

# 硬質線材に対する 均一薄膜めっき装置及び方法の開発

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  
ITERプロジェクト部 計測開発グループ  
上席研究員 石川 正男

2026年2月3日

# ITERプロジェクトの概要

- 世界7極（日、欧、米、露、中、韓、印）33カ国が共同で実施する国際プロジェクト
- 核融合出力 500MW（エネルギー増倍率  $[Q] > 10$ ）の燃焼プラズマを実現し、核融合エネルギーが科学的にも技術的にも実現できることを示すことが目的
- 南フランスのサン・ポール・レ・デュランス（プロバンス地方）に実験炉ITERを建設中
- 日本も参加極として、調達機器の開発及び製作を精力的に進めている
- **運転時の出力を評価する中性子計測システム(MFC)の開発を担当**



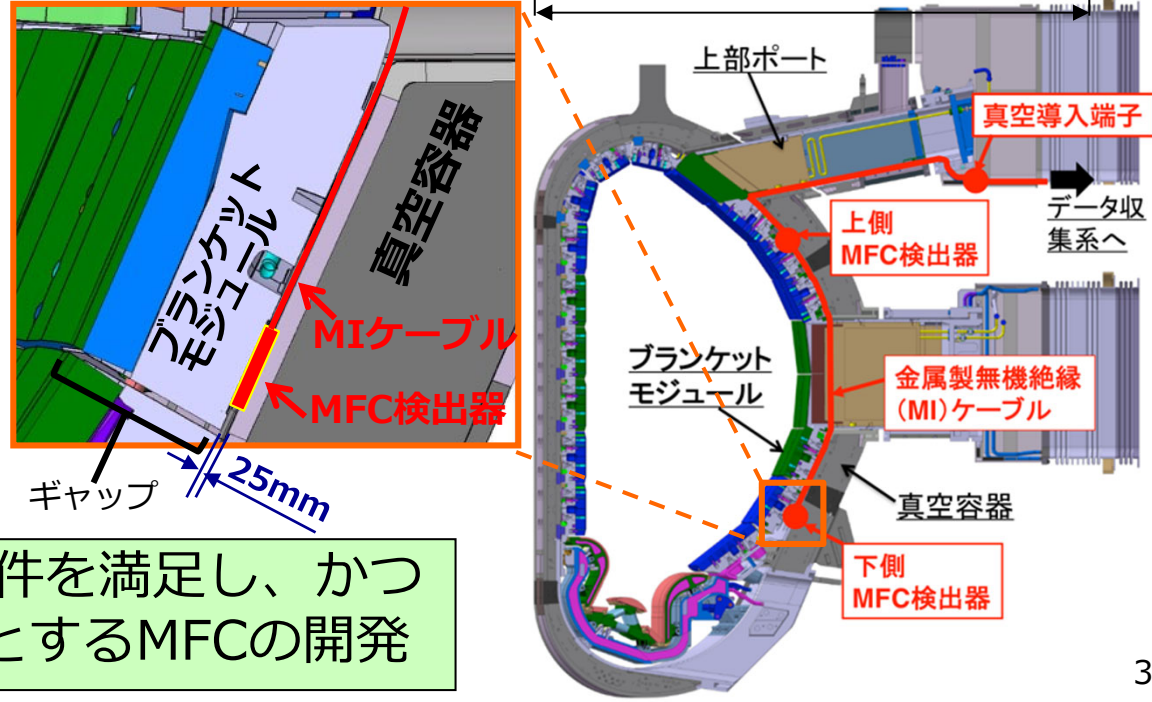
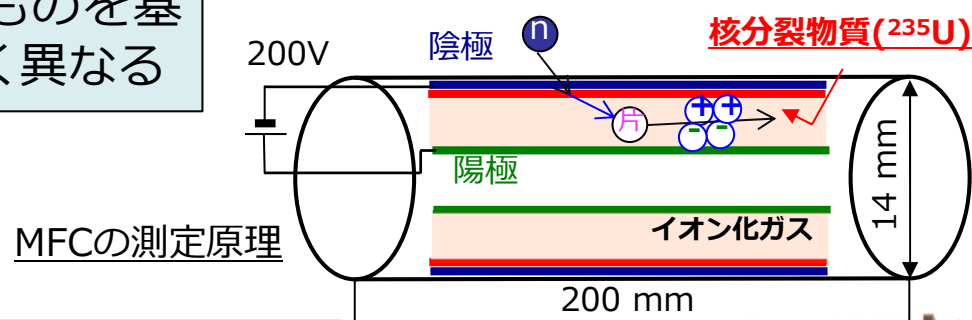
ITER公式サイト(<https://www.iter.org/iter-image-galleries>)より抜粋

# ITERマイクロフィッションチェンバー (MFC)

日本は、炉内に検出器を設置してITERの核融合出力を評価する中性子計測システム  
[マイクロフィッションチェンバー[小型核分裂計数管を用いた中性子計測システム (MFC) ]  
の開発を担当

ITERでは、MFCは軽水炉で使用されてきたものを基  
に開発しているが、設置環境は軽水炉と大きく異なる

	軽水炉	ITER
中性子エネルギー	熱	熱～高速中性子 (~14MeV)
設置空間	余裕あり	高さ 20 mm以内
設置環境	水中	高真空 (~10 <sup>-9</sup> Pam <sup>3</sup> /s)
動作環境	大きな力は働かない	高熱負荷(核発熱、放射) プラズマ崩壊現象による 強い電磁力や振動
機器構成	検出器+ MIケーブル	検出器+ MIケーブル+ 真空導入端子



【目的】 ITERの厳しい設計要求条件を満足し、かつ  
高精度の中性子計測を可能とするMFCの開発

# ITERにおけるMFCの研究開発課題

## 真空容器内への設置条件を満たしつつ、その測定環境に適用可能なMFCの開発

- 高温（ $\sim 350^{\circ}\text{C}$ ）、高放射線（ $\sim 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{s}$  [中性子束]）環境下で稼働

