

硬質線材に対する均一薄膜めっきを可能にした めっき技術（装置及び方法）の開発

帝国イオン株式会社

代表取締役社長 中村 綾 佑

株式会社 岡崎製作所

代表取締役社長 岡崎 一 英

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 那珂フュージョン科学技術研究所
所長 花田 磨砂也

| | |
|------------------------------|-----------|
| 帝国イオン(株) 代表取締役会長 | 中村 孝 司 |
| 帝国イオン(株) 代表取締役社長 | 中村 綾 佑 |
| 帝国イオン(株) 常務 | 平 紙 昌 彦 |
| 帝国イオン(株) 開発課 | 川 脇 拓 哉 |
| 帝国イオン(株) 開発課 | 北 條 将 史 彦 |
| 帝国イオン(株) 製造部 | 寺 下 光 彦 |
| (株)岡崎製作所 専務取締役 | 西 川 豪 人 |
| (株)岡崎製作所 ヒータ部門 | 漁 俊 彦 |
| (国研)量子科学技術研究開発機構 ITERプロジェクト部 | 石 川 正 男 |

はじめに

核融合エネルギーは、CO₂を排出しないクリーンで安全なエネルギーであるとともに、燃料を海水から得ることができるため枯渇の懸念がなく、世界のエネルギー問題を解決し得る新たなエネルギーとして注目されている。現在、核融合の実用化に向けては、33カ国が協力して建設を進める国際プロジェクト ITER をはじめ、各国の大学、大企業、中堅企業、さらには多数のスタートアップ企業が開発競争を繰り広げる巨大な技術開発市場が形成されている。

この中でも ITER は核融合開発の中核を担うプロジェクトであり、その成否が今後の核融合エネルギー実現の重要な鍵を握っている。ITER は数億度の超高温プラズマを生成することで核融合反応（燃焼）を発生させ、50万キロワットの核融合エネルギーを生み出すことにより、核

融合エネルギーの実現性を実証することを目的としている。

ITER は真空容器、超伝導コイル、加熱装置など多岐にわたる機器およびシステムで構成されるが、なかでも計測装置は核融合燃焼プラズマの特性を測定し、物理現象の解明に加え、燃焼制御および安全管理を行う極めて重要な役割を担っている。その中で、日本が製作を担当するマイクロフィッションチェンバー計測装置は、ITER における核融合反応時に発生する中性子の総量を計測し、核融合出力を評価する中核的な中性子計測装置である。

同計測装置は高温かつ高放射線環境に設置されるため、ゴムやビニールを用いた通常のケーブルを使用することはできず、無機絶縁物を用いた金属製ケーブル（MI ケーブル（φ6mm 程度））を採用する必要がある。一方で、ITER では超高温プラズマを維持するためにマイクロ波による加熱が不可欠であり、その一部が MI

ケーブルに入射して過熱や損傷を引き起こすことが大きな課題となっていた。

このため、マイクロ波による過熱を低減し得る銅めっきの適用が必要となった。一方で、銅は導電体であるため、めっき厚が大きい場合にはMIケーブルに作用する電磁力を増大させる恐れがある。このことから、MIケーブル表面全長にわたり、精度よく均一な薄膜（ $5\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ ）として銅めっきを形成する技術が求められた。

しかしながら、MIケーブルのような高剛性の線材に対して、所定の膜厚精度を満たす均一な薄膜めっきを施す技術は、これまで存在していなかった。

開発のねらい

帝国イオン株式会社は、株式会社岡崎製作所および量子科学技術研究開発機構と共同で、従来技術ではめっきが困難であった硬質線材であるMIケーブルに対し、均一な銅めっきを施すための新規めっき技術の開発に取り組んだ。

一般的なリール to リール方式やバッチ式めっき法では、MIケーブルのような高剛性線材を巻き伸ばし・再巻取することができず、また膜厚の均一化が難しいという課題があった。これに対し、本開発では「MIケーブルを輪巻き形状のままめっき処理する」という着眼のもと、3Dの螺旋状にケーブルを保持しながら回転させる独自構造のめっき装置を考案した。

装置の概要

本件で開発した回転式めっき装置を図1に示す。本装置により、保管・輸送時と同様の輪巻き形状（同一曲率）のままMIケーブルに対して、従来のめっき方法と同等の電気化学的条件でめっきを施すことができ、形状変更が不要となるとともに、めっき槽の小型化も実現した。また、本装置では、MIケーブルを螺旋状に巻く方式を採用できるため、1m程度の短尺から任意の長さの硬質線材まで対応可能である。さらに、回

