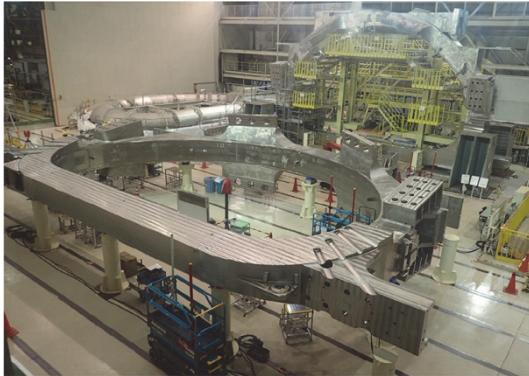


核融合実用化への挑戦 -ITER, 幅広いアプローチ活動での取り組み-

MHI's Continuous Challenges to Realize Fusion Energy
- Efforts to International Projects of ITER and Broader Approach(BA) -



清水 克祐^{*1}
Katsusuke Shimizu

藤原 英弘^{*2}
Eiko Fujiwara

前田 達志^{*3}
Tatsushi Maeda

蓮沼 俊勝^{*4}
Toshikatsu Hasunuma

浦田 一宏^{*3}
Kazuhiro Urata

井上 雅彦^{*1}
Masahiko Inoue

核融合エネルギーは、CO₂を排出せず、核融合反応の燃料は海水中に豊富に存在することから、恒久的な“夢のエネルギー源”として期待されている。我が国は、7極(日本、欧州、米国、ロシア、中国、韓国、インド)の国際協力が進められている国際核融合実験炉“イーター(以下、ITER)”計画に参画し、ITER 計画と並行して進められている核融合原型炉(以下、DEMO 炉)を早期に実現することを目指した幅広いアプローチ(Broader Approach, 以下 BA)活動にも参画している。三菱重工(株)(以下、当社は、ITER 向けのトロイダル磁場(Toroidal Field, 以下、TF)コイルを世界で初めて完成させ、ダイバータ実機製作の準備となるプロトタイプ製作にも着手したところである。BA 活動では、DEMO 炉向けプラズマ閉じ込め真空容器の概念検討、容器内機器の保守概念の検討や ITER を補完する JT-60SA(ここで、SA は Super Advanced 略)のダイバータ開発に携わっている。本報では、これらの取り組み状況を報告する。

1. はじめに

現在、南フランスのサン・ポール・レデュランスに建設中の ITER は、2025 年頃にプラズマの初点火、2035 年頃に、重水素と三重水素を用いた本格的な核融合プラズマ燃焼実験を開始する計画となっている。核融合エネルギーの実用化に向けて、ITER は「長時間プラズマ燃焼の実証」、「核融合炉工学技術の実証」を担い、それに続く発電実証を目的とした核融合原型炉(以下、DEMO 炉)のためのデータを取得し、これらの成果は DEMO 炉の建設につながる。DEMO 炉開発に向けたロードマップは、文部科学省より「原型炉研究開発ロードマップについて(一次まとめ)」(2018 年7月 24 日付)として報告され、ITER の役割、DEMO 炉開発のためのアクションプランがまとめられている⁽¹⁾。

当社は、ITER 向けの TF コイル5基の製作を担い、2020 年1月 30 日、世界に先駆け初号機を完成させ、2号機も5月末に出荷した。初号機は4月末に、2号機は7月末に ITER サイトに無事に搬入されたところである。後続号機についても順次完成次第出荷していく。TF コイル以外では、プラズマ閉じ込めに欠くことができない不純物を排出、除去するための機器であるダイバータの開発に取り組んでおり、実規模大モックアップの試作に着手したところである。現在、製造プロセスの最適化を図りつつ、実機製作に向けての技術開発を行っている。

BA 活動では、今までに培ってきた核融合装置設計、製造技術を生かし、DEMO 炉の真空容器構造概念の検討、容器内機器の遠隔保守概念の検討を行っており、JT-60SA 向けのダイバータの開発にも取り組んでいる。

*1 原子力セグメント新型炉・原燃サイクル技術部

*2 原子力セグメント新型炉・原燃サイクル技術部 主任

*3 原子力セグメント新型炉・原燃サイクル技術部 主席技師

*4 原子力セグメント新型炉・原燃サイクル技術部 グループ長

2. ITER への取組み

2.1 世界初、世界最大級の超伝導コイル完成へ –ITER 向け TF コイルへの取組み–

ITER 向け TF コイルは -269°C (絶対温度4K)で使用され、最大 11.8T、プラズマ中心で 5.3T の磁場を発生させ、高さ約 16m、幅約9m、重量約 300 トンの D 型形状をした大型重量構造物である。ITER では、TF コイルはプラズマを安定に閉じ込めるために、ドーナツ方向に 18 個配置される。図1に示すように、TF コイルは巻線部(Winding Pack, 以下、WP)、WP を収納するコイル構造物はインボードコイル構造物(以下、AU)、アウトボードコイル構造物(以下、BU)、インボード封止板(以下、AP)及びアウトボード封止板(以下、BP)からなる。WP は7層のダブルパンケーキ(Double Pancake, 以下、DP)からなり、DP に超伝導体が収納される。