⇒ 無機絶縁物を利用した金属製ケーブル [MI (Mineral Insulated) ケーブル]  
直径：6.6 mm、表面の皮膜材質：ステンレス → **硬質線材**

➡ 適用性、設置性について、解析や試験を通じて実証

## 運転環境の過酷さが増大 🤖

- プラズマ加熱用のマイクロ波（超ハイパワー電子レンジ）が、MIケーブルまで過熱（最悪  $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ まで上昇）

➡ 解決案：MIケーブルの表面に銅めっきを施す

➤ マイクロ波の反射効果により入熱を約1/8に低減

しかし、銅は伝導体のため。。。。

- ディスラプション（プラズマが急速に消滅する現象）時に発生する、MIケーブル表面を流れる誘起電流が上昇し、強い磁場との相互作用による電磁力が一気に増大

機器健全性維持のためのITERの要求

MIケーブルに高精度( $5\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ )の均一銅めっきを施す

# MIケーブルの均一なめっきにおける課題

## ITERの要求

MIケーブルに高精度 ( $5\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ ) な均一めっきを施す

### 課題

- 硬い線材であり、曲げることが容易ではない
- 何度も曲げ伸ばしを行った場合、塑性変形や破壊が生じる恐れ

## 従来のめっき法

### リール to リールめっき法 (連続式めっき)

- ✓ 線材を引き出し一連の工程を連続的に通過させ、再び巻き取ってめっきを施す方法
- ✓ 均一なめっきが可能

しかし

- 硬い線材を適切に引き出し、改めて巻き取ることが出来ない
- 最低でも長さ17mの場所が必要となり、設備コストも高い

### バッチ式めっき法

- ✓ かごや治具に取り付けた材料を次々に移動させながらめっきを施す方法
- ✓ 色々なサイズの機器にめっき可能

しかし

- 電極の設置方法により、線材に対し、薄膜の膜厚の均一性に関して課題
- 100 $\mu\text{m}$ の厚付けでは端部のめっき膜が厚くなる (後述)

- ✓ 従来のめっき法では、硬質線材に対しての均一な厚さのめっきは極めて困難
- ✓ 大企業、多くのめっき専門業社は「要求を満たすめっきはできない」との回答

# 新たな3Dめっき装置を考案

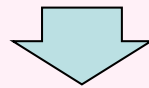
## 課題

MIケーブルのような硬質線材に対し、従来のめっき方法は適用不可

QSTは、帝国イオン(株) [東大阪市] および (株)岡崎製作所 [神戸市] と共同で  
**本件課題を克服するめっき技術の開発に挑戦**

## 着眼

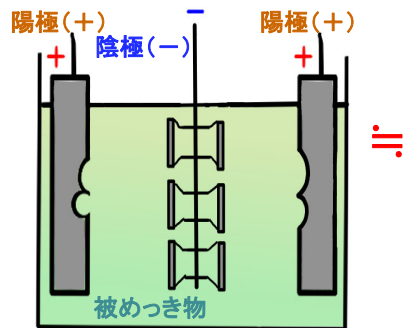
MIケーブルを巻き伸ばしせずめっきすることができれば、  
MIケーブルにダメージを与えずに品質を維持することができる



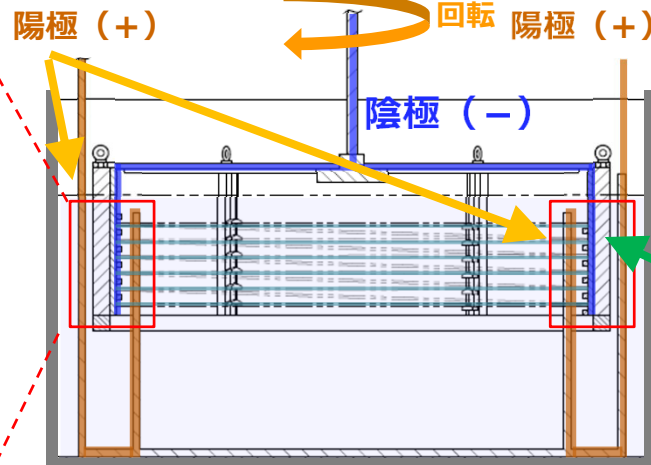
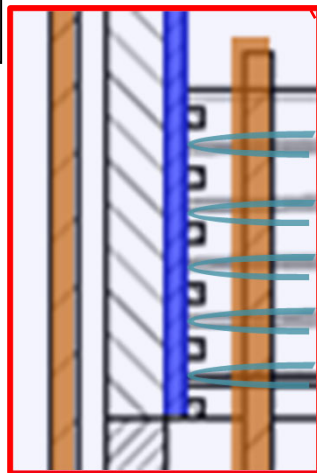
**一般的な電気めっき方法をMIケーブルのめっきに適用した3Dめっき装置を考案**

回転させることで  
**一般的なめっき方法\***と  
同じ状態を作り出した

\*被めっき物を陰極にし、陽極との間にマイナスの直流電流を流してめっきする



被めっき物  
(MIケーブル)



