

無機絶縁物を利用した硬質ケーブルの 均一薄膜めっき技術を開発

(Development of uniform and thin plating
for inflexible cables using mineral insulation materials)

～イーター計測装置のみならず

加速器など高周波環境下の幅広い分野への応用も期待～

(Hopes for applications not only for ITER diagnostic systems
but also for various fields of high-frequency environments such as accelerator)

発表者：帝国イオン株式会社



中村 孝司

無機絶縁物を利用した硬質ケーブルの 均一薄膜めっき技術を共同開発

(Co-development of uniform and thin plating
for inflexible cables using mineral insulation materials)



株式会社岡崎製作所
神戸岩岡工場 工場長
西川 豪人



帝国イオン株式会社
代表取締役社長
中村 孝司



国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
量子エネルギー部門
イータープロジェクト部 計測開発グループ
石川 正男



株式会社岡崎製作所 (Okazaki Manufacturing Company CO., LTD)



住所:神戸市中央区御幸通3-1-3
 設立年月日:1954年1月26日設立68年
 国内営業拠点:13拠点
 国内製造工場:6工場(神戸、福岡、東京)
 海外関連会社:3社(アメリカ、台湾、イギリス)
 グループ従業員数:800名(2022年1月現在)



熱電対・抵抗体
Temperature Sensors



MIケーブル
MI Cables



ヒータ
Electric Heaters



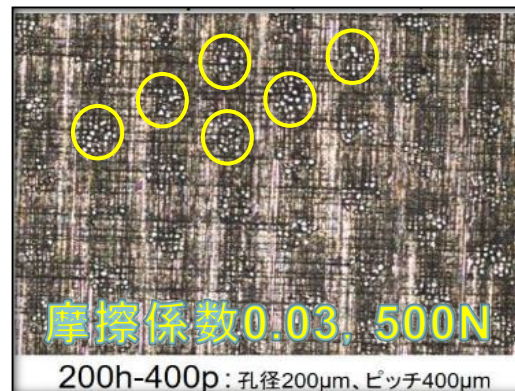
帝国イオン株式会社 (Teikoku-ion CO., LTD)



東大阪市 柏田西 1-12-26

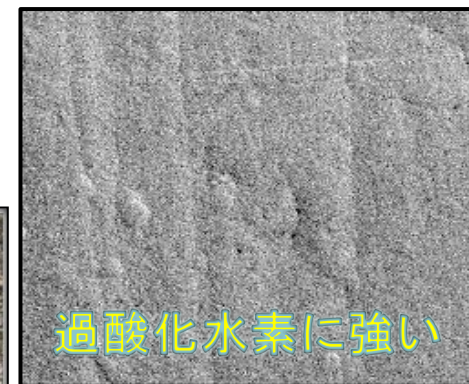
・ 独自のめっき皮膜

イオンダイヤ



摩擦係数0.03, 500N

200h-400p : 孔径200μm、ピッチ400μm



過酸化水素に強い

イオンハードCr



一般機械部品・建機機械部品



試作の評価がすぐできる。

MIケーブルのめっきの課題と 回転めっき方法

(Issues of plating for MI cables and
rotating method of plating)