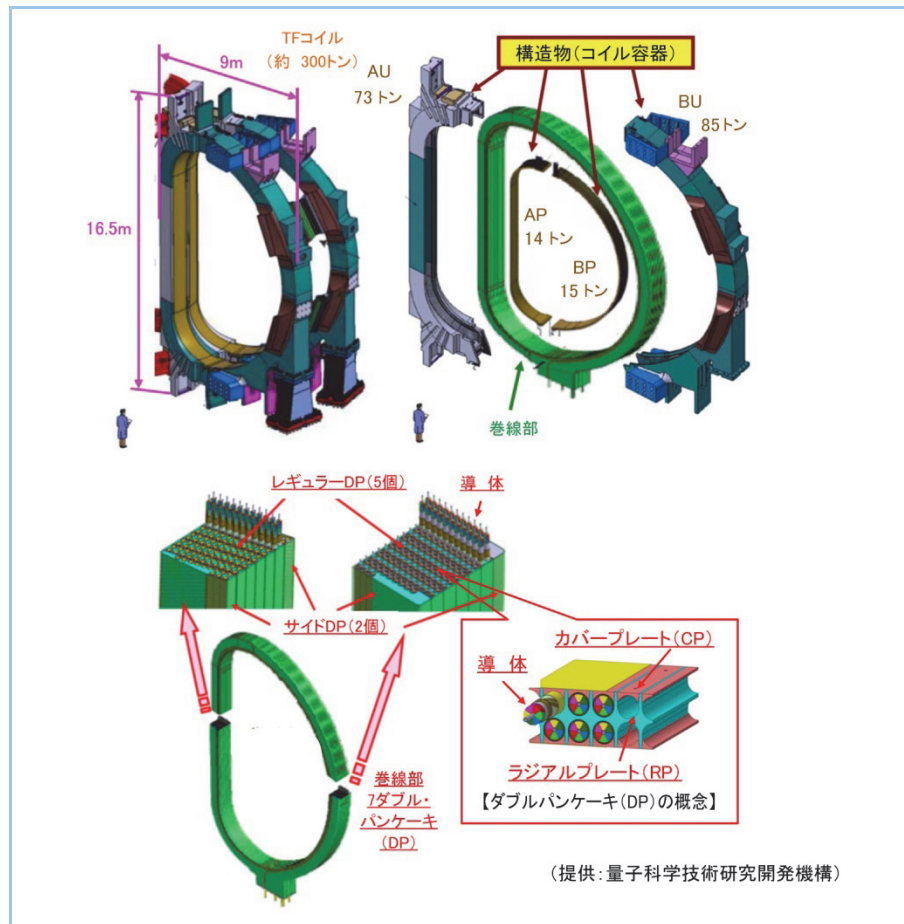


図1 TF コイルの概念図

プラズマ閉じ込めを安定に保つために、TF コイルが発生する磁場の許容誤差は数ガウスで、そのため TF コイルには、10m 超の溶接構造物に対して1mm オーダーの寸法精度が要求されている。この要求を満たす製品を提供するために、溶接入熱が小さい電子ビーム溶接や狭開先 TIG 溶接、レーザ溶接を用い、溶接変形を抑える施工を採用した。大型構造物の機械加工では、温度の変化によって物の大きさが変化することから、高精度で機械加工を行うために、温度を一定に保って加工ができる空調が完備された当社保有の大型複合作業機械“スーパーミラー”を駆使した。また、TF コイルは複雑な曲面で構成される構造物となるので、5 軸制御の特殊工具を用いて加工を行った。施工条件を確定するために、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⁽²⁾。このように、着実に技術課題を解決しながら実機を製作した。図2に、TF コイル製作のための代表的な製造技術を示す。

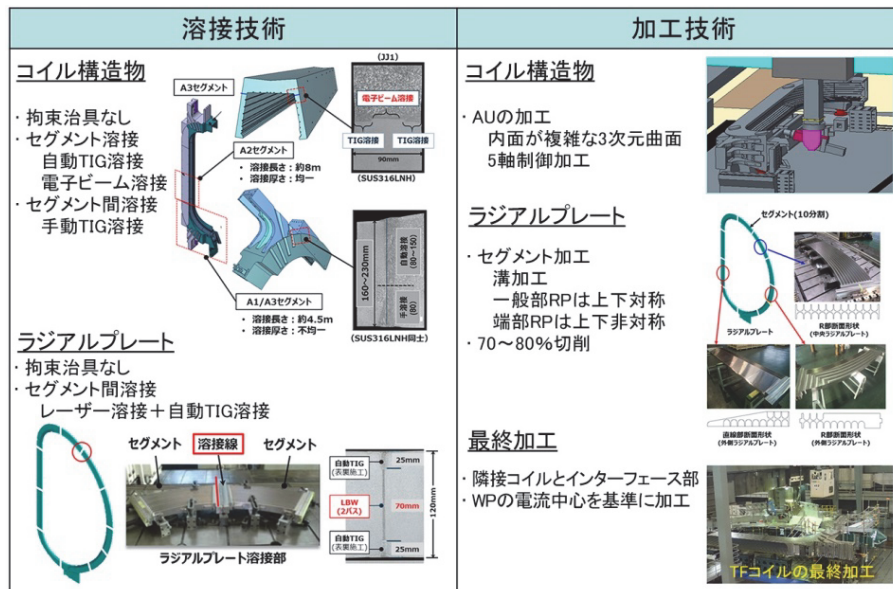


図2 TF コイルで採用した代表的な製造技術

図3に、コイル構造物と WP を一体化するプロセスを示す。TF コイルが発生する磁場の形状や分布は、コイルの電流中心位置に依存するため、電流中心位置は製造においても重要なパラメータとなる。一体化プロセスでは、WP 表面にマーキングされた電流中心位置を基準に組立、加工等行われ、TF コイルの現地据付けもこの電流中心位置をコイル構造物に転写したものを基準にして行われる。

