

ILC 計画実現に向けた KEK における超伝導加速空洞の製造研究 SRF CAVITY FABRICATION STUDY FOR ILC AT KEK

山中 将[#], 井上 均, 渡邊勇一, 清水洋孝, 道前 武,
佐伯学行, 梅森健成, 加古永治, 早野仁司, 道園真一郎, 山口誠哉
Masashi Yamanaka [#], Hitoshi Inoue, Yuichi Watanabe, Hiroataka Shimizu, Takeshi Dohmae,
Takayuki Saeki, Kensei Umemori, Eiji Kako, Hitoshi Hayano, Shin-ichiro Michizono, Seiya Yamaguchi
KEK

Abstract

KEK has been performed prototyping of superconducting radio frequency (SRF) cavities at Mechanical Engineering Center (MEC). To accelerate the SRF cavity fabrication study for the International Linear Collider (ILC) project, the Cavity Fabrication Facility (CFF) has constructed in 2011. It is a class 10000 clean room equipped with the following machines; an electron-beam welding (EBW) machine, a servo press forming machine and a CNC vertical lathe. A chemical etching apparatus is also equipped. Now, with the machine tools in the MEC, all processes of producing niobium SRF cavities can be conducted on the KEK site. The study is focusing on the development efficient manufacturing technique for cavity mass-production and the cost reduction as well as keeping high performance of cavity. Recent activity of CFF and collaborating study with industries are introduced in this report.

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) は、全長 31 km の直線トンネルの両端から Figure 1 に示すように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[1]。ILC において、電子(または陽電子)ビームを加速する主線形加速器は、超伝導加速器によって構成されている。その最小構成要素は Figure 2 に示す、長さ 1.3 m の 1.3 GHz 9 セル超伝導加速空洞である。ILC では、約 16000 台の空洞を横型のクライオスタット(極低温冷却装置)内に設置し、液体ヘリウムを用いて 2K に冷却した状態で運転する。8 台の空洞を Figure 3 に示す長さ 12 m のクライオモジュール内に設置し、これをトンネル内に並べる。冷凍機や高周波源などの周辺機器も一緒に設置される。

リニアコライダーは 1960 年代に発案され、精力的な研究は 1980 年代半ば頃から世界各国で始まった。計画段階から国際協力の下に進められている。様々な加速器の方式が提案され、研究や技術開発が行われ、2013 年に技術設計報告書(Technical Design Report: TDR)がまとめられた[2]。これには ILC の詳細な仕様および各モジュールの製造方法などが記述されている。建設から運転開始まで約 10 年を必要とする、大型のプロジェクトである。建設費が膨大であるため、国際協力により世界の 1 か所に建設することを計画している。本報では、ILC 計画実現に向けた KEK における最近の超伝導加速空洞の製造研究の取組みと関連する産学連携の実例を紹介する。

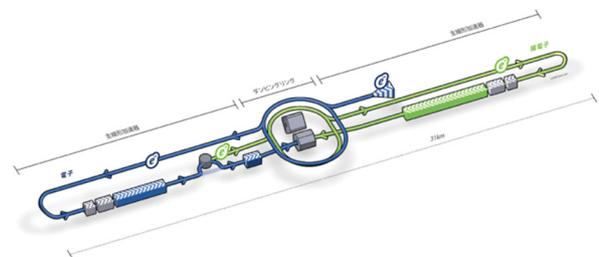


Figure 1: Overview of ILC.



Figure 2: 1.3 GHz SRF cavity (length 1.3 m).



Figure 3: Cryomodule (length 12 m).