発表者：帝国イオン株式会社



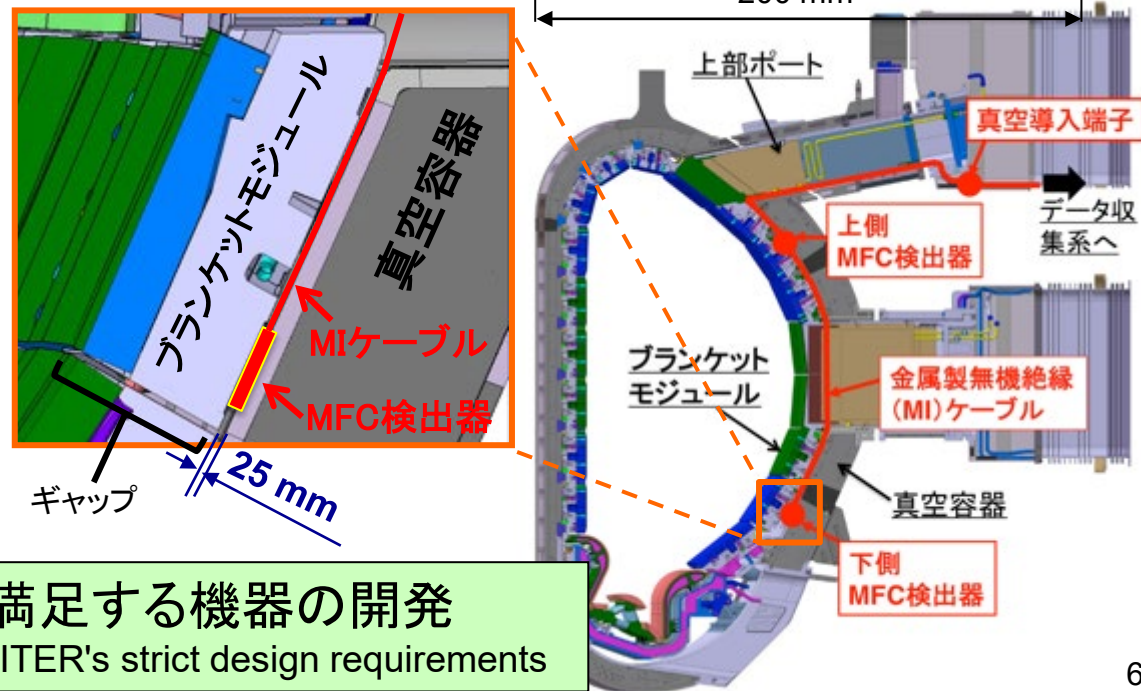
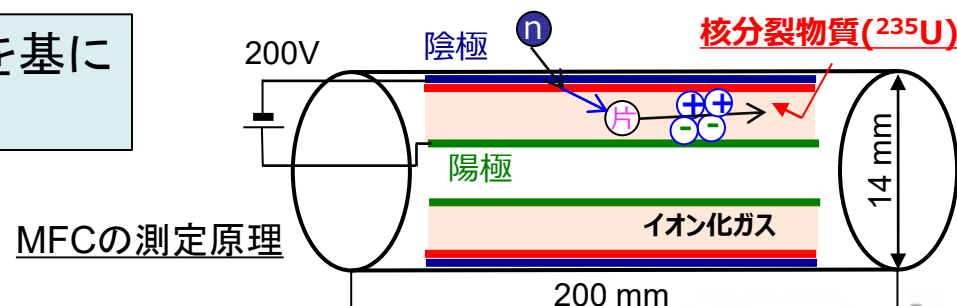
中村 孝司

イーター用マイクロフィッションチェンバー(MFC)の開発の目的 (Objectives for the development of Microfission Chamber (MFC) for ITER)

日本は、真空容器内に設置する中性子計測システムである
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 ⁻⁹ Pa m ³ /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する機器の開発

[Objectives] Development of components that satisfy ITER's strict design requirements

(Issues involving research and development of MFC for ITER)

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 (~ 350°C)、高放射線 (~ 10^{13} n/cm²/s [中性子束]) 環境下で稼働

⇒ 無機絶縁物を利用したケーブル [MI (Mineral Insulated) ケーブル]
直径: 6.6 mm、表面の皮膜材質: ステンレス

➡ 適用性、設置性について、解析や試験を通じて実証

イーターでは、高温プラズマを維持させるため、加熱用マイクロ波を入射

- ディスラプション(高温プラズマが急速に消滅する現象)に耐える

↳ MIケーブルに流れる電流(誘起電流)と強い磁場により、大きな電磁力が働く

- プラズマ加熱用のマイクロ波の一部がMIケーブルを過熱 (最悪 ~ 1000°Cまで上昇)
(Overheating of MI cables by microwaves for plasma heating (increase ~ 1000°C at worst))

↳ MIケーブルの変形、破損の恐れ (Fear of deformation or breaking of MI cables)

マイクロ波: 金属表面のみに高周波電流が流れ加熱

誘起電流: 金属全体に流れる

【対策 (Measure)】

MIケーブルのステンレス鋼表面に表皮厚み程度 (約5ミクロン) の銅めっき
(Copper plating of film-level thickness (approx. 5 μm) on the stainless steel surface of MI cable)

- マイクロ波の反射効果により過熱を約1/8に低減
- 誘起電流の上昇は20%程度のみ抑制

MIケーブルの均一なめっきにおける課題

(Issues involving uniform plating for MI cables)