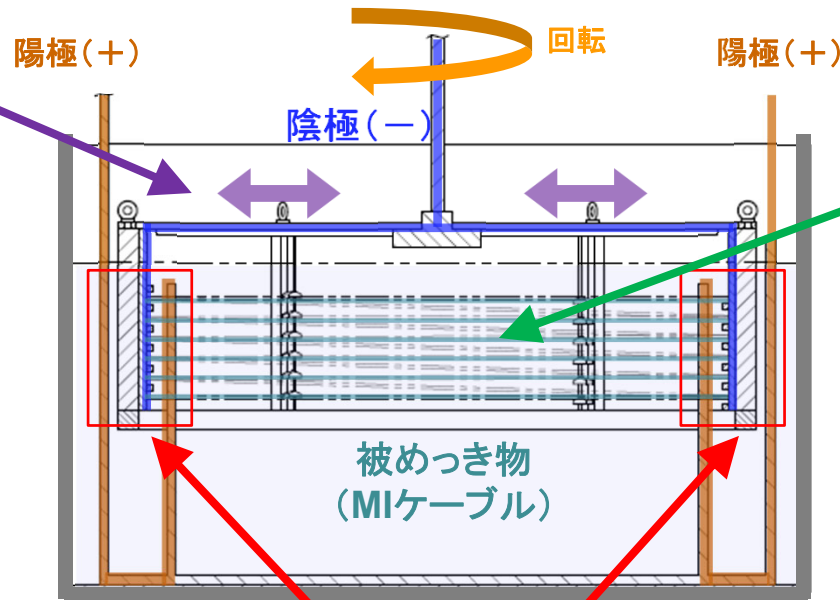
新めっき装置の特徴

**3Dの螺旋状に  
MIケーブルを  
保持することで  
輪巻き形状のまま、  
めっき処理が可能に**

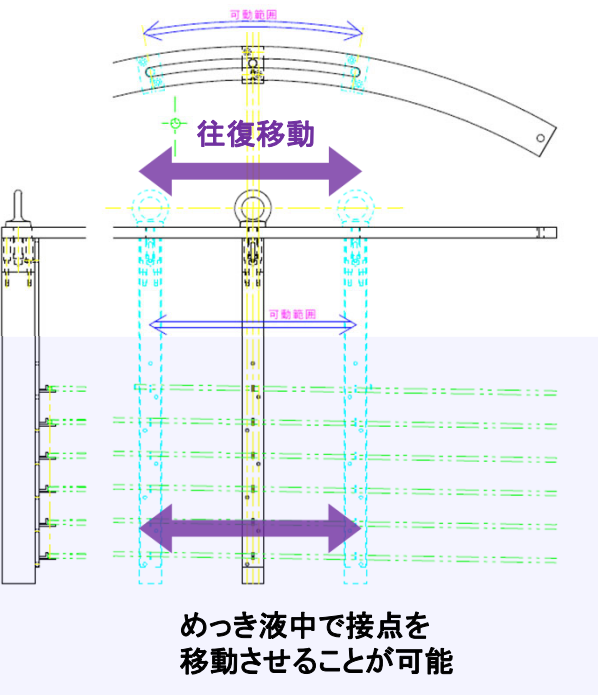
# 開発した3D回転めっき装置の概要

## 3D回転めっき装置

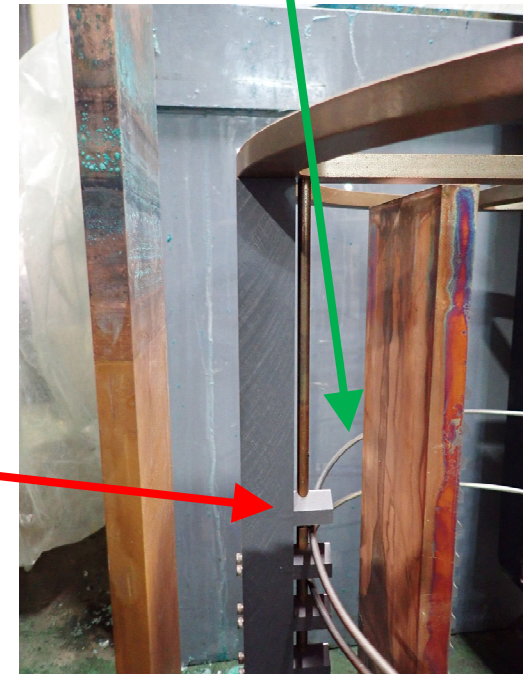
陰極兼支柱を周方向に往復移動させる機構で無めっき部分をなくす



MIケーブルが均等な間隔で螺旋状に巻かれた状態

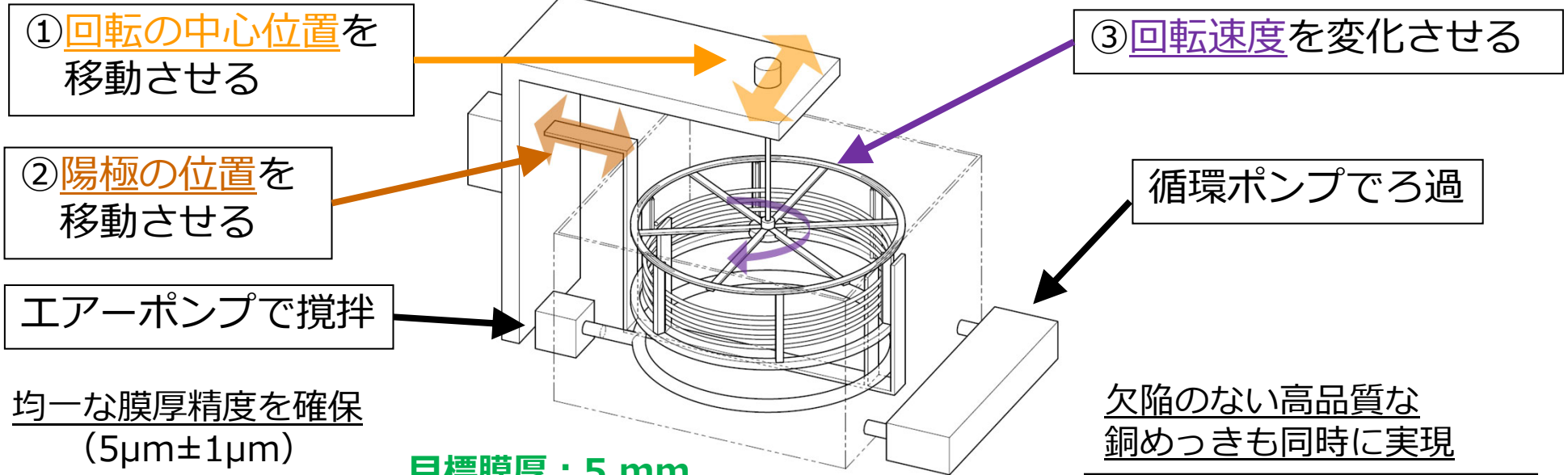


一般に行われている電気めっきと同じ方法でめっきができる条件を作り出した状態

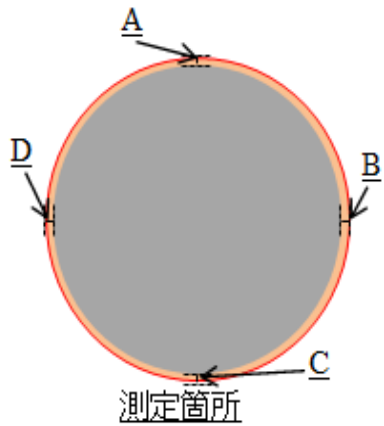


# 膜厚精度 $5\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ を達成するためのめっき手法を確立

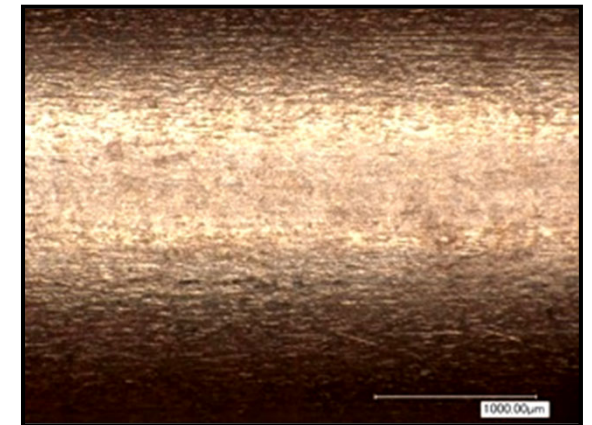
- 要求精度を満たすために、  
電極間距離の偏りをなくすための3つの工夫を取り入れためっき手法を確立



目標膜厚 : 5 mm



測定箇所	銅めっき膜厚 ( $\mu\text{m}$ )	膜厚差 ( $\mu\text{m}$ )
A	4.668	<b>0.519</b> ( $\pm 1$ 以下)
B	4.808	
C	5.047	
D	5.187	