[#] masashi.yamanaka@kek.jp

2. 超伝導加速空洞の製造

2.1 製造方法の概要

超伝導加速空洞を構成する機械部品を Figure 4 に示す。空洞の主たる材料はニオブである。ニオブは 9.2 K で超伝導状態となる金属である。ニオブの主たる用途は鉄鋼添加剤である。フェロニオブの形で高張力鋼、ステンレス鋼などの高級鋼材に添加され、自動車外板パネル、自動車排気系部品、建築土木構造材、ラインパイプ、压力容器用鋼板等に用いられる。これら鉄鋼添加剤向けフェロニオブが、世界のニオブ需要の 90% 程度を占めると推計される。加速空洞には純ニオブが用いられ、電子ビーム溶解炉を用いて真空中で溶解を繰返し、不純物をガス化して除去し純度を高めている。超伝導特性を示す指標である残留抵抗比 (Residual Resistance Ratio: RRR) が 300 以上の材料が用いられる。空洞 1 台あたり、約 25 kg のニオブを使う。

空洞の中央部はセルと呼ばれ、厚さ 3 mm 程度のニオブ板材をプレス加工して製作する。端部は旋削し、所定のはめ合い形状に仕上げる。他の部品は主に切削加工によって製造する。ニオブ以外の材料として、チタン、ニオブチタンが用いられる。ニオブは用途が限られ身近

な材料ではないが、加工はそれほど困難でない。Figure 4 に示したそれぞれの部品を見れば、一般的な機械加工で対応可能なことを、理解いただけると思う。これらの部品を電子ビーム溶接 (EBW) で組立てる。ニオブの融点は 2470 °C と高く、さらに 200 °C 以上で活性であり、強烈に酸化する。そのため高いエネルギー密度を有し、真空チャンバー内で溶接を行う EBW がニオブの溶接に適している。

2.2 KEK の取組み

超伝導加速空洞の試作は、従来より機械工学センターにて行っていたが、ILC 計画に向けて製造技術研究を加速するために、空洞製造技術開発施設 (Cavity Fabrication Facility: CFF) を整備し、2011 年 7 月に竣工した。ここには Figure 5 に示す大型の EBW 機、プレス機、化学処理室などが整備されている。特に EBW 機は高電圧型とよばれる、最大ビーム電圧 150 kV のものである。これらは 19 m × 14 m のクラス 100000 のクリーンルームにコンパクトに配置されている。従来から有る機械工学センターの工作機械と合わせれば、ニオブ製超伝導加速空洞を KEK 所内で全て製造することができる。

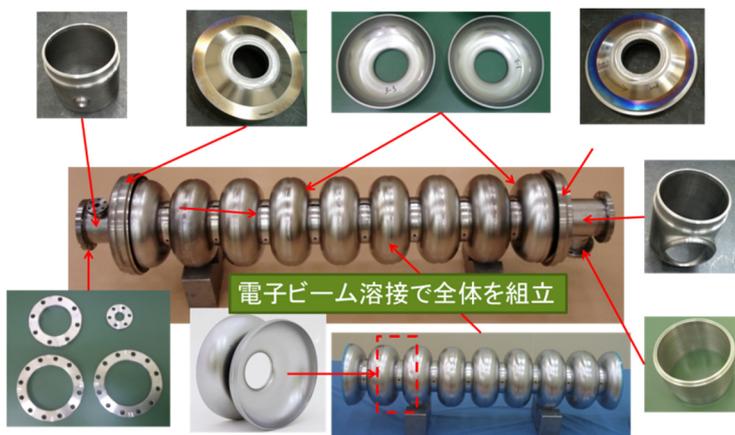


Figure 4: Mechanical parts for cavity.

