穴、モニター穴をバーリング STF棟)
ネットワークアナライザと関連高周波機器(セルやダンベル周波数測定)
クリーンルーム化、空調機

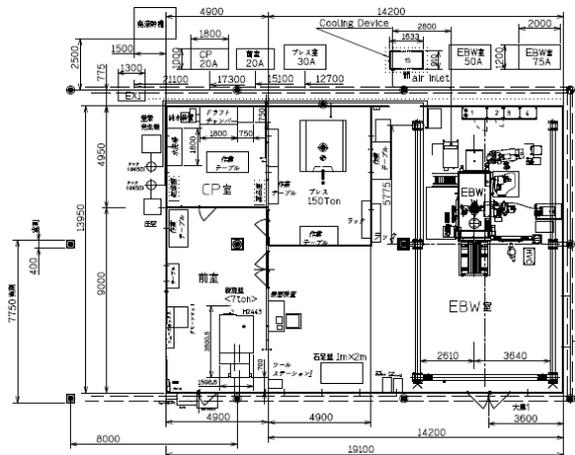


図 2 : クリーンルームのレイアウト図

正面 19 m、奥行き 14 m、高さ 5 m（一部 3.5 m）

メリットデメリットがあることを確認し、最終的に、ビームの質とビームの絞れる大きさ、電子銃（または天井）から焦点までの距離（ワークディスタンスという）が大きくとれること、フィラメント交換時のビーム位置再現性、及び非点収差補正機能の性能等を重視し、低電圧での試験も考慮し 60kV を含む高電圧型とした。近年の EBW マシンのソフト機能は、PC の発達にも支えられ、相当進化している。いわ

ゆる CNC EBW マシンと言えよう (CNC: コンピュータ制御された NC マシン)。図 3 に設備した高電圧型 EBW マシンの概観を、図 4 に真空チャンバの真空度測定結果を示す。約 1 1 分で、必要真空度に到達していることが分かる。

表 2 : EBW マシンの主仕様

1. 定格出力電力	15 k W
2. 加速電圧	60~150kV 間で連続可変
3. 電子ビーム電流	0~100mA 間で連続可変
4. ビーム最小半径	0.25mm (ワークディスタンス 200mm)
5. ビームの位置再現性	±0.05mm
6. 非点収差補正機能 (Stigmator)	付属



図 3 : EBW マシンの概観

Steigerwald 社製高電圧 1 5 0 k V タイプ

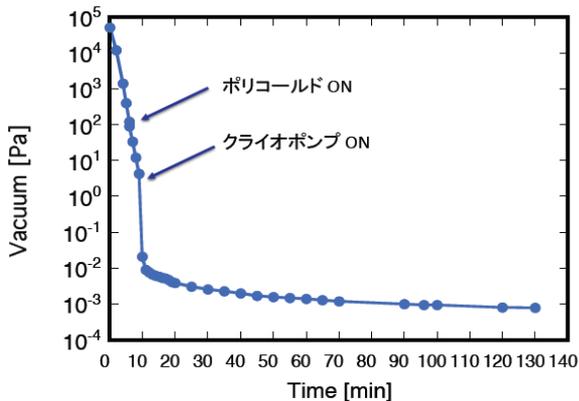


図 4 : EBW 用真空チャンバの真空度測定結果

## 5. 施設の活動状況と運用案

### 5.1 施設の活動状況

空洞製造に関する情報を、できるだけ直接経験して評価するという考えに基づいて、施設の活動として取り組んでいる。図 1 に示した空洞を平成 2 2 年度に 1 台試作する目的で、プレス加工、トリミング、CP 処理を KEK 内で実施し、EBW 作業は東成エレクトロビーム社で実施した。

#### プレス金型

プレス金型についても、KEK 内で設計製作し、その形状評価試験も実施している。ハーフセルの形状精度を三次元測定器で計測し、図 5 にセンターセルの形状測定結果をまとめて示す。図中 Cu と表示がある結果は、銅板を示す。図 5 の横軸は、図 5-1 に示すハーフセルの中心軸方向を示す。図 5 の左側が、アイリス部に相当し右側は赤道部に相当する。縦軸は、ハーフセルの設計値からの誤差を示す。この中心軸の座標に対して各点の値を求め、設計値と比較する方法をとった。図 5 のデータは、金型形状を修正しながら目標値に近づけたデータである。Nb-4 のデータから、最終的に設計値に対して ±0.25~0.3 mm の公差内に入ることを確認している。

