

DEVELOPMENT OF CAVITY FOR ELECTRON AND POSITRON LINER COLLIDER ACCELERATOR

Kenji Ueno

High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

For the development of the x-band structure or the superconducting cavity production for accelerator which are major components of the International Linear Collider (ILC), manufacturing technology of disks or cavities is absolutely necessary. In case of manufacturing of cavity, Electron Beam Welding (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. To improve on manufacturing process and reduce production cost, KEK constructed the cavity fabrication and electro polishing facility which was a pilot plant for the superconducting cavity processing technology.

電子陽電子リニアコライダー用加速空洞の研究開発

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が積極的に参加、推進している国際リニアコライダー (ILC) の開発のものづくり項目に筆者は深くかかわってきた。2003 年から常伝導 X バンド加速管の超精密接合法に関する研究、2004 年に ITRP の決定により空洞採用技術は超伝導に一本化されたが、その直後から加速空洞に関する研究を開始した。空洞性能向上のための空洞製造設備について、特に空洞製造技術開発施設と空洞内面研磨仕上げを目的とする電解研磨 (EP) 設備の建設、これらの運用立上げに取り組んだ。また、シームレス空洞 (3 セル) 製造設備開発を行ってきた。これらのことについて報告する。

2. 常伝導加速管の超精密接合

Xバンド加速管は、無酸素銅 (純度 99.9996%) で作られた加速管ディスクを特殊形状に加工して積層する方法で製作され、ディスクの接合にはアウトガスの発生を極力避ける目的から、拡散接合方式を採用している。この場合、加速管ディスクの配列に誤差が大きく生じると加速ビームの性質を崩してしまう可能性があり、また軸方向の寸法精度が大きく狂うと、加速が設計通り実施できない恐れがある。一般に、接合後の精度は、軸方向の寸法変化率として 0.01% が目標値であるが、筆者はさらに高精度な 0.01% 以内を目標として取り組んだ¹⁾。ディスク幅が約 8 mm から 11 mm であるので、1 枚のディスク当たりの変化を 1 μ m 以内とすることである。金属接合方式の一つであるパルス通電接合方式

は、熱交換用曲線流路を内蔵した成形金型等の分野¹⁾において、その利用が既に広まりつつあったが、この接合技術は無酸素銅に適用することを目的として共同研究を実施した。対象となる加速管は外径 61 mm、長さ 60cm の X バンド加速管である。この加速管は、ディスクを 60 枚必要とし、それらを接合して製作されるものである。

基礎研究として数枚接合によるモデルディスクによって接合条件を見出した後、60 枚のモデルディスクを接合する最終目標の接合実験を 3 本(台)実施した。寸法変化に関する実験結果は、3 台の加速管いずれも、目標値に達した。結果は変化率が 0.007% (2 台)、0.01% (1 台)であった。

3. 超伝導加速空洞の製造技術開発

3. 1 空洞製造技術開発施設の建設

前述の ITRP の決定を受け、KEK においては 2005 年から 1.3 GHz 9セル超伝導空洞の実用化開発研究を開始し、STF-1 計画、S 1 グローバル計画が、国際協力の下で実施された。国際的にも大きな開発プロジェクトの一つになっている ILC 計画を、マスタープランに沿って進めるために、図 1 に示す ILC 用空洞は 18,000 本 (台) 必要とする大型計画であることから、製作期間が 5 年以内の条件であるとするならば、1 社では到底製作、評価作業ができない²⁾。また、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、その性能ばらつきを最小にするためまだ改善しなければならない点が多い。具体的には空洞製造工程中、主になる電子ビーム溶接

(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、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挙げられる。これらを解決することは、空洞コスト低減効果が期待できる。

KEK においては、空洞製造上の技術的改善 R&D を目的とした空洞製造技術開発施設の建設計画を立案し、2009 (平成 21) 年度から具体化に取り組み、2011 (平成 23) 年度に完成した²⁾、³⁾。

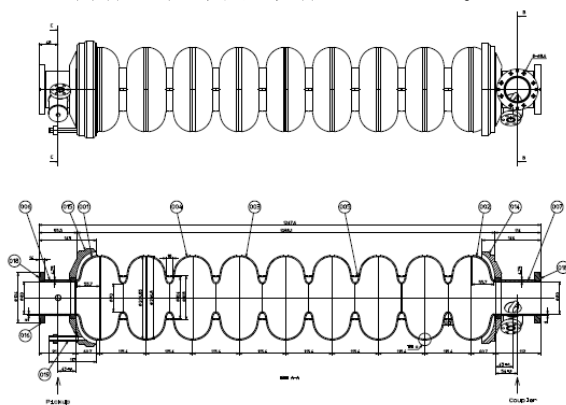


図 1 ILC 用超伝導空洞
全長 1247.6 mm、大径 $\phi 206.85$ mm



図 2 クリーンルームの外観図
正面 19 m、奥行き 14 m、高さ 5 m
(一部 3.5 m)