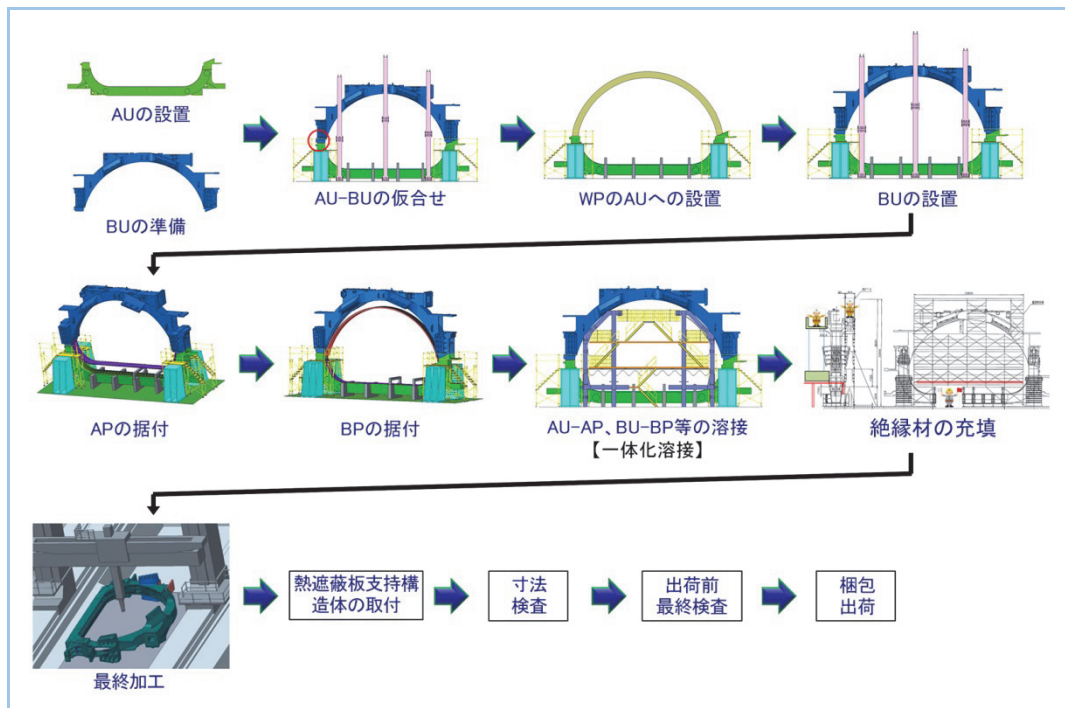


図3 一体化フロー

WP をコイル構造物 AU に設置し、BU で覆ったのちに、WP の電流中心位置をコイル構造物上に転写し、AP、BP を溶接する。WP とコイル構造物との間に注入する絶縁材のための隙間を確保するため、溶接中の変形状況を監視しながら溶接の順番を入れ替え、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う。また、最終機械加工で余肉不足を生じさせないためにも変形を抑える必要がある。本工程では、後戻りが許されないため、溶接変形予測解析で溶接変形挙動を把握し、溶接手順等の検討を行うこととし、図4に示すように、まず平板試験により溶接ひずみを計測し解析との比較を行い、解析の妥当性を確認した。その後、溶接変形予測解析を

実規模大部分モックアップに適用して、計測した溶接変形と比較し良い精度で予測できることを検証した。また、1/3 スケールモデルで一体化溶接におけるモデルの検証を行った。このように各種溶接試験によって得られたデータをもとに、実機における溶接変形挙動を把握することにより、溶接施工プロセスを確立し、溶接による倒れ変形量を抑えて、倒れ変形の目標値を達成した。

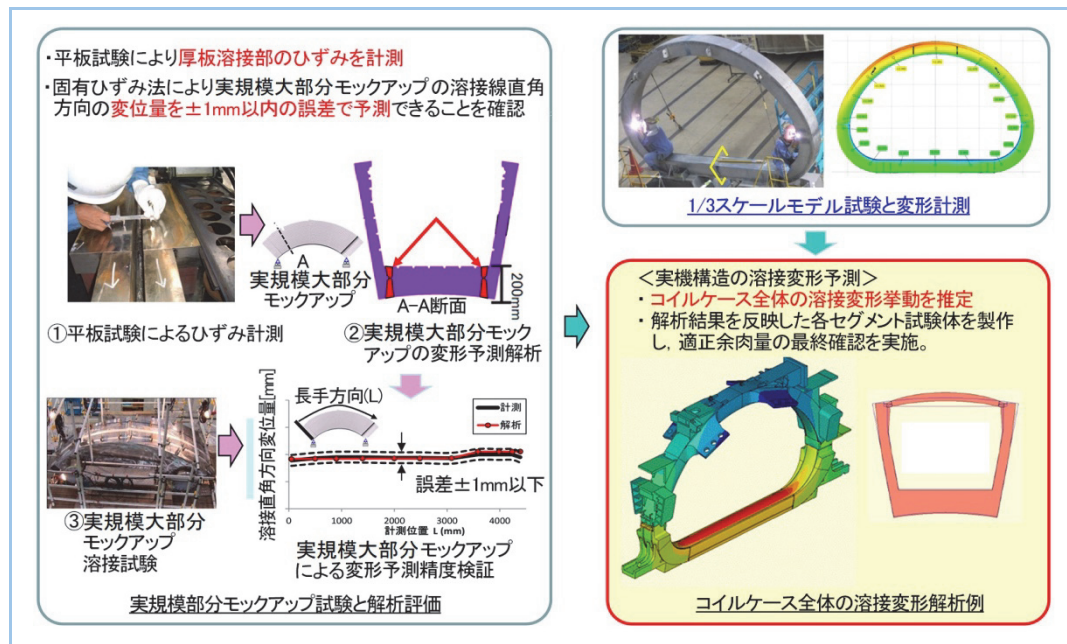


図4 一体化溶接技術の確立(実規模大部分モックアップ試験と感度解析)

このような大型重量構造に対し溶接による変形をミリオーダーでコントロールする技術は、原子力機器等の大型構造物の取扱いで培った技術に加え、レーザ溶接等の入熱が小さいビーム溶接の採用や拘束治具を使用せずに溶接変形をモニタリングして溶接を行うというような新たな工夫を取り入れることで達成したものである。

世界初となる初号機は、2月末に当社工場を出荷し4月末に ITER サイトに到着した。2号機も7月末に ITER サイトに搬入され、現地では組立準備作業が鋭意進められているところである(図5)。



図5 初号機出荷

なお、世界最大級の超伝導コイルとなる TF コイルを完成させたという偉業は、量子科学技術研究開発機構及び三菱電機との連携、協業によりなすことができた。

2.2 高熱負荷機器ダイバータの開発

核融合炉におけるダイバータは、核融合反応で生じた生成粒子(ヘリウム)、燃え残りの燃料、その他炉内でのプラズマ粒子と壁との相互作用等で生み出される不純物を除去する機器で、プラズマの性能に関わる重要な機器の一つである。ダイバータは、プラズマに面し、熱的にも非常に厳しい環境に晒される。ITER では、定常熱負荷で 10MW/m^2 、非定常負荷で 20MW/m^2 という高い熱負荷の除熱を行う。