**ITERの要求を満足する高精度、高品質のめっきを実現**

# めっきの密着性向上に向けためっき手法を適用

## 課題

- ・ MIケーブル表皮 (SUS304L) の不動態皮膜がめっきの密着性を阻害
- ・ ITERに設置時に、設定されたルートにしたがって幾度も曲げて設置

→ **不動態皮膜を除去し、めっきの密着性を向上させる逆電解処理を採用**

## 逆電解処理のためのめっき手順

### ① Ni ストライクめっき

- ・ 塩化ニッケル : 240g/L
- ・ 塩酸 : 125ml/L

めっきと逆向きに電流を流し (逆電解) 不動態皮膜を除去した後に、正電解でめっき処理することでナノニッケル皮膜を形成して表面を活性化

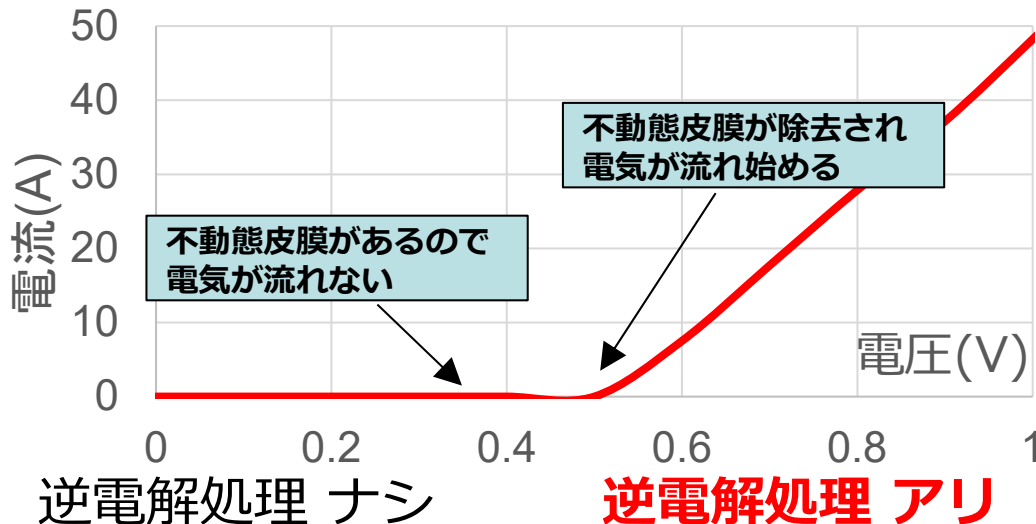


### ② 銅めっき

- ・ ピロリン酸銅 : 90g/L
- ・ ピロリン酸カリウム : 375g/L
- ・ アンモニア水 : 3ml/L

活性化したナノニッケル皮膜上に銅めっきを被覆することで素材と銅めっき皮膜が強固に密着し剥離しない