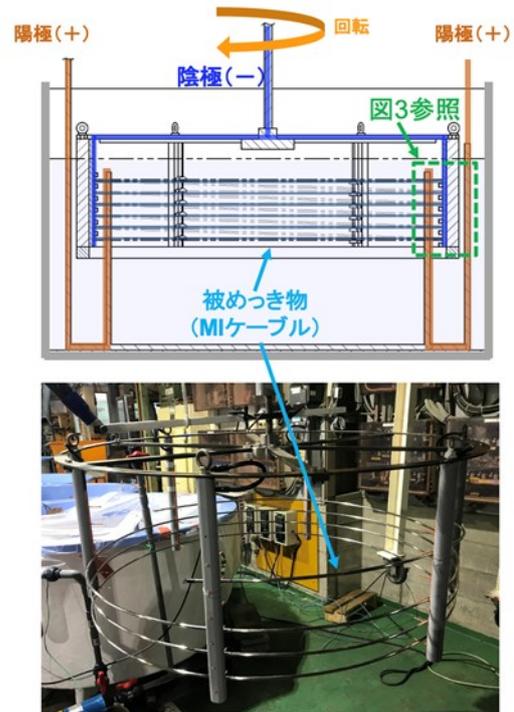


図1 新たに開発した3D回転式めっき装置

転方式、給電方法、極間距離の差異抑制機構、めっき液循環方式などに独自の工夫を施し、これらを組み合わせためっき方法を確立することで、MIケーブルの円周方向および全長にわたり偏りのない均一なめっき皮膜形成に成功した。

この装置により、従来のめっき方法と同等の電気化学的条件を輪巻き状態で再現でき、MIケーブルにダメージを与えることなく、全長にわたり均一なめっきを施すことが可能となった。

技術上の特徴

本開発では、MIケーブルに対して $5\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ の均一な銅めっきを実現するため、以下の三つの主要技術課題を解決した。

(1)電極間距離の偏りを抑制し析出速度を均一化

めっき膜厚の均一性には電極間距離の一定化が不可欠であるが、実際にはケーブルの巻き方（曲率）のわずかなズレにより偏りが生じる。そこで、図2に示す通り、

- ①回転中心位置
- ②陽極位置
- ③回転速度

の3パラメータを同時に変化させる独自機構を導入し、電極間距離を最小偏差に抑えることで全長にわたる均一めっきを可能とした。

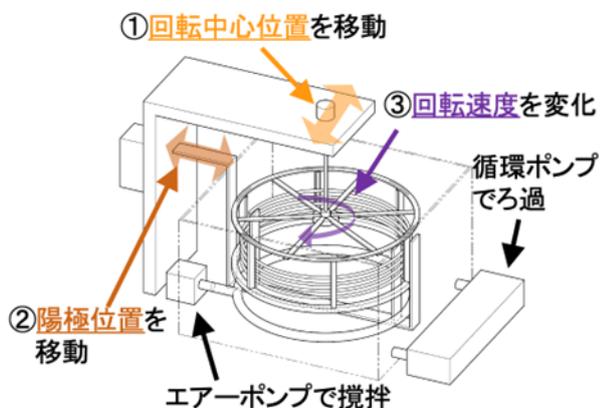


図2 均一めっき実現のために採用した技術

(2)陰極接点条件の最適化

この手法の大きな課題は、MIケーブルと陰極との接点部の膜厚が薄くなることであったが、この問題に対しては、図3に示すように、

- 接点部を点接触化する形状設計
- 接点位置を円周方向に往復移動させる機構
- 接点移動をめっき液中で実施

を導入した。これにより、接点部の膜厚を他部位と同等とし、酸化によるめっき不良も防止した。

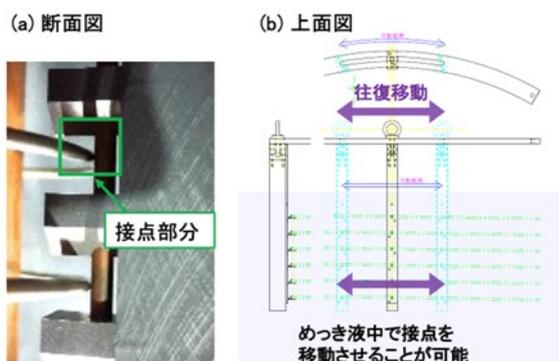


図3 めっき装置の接点条件の最適化

(3)めっき液循環によるめっき品質向上

回転方式および接点移動による攪拌効果に加え、循環ポンプによるろ過により銅イオン濃度を均一化し(図2参照)、従来のバッチ式では困難だった高品質・高均一の皮膜形成を実現した。

薄膜均一めっきの実証結果

新規開発した装置および治具を用い、1mおよ

び15m(実機相当の長さ)のMIケーブルに対して実証試験を実施した。回転数・回転中心位置・陽極位置の3パラメータを変動させながらめっきを行い、循環ポンプを稼働してめっき液の均一化を図った。その時のめっき完了時の写真を図4に、ケーブルのめっき膜厚の測定結果を図5に示す。測定の結果、いずれの測定点でも膜厚 $5\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ を達成し、外観品質も欠陥なく良好であることを確認し、ITER要求を満たす高精度めっきの実現に成功した。