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 \times 14 m \times 高さ 5 m (一部 3.5 m) のクリーンルームを設備し、その中に関連設備を設置した。クリーンルームの外観図を図 2 に示す。

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、装置及び設備を導入した。このクリーンルームの中には、EBW 直前の CP 処理装置が隣接する部屋に設備されている。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ので、時間短縮の改善効果が期待される。

3. 2 EBW マシン

半年間の内外の調査、研究会等の議論の結果、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、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。図 3 に設備した高電圧 (60kV \sim 150kV) 型 EBW マシンの外観図を示す。



図 3 EBW マシンの外観
Steigerwald 社製高電圧 150 kV タイプ

4. 施設の活動状況と運用案

4. 1 施設の活動状況

空洞製造技術に関する情報を、直接経験して評価するという考え方に基づいて、施設の活動として取り組んでいる。図 1 に示した空洞を 2011 (平成 23) 年度に 1 台試作した。プレス金型についても、同施設内で設計製作し、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、金型の形状を決定した。最終的に設計値に対して $\pm 0.25\sim 0.3$ mm の公差内に入ることを確認している。

なお、本体部の EBW 作業は、KEK 納入機の納期の関係から同型機を有する東成エレクトロビーム社の協力を得て実施した。基礎的な溶接条件検討を経て図 4 に示すダンベル形状を得ることができた。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5に完成したセンターセル部を示す。新たに納入されたEBW機により両端部のエンドグループを製作し、センターセル部にEBWした（図6）。最終的に図7に完成した空洞を示す⁴⁾。



図4 完成したダンベル形状



図5 センターセル部の完成



図6 エンドグループとセンターセル部をEBWする最終工程



図7 完成した空洞

4. 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、すなわち一箇所での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。この活動の中から最適な手順が固まれば、KEK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、多方面の一般企業、及び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。空洞製造は、数本/日のレベルで必要であり、本施設が先端技術開発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。

5. 電解研磨設備の建設

超伝導空洞製造上、電解研磨工程は空洞表面処理をするため必須かつ重要工程である。特にILC用高電界の空洞製造には、表面処理技術の工程開発に多くの内外の研究者が努力している。このような背景の中、KEKのSTF棟に2006（平成18）年度から電解研磨設備（EP設備）建設を行なった。2006年度には、主要設備の建設を完了し、2007（平成19）年度には水試験（超純水による漏れ防止試験）、各種装置性能評価試験を経て、2008（平成20）年3月から試用運用を開始した^{5)、6)}。

このEP設備の対象空洞としては、KEKが扱う空洞（ILC用空洞、KEKB用空洞、他）およびそれらの部品であるが、全体建設計画は数年に亘る大型工事であるので、1期（ILC用空洞）、2期工事（KEKB用空洞、他）として建設、その後の立ち上げ作業を行った。EP設備の設置場所は、STF棟の西南側、1階部である。図8にそのレイアウト図を示す。STF棟内部設置エリアは概略6m×30mの広さであり、作業性、安全性を考慮して2階建てとした。

本設備の考え方は以下のとおりである。高電界の確保・維持及び管理のために、一貫した空洞内面仕上げを1箇所の設備で実施する。隣接する組み立て用クリーンルームとの相乗効果が期待できる。将来の工業化を狙った場合、モデルルームとして構築、運用することは、意義がある。KEKを本処理の拠点の一つとし、さらには高電界空洞のR&Dの拠点を構築する。さらに、各空洞処理の操作データは、ソフト化管理し、オンタイムでトレース可能とした。図9にILC空洞用電解研磨（EP）ベッドの外観図を示す。

最近の空洞電界性能として、企業の協力を得て製作したILC空洞において、このEP処理設備を使用して40MV/m前後の電界性能を複数台の空洞で達成することができている。

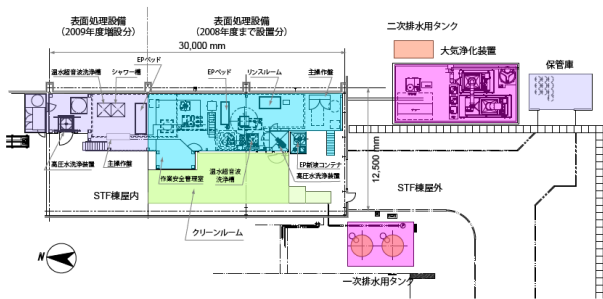


図8 電解研磨設備 (レイアウト図)

