

ITER TFコイル開発から学んだこと,そして原型炉への展望

4) ITER-TFコイル構造物の製作と一体化

Lessons learned from ITER TF coil development and load to DEMO

4) Manufacturing and Integration of ITER TF coil case

藤原 英弘

Eiko Fujiwara

三菱重工業株式会社

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd (MHI)

1. はじめに

三菱重工業は、ITER 向けの TF コイルの初号機を 2020 年 1 月, 2 号機目を同年 3 月, 3 号機目を同年 11 月, そして 4 号機目を 2021 年 5 月に出荷し, TF コイルの製品に至る一連のプロセスを確立した. 既存技術の応用, 創意工夫, 最新技術を用いて厳しい ITER の要求仕様に適合する製品を作り上げた.

一方, 原型炉では ITER の約 2 倍の規模となることが予想されコストを意識して合理性を織り込んだ設計, また長期的な計画となるため, ITER TF コイルでの経験の伝承と更なる技術向上が必要となる.

本稿では, ITER TF コイルの構造物及び一体化において製作に要求された技術仕様の内容と解決のために用いた技術を紹介し, 製作手順並びに適用技術の採用に至るのに苦労した, また, 難易度が高かった点に触れる. その上で, 原型炉に向けた課題を考える.

2. ITER TFコイルの仕様と採用技術

TF コイルの磁場の許容誤差は数 Gauss であり, TF コイルが 10 m 超の溶接構造物であるに対して, 1 mm オーダーの寸法精度が要求される. この要求を満たすため, 溶接入熱が小さい電子ビーム溶接や狭開先 TIG 溶接, レーザ溶接を採用し, 溶接変形を抑える施工を実現した. 大型構造物の機械加工では, 高精度で機械加工を行うために, 温度を一定に保ち大型複合工作機で加工した. また, 複雑曲面で構成される構造体であるので, 専用の特殊工具を作成して精度を保つと共に加工スピードの高速化を実現した. 今回の施工条件を確証するために, 事前に小規模試験体による要素試験, 実規模大モックアップによる溶接, 加工プロセスの検証/実証を行った.

図 1 に製作に適用した代表的な技術を示す.



図 1 ITER TF 製作で苦労した製造技術の代表例

- 1) RP (ラジアルプレート) は, 素材の約 80% を切削し, くし形の形状に仕上げるため歪を低減する加工を採用した. 特に, サイド RP は非対称な断面のため, 加工時の変形を考慮し複数回の反転を実施し加工した.
- 2) カバープレートの溶接は, 要求である溶け込み 2mm を維持できる自動レーザ溶接機を採用して溶接手順を適正化し, 要求される平行度を実現した.
- 3) 構造物内面に取り付ける冷却管は, HIP (熱間等方圧加圧) により SUS 配管と銅との異材接合により製作して構造物の溝に挿入し, 配管と溝の間に 4mm の Ni プレートを設置しレーザ溶接にて固定した.
- 4) 巻線部 (WP) 完成後の構造物と WP との一体化は, はじめに WP をコイル構造物 AU に設置し BU で覆い, 約 10m の溶接構造物 AU と BU の溶接開先の合わせ精度 $\pm 0.5\text{mm}$ で作業を行った. また, WP とコイル構造物の間の絶縁材注入隙間 4mm は溶接中の変形を監視して溶接順序を入れ替えながら, BU の頂部の倒れ変形量が所定の値 (3mm 以下) となるように溶接を行った. また, 最終機械加工で加工余肉が偏ら

