

R&D AND MASS PRODUCTION OF DTL/SDTL FOR THE LINAC AND CERAMICS VACUUM DUCTS FOR THE RCS OF THE J-PARC

Zensaburo Kabeya

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

1-1, Itozaki Minami 1-chome Mihara

Abstract

At present, all facilities in the J-PARC are in commissioning. The Linac and the RCS preceded it, and started commissioning according to schedule in 2006 and 2007 each. However, R&D for the components of these accelerators had already begun ten years ago. R&D started to miniaturise the DT of the DTL, therefore it was necessary to reduce the size of quadruple electromagnet enclosed in the DT inevitably. Then, even if the volume of the electromagnet was reduced, a rectangular coil was considered as a method of not decreasing the volume rate of the magnet core.

This rectangular coil took developer's name, and was called "SAKAE coil". The adoption method is copper electroforming as one of the manufacturing methods of the SAKAE coil, and it becomes an important inseparable technology to develop the DTL/SDTL cavity and RF shielding of the ceramics vacuum ducts for the RCS afterwards.

J-PARC DTL/SDTL およびセラミックス真空ダクトの開発・量産

1. はじめに

J-PARCでは現在、ほとんどの加速器施設がビーム調整運転に入った。それに先立ち、Linacは2006年に、RCSは2007年に予定通りのビーム加速と取り出しに成功した。遡ることこの10年前に、LinacのDTLとSDTLの加速空洞およびRCSのセラミックス真空ダクトに共通する必須の生産技術が加速器製作に適用された。PR(Periodic Reverse; 周期的極性反転)法による銅電鍍である。

そのころ、入射器であるDTL用高周波源のクライストロン化が考えられており、加速周波数のアップに伴うDTの小型化、それゆえに内蔵四極磁石の小型化が避けられなかった。加速器としての収束調整能力を維持するためには、この磁石は電磁石である必要があり、小型化すると磁極の体積率が減少し磁気飽和による漏れ磁場の発生が問題となった。従来のホローコンダクター的な中空銅線による巻き線コイルのかわりに、手間はかかるが、銅ブロックを削り出し矩形の中空コイルができれば、磁極の体積率減少も避けられるという考えから、KEKの高崎栄一先生がろう付け法により工作センターと試作を開始されていた。

この矩形中空コイルにロストワックス法を適用しDT用の一体電鍍式四極電磁石をPR銅電鍍で製作したことが、以後のJ-PARCとPR銅電鍍とのかかわりとなった。またこの小型電鍍四極電磁石を発案者の名前を取って、「栄コイル」と称している。

ここでは、J-PARCの中で特にPR銅電鍍を適用した機器の開発・量産について概要を述べる。

2. 栄コイルと小型四極電磁石

栄コイルの試作にあたって、当初はKEK/PS入射器用のものを金ろう付けとPR銅電鍍法の2種の製法で

試作した。どちらの製法でも成功したが、歩留まりや後工程との整合性などからPR銅電鍍をJ-PARC用四極電磁石量産製法として選択した。

PR電鍍そのものはシアン化銅めっきや、Ni電鍍には常用の既存技術であったが、高純度硫酸銅浴を用いたPR銅電鍍法は、三菱重工/名航の田尻が、HIIロケット燃焼室壁面の冷却溝形成法として開発したものである^[1]。ここで形成された細い冷却溝が電鍍製矩形コイルである栄コイル開発の発端となった。

図1の工程図に示すように、無酸素銅ブロックに冷却溝を細いエンドミルとドリルで形成し、その中に溶かしたピッチ系ワックスを流し込む。余剰ワックスを取り除いた溝状のワックスに銀粉を刷り込み、導通を取った上で、1mm厚の銅電鍍を施すと銅ブロック内にワックスの詰まった冷却溝が形成されることになる。この銅ブロックをエンドミルとワイヤーカットにより、四極コイルに切削加工し、最後に熱水浴中でワックスを溶かし出して冷却溝中を洗浄すると栄コイルが完成する。精密製造で使われる「ロストワックス法」の応用である^[2]。

