粒子加速器製造技術の開発

Development of Manufacturing Techniques of Cavities for Particle Accelerator

名古屋航空宇宙システム製作所	田	尻相	<b>圭</b> 介*1	壁	谷 善	FΞ	<b>郎</b> *²
	Л	澄每	友 廣*³				
神 戸 造 船 所	大	久 保	光 —*⁴	服	部		尚*5
	山	崎正	E 人*『				
技術本部	太	田福	高裕*7	田	浦	良	治*'

核物理や素粒子研究等に用いられる粒子加速器は、用途に応じ電子、陽電子、陽子等の粒子を高エネルギーの状態まで加速し、 実験を行う装置で、粒子の加速には高周波電力をエネルギー源とする加速空洞が用いられる。高い加速性能を得るため、材料と して、常伝導方式では銅、超伝導方式では高純度のニオブ材が使用される。当社では約30年この加速空洞の製造技術の開発を行 ってきている.最近確立した技術として、無酸素銅並みの高純度で強度や伸びが制御可能な"革新銅電鋳技術"を加速器構成部 品へ適用しており、高精度の純ニオブ成形技術として"対向液圧成形"及び"フローフォーミング"をニオブ製空洞に適用した.

Particle accelerators used for studying elementary particle physics, nuclear physics, and materials science accelerate particles in normal conducting copper RF cavities and/or superconducting pure niobium RF cavities. Over the last 30 years, we have developed techniques for manufacturing particle accelerator cavities. Among the latest of these techniques is advanced copper electroforming, applied to normal conducting cavities, which yields high-purity deposits having controllable mechanical properties. In high-precision forming, hydroforming and flow-forming were applied to a superconducting niobium cavity.

#### 1. **ま** えがき

粒子加速器の加速性能は、その構成要素である加速空洞材料の 物性と製造法に大きく依存する。高い性能を得るため、加速空洞 材料として、常伝導方式では高純度の銅、超伝導方式では高純度 の純ニオブを通常使用するが、構造強度を持たせる部分を除いて は、高周波による誘導電流が流れる空洞内表面の数十µmの層が 要求される物性を持てば良い。加速空洞の概念を図1に示す。し たがって、その製造法は、加速空洞の寸法、形状、運転負荷、コ スト等の条件により無酸素銅の削り出し、純ニオブの板金成形又 は銅の板金成形にニオブを被覆したもの、鋼鉄に銅のライニング, 又は銅電鋳等が挙げられる. これらの製造技術は, 当社が 1970 年 代より主に、文部省高エネルギー加速器研究機構(KEK)向けの 大型粒子加速器建設計画に参画する過程で開発してきたものであ る.本報では、それらの製造技術のうち、最近確立され、KEKの

大型プロジェクト用加速空洞等に適用中である"革新銅電鋳技 術",及び"純ニオブ成形技術高度化"について述べる。前者は, 大強度陽子ビームにより生成される 2 次粒子を広範囲な物理研究 に利用する"大型ハドロン計画"に適用され、後者は、高エネル ギーの電子と陽電子を衝突させ、新しい素粒子物理の現象を発見 する"Bファクトリー計画"に適用される.

# 2. 革新銅電鋳技術

#### 2.1 銅電鋳の概要

電鋳とは、溶液中の金属イオンの析出(電析)により、下地上 に厚い金属の層を形成させる製法で、複雑な構造体を製造するの に有用な技術である。めっき技術の応用ともいえるが、めっきが 数十 μm の厚みで,素材の表面を保護したり機能を付与したりす るのに対し、電鋳は厚みが mm のオーダであり単なる被覆ではな く, それ自体で独立した構造体である.



\*8 広島研究所紙·印刷機械研究推進室主席

\*4 機械・宇宙部高密度エネルギー装置開発グループ長

加速器に適用される電鋳は、電気及び熱伝導率の良いことが必 須であるため銅電鋳となる. 直流電流による通常の銅電析物は成 長とともに急速に結晶粒が粗大化して表面が粗くなり、電鋳中に ボイドを発生させてち密でなくなる. 従来は, 析出する金属結晶 粒を微細化させる効果のある有機物(光沢剤)を電鋳液中に添加 して電析物表面を平滑化させ,数mmオーダの電鋳層を形成させ ていた.しかし、この光沢剤の影響で電析物は酸素、水素、炭素 等高温下でアウトガスとなる不純物を含み、一般に硬くてもろく、 また強度や伸びを一定値に制御するのが困難であった(1).したがっ て、光沢剤法によって得られる銅電鋳は、厳密な強度要求のある 部品や使用時に高温下にさらされる部品には適用できない。しか し光沢剤法は製造期間が短いことから、当社ではこの電鋳法を電 子線形加速器の加速管組立用として,空洞外面に施工している. また、加速空洞内表面への適用例としては、KEK 陽子線形加速器 のタンク及び加速電極であるドリフトチューブがあるが、今後の 運転負荷や電場が高くなる加速器に対しては、より高性能な銅電 鋳のニーズがあった.そこで新しい銅電鋳法の適用が考えられた.