ITERの要求

イーター用MFCのMIケーブルに均一 ($5\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$) なめっきを施す
MIケーブル指定箇所だけに $100\mu\text{m}$ 以上のめっきを施す

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)

- ✓ 線材をリールに巻き、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

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

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

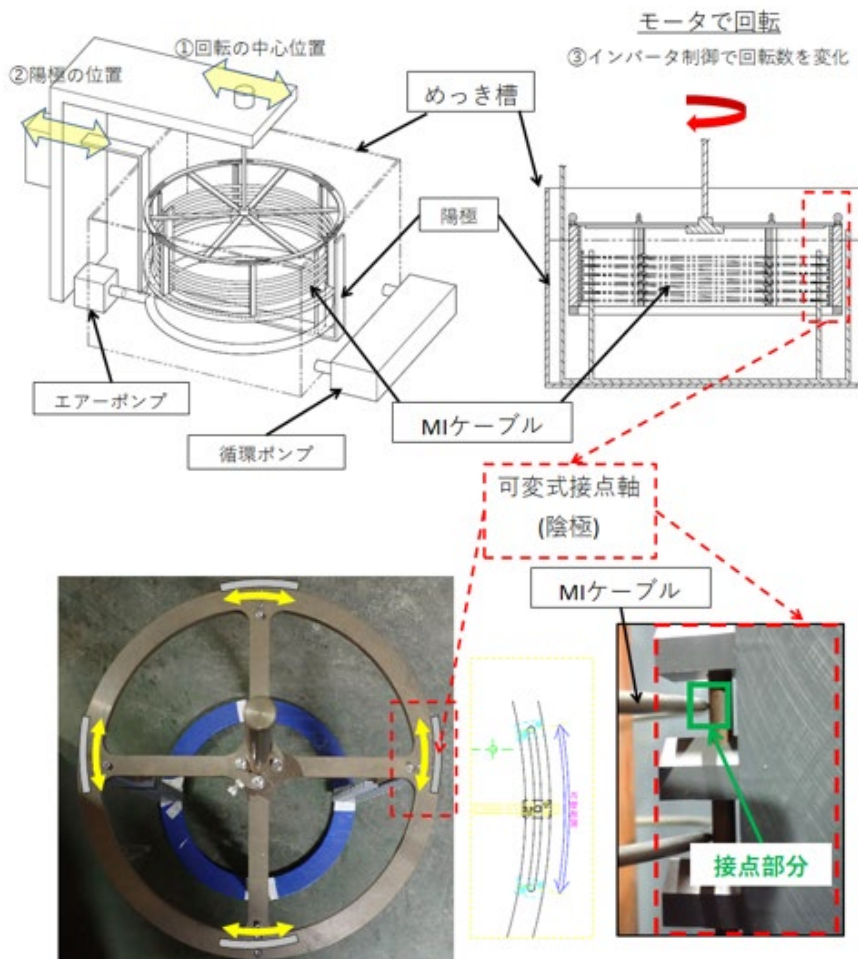
電極の設置方法により、線材に対し、薄膜の膜厚の均一性に関して課題

従来のめっき法では、MIケーブルのような非常に硬い線材に対し、均一な厚さのめっきはできなかった
また、指定箇所のみ厚めっきも課題

(The existing plating methods are not capable of plating hard wire rods such as MI cables with even thickness and has issues with increasing thickness at specified area.)

- ✓ 帝国イオン(株)の発案と、(株)岡崎製作所の技術支援により新たな回転式のめっき装置を開発
(The new rotating equipment for plating was developed with the ideas of Teikoku-ion and the technical support of Okazaki Manufacturing Company)

概要図



硬いMIケーブルへのめっきが可能

- 保管・輸送時と同じ輪巻き形状 (同じ曲率) でMIケーブルへのめっきが可能
- 小型化を実現 (リールtoリールめっきは 10 m以上の長さ)
- 螺旋状に巻くため、1 mからどのような長さでも、めっきを実施することが可能

均一なめつきを実現するための多様な機能

- 回転方式、給電方法、極間距離の差異抑制方式を最適化することで、めっき時に電極と線材にかかる電圧を一定にできる

指定箇所だけ厚めっきするマスキング法

- マスキング治具と電導率を最適化することで、線材指定箇所のみ厚めっきが可能

従来のめっき法では、解決できなかった課題を克服
(Overcoming issues that could not be solved with the existing plating methods)