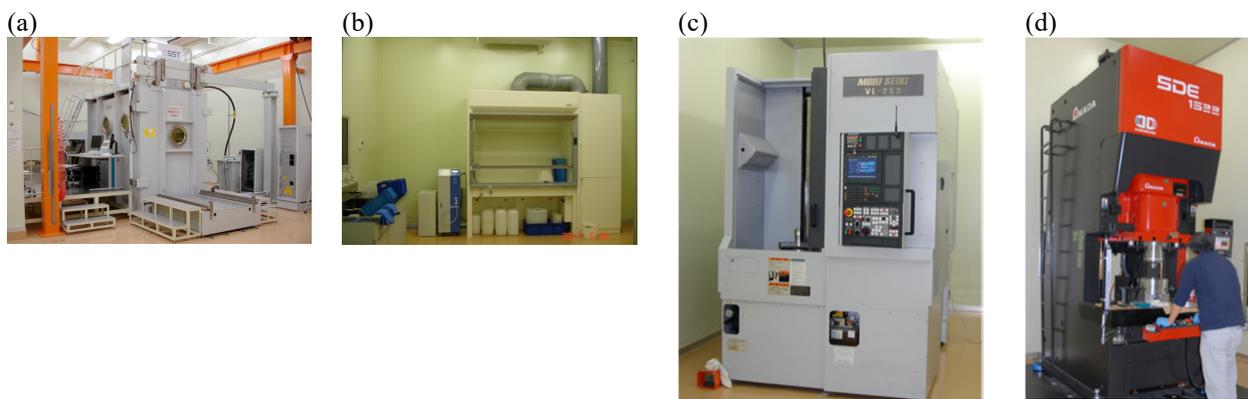
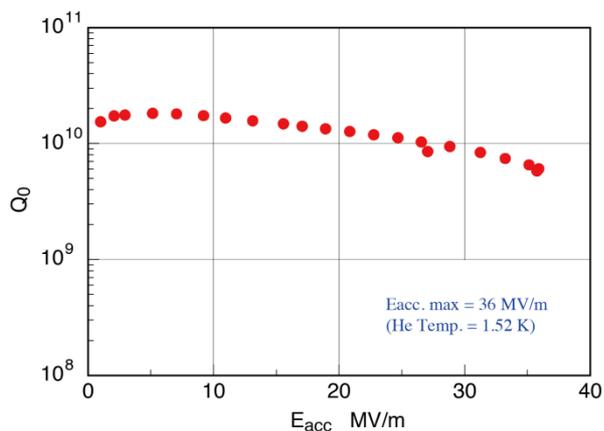


Figure 5: Equipment in CFF; EBW machine (a), chemical etching booth (b), CNC vertical lathe (c), servo press forming machine (d).

これらの設備を利用して製造した 9 セル空洞(KEK-1号機)を Figure 6 に示す。完成した空洞は内面を電解研磨した後に、電界性能試験を行う。液体ヘリウムを満たしたデュアーに真空引きした空洞を浸漬し、超伝導状態にする。さらに空洞内部に 1.3 GHz のマイクロ波を入力し、どの程度高い電場が立つかを調べる。ILC の仕様は運転時の平均加速勾配を 31.5 MV/m と定めている。空洞単体の仕様は、最大加速勾配 35 MV/m である。測定結果を Figure 6 に合わせて示す。最大加速勾配は 36 MV/m に達し、ILC 仕様を満たしている。CFF で ILC 仕様の空洞が製造できることが確認できた。これまでの CFF の取組みの詳細は参考文献[3]を参照されたい。



(a) Manufactured 9-cell cavity and fabrication staffs.



(b) Result of vertical test (Q-E curve).

Figure 6: Production of 9-cell cavity and result of evaluation.

完成した空洞はチタン製のジャケットに挿入して運転に供する。空洞の外側とジャケット内部の空間に液体ヘリウムを満たす。この部分は圧力容器と見なされるので、高圧ガス保安法に対応するには、溶接資格者による施工が必要である。KEK は溶接士を擁しており、Figure 7 に示すように、ジャケット端部と空洞の TIG 溶接も所内で実施している。尚、ジャケット単体の製造は外注している。

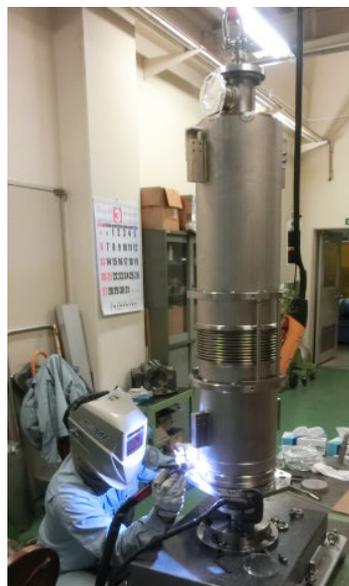


Figure 7: TIG welding for He jacket and cavity.