図6に、ITER ダイバータの構造概念を、表1に主な要求仕様を示す。ダイバータは、日本、欧州、ロシアが調達し、日本は外側垂直ターゲット(Outer Vertical Target, 以下 OVT)を分担する。ダイバータは真空容器のドーナツの周方向 20° セクターに3カセット設置され、全体で 54 カセットが設置される。OVT は、高熱負荷受熱部であるプラズマ対向ユニット(Plasma Facing Unit, 以下、PFU)及びそれを支持する鋼製支持構造体(Steel Support Structure, 以下 SSS)から構成される。PFU は高融点材であるタングステン(以下、W)のブロック(約 150 個)が銅合金製の冷却管にロウ付けされる。隣接する PFU 間の段差を要求公差内で設置し、また、ブロック間の隙間も要求公差内に施工する必要がある(段差は0.3mm 以内、全体の輪郭度は0.5mm 以内、ブロック間の隙間公差は±1mm 程度)。W ブロックの形状は単純な矩形ではなく、冷却管軸方向で形が変化する複雑な構造となっている。

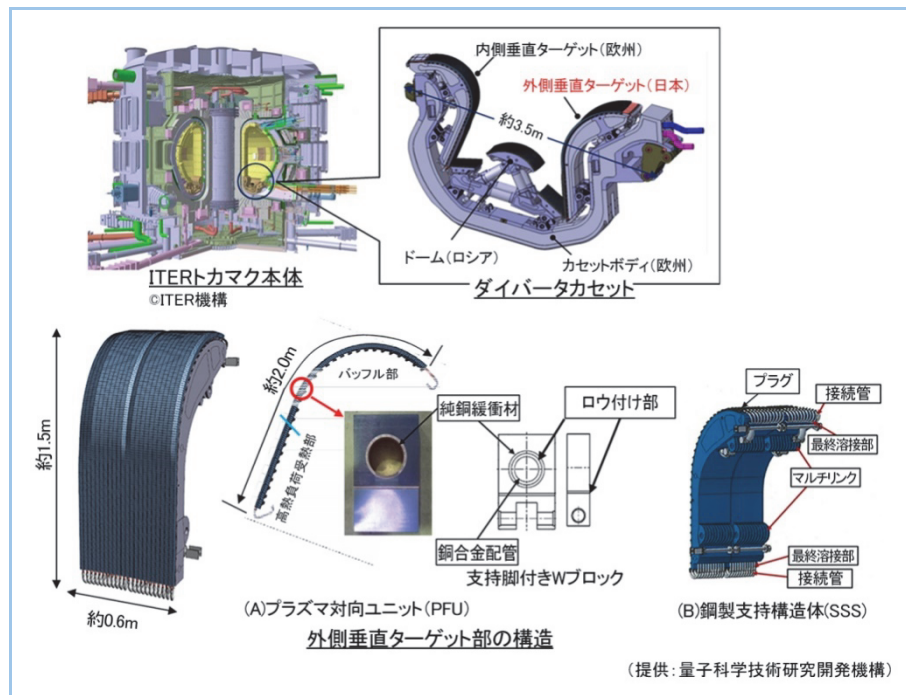


図6 ITER ダイバータ及び OVT の構造概念

表1 ITER ダイバータの主な要求仕様

主な機能	項目	仕様・構造
除熱	耐熱耐プラズマ粒子	- 材質: タングステンブロック - 表面最大熱負荷: 10MW/m² (通常時), 20MW/m² (異常時) - 輪郭度: 0.5mm - 隣接 PFU 間の段差: 0.3mm 以下
	冷却性能	- 冷却管貫通型タングステンブロック - 冷却水: 4MPa, 10m/s ; 入口温度 100℃, 出口温度 140℃ - ロウ付け(熱伝達(熱通過)を確保するための冶金学的接合) - ねじりテープ(乱流伝熱促進: 限界熱流束向上)
強度	圧力, 電磁力支持熱伸び吸収	- 冷却管: CuCrZr 管 (析出硬化型銅合金) - 支持脚部接合強度: 最大荷重 (9kN) に耐えること - 鋼製支持構造体: XM-19 (高強度鋼) - マルチリンク, 配管の曲率 (柔軟性)
保守・補修	PFU 単独での取り外し可能	支持脚-ピン-プラグ構造
その他	耐放射化性	- Co 規制 - 核発熱除去

ITER 向けダイバータへの開発には 2012 年頃から取り組んでおり、炭素複合材 (Carbon Fiber-reinforced Composite, 以下 CFC) モノブロックと W モノブロックからなる PFU では、世界で初めて ITER で要求されている繰返し熱負荷試験条件を満足することができた⁽²⁾。その後、設計変更が行われ PFU はフル W となり、フル W の PFU プロトタイプも作製し、同様に、世界で初めて ITER 要求を大いに上回る結果を得た(図7)。これは量子科学技術研究機構との連携により成しえ

たものである。



図7 外側ダイバータフル WPFU プロトタイプの試作及び試験

実機に向けてのダイバータの技術的な主な課題は、①ロウ付け部の健全性確認、②冷却管部のステンレス鋼と銅合金との異材継手の健全性確保、③SSS の構造材である特殊ステンレス鋼 (XM-19) の溶接性と加工性等が挙げられる。したがって、引き続き、要素試験、実規模大プロトタイプ試験等を行い、歩留まり 100%となるように製作性に関わるデータを取得する必要がある。

(1) ロウ付け部の健全性確認

ロウ付け部の接合状態が除熱性能、接合強度に影響するため、ロウ付けプロセスの管理だけではなく、超音波を用いた非破壊検査 (超音波探傷試験, Ultrasonic Test 以下 UT) を行って欠陥なく接合していることを確認する必要がある。UT は冷却管内部から行い、ロウ付け部の位置、検出すべき欠陥の大きさ、接合境界部の材料の組合せに適した条件 (探触子の大きさ、周波数) を選定することが重要となる。予め数値シミュレーションにより音波の伝達状態から探触子の条件を求め、試作、試験を行って性能の確認を行った。図8に、数値シミュレーションの結果と試作試験によるロウ付け部の健全性確認結果を示す。ここで、図8(a)は超音波の伝搬の様子を数値的に評価した音場シミュレーションの結果を、図8(b)には、超音波の反射の強さを数値的に評価したエコーシミュレーション結果を示した。これらのシミュレーションでは探触子の形状をフラットと球殻状 (SR25) としたが、いずれも軸方向の収束性が周方向のそれと比べて若干劣ることが示され、今後探触子の形状と周波数との最適化を図り、より収束性のよいものを選定していく。図8(c)に示した小規模試験体を用いた特性試験では、冷却管である銅合金とその外面の無酸素銅の境界及び、無酸素銅と W ブロックの境界の異なる境界面での信号を得ることができ、検出性が検証された。実機では 1200 本を超える (58 カセット分 = 22 本 × 58 カセット = 1276 本) 検査を行う必要があるため、検出感度のみならず、検出時間短縮を含めて、検査方法の最適化を図っていく。