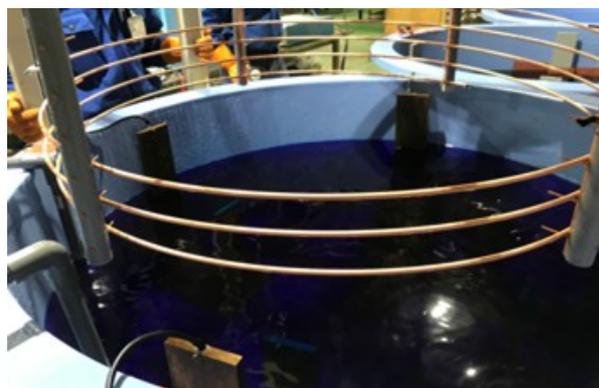


図4 MIケーブルを用いた実証試験時の様子

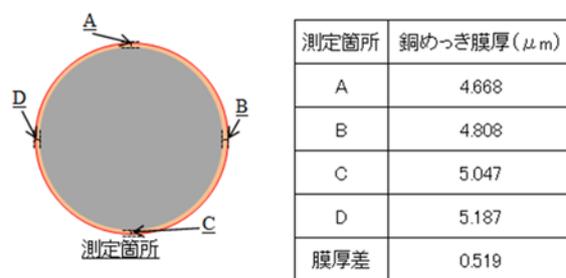


図5 めっき後のMIケーブルの銅めっき膜厚

任意箇所に任意の膜厚めっきを施す技術の開発

上記に加え、ITER用MIケーブルでは、中間部の限定区間に約 $100\mu\text{m}$ の厚膜めっきを施す新たな要求が追加された。これに対しては、新たに、必要箇所のみを選択的にマスキングして再めっきを行う新プロセスを構築し、任意位置に任意厚さの均一めっきを形成できる高度技術を開発した(図6)。この成果により、従来技術では不可能であった部分厚膜めっきを実現し、ITERの追加要求に応える革新的めっき技術を確立した。

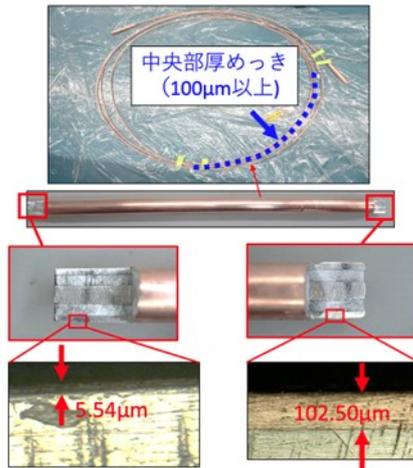


図6 所定箇所に任意厚さ(100 μ m)の均一めっき

実用上の効果

ITER 計測装置の実機のめっきに本技術を適用

今回開発した均一薄膜めっき技術を適用した MI ケーブルへのめっき技術は、ITER 機構が要求する品質基準（ISO2819 および ITER のガイドライン）を満たすことが認証試験により確認された。これを受け、実機の MI ケーブルに対して、本件で開発した装置を用いてめっきが実施された。めっきが施された MI ケーブルは、他の構成機器とともに、日本の計測装置としては初めて ITER 機構（フランス）への輸送された。到着後の ITER 機構での受入検査では、目視検査、員数確認、識別番号の整合性検査など全てに合格し、めっきの品質が輸送後も維持されていることが確認された。

これにより、日本開発めっき技術の信頼性と国際プロジェクトへの貢献が明確に示された。

実用上の経済性

また、上記のめっき装置を導入することにより、従来のリール to リールめっき法と比較して装置価格を大幅に削減でき、約 660 万円程度での製作が可能となった。また、装置自体が小型で、小スペース（ ϕ 1,200mm の槽を 4 つ配置するのみ）で、めっき処理が可能となった。さらに、本装置は 1m から数百 m まで、幅広い長さの線材に対応可能で、繰り返し処理も容易なため、資

源の有効活用、エネルギー消費の低減、コスト削減に寄与し、経済的な優位性を有している。

加えて、本めっき装置は小型化に加え現地組立てを前提とした構造であるため、めっき対象材料の移動が困難な場合でも、現場に装置を持ち込み、その場でめっき処理を実施できるという利点を併せ持っていることも強みである。

知的財産権の状況

本開発に関する特許登録は下記の通りである。

①日本国特許第 6893001 号

名称:めっき装置およびめっき方法

概要:硬質線材に対して高品質な薄膜均一めっきを実施できる技術

②米国特許番号: 12410536

名称: PLANTING APPARATUS, PLANTING METHOD, AND METHOD FOR PRODUCING WIRE ROD HAVING THE SURFACE PLATED

概要:上記技術に任意箇所に任意の膜厚を施す技術を加えたもの

むすび

今回開発しためっき装置は、硬質線材に適用できる世界初の 3D 回転式めっきシステムであり、ITER 用 MI ケーブルに留まらず、医療分野で利用される粒子加速器の導波管など、高精度なめっきが要求される幅広い分野への高品質めっきの実現に大きく寄与する技術である。

また、本件技術が蓄電池の負極材に使用されている電解銅箔に替わる複合銅箔の開発に繋がる、といった新たな波及効果ももたらしている。

今回の開発は、大型国際プロジェクト ITER の技術開発の中で生まれたものだが、中小企業である帝国イオン株式会社と株式会社岡崎製作所が、国立研究開発法人である量子科学技術研究開発機構と一体となって、共同で生み出した開発技術であることも、特筆すべき点である。