2.3 これまでに製造した空洞

これまでに 9 セル空洞を 3 台、3 セル空洞を 1 台、1 セル空洞を 5 台製造した。全て TESLA-like 空洞である。Table 1 にその詳細をまとめた。9 セル空洞は、製造に必要な様々な治具を開発することと、製造経験を積むことが主たる目的である。1 セルと 3 セル空洞は、研究用途であり、材料や工法等を変更して、その効果を評価することが目的である[4][5]。製造した空洞は KEK の STF で内面処理とたて測定を行う。電解研磨後に行う熱処理も機械工学センターに設置された真空炉で実施できる。両施設の連携により、新しいアイデアを形にして評価する一連の工程を迅速に KEK 所内で実施できるようになった。ILC 計画実現のために、強力な布陣と考えている。

Table 1: List of Produced SRF Cavities at CFF

Code	Number of cells	Purpose	E_{acc} (MV/m)	Remarks
0	9	First trial of 9-cell cavity fabrication	29	Without HOM coupler EBW for cells were performed at the jobshop outside KEK
1	9	Complete fabrication of 9-cell cavity at CFF Qualify ILC spec. ($E_{acc} > 35$ MV/m)	36	With HOM coupler Equator part was welded in vertical set up (Gun is horizontal)
2	9	Trial of LG niobium for 9-cell cavity [6]	23	Without HOM coupler Beam tubes are a little longer than std.
R1	1	Prototype LG niobium material	43	End cell shape
R2	1	Standard cavity using FG niobium	37	Shape is same to R1 For reference
R3	3	Trial of some new manufacturing technique Omit the correction process after EBW in dumbbell Improve EBW conditions	36	Center cell shape Cells were manufactured by the collaborating company
R4	1	Evaluation newly developed niobium material	41	Center cell shape
R5	1	Prototype low RRR and LG niobium material [7]	31	Shape is same to R1
R6	1	Fabrication training by the collaborating company	—	Shape is same to R1

3. 産学連携の取り組み

産学連携の目的は、ILC 計画実現のために、加速器産業に参入いただく企業を増やすことである。また、空洞製造のコストダウンが必須の課題であり、これを解決するための様々なアイデアを産学連携により、創出したいと考えている。

3.1 ニオブ材料の事例

前述したように、空洞には高純度のニオブが使われる。材料を供給できるメーカは世界で 5 社程度である。そのうちの 1 社は国内にある。ILC 計画では、大量のニオブ材が必要となるので、材料の安定供給のために国内にて複数の企業より材料調達できることが望ましい。KEK は板材からプレス加工、EBW で空洞を製造するのとは異なり、パイプから液圧成形でセル形状を製作する研究開発を産学連携で行っている[8]。連携企業は EB 溶解炉を有し、タンタル、ニオブ、タングステンの生産の経験があり、高純度のニオブインゴットの製造からパイプ製造までを担当している。その派生として、RRR>300 のインゴットとそれを用いたニオブ板材の生産が可能となった[9]。

このニオブ板材が空洞に用いることができるかを KEK で評価した。Figure 8 に示すように板材の渦流探傷を行い、空洞の性能低下につながる傷がないことを確認し、1セルの空洞を CFF で製造した(KEK-R4 号機)。ILC では 9 セル空洞が用いられるが、例えば材料、工法、セルの形状を変更した際の基礎的な試験は、セルが 1 個の空洞で評価することができる。これを電界性能試験したところ、最大加速勾配は 41 MV/m に達し、開発したニオブ板材が超伝導加速空洞として使用可能であることを確認した。すでに市販を開始している。空洞を試作して性能評価までを行うのは、民間企業では不可能である。空洞としての性能が確認できなければビジネス展開はで