## 2.2 革新銅電鋳

従来のピロリン酸銅浴や光沢硫酸銅浴のように、添加剤を使用 して平滑でち密な電鋳面を得ていた方法(2)に対し、筆者らは電鋳時 に印加する電圧(電流)の極性を周期的に反転(例えば正電圧印 加20s, 負電圧印加4sの交番電界) することによって, 光沢剤を 含まない酸性硫酸銅低濃度浴(硫酸銅138~148g/l,硫酸135~ 145g/l)から、厚いち密な銅電鋳層を得ることに成功した。正電圧 印加時に電析した銅の一部は、反転時に陽イオンとなって浴中へ 溶解するが、この電析-溶解の繰返しによって結晶粒の粗大化が 防止され、微細な針状晶又は柱状晶の銅電鋳層が形成される。交 番電界を用いることから本法は PR(Periodic Reverse)法と称さ れる.PR 法によって得られる銅電鋳は、添加物がないため無酸素 銅並みに高純度であり、電子ビーム溶接やろう付の施工も可能で ある.また、この銅電鋳は構造材として求められる優れた機械的 性質(引張強さ187~303 N/mm<sup>2</sup>,伸び37.2~61.5%)を有して おり、電鋳液中の塩素イオン濃度を調整して電析物の微細構造を 制御することにより、所望の強度と伸びを得ることができる。図 2に機械的性質の塩素イオン濃度依存性を示す.図3に示す銅電 鋳のうち, (a)の針状晶は高強度(最大 303 N/mm<sup>2</sup>の引張強さ) の、(b)の柱状晶は高延性(最大 61.5%の伸び)の銅電鋳層であ る<sup>(3)</sup>. なお、使用した引張試験片は銅母材上に形成させた3 mm 以



Mechanical properties plotted against chloride ions content



図3 銅電鋳層の微細構造 Grain structures of electroformed copper layer

上の電鋳層から、母材界面と0.5 mm 離れた位置を起点に採取した厚さ2 mmの平板試験片である。したがって、電鋳成長方向に 垂直に荷重が作用する。また、標点間距離25 mmで試験を実施した。

このように強度や伸びを一定値に制御でき,高温下でも安定で 下地からのはがれや変形がない,厚い銅電鋳層が得られたことか ら,まず本法を H-IIロケットエンジン燃焼室の冷却溝形成に適用 し成功した.さらにもう一つの優れた性質である無酸素銅並みの 高純度であることにより,不純物ガス放出が少なくかつ高い電気 伝導率が得られ,これらは加速器のニーズにも合致する.

### 2.3 銅電鋳適用製品

PR 法による銅電鋳は, KEK の大型ハドロン計画用陽子加速器 において, DTL (Drift Tube Linac) と SDTL (Separated DTL) という2種の加速空洞タンク内面及びドリフトチューブ (DT) と称される内部電極表面の銅電鋳に適用されている.ま た, DTLのDT に内蔵される四重極電磁石用コイルの冷却溝形成 にも適用されており,現在,量産中である.

### 2.3.1 タンクの銅電鋳ライニング

DTLのタンク内は内径 560 mm,長さ3.3 mの鍛造鋼製で,大小様々な寸法のポートが 50 箇所程度あり,そのうち,ステンレス 鋼製フランジが付く大型ポートが 7 箇所と,複雑な形状をしてい る.ポートも含めたタンク内表面全体には,厚さ 0.5 mm 以上の 銅電鋳層を形成することが必要とされる.また,この電鋳層は, ピット,ボイド及び割れ等の欠陥がなく,下地である鍛造炭素鋼 やステンレス鋼との密着性が強く,表面が鏡面様に平滑でなけれ ばならない.この仕様を満たすために,タンク内表面に PR 法で厚 さ1 mm 以上の銅電鋳を施し,機械加工で所定の厚さまで切削し た後,電解研磨を行って鏡面様の最終表面を得ている.従来の光 沢剤法による最終表面は,フラッシュめっきとクロメート処理を 行っており,本法の製法とは異なっている.

電解研磨を受けた表面は、安定でち密な酸化物層(高周波によ る誘導電流が流れるスキンデプスより十分に薄い)に覆われるた め変色もなく、十分な水洗と乾燥のみで高真空域に達することが、 実物大タンクモデルの電鋳で実証された.