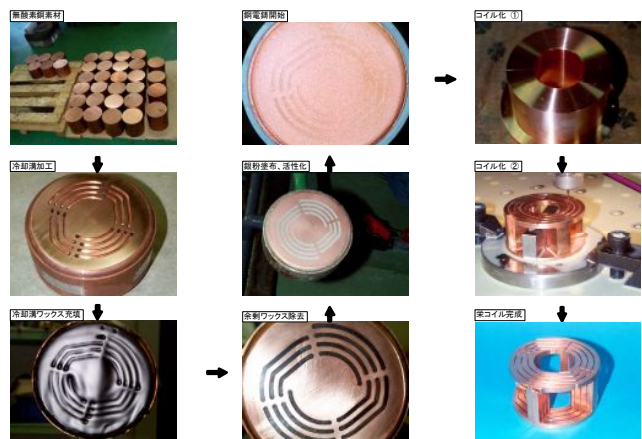


図1：栄コイル製造工程

この銅コイルに銅パイプのリード線をろう付けすると、その時の熱処理で銅電鍍層と冷却溝を刻んだ無酸素銅の境界は再結晶化して動き、顕微鏡下でも境界がわからないほど融合する。従って最終検査の水圧検査で漏水したコイルは皆無である。

こうして出来上がった四極コイルに、珪素鋼板の積層コアをはめ込み、無酸素銅製の冷却ジャケットを焼きばめして組上げるとJ-PARCのDTL用小型四極電磁石が完成する。図2にその工程図を示す。

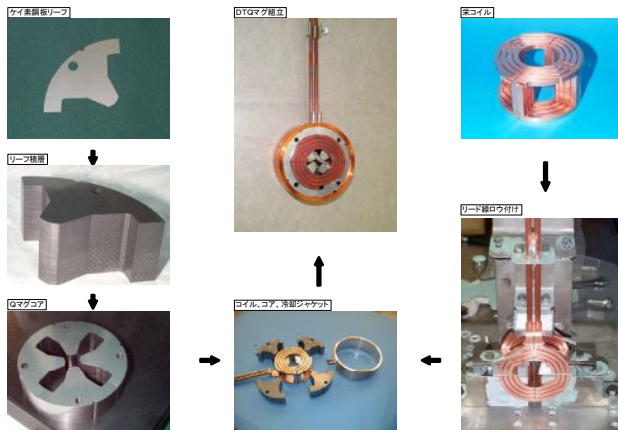


図2：小型四極電磁石組立工程

3. DTおよびDTL/SDTL加速空洞

ロケットへの適用時からPR銅電鍍により形成される銅電鍍層は、ろう付けや電子ビーム溶接が可能である事など、他の銅めっきや銅電鍍法に比べて優れた物性を示すことがわかっていたので、実際に

加速器として必要な電気伝導度(IACS)、耐放電性および放出ガス特性などを測定して他の銅めっきや銅電鍍法と比較してみると、無酸素銅に匹敵する物性を持つことが判明した。表1に比較表を示す。

DTLのような加速周波数の低い大型空洞はその高周波特性から銅無垢材で製作すると自重変形が大きいので、鋼製タンクの内面を銅めっきする製法がよく採用される。KEK/PS入射器では前段の20MeV部分に光沢添加剤入りのR-1銅電鍍、後段の40MeV部分にピロリン酸銅浴の銅電鍍を施工しているが、両者とも添加剤の影響で不純物を多く含み、IACS値が低いため加速空洞としての性能は劣る。一方、純度の高い硫酸銅浴のPR銅電鍍で形成される銅層は不純物が約30ppmと低く、電気伝導度も無酸素銅class-1に匹敵すること、結晶が針状で緻密なため十分な加工強度を持ち電解研磨に適していること^[3]、機械化学研磨したステンレス材なみの低い放出ガス率であること^[4]等が試験片や実機DTLサイズのタンクの試作試験から明らかとなったため、J-PARCのDTL/SDTLタンク内面およびそのDT表面の製法は、PR銅電鍍+機械加工+電解研磨と決まった。

銅電鍍を施工するタンク鋼材表面の不純物や欠陥を極力抑えるため、厚肉パイプはU字工法の溶接管ではなく中空鍛造とし、真空ポート、カプラーポート、チューナーポート等の開口部もポートを厚肉から削り出し、ビームラインから溶接線が見えない構造とした。