逆電解で電圧を上げていくと、不動態皮膜が破壊されて電流が流れ、めっきの密着性が向上



# 任意箇所異なる厚さの均一めっきを行う手法を新たに確立

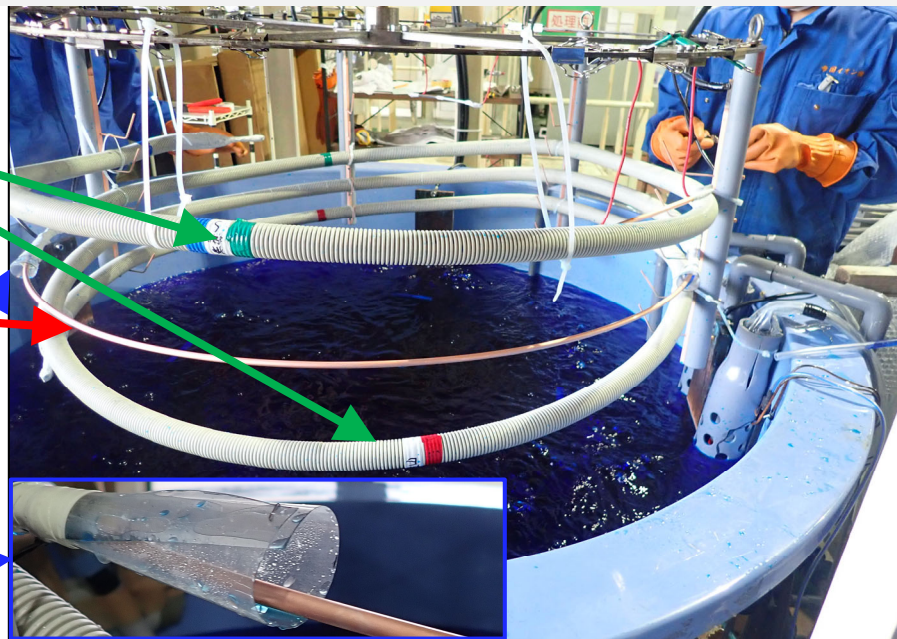
**課題** 新たに、指定箇所だけに100 mm厚のめっきをする必要性が発生

→ **指定箇所だけにめっきを被覆するマスキング手法を新しく開発**

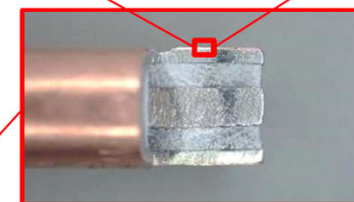
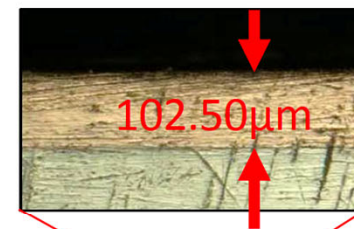
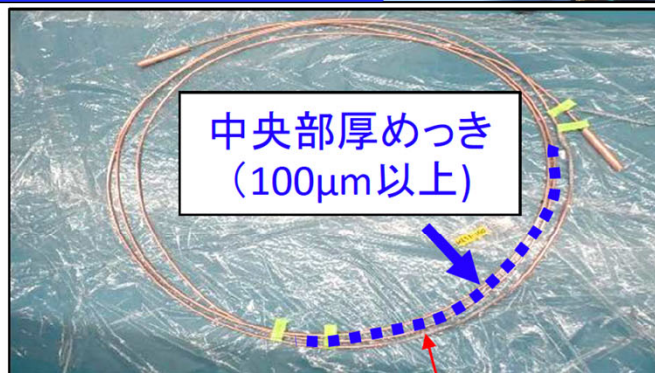
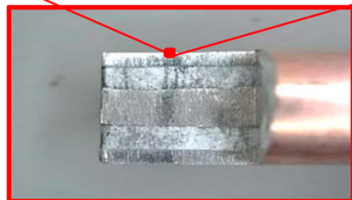
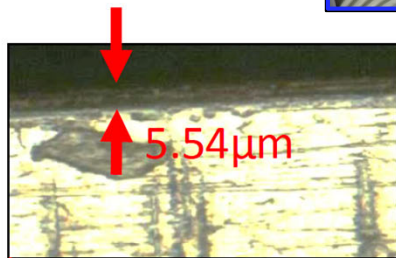
パイプ型のマスキング治具

中央部めっき厚  
100 $\mu$ m以上の  
指定箇所

漏斗型の遮蔽治具



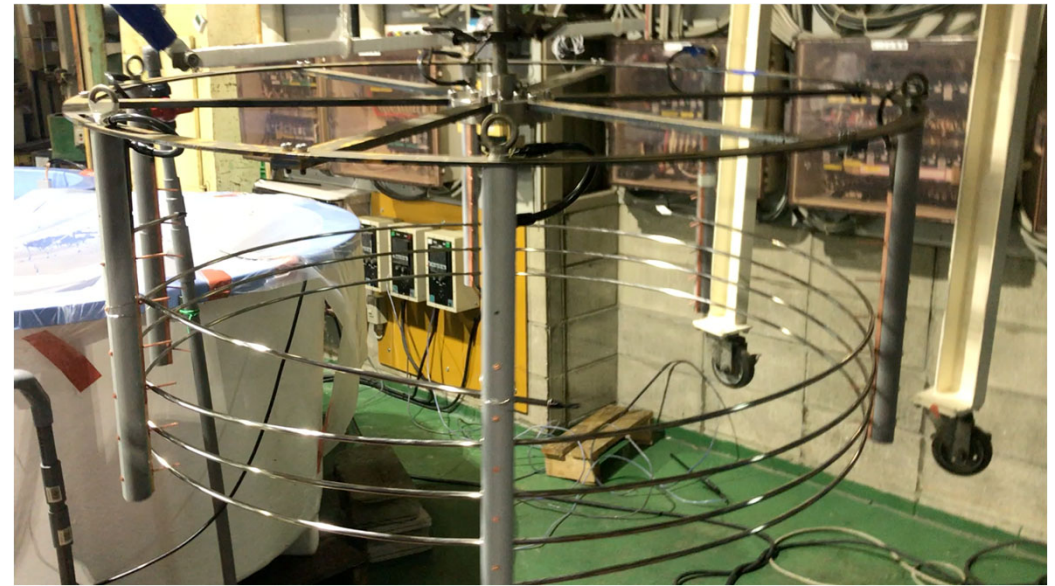
膜厚測定作業  
(測定用ダミー)