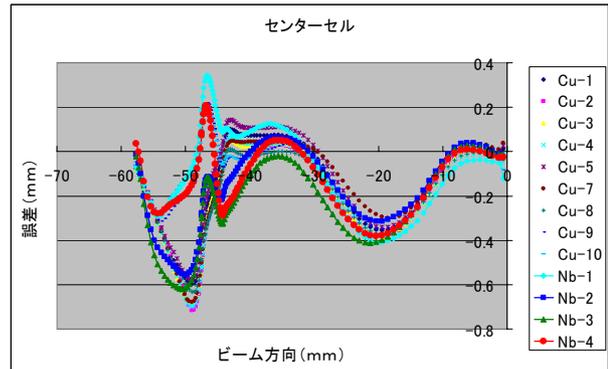


図 5 : ハーフセルの形状精度データ



図 5-1 : 図 5 の計測位置方法

合格できるハーフセルがプレスできる見通しを得たので、空洞用 Nb 材のプレス加工に入った。なお、後述のトリミング後に、加工したハーフセルの設計値からのずれを 1 9 個のそれらについて検証した。プレス後のハーフセルの形状精度は、±0.04~0.05 mm の範囲内のばらつきで形状精度が得られていることが判明した。我々の金型と押さえ板の方法によれば、トリミング代は 3~4 mm であり、Nb 板材の無駄がかなり小さいことが実証できた。また、ハーフセルの板厚分布状態については、赤道部で

3.15 mm (約9%厚く) なり、アイリス部で 2.57 mm (約8%減少している) であることが、確認できた。

### EBW 加工

新設 EBW マシンと同一メーカーの高電圧タイプ (70 kV から 150 kV) のマシンを有す東成エレクトロビーム社にて、KEK 内で成形したハーフセルの EBW を実施した。基礎 EBW 試験を経て、対象空洞の EBW 工程の本格実験を行った<sup>[3]</sup>。図6に2個のハーフセルをアイリス部で EBW したダンベル形状の中間完成した状態を示す。このようなダンベルを8個製作し、8セルの空洞本体部 (センターセル部) を試作した。これらのダンベル形状は、EBW の熱ひずみのために変形が生じている。このためダンベル状態で設計値に合致するように塑性変形をさせ、形状を整形している。その後、ダンベルを赤道部で EBW した。図7に完成したセンターセル部を示す。



図6：完成したダンベル形状



図7：完成した空洞センターセル部

### 温度計算

EBW 部の加工中の温度に関しては、ANSYS を使用して計算している。実験条件に合わせた計算結果を図8に示す。ビーム中心の温度は、2600℃付近にまで上昇することが判明している。詳細は別途行う予定である。この計算結果をさらに詰め、EBW 条件の選定に利用することを検討している。

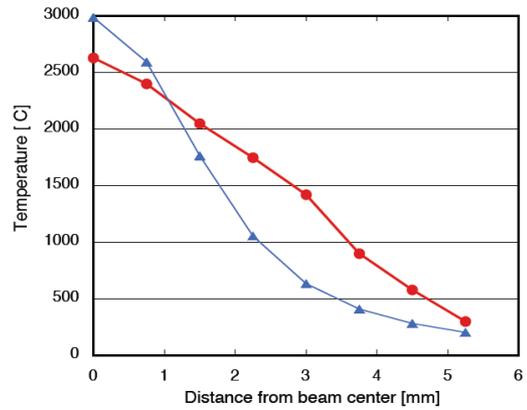


図8：温度計算結果

○ 印 ANSYSによる数値計算結果  
 △ 印 参考文献の式による解析結果<sup>[4]</sup>  
 計算条件：ビーム出力1.06 kW、ビーム直径3 mm、溶接速度10 mm/秒、溶接時の環境温度20℃

### 5.2 施設運用案

EBW マシンを核にして、このクリーンルーム内で空洞製造が可能な、すなわち一箇所で空洞製造するというコンセプト実現のために、必要な工程 (マシン、装置) を計画、設備した。この考え方に沿って、まず後戻りのない製造工程を確立し、KEK 内で実証したいと考えている。この施設にて行う加工条件は、すべてデータベースとして記録し、その後の工程の検証に有効活用する。この活動の中から最適な手順が固まれば、我々の工程をたたき台として、空洞製造の工程の検証のために、多方面からの KEK 外の一般企業から、関連する研究機関からの積極的な本施設の利用を期待している。空洞製造にかかるまだ多くの小物部品もあること、シームレス空洞のようなまったく考え方の異なる製造方法もあるが、決して無視できないのは、Nb 材のため EBW 工程が必ず必要であるということである。空洞製造は、数本/日のレベルで必要であり、本施設が先端対応施設として利用されることは、大いにこの施設の価値が上がることを考えている。

### 6. まとめ

ILC 用の超伝導空洞の高電界性能向上の目的から、KEK 内に空洞製造技術開発施設を建設する計画に基づいて、我々は平成21年度にその基本計画を定め活動し、平成22年度に施設を完成することができた。この施設の目的は、空洞の製造技術の R&D と空洞製造技術の確立及び工業化準備である。基本的には、人材育成と開発できた技術の伝承 (継続) であり、空洞製造技術の確立に向け積極的に取り組んでいく。

## 参考文献

- [1] 上野健治 他「空洞製造技術開発施設（CFF）の建設」平成22年8月4日 第7回日本加速器学会年会 於 姫路市
- [2] 早野仁司 「空洞部品の種類と点数」平成21年9月10日 第3回AAA会議 於 KEK
- [3] 佐伯学行 他「KEK超伝導空洞製造施設における9セル空洞製作」平成23年8月1日 第8回日本加速器学会年会 於 つくば市
- [4] 超精密生産技術大系 第1巻 基本技術 フジ・テクノシステム 入江宏定 773ページ