

1. 第30回 ITER 理事会が開催

2022年6月15日,16日にITER理事会は第30回会合 を開催し,ITER計画の最新の進捗報告の評価を行った. プロジェクトは,ITER機構(IO)と国内機関(DAs)に よる機器の納入,現地での据付・組立活動の成功のため の最善の努力を反映し,着実な進捗を維持している.

ITER 理事会では、以下についての報告・議論が行われた.

- 理事会は、前機構長ベルナール・ビゴ氏の悲しく早す ぎる逝去を悼んだ.理事会は、新たな機構長ができる 限り早く着任することを期待し、後継者を選定するプ ロセスを始めている.理事会は、暫定的に機構長に任 命された多田栄介博士を含む ITER の上級管理職と、 IO-DA による一つの ITER チームに対し、この挑戦的 な移行期間における堅固な実績と協力を称賛した。
- 理事会は、技術的挑戦と感染拡大の影響を考慮しつつ、2021年11月の理事会の要請に則ってIOから示された、プロジェクトの進捗を維持するための緩和策に重点が置かれたプロジェクトベースラインの見直しに留意した.理事会は、IOに対し、2023年の理事会での承認を目指し、国内機関と緊密に連携して見直しを一層発展させることを要請した.
- 2022年1月,フランスの規制当局である原子力安全局 (ASN)は ITER 設計の承認後の 2013年に設定された 規制の一つである「ホールドポイント」を解除しなかっ た.理事会は,ASNの関心に応えるために追加の情報 提供を行う IOの努力に留意し、本件の進捗を緊密に 報告するよう IO に要請した.
- 理事会は,主要機器の継続された納入と装置組立の進 捗を含む,2021年11月の前回の理事会以降の重要な プロジェクトの成果を感謝しつつ留意した.
 - ▶最初の真空容器セクターの部分組立は、対応する 二つの超伝導トロイダル磁場(TF)コイルと熱遮 蔽部品の組み込みが完了し、トカマクピットに据 付けられた.また、3番目の真空容器セクターが ITERサイトに納入された.
 - ▶ クライオスタット上蓋が完成し、クライオスタットの全ての部品製作が完了した。
 - ➤ 超伝導磁石について、ポロイダル磁場コイルは6 個中3個、トロイダル磁場コイルは18個中13個、 中心ソレノイドモジュールは6個中2個が納入され、さらに追加のコイルが完成し出荷準備が完了 している.また、底部補正コイルは全て据付られた.
 - ➤プラントシステムにおいて大きな進捗があった. 冷却システムが試運転に移行した.冷凍プラントの建設が完了し,現在機能試験が行われている. 磁場電力変換建屋では初プラズマに必要な 100%

<u>ITERだより (95)</u>

の機器が据付けられた.

2. ITERダイバータ赤外サーモグラフィのための 加熱中タングステンの微細かつ動的な放射率変 化に関する研究

量子科学技術研究開発機構(以下,量研)では,日本 が調達を担当するITERダイバータ赤外サーモグラフィの 研究開発を行っている.サーモグラフィにより高精度な 温度計測を行うには,計測温度範囲にわたって変化する ダイバータ放射率の温度特性の理解が不可欠であるた め,これまで量研では観測波長である1.5µm-4.5µmの 波長範囲を対象に200℃から1900℃のタングステン放射 率の温度特性の詳細調査を実施してきた.しかし,この 先行研究からは,約700℃から1700℃の温度区間におい てはタングステンの放射率は再現性がないだけでなく, 温度ヒステリシスを有することが明らかになり,上記温 度区間での温度計測精度要求(10%)の実現が難しいと いう課題が浮き彫りとなっていた.

今回は、この課題を克服し高精度な温度計測を実現す るため、上記のタングステン放射率の非再現性と温度ヒ ステリシスの原因の調査を行った.ここでは、「放射率の 非再現性と温度ヒステリシスはタングステンの再結晶過 程に伴う結晶構造の変化に起因する」という仮説を立て、 100 µm 以下の高空間分解能を有する赤外計測系を開発 し、昇温中のタングステン放射率の空間分布の計測を 行った.図1(a) は波長 4.56 µm における昇温中のタング ステン試料表面の放射率、(b)は各温度の放射率の空間分 布を示している.

今回の試験からタングステンの放射率は先行研究と同 様に700℃から800℃にかけて急激にRampupし,1200℃ から1600℃にかけてRamp down するまでの温度区間で大 きな温度ヒステリシスを有すること(図1(a)),またこ の温度区間において試料表面の放射率はマイクロスケー ルでダイナミックに変化することが明らかになった(図 1(b)). さらに, 図1のケースとは異なる昇温パターンと して, 放射率の Ramp down の途中(1400℃程度)で昇温 を停止した試料表面のSEM及びレーザー顕微鏡等による 表面分析から, 試料表面の放射率が高いエリアでは厚み 20 nm程度のマイクロポーラス状の構造が成長しており, 放射率が低いエリアとでは明瞭な表面構造の違いが存在 することが明らかになった(図1(c)(d)).このことから, 昇温中の700℃から800℃にかけての放射率のRamp upは タングステン表面上のマイクロ・ナノスケールの表面構 造変化に起因するものであること,1200℃から1600℃に かけての放射率の Ramp down はその構造が Annealing さ れて消滅する様子であることを世界で初めて明らかにし た.