(2) 異材継手の健全性確保

FU の冷却管とヘッダーとの溶接部は銅合金 (CuCrZr) とステンレスとの異材溶接となり、数 MPa の水圧が掛かるため溶接部の健全性確保が重要となる。ITER では、銅合金配管とステンレス配管との間に Ni 基合金を挟み、溶接変形が少ないビーム溶接施工法を採用しておりその施工プロセス確立に向けた要素試験を行った結果、健全な異材継手が施工できる見通しを得た (図9)。今後は、溶け込み深さ、狙い位置等の最適化を行っていく。

(3) SSS の溶接性と加工性

SSS に使用される構造材である XM-19 は、オーステナイト鋼の SUS316/SUS316L 等と比較して、Mn, N が多く含まれ、強度が高い材料となっている。そのため、溶接や加工は、通常のステンレス鋼に比べて難しく、適切な施工条件を見出す必要がある。

図 10(a) に示す試験体を製作し溶接性試験の予備試験を行い、各種試験 (引張試験, 側曲げ試験, 断面観察) を実施したところ、引張試験は溶接部で破断したものの、その引張強度は

809MPa と評価され、要求値である 690MPa (@室温) を満足するものであった。側曲げ試験でも有意な割れは見られず、溶接部の断面観察でもクラック、ポロシティ等は観察されず良好な結果を得た。これらは予備的な試験であり、今後、実機に向けて溶接施工条件の最適化を行っていく予定である。

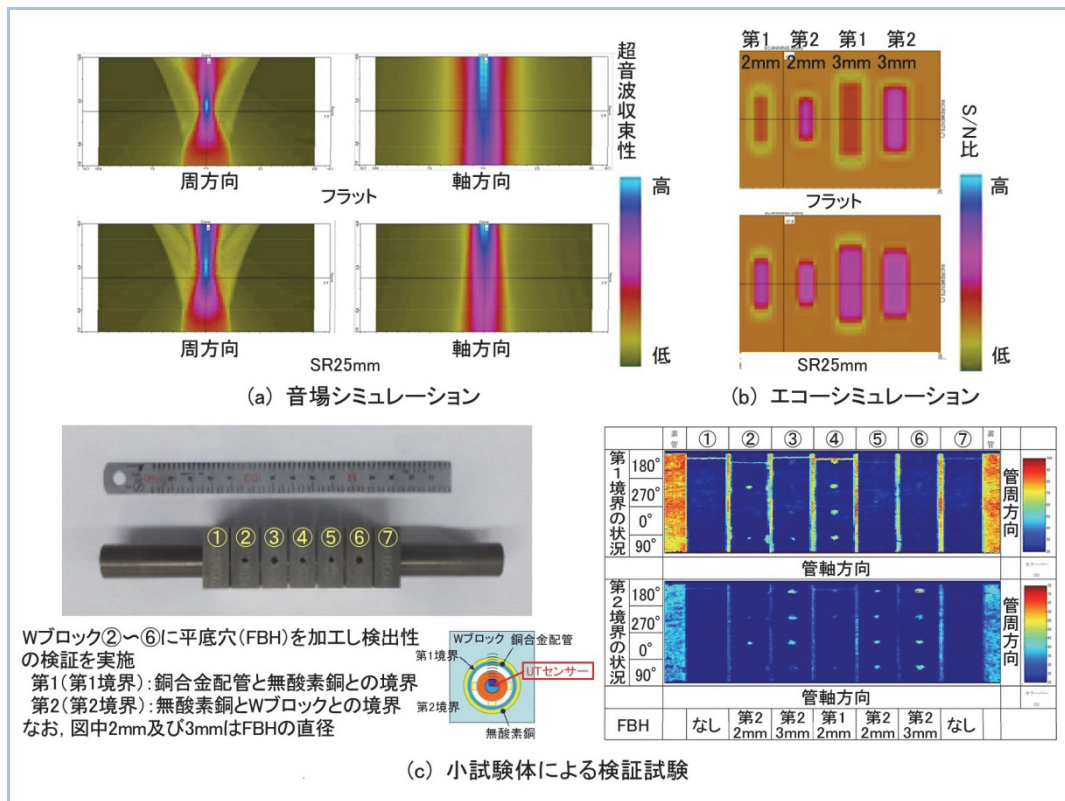


図8 ロウ付け部の健全性確認

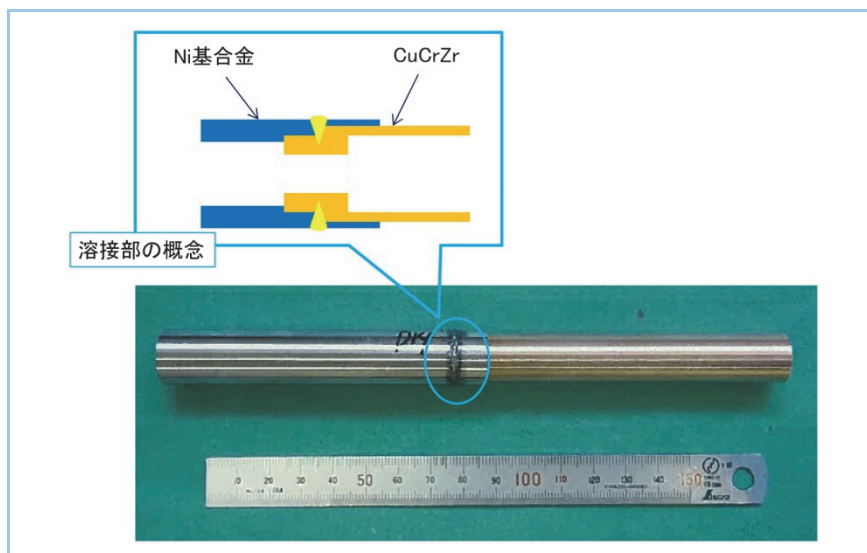


図9 異材溶接要素試験(CuCrZrとNi基合金)