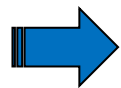
高精度なめっきを実現するためのめっき方法の開発 (Development of plating method to achieve high-accuracy plating)

- ◆ めっき厚を均一 → 析出速度を一定 → 電極間距離の偏りをなくす



新たに開発しためっき装置を用いて以下のパラメータを同時に変化させる

- ① 回転の中心位置、② 陽極の位置、③ 回転速度

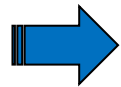


線材の全長にわたりめっきの析出速度の均一化を実現

(Achieved the even deposition speed of plating throughout the whole length of the wire rod)

- ◆ 全域に高精度なめっき → 電極との接点部分の膜厚が他の箇所より薄くなることが課題

- めっき治具の外周部に接点位置を円周方向に往復移動させる機構
- 陰極とケーブルの接点を点接触にさせ、接点面積を極小化
- 接点を移動させる工程をめっき液中で実現

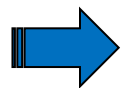


均一な膜厚を実現する陰極と線材の接点条件の最適化に成功

(Successfully optimized the conditions for the contact point between the negative electrode and wire rods to achieve uniform thickness)

- ◆ 指定箇所に100μm以上のめっき → 指定箇所だけめっきをすることが課題

めっき液中で行えるマスキング治具と電導率の最適化方法を開発して実現



線材の指定箇所に100μm以上のめっきをすることに成功

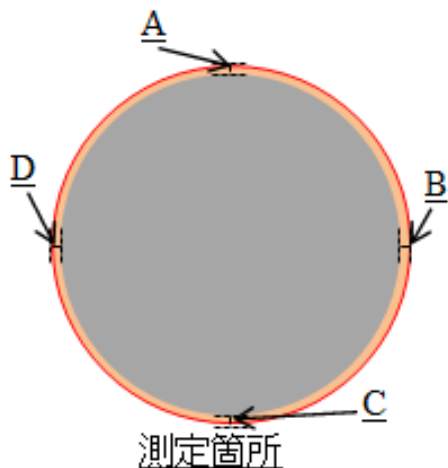
(Achieved the plating thickness of over 100 μm at the specified area of wire rod)

新たに開発しためっき装置およびめっき方法を適用して、ITERの要求を満足する高精度、高品質のめっきを実現

(Applied the newly-developed plating equipment and method to achieve the high-accuracy and high-quality plating required by ITER)