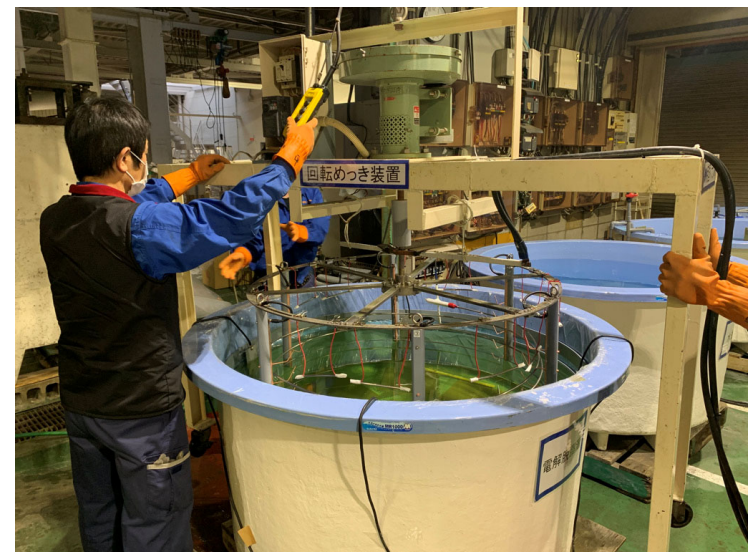
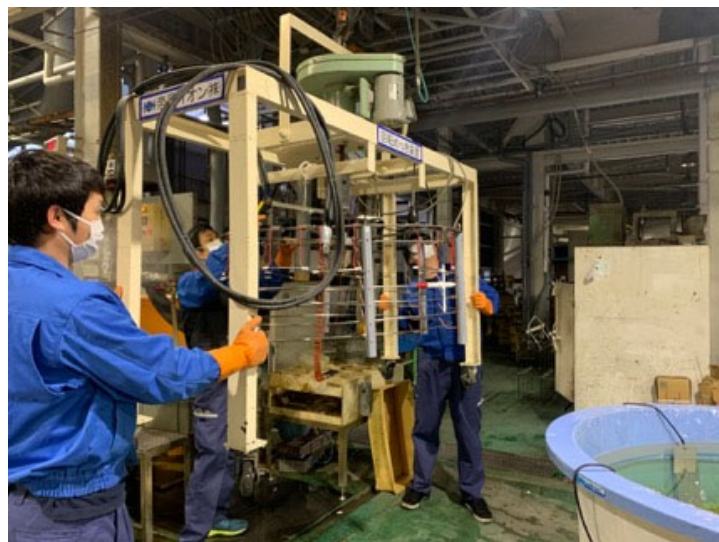
# MIケーブルのめっき時の様子

4つの槽を並べてめっき処理を行う (小スペース化)