きない。両者が得意な分野を分担し、よい協業ができたと思自負している。

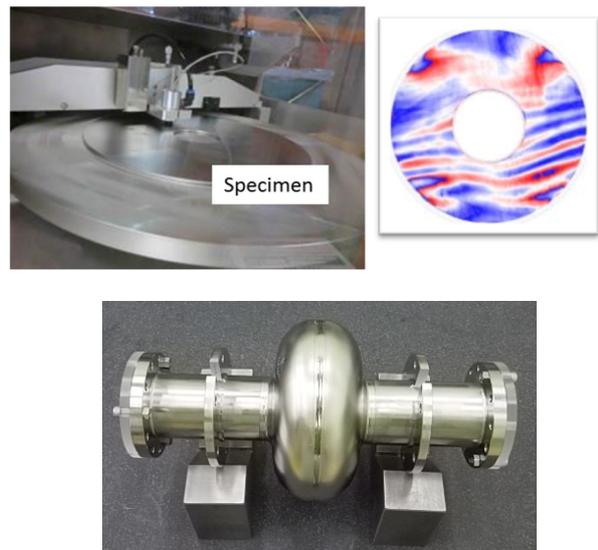


Figure 8: Eddy current testing for Nb sheet and prototype 1-cell cavity.

3.2 製造技術の事例

次に塑性加工の事例を紹介する。Figure 2 に示した空洞の左右端部はエンドグループと呼ばれ、ビームパイプに枝管、フランジおよび HOM coupler という部品が溶接されている。HOM coupler は Figure 9 に示すように直径 48 mm、高さ 64 mm、肉厚 2.5 mm のカップ状の外導体の中にアンテナが溶接されている。外導体は従来、板材から数工程に分けたプレス加工で製作していたが、図

中に右に示すように深絞り 1 パスで製造することに成功した。部品のコストダウンを図るのが目的である。将来的には連携企業から部品を購入するビジネスを想定している。深絞りは電池ケース、コネクタ、自動車部品に多様されており、 $L/D > 20$ を超える超深絞りと呼ばれる技術も開発されている。早野らの共同研究において、ニオブに深絞りを適用することをエキスパートにお願いした。ニオブの絞りはやったことがないとのことであるが、試行錯誤の後に成功した。絞り性を示すランクフォード値(R 値)を実測すると値は小さく、さらにばらつきが大きくて安定した絞りは簡単でないことがわかった。また前述のように温度もあまり上がられないので、絞るスピード等を工夫して実現した[10]。製造した部品は、Figure 6 に示した 9 セル空洞に装着した。塑性加工の研究対象としても、ニオブは興味深いこともわかった。機械特性を知るための研究は KEK 側で行っている。

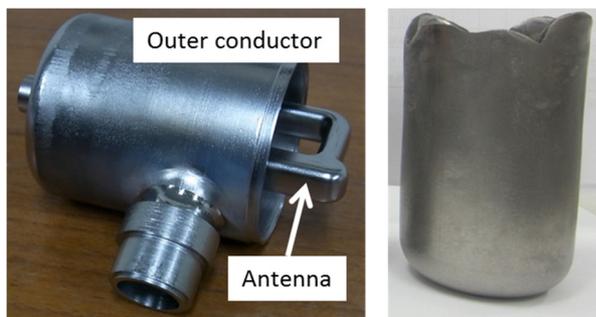


Figure 9: HOM coupler (left) and ultra-deep drawing more than 70 mm (right).

セルのプレス加工と切削加工については、当方でもクリアしているが、エキスパートにもトライしていただいた。大量生産のためのヒントを得るためと、将来的には連携企業へ加工委託するビジネスを想定している。セルの部品図を渡して金型の設計・製作をしていただき、試験用のニオブ板材を支給して打っていただいた。3 次元測定機で内面形状を測定して、2 回ほど金型を修正した後に要求公差に収まった。端部の加工は当方では旋盤でおこなっているが、量産は考えると MC で加工する方がよいと提案いただき、エンドミルで加工した。超硬のエンドミルを使って加工条件を探り、当方の期待を上回る短いサイクルタイムを実現した。このセルは KEK-R3 号機に用いた。