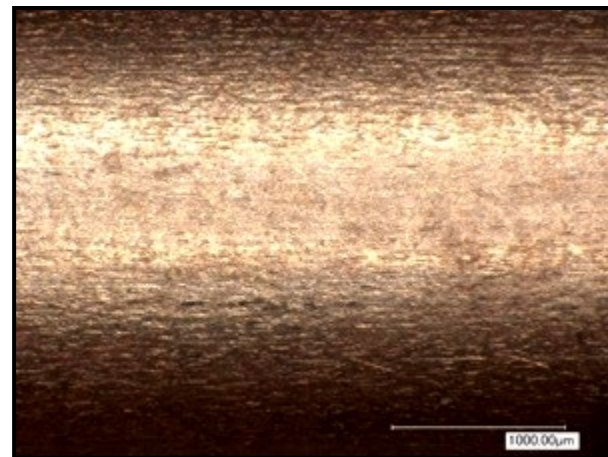


要求値 4 ~ 6 μm



測定箇所	銅めっき膜厚 (μm)
A	4.668
B	4.808
C	5.047
D	5.187
膜厚差	0.519

めっき後のMIケーブルの銅めっき膜厚



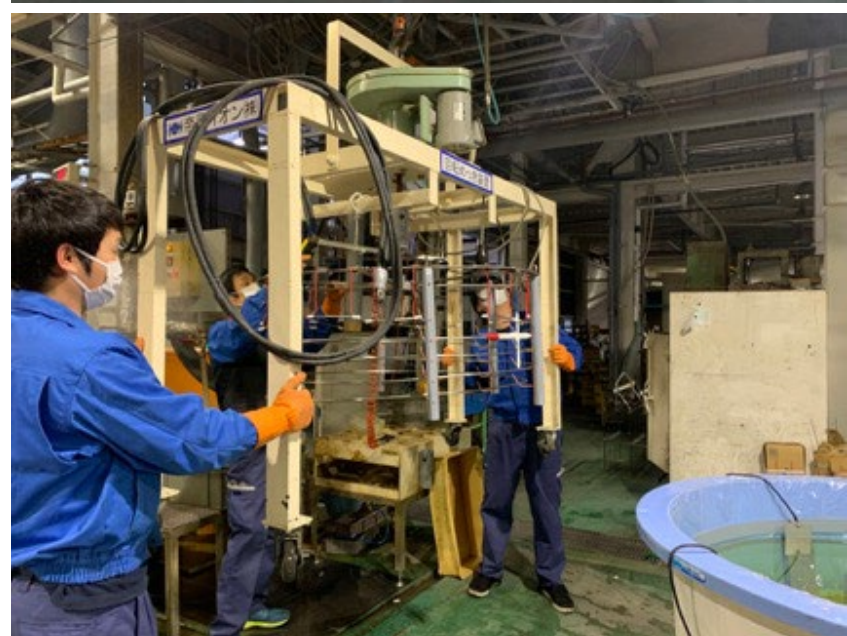
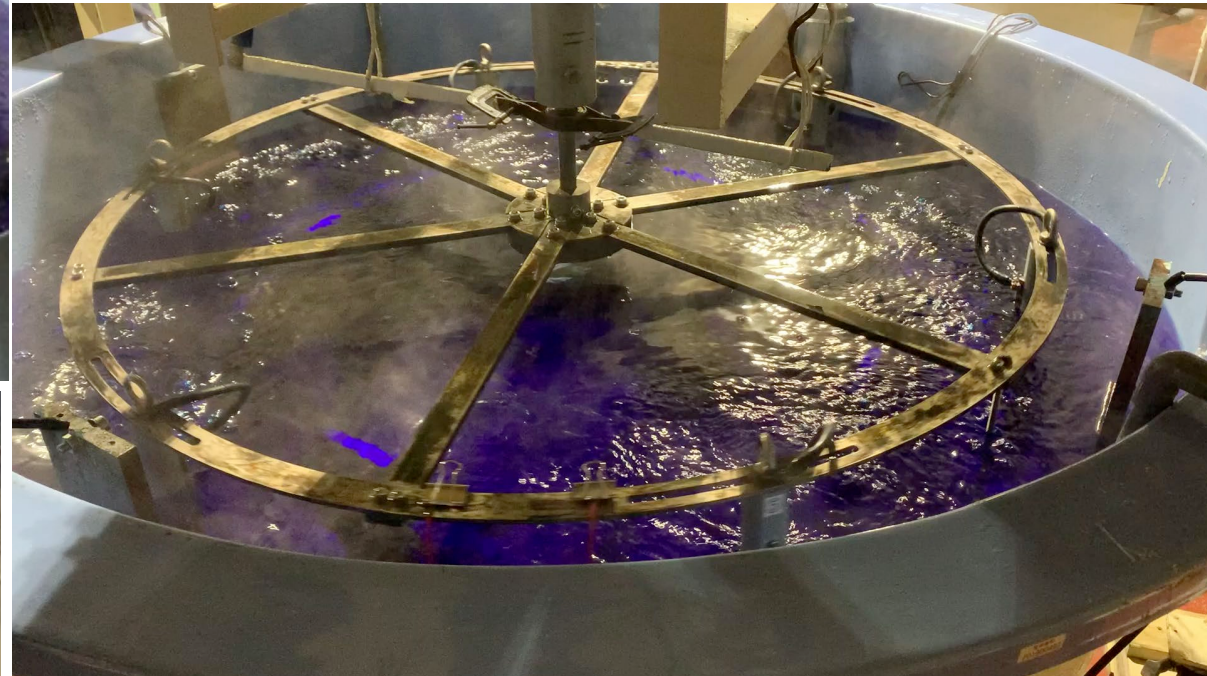
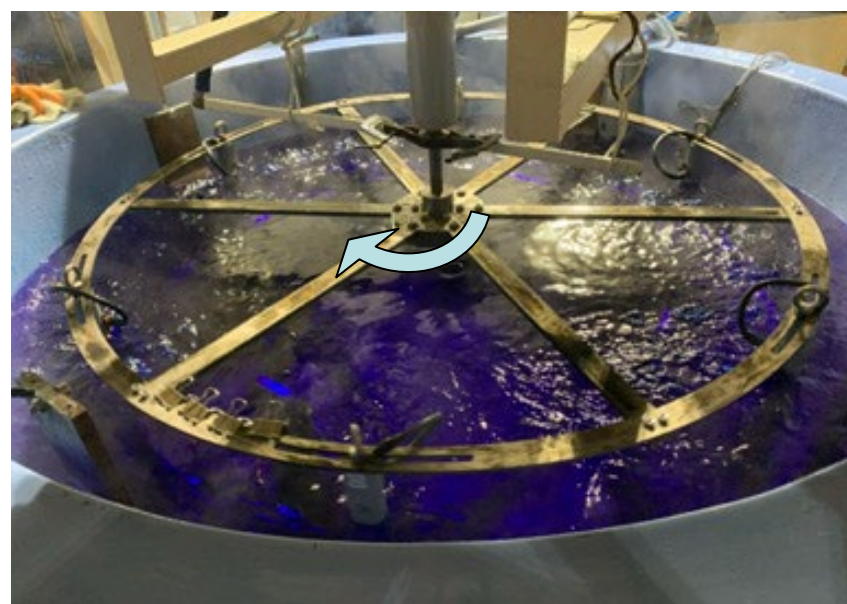
銅めっき後のMIケーブルの表面拡大写真