PFU は SSS にピン連結構造で支持されるため、SSS にはピンを止める溝付きのプラグがネジ構造で取り付けられる。そのためネジ穴加工の予備試験を行った(図 11)。PFU 冷却配管方向に整列するようにプラグ穴(ネジ穴)を加工する必要があるが、SSS の加工面は3次元曲面を有しており、工具が逃げないように加工中の工具の姿勢維持が重要となる。予備試験では、工具種類と配列(アライメント)の相関を確認することができ3次元曲面上でのプラグ穴加工の見通しを得た。

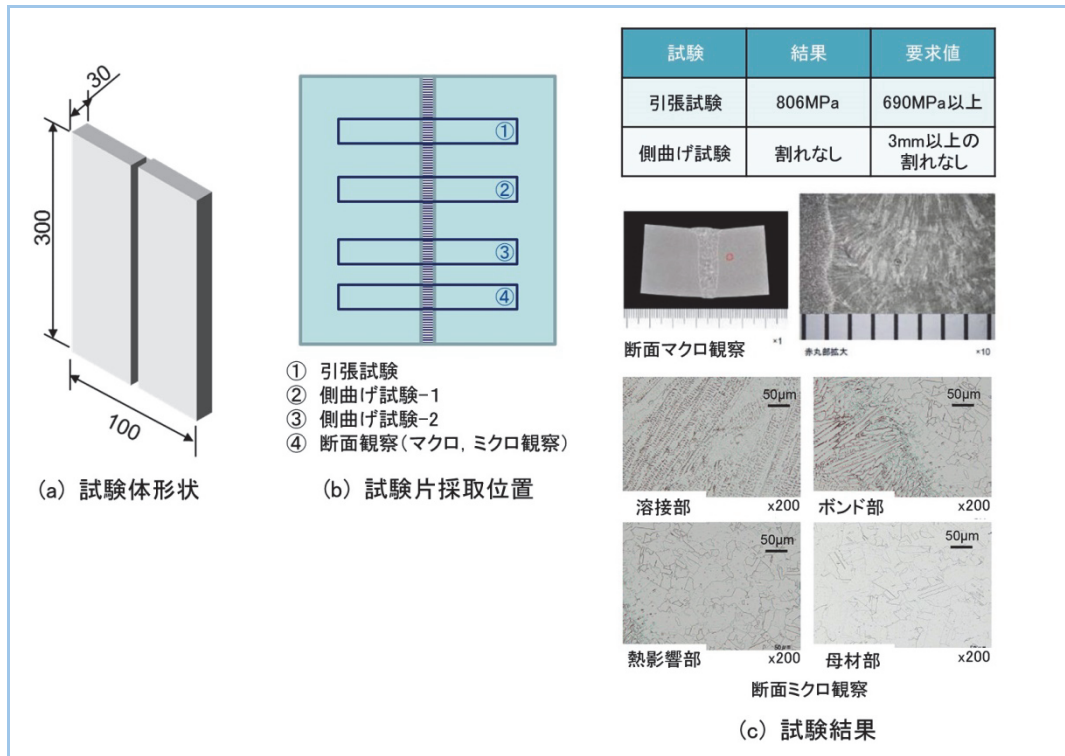


図 10 XM-19 の溶接性試験

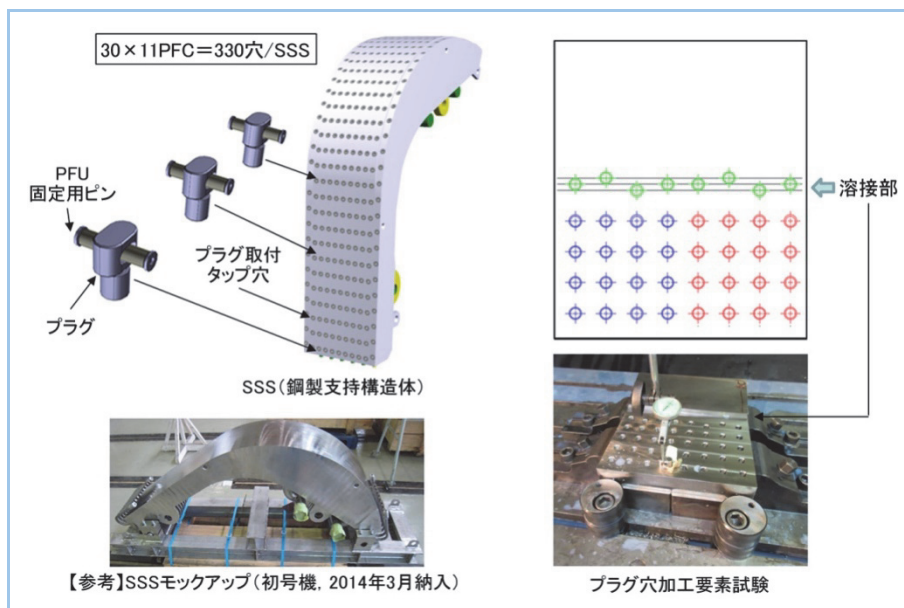


図 11 プラグ穴加工

3. BA 活動への取組み

BA 活動は、核融合エネルギーの早期実現に向けて、日欧二国間協力で推進されており、①国際核融合エネルギー研究センター事業 (DEMO 炉設計・R&D 調整センター、ITER 遠隔実験センター、計算機シミュレーションセンター) ②国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動事業、及び③JT-60SA が中核装置となるサテライト・トカマク計画事業の 3 つの事業からなる。

本報では、当社における①DEMO 炉設計、及び③JT-60SA への取組み概要を記す。

3.1 DEMO 炉設計について

当社は DEMO 炉の炉構造、遠隔装置に関わる概念検討を BA 活動の初期より実施してきている。プラズマ閉じ込め真空容器、容器内構造体(ブランケット、ダイバータ)は、遠隔保守シナリオと整合が取れた構造概念とすることが DEMO 炉では要求される。容器内構造物であるブランケットは