このような放射率のヒステリシス,非再現性は温度計 測において不都合な事実であるためこれまでその存在に



図 1 (a) 昇温中のタングステン試料表面の放射率(波長: 4.56 µm), (b) 赤外計測系により撮影した各温度のタング ステン表面の放射率の空間分布, (c) 昇温中タングステン表面の放射率の空間分布((a)(b)とは異なる昇温サイク ル) と高温後の SEM 像(43 倍), (d) 放射率が高いエリアの SEM 像(5000 倍).

光が当てられることはなかったが、赤外サーモグラフィ によるタングステンの温度計測における最重要課題であ るといえる、今後はこれまで得られた知見をもとにこれ までの実験結果を説明しうる新しい放射率モデルの開発 を行い、より高精度な温度計測を目指す、

3. 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

量研では、ITER マイクロフィッションチェンバー (MFC)の開発を行っている.この度,量研は,帝国イオ ン株式会社(以下「帝国イオン」という.)及び株式会 社岡崎製作所(以下「岡崎製作所」という.)と共同で, MFCの構成機器である真空容器内に設置する無機絶縁 (以下「MI」という.)ケーブルに対して必要となる,均 ーかつ高精度で,薄膜を実現するめっき技術の開発に成 功した.

[開発の背景]

MFCは, ITERの核融合反応時に発生する中性子の発生 量を計測し,核融合出力を評価する重要な中性子計測装 置である.その大きな特徴は,小型のフィッションチェン バー検出器(核分裂計数管)をITER 真空容器内に設置す ることである.核融合反応を起こす燃焼プラズマに近い位 置に設置することで高精度の中性子計測が可能となる. 一方,真空容器内は 350℃という高温(MIケーブルの ITER運転時の最高到達温度)で且つ高い放射線線量にさ らされるだけでなく,ディスラプションにより発生する強 い電磁力など厳しい環境下にあるため,真空容器内に設 置する機器は当該環境に耐える必要がある.このため,信 号ケーブルとして,耐放射線性に優れ,高温環境下(約 350℃まで)でも利用できるMIケーブルを採用すべく,電 磁力に耐えられるかなど,その適用性について,これまで 解析や試験を通じて実証してきた. これに対し,設計活動が進むにつれ,MFCのような真空 容器内機器は新たな熱負荷環境に対応する必要があるこ とが判明した.すなわちプラズマを加熱するために入射す るマイクロ波の一部が真空容器自体や真空容器内機器を 過熱する可能性があることが判明し,この場合,MIケーブ ルも過熱され健全性が保てる温度(約350℃)を超え, 1000℃近くまで上昇し破損する恐れが生じた.

この問題を解決する方法の一つは、マイクロ波の過熱 を低減できる銅めっきを MI ケーブルに施すことだが、 めっき厚が厚くなると、今度は電磁力の影響を受けやすく なるということが課題であった.このため ITER では、銅 をMIケーブルに表面全長にわたって精度よく均一に薄膜 (5ミクロン±1ミクロン)めっきすることが求められた たが、MFCのMIケーブルのような比較的硬い線材に均一 にめっきするという技術は、これまで存在していなかった.

[薄膜めっき技術の開発]

そこで、量研は、高いめっき技術を有する帝国イオン及 び MI ケーブルの製作メーカーである岡崎製作所と共同 で、新たなめっき技術の開発に着手し、図2に示すような 「回転式めっき装置」を開発した.この装置を使用するこ とにより、保管・輸送時と同じ輪巻き形状(同じ曲率)で MIケーブルのめっきを施すことができるため、形状を変 える必要がなく、同時に、めっき槽の小型化も実現してい る.また、当該装置を採用することにより、MIケーブルを 螺旋状に巻く方式を採用できるため、1メートル程度から どのような長さのMIケーブルでも、めっきを施すことが 可能なった.さらに、回転方式、給電方法、極間距離の差異 抑制方式、めっき液循環方式等に独自の工夫を取り入れ 新たに開発した「めっき方法」を組み合わせることによ り、MIケーブルの円周方向、及び全長にわたって偏りがな く、均一なめっきを施すことに成功した.

量研,帝国イオン及び岡崎製作所が開発した「回転式



図2 新たに開発した「回転式ケーブル用めっき装置」の概略.



図3 実機相当のMIケーブルを用ITER実証試験時の様子.