特許を取得 (Patented)

- ✓ 「めっき装置及びめっき方法」(特許第6893001号), 帝国イオン、岡崎製作所、量研機構
- ✓ PCT出願による海外特許の取得も進めている(PCT/JP2021/029413)

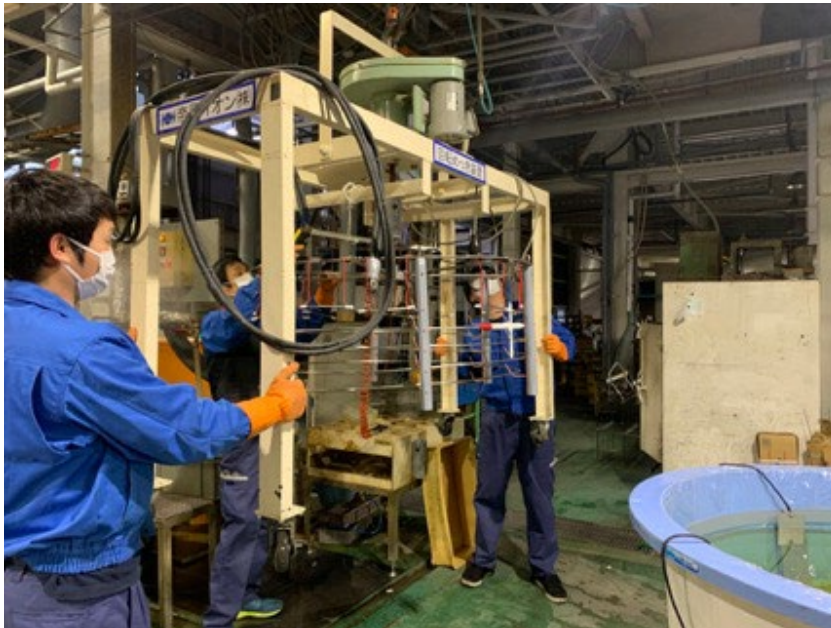
ITER用MIケーブル実機の銅めっき作業

(Copper plating of the actual MI cable for ITER)