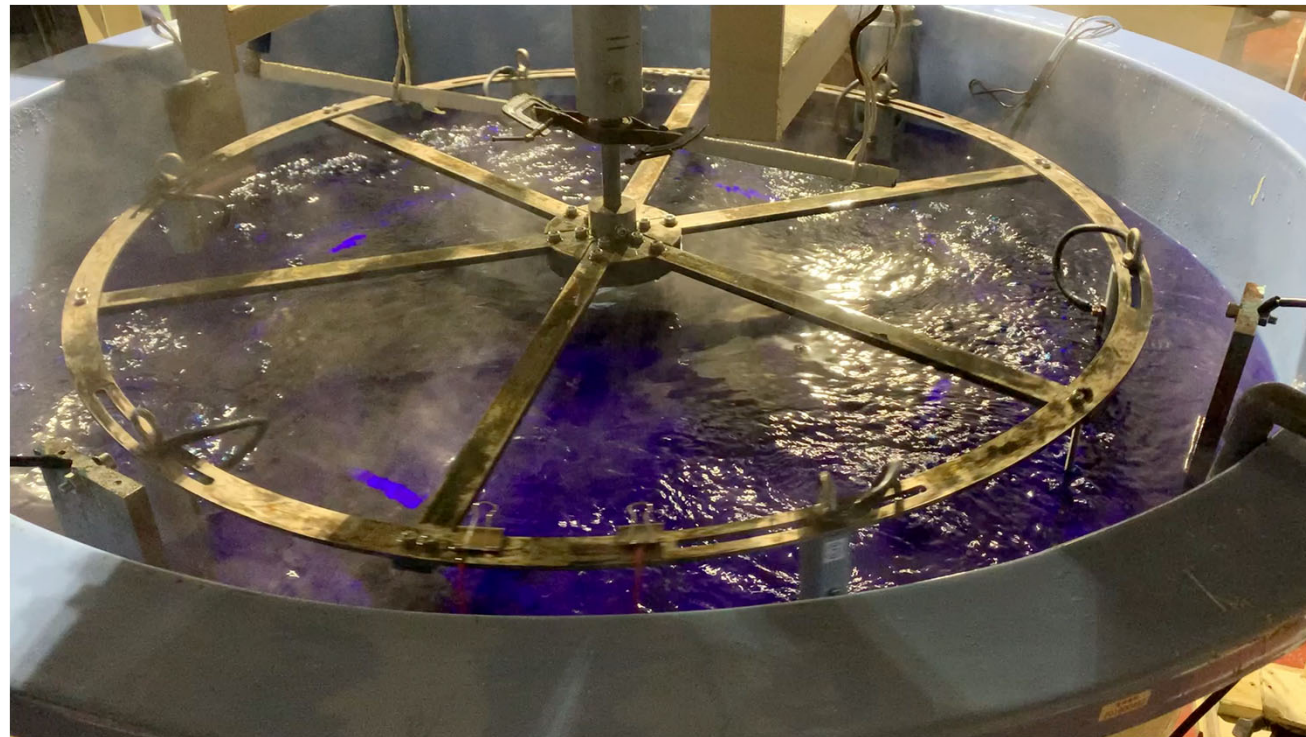
回転めっき装置



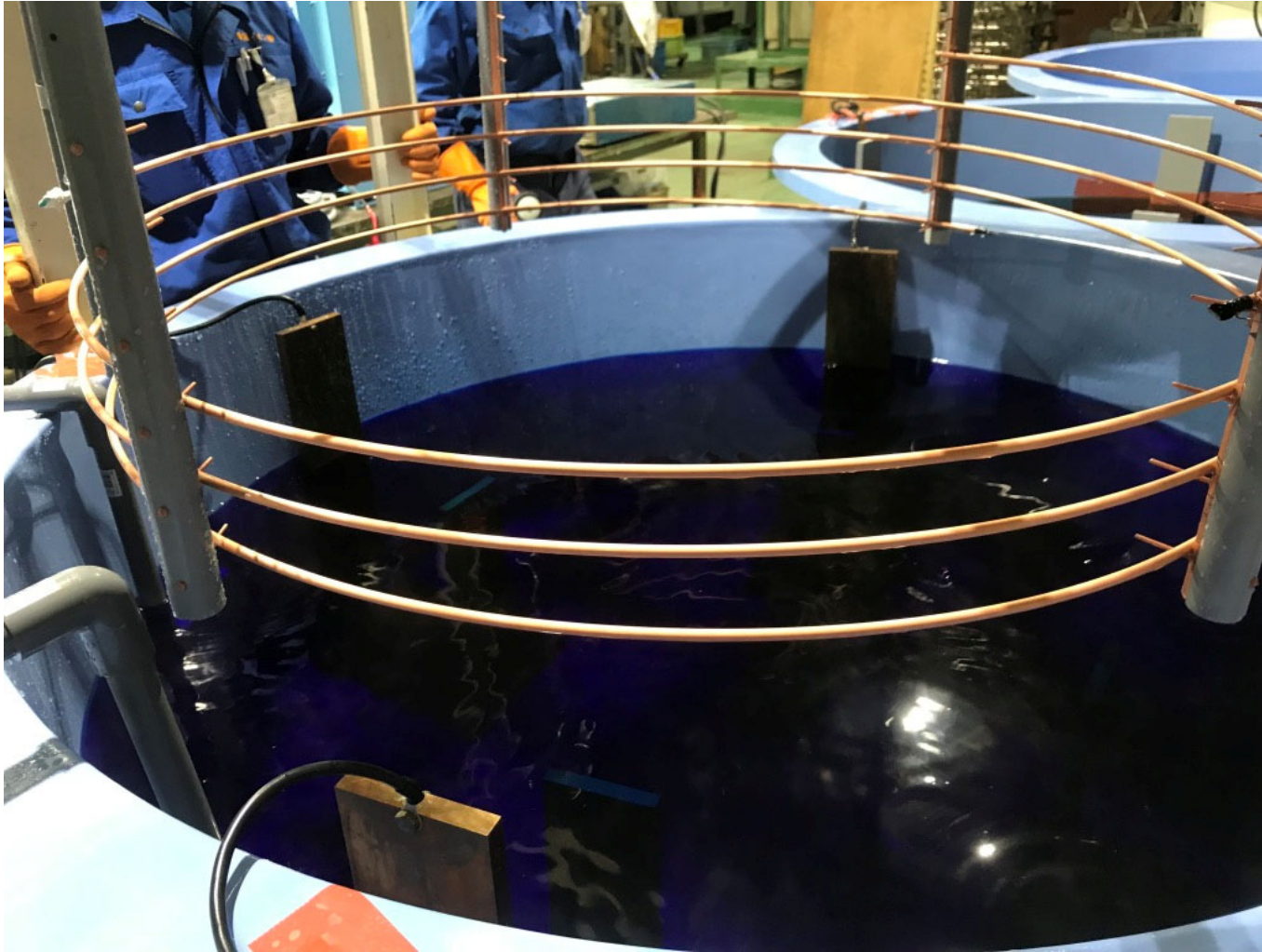
クレーンを使って回転めっき装置を移動させる



# MIケーブルのめっき時の様子



# MIケーブルのめっき時の様子



めっき直後

# MFC真空容器内機器を初輸送 [日本の計測装置として初]



ITER機構  
(フランス)  
へ輸送



JADA/QST那珂研出発

ITER機構での受入検査

- 開発しためっき技術は、ITER機構が要求する品質基準（ISO2819及びITER機構が独自に設定した真空技術に関するガイドライン[ITER Vacuum Handbook]）を満たしていることを認証試験によりを実証
- これにより、製作実施の許可があり、検出器を除く真空容器内機器（MIケーブル、排気管及びクランプ一式）の製作を完了
- **日本の計測装置の機器の初の輸送として、同機器を初めてITER機構に輸送。**
- **ITER機構に到着後、受入検査を実施し、合格。ITER機構の受け入れ完了。**  
(めっきの品質維持も確認された)

# 開発しためっき技術の他技術に対する優位性①

- 今回開発しためっき技術の優位性について、従来技術と比較し、装置のサイズ、コストおよび品質の観点から評価

帝国イオン(株)の調査結果

めっき方法	めっき装置		品質			総合評価
	サイズ	価格	めっき厚精度	歩留まり	部分的な厚めっき	
<b>3D回転めっき (今回開発)</b>	φ1200の処理槽 4つ必要で実施可能	約660万円	5 ± 1 mm以内	なし	マスキング法で 可能	<b>極めて 優位性が高い</b>
バッチ式 (回転なし)	φ1200の処理槽 4つ必要で実施可能	約500万円	5 ± 1 mm以内 に入らない	なし	マスキング法で 可能	価格は同等だが、 めっき精度・品質 面に問題あり
リール to リール (フープめっき)	搬送速度0.5m/min で試算すると、処理 槽だけで17m必要	約5000万円	5 ± 1 mm以内	巻き出し/巻き取 りで17m×2倍の 材料がロスにな る。	できない	コスト面で問題あ り