核融合燃料であるトリチウムの製造と核融合エネルギーの回収を行う機器で、メンテナンス等での交換時には一体で容器内から搬出され、保管場所に移送する概念となっている。DEMO 炉のブランケットは図 12 に示すようにバナナ型のブランケットセグメント構造が採用され、上部ポートより搬出入される。ダイバータは ITER と同様にカセット方式の概念を採用し下部ポートからの搬出入、冷却配管の引き回し等から分割位置を設定した(図 12)。

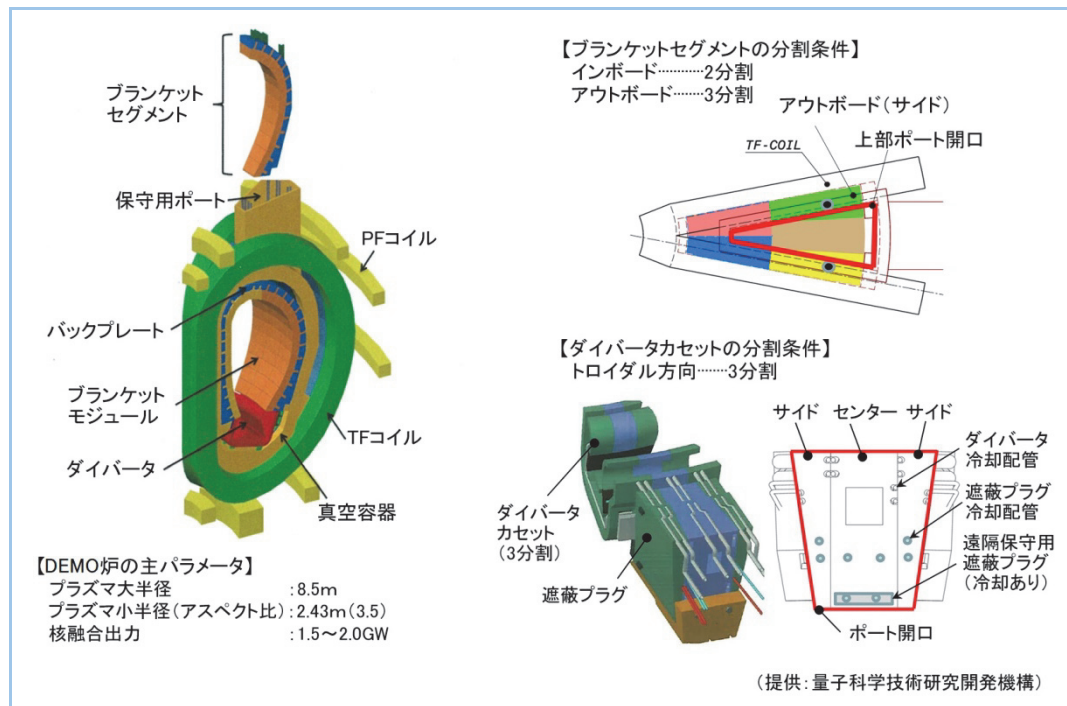


図 12 DEMO 炉の炉構造概念

真空容器構造概念を決定する主な荷重は、ディスラプションと呼ばれる運転異常時のプラズマ電流消滅、プラズマ垂直位置移動や TF コイル異常時の高速放電による電磁力である。当社では電磁力により真空容器にかかる荷重を解析する電磁力解析技術を保有しており、ここでは、TF コイル高速放電による電磁力解析事例について記述する。TF コイルの放電時間が 30 秒の場合(図 13)、放電開始後 2.25 秒に電磁力積算和が最大となり、内側(-X 方向)に約 20MN の力が発生していることがわかる。今後、プラズマ電流消滅、移動も考慮して構造強度評価を行い、また、過渡電磁力荷重に対する動的効果も含めた評価も行い DEMO 炉の真空容器構造概念を検討していく。

3.2 JT-60SA 用ダイバータについて

JT-60SA は、ITER プラズマ実験の補間を行うとともに、DEMO 炉に向けたプラズマ開発を行うことを目的とした実験装置で、日本国内に建設中である。当社は、ITER 向けダイバータで培った基盤技術が適用できるロウ付けタイプのダイバータの開発に参画し、今までにサンプル試験体の試作等を実施してきている。W を採用している ITER ダイバータと異なり、JT-60SA ダイバータのプラズマ対向材は W より熱伝導率が優れている CFC を採用している。CFC は金属とは異なり、繊維状の組織を持つため、ロウ材の浸み込みが大きく、それを踏まえてのロウ付けの施工条件を確立する必要がある。図 14 に、JT-60SA ダイバータの構造概念及び要素試験体を示す。JT-60SA に使用される CFC モノブロックの冷却管軸方向の長さは約 30mm で、ITER に比べて大きなブロックが使われ、接合境界部の熱的応力が懸念される。今後は、形状を含めて接合条件の最適化を図っていく。また、接合部の UT 特性の把握と信号処理についても検討を進めていく。