めっき装置」および「めっき方法」を用いて行った均一 化めっきの実証試験時の写真を図3に、めっき膜厚の測 定結果を図4に示す.図4の左側はケーブル断面の模式 図であり、A~Dは膜厚測定箇所である.右側の表は各測 定箇所のめっき膜厚の結果を示したものである.A~D のいずれの箇所でも膜厚は5ミクロン±1ミクロンの範 囲に収まっており、ITERの要求値を満たす高精度銅めっ きを実現することに成功した.外観においても、めっき中 にケーブルを動かし、めっき液を攪拌することで、めっき 液が均一となり、図5のようにボイド等の欠陥がない高 品質な銅めっきを実現した.

[実機への適用]

今回開発しためっき技術を適用することにより,量研は,2022年度にITER機構に納入するマイクロフィッショ ンチェンバー計測装置のMIケーブルの実機8本及びス



図4 めっき後の M ケーブルの銅めっき膜厚.



図5 銅めっき後の M ケーブルの表面拡大写真.

テンレス製の排気管4本の銅めっきを2022年3月に実施した.実施後の工場検査において,膜厚検査,表面検査 等全ての検査項目に合格し,MIケーブル及び排気管の一 連の製作活動が完了した.そして,計画通り,量研がITER 機構に輸送する最初の計測装置構成機器として,2022年 7月末までに本機器の納入が完了した.

[特許の取得]

今回,新たにめっき装置及びめっき方法を開発したこ とにより,これまで不可能とされていた,硬い線材に対し, 全長にわたって高精度(膜厚が均一)かつ高品質(ボイ ドなどの欠陥のない綺麗な表面状態)なめっきを施すこ とが可能となった.本技術は,医療分野などで利用される 粒子加速器の入射部品など,高精度のめっき厚が要求さ れる分野にも適用可能であり,幅広い分野への波及効果 が期待できる.そこで,量研は,帝国イオン及び岡崎製作 所とともに,同技術に対する特許出願を行い,2021年6 月に特許を取得した(特許第 6893001 号).さらに,現在, 海外特許の取得に向けて,手続きを進めているところで ある.

[プレス発表] 量研プレスリリース (5/27) 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 ~ITER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~ https://www.qst.go.jp/site/press/20220527-1.html [新聞記事] 日本経済新聞(5/27)国際核融合炉向けにメッキ技術 帝国イオンなど開発 https://www.nikkei.com/article/ DGXZQOUF247XA0U2A520C2000000/

ITER向け中性子計測装置マイクロフィッショ ンチェンバー(MFC)真空容器内機器の出荷及び ITER 機構での受入れ検査完了

量研では、ITER マイクロフィッションチェンバー (MFC)の開発を行っている.このうち,真空容器に設 置する金属製の信号ケーブルである無機絶縁(MI)ケー ブル,MFC検出器に封入されたイオン化ガス漏洩時の 検知及び排気のための排気管,そして,MIケーブルと排 気管を真空容器に固定するためのクランプの製作を 2022年3月までに完成させ,これらの真空容器内機器を ITER機構に向けて出荷した.

これまでに,量研では ITER の設置及び運転条件に適 用可能とするための真空容器内機器の設計及び開発を 進め,最終設計を完了させた後,真空容器内機器の製作 を行った.MIケーブルの製作と加工はキヤノン電子管デ バイス(株)が担当した.さらに,ITER 真空容器内に MI ケーブル及び排気管を設置するためには,均一薄膜の銅 めっきを施す必要があり,帝国イオン及び岡崎製作所が, 量研と共同で取得した特許技術を活かして,これを実施 した.また,クランプは株式会社トヤマが製作加工を担 当した.

製作が完了した MFC 真空容器内機器は,一旦量研に 納品された後,梱包を行い,7月1日に那珂研から出荷 した(図6).その後,輸送会社により海外輸送に向けて 再梱包後した後,成田空港から出航し,7月20日に ITER 機構に納品された.ITER 機構では,7月25日に開梱後,



図6 量研出荷時の MFC 真空容器内機器.



図7 M ケーブルの目視検査.



図8 クランプの員数検査.

受入担当職員による受入検査が実施された.受入検査で は、量研のMFC担当者立会いの下、目視検査及び員数 検査が実施された.目視検査では特にMIケーブル及び 排気管の銅めっきの状態が確認され(図7)、員数検査で はクランプの構成部品に与えられた識別番号が量研出荷 時に添付したラベルとITER機構が用意したラベルとで 一致しているかどうかの入念な検査が行われた(図8). その結果,全ての構成部品に対する確認が取れ、7月29 日までに受入検査に無事に合格した.これにより、日本 が担当するITER計測装置としての初の機器の輸送が完 了し、重要なマイルストーンの一つを達成した.

(量子科学技術研究開発機構 量子エネルギー部門)