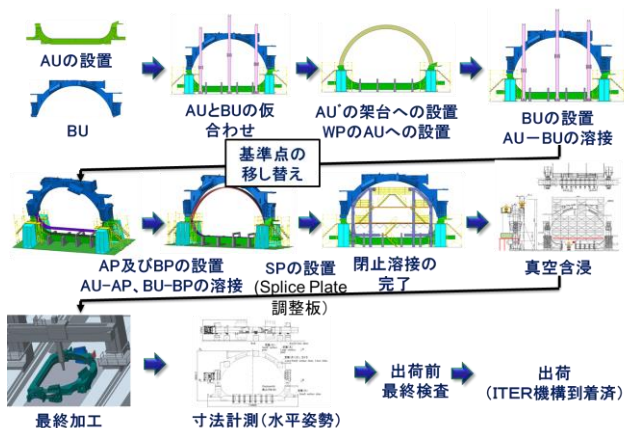


図2 一体化フロー

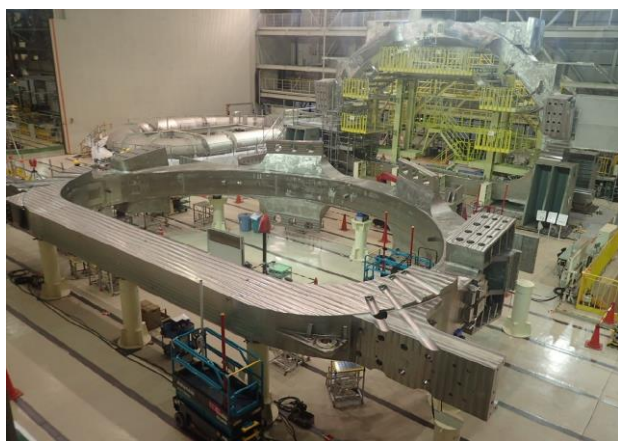


写真1 ITER TF製作 製品写真

ないように変形を抑えた。TFコイル最終形状で、電流中心位置 (Current Center line: CCL) と製品のCCLとのズレは要求値 $\phi 2.6\text{mm}$ を満足させた。図2に、一体化フローを示す。

一体化溶接は、溶接歪でTFコイルが公差から一旦逸脱すると補正が一切できない。溶接変形歪が大きくなってしまうと、最終TFコイルが寸法公差を満足できず、製品として成立しなくなるリスクがあり、本工程は後戻りが許されない工程である。溶接変形予測解析で溶接変形挙動を把握して溶接手順等を最適化し、更に実規模大部分モックアップで溶接変形を良い精度で予測できていることを検証した。また、1/3スケールモデルでも一体化溶接の検証を行った。これらの一連の各種溶接試験によって、溶接変形挙動を追跡する溶接施工プロセスを確立し、溶接による倒れ変形の許容値を達成した。

以上のITER TFコイル製造は、設計段階での製造面の考慮で想定しなかった様々な技術課題が顕在化した。加えてRP加工、CP溶接、AU-BU開先合わせ、封止溶接での歪低減等はいずれもかなり挑戦的な製作技術の適用を必要とするものであった。

3. 原型炉に向けた課題

原型炉はITERに比較して更に高い技術と関係する組織とプロジェクトを円滑に進めるための新しいアプローチが必要と予想され、その実現には、以下取組みが必要と考える。

- 1) 製品目標実現への要求の明確化と最適化
 - ① プラズマ維持のため真に必要な設計要求
 - ② 可能な限り実現したい設計要求 (高精度)
 - ③ 技術限界を超えないための製造側要求
 - ④ 作業高速化、精度実現への製造側要求
 そのための開発段階からのメーカーの参画
- 2) 経済目標と建設期間目標実現への技術開発
 - ① 溶接も含めた材料特性確認と品質の安定
 - ② 大型化に対応した専用設備 (工場建設含)
 - ③ サイト輸送手段と現地組立プロセス
- 3) 原型炉の基本計画段階からの関係機関の連携体制の構築
- 4) 総合工学としての全体最適化への専門家同士の同期的かつ密なコミュニケーション

4. 最後に

三菱重工業は、ITER TFコイル製作及び今後のダイバータ工事で得られる経験と技術を伝承し、将来の核融合発電の実現に期待される役割を果たせるよう、継続して取り組みを進めていきます。

参考文献

- 1) Development of Manufacturing Technologies for the ITER Toroidal Field Coil - Welding and Machining Processes -ICAPP (4)(2017)
- 2) "Completion of the first ITER toroidal field coil structure", Nuclear Fusion 59, (2019)
- 3) Application of High-precision assembly technology for large structures by laser beam welding ICONE28 (8)(2021)
- 4) 「核融合実用化への挑戦-ITER,幅広いアプローチ活動の取り組み」三菱重工技報 原子力特集(Vol 57 No.4)(2020)
- 5) 「ITER TFコイル間支持構造物向け材料及び製作技術の開発」, 低温工学(11)(2020).
- 6) 「小特集:超伝導コイル製作の技術進展と原型炉に向けた課題」, プラズマ・核融合(11)(2020).
- 7) 「産報出版「溶接技術」ITER トロイダル磁場コイルの高精度組立を実現する溶接技術」, 一般社団法人日本溶接協会, (6)(2021)
- 8) 「Journal of Plasma and Fusion Research/ITER だより」, 量研機構, (89) (9)(2021)