**従来方式はそれぞれの項目で、利点と欠点があるのに対し、  
今回開発しためっき技術は全ての項目に対して優位性を持っている**

### 現地でのめっき装置組み立てが可能

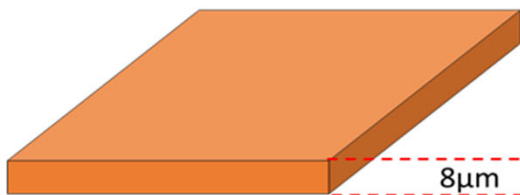
- 回転治具などの機器をキットとして持ち運び可能  
⇒ **どこでもめっきが可能**に
  - 被めっき材が持ち運びできない場合  
⇒ **めっき装置を現場に輸送して、めっきが可能**
  - 被めっき材の**輸送費削減**も期待
- **めっき作業の対象地は日本国内だけでなく世界各国に広げて市場を拡大することが可能**
  - **現在、新たにフランスでのMIケーブルめっきの実施に向け、技術検討、コスト評価等を実施中**

## 開発しためっき技術の波及効果

- 今回開発した新しいめっき技術は上述の核融合研究分野にとどまらず、高精度なめっきが要求される幅広い分野への波及させることが可能
  - 医療分野などで利用される粒子加速器の導波管、等
- 新たな分野のめっき技術にも適用 **実績有り**
  - 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を開発

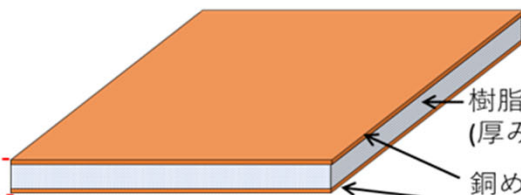
### 複合銅箔の概要

電解銅箔



8μm

複合銅箔

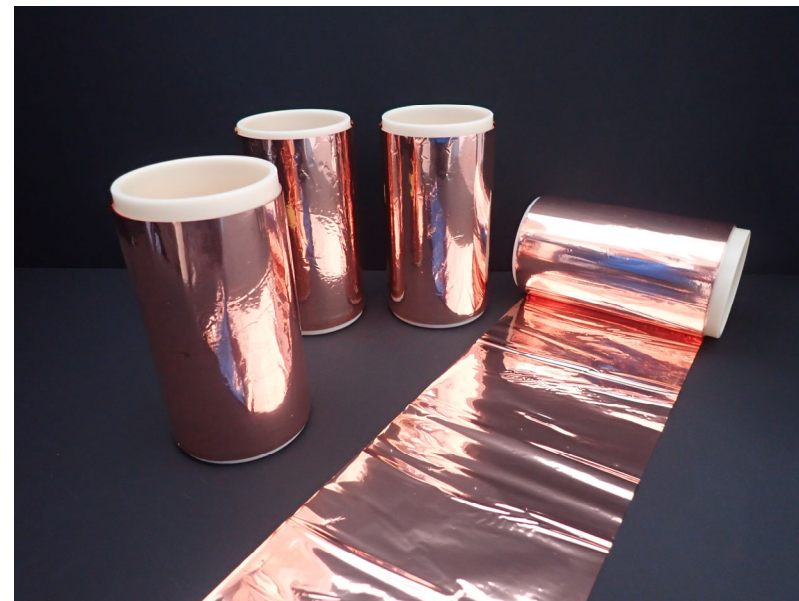


樹脂フィルム  
(厚み6μm)

銅めっき  
(膜厚1μm)

### 電解銅箔と比べて

**軽量 (1/2以下)、省資源 (銅使用量1/4)**



- ✓ 電化社会が進む中、蓄電池のエネルギー密度の向上と電池の急激な普及による**銅の枯渇に対応可能**
- ✓ これら課題をクリアできるので次世代電池開発に向けて期待できる

# 本技術に関する知的財産権

## ①国内特許

- 発明の名称 : めっき装置およびめっき方法
- 特許番号 : 第6893001号
- 出願人 : 帝国イオン(株)、(株)岡崎製作所、QST
- 発明者 : 平紙昌彦、石川正男、他

## ②米国特許

- 発明の名称 : LANTING APPARATUS, PLANTING METHOD, AND METHOD FOR PRODUCING WIRE ROD HAVING THE SURFACE PLATED
- 特許番号 : 12410536
- 出願人 : 帝国イオン(株)、(株)岡崎製作所、QST
- 発明者 : 平紙昌彦、石川正男、他

# ま と め

他社ではできなかった、**硬質線材に対する均一薄膜めっきを実現**するため、帝国イオンは、岡崎製作所および量子科学技術研究開発機構と共同で、技術開発に着手

✓ **新たな回転式の3Dめっき装置を開発**

✓ **高精度なめっきを可能にするめっき方法を開発**

- 電極間距離の偏りを最小化する手法（回転中心、陽極位置、回転速度を変動）
- 陰極と線材の接点条件を最適化
- 回転方式及び循環ポンプの採用でめっき液を効率的に均一化

➡ **ITERの要求を満たす高精度なめっき（ $5\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ ）を実現**

✓ **任意の場所に異なる厚さの均一めっき手法も併せて開発**

✓ **開発しためっき技術は経済的にも優位性を持つ**

- 低コスト（装置費 660万程度）、省スペース（F1200 x 4）
- 1 m ~ 数百mのどのような長さにも対応し、繰り返しのめっき作業が可能
- 小型、軽量のため、キットを持ち運び、どこでもめっきが可能に

✓ **蓄電池の負極材の軽量化という新たな波及効果も生み出した**

**ITERの機器の開発に貢献し、QSTの技術力を世界に示した**

# 産学連携の経歴

- 2019年-2021年 帝国イオン(株)、岡崎製作所(株)と共同開発実施
- 2021年 特許（第6893001号）取得
- 2022年 本技術を用いた実機を初納入
- 2025年 米国特許（No.12410536）取得
- 2026年 **機械振興賞 機械振興協会 会長賞受賞**

# お問い合わせ

## 量子科学技術研究開発機構（QST）

イノベーション戦略部 知的財産活用課

T E L 043-206-3027

e-mail [chizai@qst.go.jp](mailto:chizai@qst.go.jp)

紹介した技術につきまして、気になること  
ご質問などございましたらお気軽にご相談ください