## 2.3.2 DT の銅電鋳ライニング

DT は外径 140 mm の円筒の中心に,陽子ビームの通る 4 20 mm 前後の穴があいたものをステムと称される 4 34 mm の支持棒で DTL タンク上端より支持する構造である。今回の計画ではこの DT を

約150個(円筒長さは50~165 mmの間ですべて異なる)製造す る。全部品がステンレス鋼の溶接組立でできており、ビーム穴の 内面を除いてはタンクと同様,厚さ0.5mm以上の銅電鋳層を表 面に形成する必要がある.

DT は高電界が作用する加速用電極であるため、放電を起さない よう滑らかな R 仕上げを行い,かつ,タンク以上に平滑な鏡面に 仕上げなければならない.したがって、1 mm 以上の銅電鋳を施 し、機械加工で所定の寸法まで切削された DT は、と粒研磨を施 されてから電解研磨を行う、電解研磨には、と粒研磨の際に銅電 ・鋳層に埋込まれたと粒や、機械加工時の加工変質層を除去する効 果もある.

## 2.3.3 四重極電磁石用銅電鋳コイル

DTの内部には、軌道を外れる陽子ビームを収束させるための四 重極電磁石が封入されている。この磁石は小型であるが非常に強 力なもので約1000Aの励磁電流を要するため、コイルには通常ホ ローコンダクタと称される冷却穴があいた伸銅材を使用する。DTL の加速性能は DT 径が小さいほど良くなるが、コイルを小さな磁 極に巻く際の曲げ R 制限(冷却穴のつぶれ等)で、実際には余り 体積を減らせないため、R部のないコイルのニーズがあった. そ こで開いた溝を銅電鋳でふたをする方法で形成された中空溝を有 する銅ブロックから、四重極電磁石用コイルを切削加工で製作し た.図4に外観を示す。接続端子のろう付のため、本コイルの銅 電鋳層はろう付温度でも熱的に安定で、変形しないことが求めら n.z.

本コイルの製造法は概略次のとおりである。コイル母材となる 無酸素銅ブロックに、四重極電磁石の1ブロックごと、冷却溝と なる貫通穴と溝を機械加工でらせん上に連結させる. この溝内部 にワックスを充てんし、表面に金属粉を擦込んで導電性を与えた



銅電鋳中空コイル 図 4 Electroformed hollow conductor coil



後、銅電鋳を施し、溝のふたとする。温度を上げてワックスを抜 けば銅ブロック内にコイルの中空部が形成されていることになる。 後は冷却穴に沿って、不要なブロック部を削り出すとともに、ワ イヤカット等でコイル状に切離していけば完成する(4).

#### 3. 純ニオブ成形技術の高度化

KEK "Bファクトリー計画"に採用される超伝導クラブ空洞の 塑性加工において問題となる部位は,非軸対称形状のハーフセル と同軸部高精度パイプである. そこで, ハーフセルには対向液圧 成形を、同軸部高精度パイプにはフローフォーミングを適用した.

#### 3.1 対向液圧成形

ハーフセルは純ニオブの薄板構造であり、内面の寸法精度と表 面粗度を要求される。そこで、ハーフセルには対向液圧成形を適 用した.対向液圧成形は図5(a)に示すように、製品内面形状に加 工した雄型と単純形状の圧力制御された油圧室を用いた成形方法 であり、以下に示す利点がある。(1)フランジ部の液体潤滑による 摩擦定数低減及び液圧による上型での面圧増加による滑りの抑制 により、通常のプレス加工に比べて絞り比を大きくできる。(2)製 品形状の上型に油圧を用いて沿わせるため、内面の寸法精度が良 い、また、前述のように上型での滑りが抑制されるため、内面の 傷が少ない。(3)下型が単純形状で良く、型費が低減できる。

純ニオブに対して、非軸対称形状の対向液圧成形を行った例は 報告されていないため、モデル試験で検討を行った。開発課題と して、ブランク形状・しわ押さえ形状・対向液圧パターンなどが あったが、1/3スケールモデル試験、実機大モデル試験を経て、 すべて解決することができた.特に、純ニオブは高価であり、歩 留りを最大にできるブランク形状の決定は重要であった。実機成 形金型を図5(b)に示す。成形は20MN油圧プレスを用いて行 い、クリアランスを制御したしわ押さえはボルトで固定した。油 圧室の圧力は油圧ポンプと逃し弁を用いて、ストロークに応じて 制御し, 最高14 MPa まで負荷した. 成形後(内面研磨済み)の ハーフセル外観を図5(c)に示す。成形は良好に行われ、溶接組立 で問題は発生しなかった.