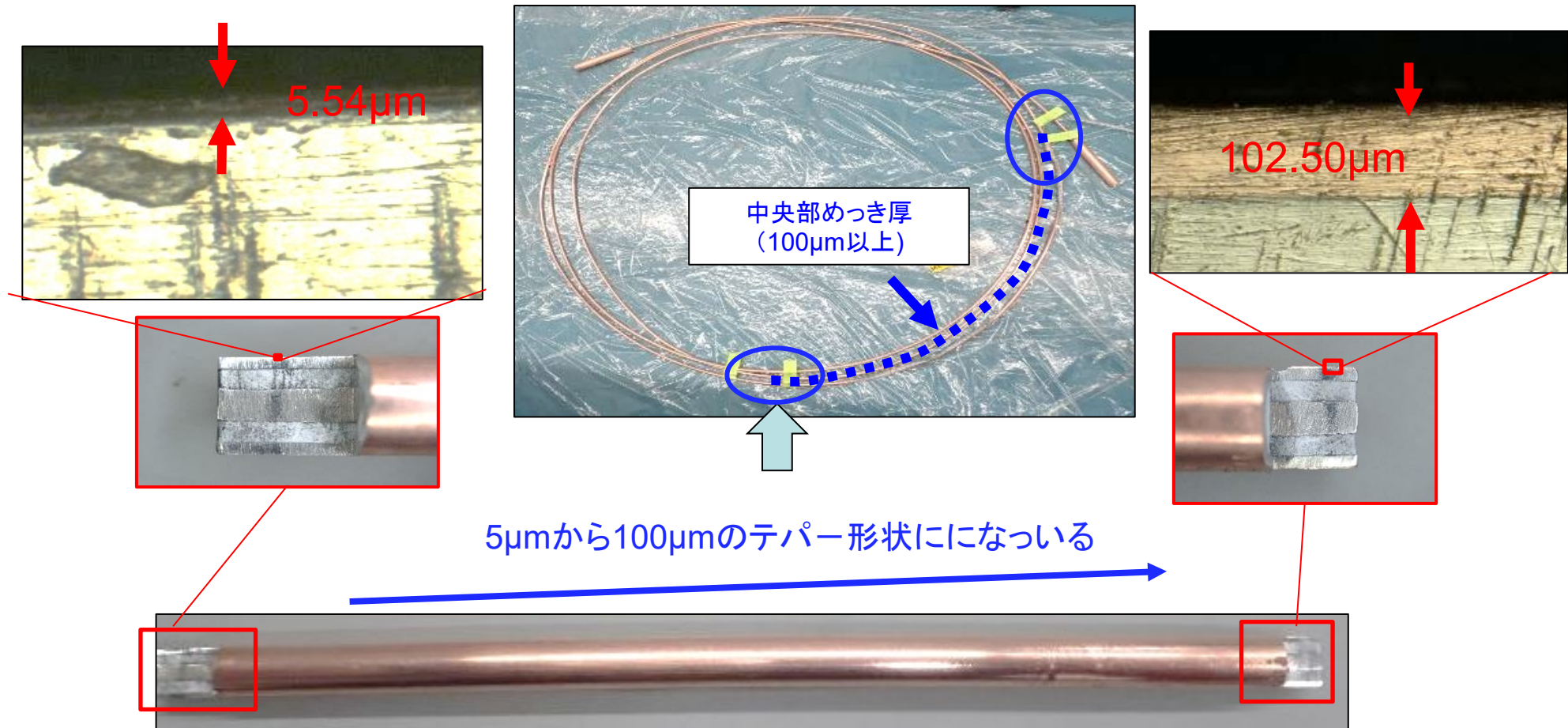


ITER用MIケーブル実機の銅めっき作業

(Copper plating of the actual MI cable for ITER)



- ・めっき液中で行えるマスキング治具と電導率の最適化方法を開発して、イーターへの設置条件を満たすための追加要求である、**中央部指定箇所だけに異なる厚さ(100 μm 以上)のめっきを実現**



ITER真空容器内の新たな熱負荷(加熱用マイクロ波)に対応するため、量研は、帝国イオン、岡崎製作所と共同で、MIケーブルのような硬い線材に対する高精度めっきの技術開発に着手

- ✓ **新たな回転式のめっき装置を開発**
(Developed the new plating equipment that rotate)
- ✓ **高精度なめっきを可能にするめっき方法を開発**
(Developed the plating method that enables high-accuracy plating)
 - 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
- ✓ **指定箇所に異なる厚さ(100 μm)のめっきを可能にするマスキング治具を開発**
(Developed the masking jig that enables plating with different thickness (100 μm) at the specified area.)



ITERの要求を満たす高精度なめっきを実現
(Achieved the high-accuracy plating required by ITER)

特許を取得

- ✓ 「めっき装置及びめっき方法」(特許第6893001号)
- ✓ PCT出願による海外特許の取得も進めている(PCT/JP2021/029413)

ITER用MIケーブル実機へめっきを実施

- ✓ 本年3月までにITER用MIケーブル8本、排気管4本のめっきを完了
- ✓ **本年7月、日本の計測装置、初の機器としてITER機構で受入合格**

- 16

最後に

今回、MIケーブルへの銅めっき技術開発に
参加させて頂きましたことに
感謝を申し上げます。

(Thank you for having us in the development of
copper plating technology for MI cables.)

ご清聴ありがとうございました。