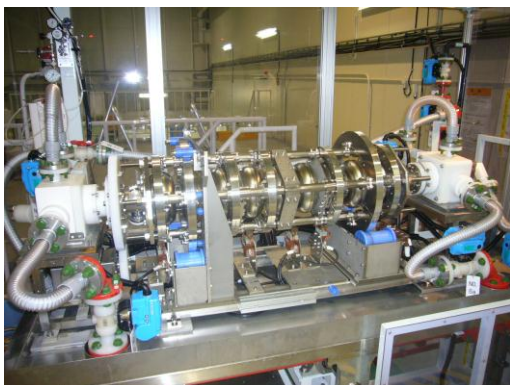


図9 STF棟に設備したILC空洞用電解研磨 (EP) ベッド

6. シームレス空洞製造技術開発

ILC用超伝導空洞の製造方法は、3項、4項で述べた方式が、ベースラインとして試験的に技術上確立されている。しかしながら主工程のEBWは工程の作業時間が長時間であるため生産性が必ずしも高いといえないこと、および完成した空洞の赤道部 (空洞最大直径部のこと) にEBWのビードが残り、このビードを滑らかに加工することなど工程上の課題は少なくない。また基本的に高電界が発生する赤道部に電界の方向に直角方向にビードが走っていることは、空洞の性能上から存在しないことが望まれる。

このような観点から、空洞のシームレス化が可能になれば、いくつかの改善が図れることが期待される。空洞性能の向上だけでなく、コスト上の改善も期待できる。このような目的で、超伝導空洞のシームレス化に必要な装置開発を実施した^{7)、8)}。

空洞のシームレス化を実施するには、パイプの絞り工程 (ネッキング工程) とその後のアニール処理、続いて液圧成形工程が必須である。このため、9セル空洞モデルを製作する専用工作機械を、加工要領が最も近い仕様である旋盤をベースにして開発した。図10に開発したネッキングマシンの外観図を示す。

液圧成形機は、軸方向プレス加工と内部圧力加工が並行して動作できる3セル空洞用の装置を開発した。図11にネッキング工程後、中間液圧成形後、



図10 9セル絞り加工が可能なネッキング加工機の外観

最終液圧成形後の銅パイプを並べて示す。図12には、3セル空洞の再現性を調べるために成形した空洞モデルを示す。シームレス製法として本方式は、有効であることを銅パイプ材料により確かめ、その後Nbパイプを開発検討を実施している。



図11 試作したモデル空洞 左 ネッキング後 中央 中間液圧成形後、右 液圧成形完了



図12 試作した銅製の3セルモデル空洞

7. まとめ

電子陽電子リニアコライダー用加速空洞の研究開発をテーマに、製造技術開発、設備建設、ものづくりを主に取り組み、その状況について報告した。本研究で成果があったとしても、まだ試作段階であり、実機製作となれば企業の方々との共同開発となる。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今後も積極的に取り組んでいきたいと考える。

謝 辞

本稿で報告した技術開発は、多くの企業の方々との共同開発や協力により取り組めた案件であり、また KEK 内の関係者の協力の賜物であります。特に諏訪熟工業株式会社、株式会社野村鍍金、株式会社シーケービー、及び株式会社清水製作所の各社の方々、KEK の関係して頂いた皆様には心からお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 石川政幸、他 「パルス通電による加速管用無酸素銅ディスクブランクの60枚接合」 溶接学会論文集 第23巻 第2号(2005)、P344-168
- 2) 上野健治、安島泰雄、井上均、渡辺勇一、佐伯学行、山口誠哉 「空洞製造技術開発施設(CFF)の建設」 日本加速器学会 第7回年次大会 2010年8月
- 3) 上野健治、安島泰雄、井上均、渡辺勇一、佐伯学行、山口誠哉 「空洞製造技術開発施設(CFF)の建設(Ⅱ)」 日本加速器学会 第8回年次大会 2011年8月
- 4) 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」 日本加速器学会 第8回年次大会 2011年8月
- 5) 上野健治、舟橋義聖、他 「KEK電解研磨設備の開発」 日本加速器学会 第5回年次大会 2008年8月
- 6) 上野健治、舟橋義聖、他 「KEK電解研磨設備の開発(2)」 日本加速器学会 第6回年次大会 2009年8月
- 7) 上野健治、井上均、渡辺勇一、斎藤健治、東保男 「超伝導空洞のシームレス化に関する装置開発」 日本加速器学会 第3回年次大会 2006年8月
- 8) 上野健治、井上均、渡辺勇一、斎藤健治、東保男 「超伝導空洞のシームレス化に関する装置開発(第2報)」 日本加速器学会 第4回年次大会 2007年8月