こうして出来たDTL/SDTLの高周波エージングは従来の銅電鍍法に比べ、一桁近く早い時間でエージングが完了し、定格電力投入可能になる事が報告されている^[5]。

	アルカリ性浴		酸性硫酸銅浴				
	ピロリン酸銅浴	シアン化銅浴	低濃度浴		高濃度浴		
			R-30(仮称)	PR	R-1	高速PR	
一般用途	鉄、亜鉛系めっき プリント配線	下地、浸炭防止 光沢めっき	電鍍	電鍍	光沢めっき 電鍍	電鍍	
浴の特徴	添加剤、メーカー等	アンモニア、硝酸塩、砒酸塩	水酸化カリ、ロウソク等	EF-A (ハニョウ村田)	添加剤なし	UBAC R-1 (ユーージャイト)	添加剤なし
	電流密度(常用値)	3~5A/dm ²	1~4A/dm ²	2.5A/dm ²	3.3A/dm ²	10A/dm ²	7.5A/dm ²
	電源	DC	PR, DC	DC	PR	DC	PR
	電鍍速度(厚み)	20~40μ/hr	20~80μ/hr	~20μ/hr	~20μ/hr	~80μ/hr	~40μ/hr
	電鍍応力 - : 圧縮 (常用電流密度での値)	-1.1~1.2 kgf/mm ²	データなし(引張)	データなし(引張)	~2kgf/mm ²	2~10kgf/mm ²	~3kgf/mm ²
	浴の劣化	中	中	小	無	大	無
電鍍層の特徴	電気伝導度(IACS値)	80.1	データなし	データなし	101.9	76.8	データなし
	硬度(HV)	92	150~220	データなし	81	128	データなし
	引張強度	280MPa	データなし	240MPa	187~303MPa	784MPa	362MPa
	耐力(O.2%)	データなし	データなし	100MPa	79~154MPa	527MPa	217MPa
	初回絶縁破壊電界	10MV/m	データなし	データなし	41MV/m(EP)	13MV/m	データなし
	外観・平滑度	鏡面光沢 平滑でピンホール少	光沢、無光沢 レベリング作用大	無光沢 デンドライト	無光沢 針~柱状結晶	鏡面光沢 レベリング作用大	無光沢 針~柱状結晶
結晶・配向	0.1μ以下	微粒子(111)配向		配向調整可能	微粒子	配向調整可能	
加速器関連鍍金メーカー	野村(福山)	野村、旭金	野村(鹿沼)	旭金	野村、名航	名航	
加速器&名航適応製品	PS LINAC(40MeV) ARES貯蔵空洞	各種下地めっき	H-II A燃焼室試作	H-II A燃焼室本機 J-PARC: LINAC&3GeV	PS LINAC(20MeV) KEKB入射機: S&C-band	C-band加速管 (名航試作品)	

めっき/電鍍の境界: ~200μ以下をめっき PR: Periodic Reverse
IACS: International Annealed Copper Standard(日立電線OFC Class1:102)
IACS 100=5.81×10⁻⁷Si/m(100kHz)

表1：銅めっき、銅電鍍法の物性比較

4. セラミックス真空ダクトのRFシールド

PR銅電鍍の更なる応用範囲として、絶縁物への適用を試作していた時に、J-PARCのRCS用セラミックス真空ダクトの表面にRFシールドとして銅ストライプを形成する計画が持ち込まれた。シンクロトロンのパルス磁場中で必要なセラミックス真空ダクトは、大型電磁石に合った大口径・長尺が必要である^[6]。しかしながら、セラミックス・メーカーが1mを越える長尺で大口径なダクトの製作は困難な事、従って短いユニットダクトを接合して長尺化する事、内面は二次電子放出を抑制するため、TiNをコーティングする事等の条件から、様々な工程処理でダクト表面や接合界面に形成される物質と、PR銅電鍍工程の種々な処理浴との両立性を検討して、全体工程を決めることがまず必要となった。

そこでセラミックス上のメタライズ層、10nm厚のTiNコーティング層およびダクトろう付け用の銀ろう箔などの耐性を電鍍前処理浴や硫酸銅浴に浸漬試験して、全体工程と各工程前の保護対策を決定した。図3に工程図を示す。