#### 3.2 同軸高精度パイプのフローフォーミング

同軸部高精度パイプは薄肉パイプであり、真直度、真円度と板 厚精度が要求される。設計要求公差を表1に示すが、板厚・真円 度のいずれも通常の引抜き管では達成不可能な値であるため、高 精度のパイプ加工が可能であるフローフォーミングの適用を検討 した.フローフォーミングは後方向回転しごき加工の一種で,図 6に示すようにマンドレル上に取付けた管状の素材を回転させ, その管壁をローラでしごくことにより軸方向に延伸する加工法で



(b)成形金型



図 5 対向液圧成形 構成,成形金型及びハ -フセルを示す. Hvdro-forming

三菱重工技報 Vol. 37 No. 3 (2000-5)

144

Result of now forming pipe							
項	目	設計値	要求精度	製作精度			
板厚	(mm)	2.85	$\pm 0.10$	-0.01 + 0.09			
真円度	(mm)	130	0.20	0.14			
真直度	(mm)	850	0.40	0.30			

高精度パイプ製作結果 Popult of flow-forming

同軸高精度パイプ(成形後)

表1



ある. 主な加工条件因子として,以下の項目が挙げられる. (1)ロ ーラの形状(外径,角度,先端丸み半径など),(2)ローラの送り 速度,(3)板厚減少率(パス数),(4)供試体材質(変形抵抗,組 織). 純ニオブについて、フローフォーミングの実施例は報告され ておらず,成形条件は不明であった。そこで,直径148×板厚12 ×長さ100mmの短いニオブパイプを製作して、成形条件を調査 した. その結果,ニオブの結晶粒径と板厚減少率が最も影響が大 きいことが分かった。純ニオブは製造方法の制約から結晶粒の大 きい鋳造組織が残存しており,成形性が極めて悪いことが判明し た.そこで、素材の製造条件、並びにフローフォーミングの途中 で中間焼鈍を行い、再結晶により結晶粒微細化できる条件を検討 した. 板厚減少率と中間焼鈍温度・時間を最適化することにより, 結晶粒を微細化できるプロセスを決定できた。純ニオブ材の結晶 組織を微細化でき、フローフォーミング可能であることを短管試 験で確認できたので、実機サイズの成形試験を実施した.素材と して、外径 154×長さ 250 mm の純ニオブ円柱から、ワイヤカット 及び機械加工で外径148×板厚12mmのパイプを製作した。素材 の外観を図7(a)に示す.素材は4ステップのフローフォーミング を実施後、中間焼鈍を行い再結晶処理を行った。焼鈍後に3ステ ップのフローフォーミングを行い、外径 130×板厚 2.85×長さ 850 mmのパイプに成形した.成形後のパイプの外観を図7(b)に示 す.成形後の板厚・真円度・真直度を表1に示すが、設計要求公 差以内で成形できることを確認できた。

## 4.まとめ

粒子加速器構成部品の製作に当り、"革新銅電鋳技術"及び"純 ニオブ成形技術高度化"の検討を行い、次のことが明らかとなっ た.

- (1) 電鋳時に印加する電圧の極性を周期的に反転することによっ て、添加材を用いず平滑でち密な電鋳層を得る革新銅電鋳技術 を確立した.
- (2) 革新銅電鋳によって得られる電鋳層は、無酸素銅並みに高純

(a)パイプ素材



(b)パイプ成形品

図7 高精度パイプ 素材及び成形品を示す. Thin accurate beam pipes

度であり、また機械的強度(引張強さ、伸び)を制御すること ができる.これにより電子ビーム溶接やろう付の施工も可能と なるとともに、ガス放出の低減や高い電気伝導率が得られる.

- (3)非軸対称形状の純ニオブ薄板構造の成形に対向液圧成形を適用すべく、モデル試験にてブランク形状・しわ押さえ形状・対向液圧パターンを特定した。実機大モデルで最高14 MPaまで 圧力を負荷し、成形は良好に行われた。
- (4) 高精度が要求される純ニオブ薄板パイプの成形にフローフォ ーミングの適用を検討した。純ニオブでは成形条件とともに素 材条件を確立することで、引抜き管では達成不可能な製作精度 (板厚公差-0.01~+0.09 mm, 真円度 0.14 mm, 真直度 0.3 mm/L 850 mm) を実現した。

最後に本技術の開発に当って,KEK 高崎榮一教授,加藤隆夫助 教授,細山助教授より御指導を頂いた.ここに記し謝意を表す.

#### 多考文 献

- Safranek, W. H., The Properties of Electrodeposited Metals and Alloys, 2nd ed., American Electroplaters and Surface Finishers Society, Orlando, FL (1986) p.99
- (2) Hamilton Jr., A. C., Plat. and Surf. Fin., 84, 47 (Aug. 1977)
- (3) Tajiri, K. et al., Controllable Copper Electroforming for Mechanical Properties from Acid Copper Sulfate Bath, Abstracts of the 195 th Meeting of the Electrochemical Society (1999) No.102
- (4) Tajiri, K. et al., Coil, New Application of Electroforming, AESF/SFSJ Advanced Surface Technology Forum (1998) p.145