部品加工の次は溶接組立である。EBW のジョブショップ(溶接請負)は国内に何社もあるが、自社設備として EBW 機を保有し、すでにこれを使って商売をされている企業に空いた時間で空洞組立ができないかと考え、声をかけて回った。これは母数が少ないので難儀したが、連携先を得た。先方に無理をお願いして EBW 機のオペレータの方に 3 週間ほど KEK に滞在していただき、一緒に CFF にて溶接組立を行った。作業の進め方を体得いただき、次は自社の設備を使って溶接組立をお願いした。ニオブの EBW に必要な基本的なパラメータは当方から提供した。先方が所有する EBW 機は、当方とは異なるので微調整は必要であるが、ゼロから条件探索す

るよりは、かなり効率的である。連携企業には一歩踏み込んで、機械加工から溶接組立までの一連の工程を自社設備で行うことをトライしていただいた。将来的には、連携企業へ空洞製造一式を委託するビジネスを想定している。Figure 8 に示したのと同じ 1 セル空洞を製造した(KEK-R6 号機)。自社で行うことが困難な工程は CFF の設備を利用した。作業は基本的に企業側をお願いした。いろいろと負担をいただいているが、少しでも負担を減らすために、ものづくり補助金を活用した。既存の設備を活用して、少し違う分野(ここでは、ニオブ材や加速器)の技術開発を行い、KEK が助力するという提案が採択された。応募に際しては、2014 年 KEK に設置された研究支援戦略推進部に協力いただいた。

以上の紹介した取組は、KEK と企業が共同研究または、学術指導の契約を結んで行っている。大学等で行う形式と同じである。CFF を産学連携の拠点とすることは、設置時の目的の一つであり、この取組は多くの企業と行いたいと考えている。

4. おわりに

KEK における超伝導加速空洞の製造研究について紹介した。ニオブという特殊な材料の点を除けば、やっていることは、ごく標準的なものづくり研究である。KEK は 2016 年 1 月に KEK-ILC アクションプランを策定し[11]、現在は予備準備期間として、著者らは CFF を活用した製造技術開発を継続している。劇的なコストダウンを実現できるよう、産学連携にも注力してまい進したい。本格的な量産化技術開発は、エキスパートの皆様を力を借りながら、本準備期間に実施したいと考えている。

参考文献

- [1] <http://www2.kek.jp/ilc/ja/contents/project/index.html>
- [2] “ILC Technical Design Report”, Volume 3- Accelerator, Part II: Baseline Design, 2013; <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [3] 佐伯学行, “ILC 用超伝導加速空洞の量産化に向けた製造の研究”, 加速器, 11, 3, 2014, pp. 161-171.
- [4] 清水洋孝 他, “異なる材質と工法で製造された超伝導加速空洞の性能評価”, 第 12 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 2015, pp. 66-70.
- [5] K. Umemori *et al.*, “Comparison of cavity fabrication and performances between fine grains, large grains and seamless cavities”, in *Proc. SRF2015*, Whistler, Canada, THAA04, 2015, pp. 1006-1011.
- [6] 道前武 他, 本プロシーディングス, MOP017.
- [7] 山中将 他, 本プロシーディングス, MOP027.
- [8] 山中将 他, “シームレスニオブパイプを用いた液圧成形による超伝導加速空洞の製造”, 第 12 回加速器学会年会プロシーディングス, 2015, pp. 587-590.
- [9] 永田智啓 他, “アルバックにおける低コスト化に向けた超伝導加速空洞の開発”, 第 12 回加速器学会年会プロシーディングス, 2015, pp. 1105-1108.
- [10] K. Nohara *et al.*, “Studies on innovative production methods of HOM coupler for SRF 9-cell cavity”, in *Proc. IPAC2015*, Richmond, USA, WEPMA046, 2015, pp. 2869-2872.
- [11] https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/KEK-ILC_ActionPlan_160106-JP.pdf