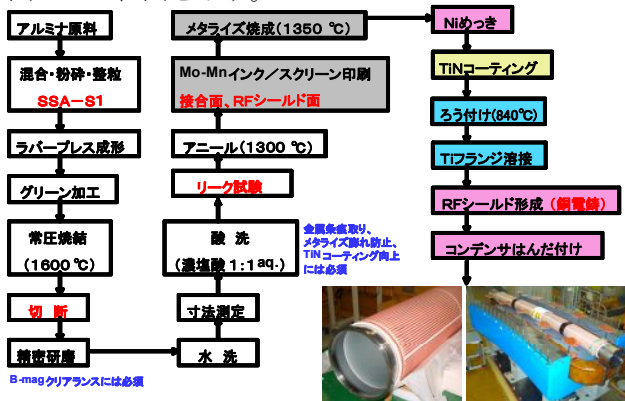


図3：セラミックス真空ダクト製造工程

酸や湿度にも注意の必要なMo-Mnメタライズ層の保護には2~5ミクロン厚のNiめっき保護層をメタライズ処理後、1週間以内に施すこと、TiNコーティングを施した内面は気密に保つこと、ユニットダクト接合境界の銀ろうフィレットは、銅電鍍前に耐放射線性エポキシ樹脂とダクト原料のアルミナパウダーの混合セメントで被覆することなどが各種の暴露・浸漬試験で決まり、結局、PR銅電鍍によるRFシールド形成工程がほぼ最終工程となった。図4に偏向電磁石用セラミックス真空ダクトの電鍍の様子を示す。ダクト内は両端のフランジで1.2気圧の乾燥窒素を封入することにより気密が保たれている。

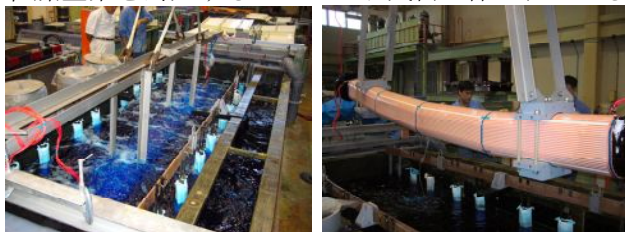


図4：偏向電磁石用セラミックス真空ダクトの電鍍

ユニットダクト毎に処理して、ろう付けしPR電鍍しただけでは外表面上に形成されたRFシールドは全長にわたって導通していないので、各ユニットダクトのRFシールドをジャンピングライン（接合部をまたぐ架橋配線）でつなぐ必要がある。また長尺化したダクトの片端はコンデンサーを挿入し、渦電流を発生させないために直流的に切れている必要がある。

ジャンピングライン形成でも、ロストワックス法による接合部への架橋形成と、無酸素銅細線（φ0.3mm）のPR銅電鍍によるRFシールドへの固着法の2種類を開発したが、工程の省略化およびコンデンサー用リード線への転向が容易なことから後者を製法として選択した。図5に架橋部とコンデンサー部を示す^[7]。

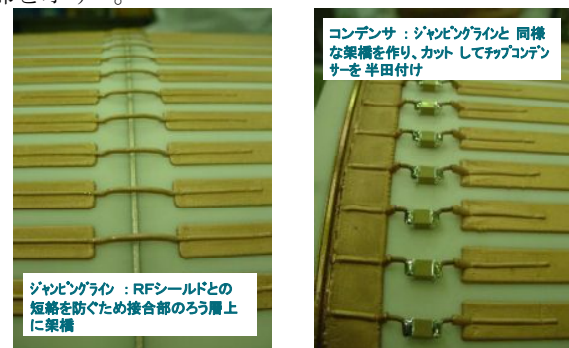


図5：架橋部とコンデンサー部

5. 謝辞

栄コイルからセラミックス真空ダクトのRCSへの据付にいたるこの10年間、KEK、JAEA、各大学の多くの研究者の皆様、および数多くの協力会社のトップから作業者の皆様まで多数の知人・友人に出会うことができ、切磋琢磨しあいながら続けた結果を今日、J-PARCの一部として見られることは何にも勝る喜びです。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] K. Tajiri, et al., AESF/SFSJ Advanced Surface Technology Forum Proceedings, 145 (1998)
- [2] K. Yoshino, et al., Proceedings of XX Int. Linac Conf., Monterey, California, 569 (2000)
- [3] H. Ino, et al., Proceedings of XX Int. Linac Conf., Monterey, California, 1015 (2000)
- [4] 齊藤芳男 他, 真空 49, No.8, (2006) 453
- [5] F. Naito, et al., Proc. of LAC 2002, Gyeongju, Korea, 429 (2002)
- [6] M. Kinsho, et al., Proc. of PAC 2005, Knoxville, Tennessee, 2604 (2005)
- [7] 壁谷善三郎 他, 真空 49, No.6 (2006) 343