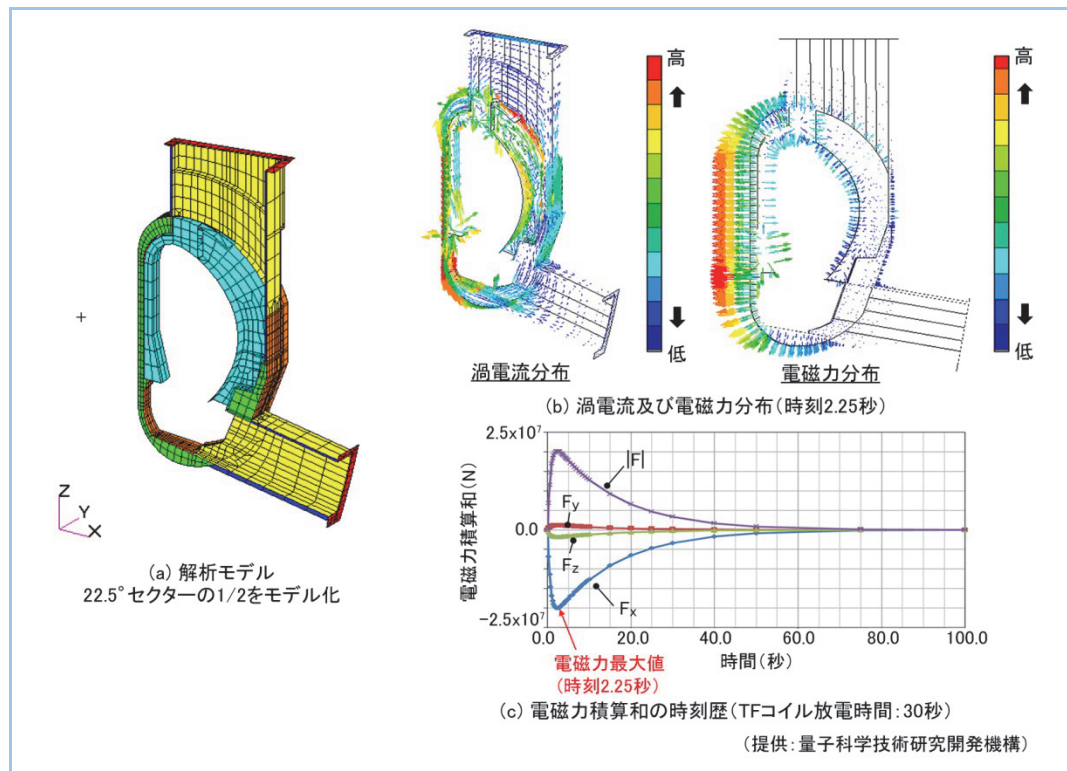


図 13 真空容器に対する電磁力解析

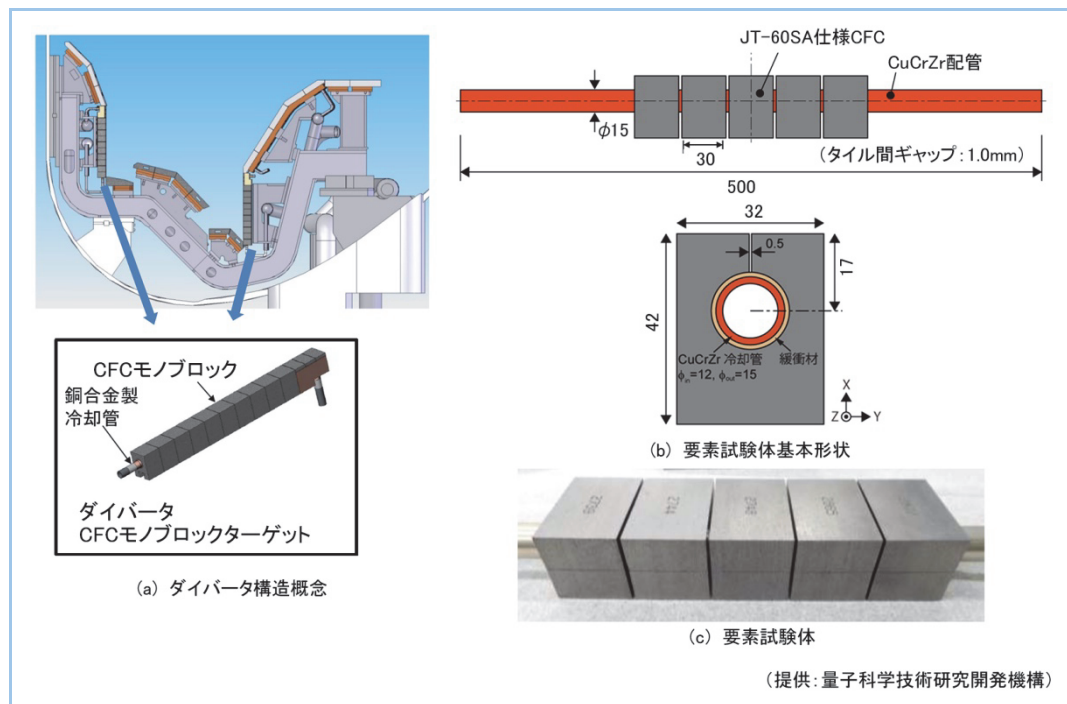


図 14 JT-60SA ダイバータの構造概念と要素試験体形状

4. まとめ

世界最大級の超大型超伝導コイルとなる ITER 向け TF コイルの初号機完遂のため、既存技術の応用、創意工夫、最新技術を用いて ITER 要求を十分に満足するものを作り上げることができた。また TF コイルに続き、ITER 主要機器であるダイバータの実機に向けての R&D 工事や社内研究を通して、技術的リスクの潰し込みを鋭意進めている。ダイバータの PFU は部品点数が多く、部品、生産管理とともにそのトレーサビリティも確保しつつ高精度なものに作り上げていく必要がある。鋼製支持構造体には特殊ステンレス鋼 XM-19 が使用されるため、その溶接性、加工性を十分に技術検証して製作を行っていく。

BA 活動の中での DEMO 炉設計は現在、概念検討から概念設計に移行するフェーズにあり、今後、物作りを意識した設計を行っていくことになる。DEMO 炉は ITER の約2倍の規模となることが予想されるため、コストを意識して合理性を織り込んだ設計を行い、また、長期的な計画となるため、基盤となる設計、製造技術の伝承、維持・向上も必要となる。コンピュータによる設計や AI による製造の技術革新が普及していく中、個々の技術や経験を統合できる手法を確立して、合理的な物作りが行えるようにしていく。

当社はこれからも新旧技術を取り交ぜつつ、さらに新たな手法も生み出して、ITER の TF コイル製作で得られた経験、技術や今後のダイバータで蓄積される経験、技術を DEMO 炉設計に生かし、核融合炉の実用化に向けて開発を進めていく。

参考文献

- (1) 文科省核融合科学技術委員会報告書，“原型炉研究開発ロードマップについて(一次まとめ)” 2018 年7月 24 日付
- (2) 清水克祐ほか，三菱重工の ITER への取組み -大型高性能超伝導コイル製作への挑戦-，三菱重工技報，Vol.52 No.1 (2015) p.15～23