

8L01 ITER 計画の進展 - 調達の新展開と運転期の議論 - Progress of the ITER Project – evolution of procurements and discussion on the operation phase –

鎌田 裕

Yutaka Kamada

量子科学技術研究開発機構

National Institutes for Quantum Science and Technology

ITERの建設は進み、2022年4月時点で、初プラズマ(2025年末)までに必要な建設工程の77%を達成し、主要な建屋もほぼ完成した(図1)。いよいよ、ITERの「運転」を具体的に構想する時期に入った。日本が担当する機器製作も順調で、超伝導トロイダル磁場(TF)コイルは山場を過ぎ、初プラズマ以降に装着する機器の製作が本格化している。ITERの目的は、核融合原型炉に向けて、核融合燃焼と、統合された核融合炉技術を実証することである。前者の達成は、DT運転(2035年開始)を待つ訳であるが、後者の「統合された核融合技術」は、既に機器製作や組み立てを通して始まっている。このような状況認識の下、本講演では、日本は、原型炉のために「ITERをどのように実施・活用するのか？」を議論していく。



図1 建設が進む ITER サイト(2021年10月)

1. ITERの建設状況：ITERでは、核融合熱出力50万kWを300~500秒間維持する。そのトカマク本体の直径及び高さは30m、重量は2万3千トンである。装置を構成する機器は日、欧、米、露、中、韓、印の7極が分担して製作し、建設サイトに搬入し、ITER機構が組み立てている。すでにトカマク建屋が完成し、本体を収めるピット内では、下側クライオスタット(印)、下側熱遮蔽(韓)、ポロイダル磁場コイル2機(欧)などの上に、最初のセクターモジュール(真空容器40度セクター(韓)+TFコイル2機(日)+熱遮蔽(韓))が設置された(図2)。これらの大型機器の高精度の組み立て経験は、原型炉に向けた大切な技術資産である。冷却プラント(印)や冷凍機プラン

ト(欧、ITER機構)などの周辺設備も完成した。

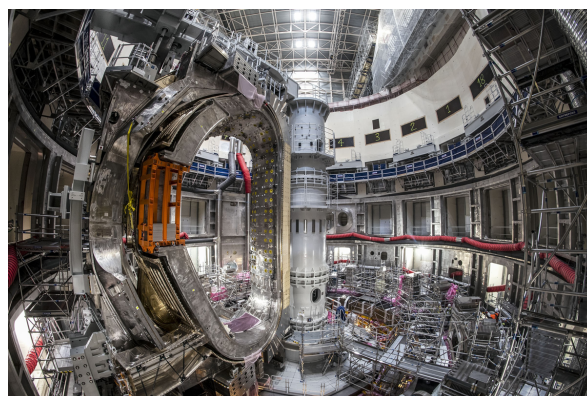


図2 据付けられた最初のセクターモジュール(韓国製真空容器セクター&日本製TFコイル2機)

2. 日本の物納機器製作：日本の担当は、特に高度な技術を要する機器で、日本実施機関である量研が産業界と共に数多くのR&Dと製作を順調に進めている。
＜TFコイル＞：巨大(高さ16.5m、幅9m、重量300トン)な超伝導コイル(ニオブスズ導体)であり、12テスラの強磁場を発生する。日本は、予備1基を含む全19基中、9基を製作する。超伝導に必要な極低温で使用できる特殊ステンレス製の厚肉(230mm)大型構造物の溶接技術を確認するなどのR&Dを経て、2020年1月に1号機を高精度(1mm誤差)で完成した。コイル一体化手法を高度化するなど、その後の製作も順調に進み、既に6基を完成してITER機構に搬入した。また、全TFコイル19基用構造物の製作も完了した。
＜タングステン(W)ダイバータ＞：ITERのダイバータは、20MW/m²の熱負荷に耐える必要がある。日本は外側ターゲットの全58基を製作する。Wモノブロックの量産化技術を確認し、合計20万個の製作を開始した。また、WモノブロックとCuCrZr製の冷却管を無酸素銅緩衝材で接合する技術を確認し、耐熱負荷及びモノブロック間ギャップ0.4mm±0.1mmの要求値を満足する量産化技術に見通しを得、実規模大の外側ターゲットプロトタイプ製作を開始した。これらは、原型炉のダイバータ製作に直接貢献するものである。
＜高周波加熱装置＞：ITERでは、24基のジャイロトロン(170GHz、定常1MW以上、効率50%以上)で20MWの

プラズマ加熱を行う。日本は8基を製作する。これまで、3極管型電子銃の製作、人工ダイヤモンド窓の接合、電子ビームの減速によるエネルギー回収などの技術開発を進め、すでに全8基の製作と、5基の性能試験を完了した。同時に確立した複数周波数化技術を含めて、原型炉に大きく貢献するものである。

＜中性粒子ビーム加熱装置＞：ITERでは、2基の負イオン源NBI (1MeV) で33MWのプラズマ加熱を行う。このために、実機大の試験設備をイタリアに建設してR&Dを行う。日本は、これらの1MV高電圧電源を製作するとともに実機用加速器を1基製作する。NBTFでは、すでに日本の高電圧電源と欧州の低電圧電源を組み合わせ合わせた統合出力試験を開始した。また那珂研での加速器開発では、耐電圧性能向上や電極熱負荷の低減によって、1MeVビームの60秒間連続生成を実証した。

＜計測機器＞：日本は、中性子計測用マイクロフィシオンチェンバー、周辺トムソン散乱計測、ポロイダル偏光計、ダイバータ不純物モニター、ダイバータ赤外サーモグラフィを担当する。いずれも、大型核融合装置環境（高い熱・電磁力負荷、遠隔操作による較正・調整、光学・電子機器の耐放射線性、長時間計測など）を踏まえた設計・製作を進めている。

＜遠隔保守装置＞：ITERでは440個の遮蔽ブランケットモジュール（約5トン、据付精度0.5mm）が真空容器内面を覆っている。その交換は高線量下（約500Gy/h）でロボットで実施する必要がある。日本は、この遠隔保守システムを製作する。大重量物搬送、高精度設置、配管溶接・切断・検査ツール類、耐放射線部品などのR&Dを進め、基本設計を完了し、現在、最終設計を進めている。

＜トリチウム除去システム＞：本システムはITER施設の通常時及び事故時においてトリチウムを回収し、環境への漏洩を防ぐ重要な安全機能を果たすもので、日本とITER機構が共同で整備する。すでに、主要構成機器であるスクラバ塔とトリチウム触媒酸化塔の性能確認試験を完了し、現在、ITERトリチウム除去システムの忠実な2%スケールを整備した統合性能確認試験を開始した。

3. テストブランケットモジュール(TBM) 事業

ITERでは、トリチウム増殖ブランケット（中性子遮蔽、熱の取出し、トリチウム増殖）を実際の核融合環境で試験する。ブランケットに関しては、各極が提案する方式は異なっており、このため4基のTBMの比較試験が可能である。初めに取り付けられる4基のTBMのうちの1基が日本の水冷却固体増殖ブランケットである。すでに概念設計（ブランケット形状を円筒形にすることで、少ない構造材料で高い耐圧性を維持し燃料生産性を向上させる）を完了した。このTBM開発を推進する国内拠点として、量研六ヶ所研にブランケット工学試験棟を建設した。ここでは、2025年の最終設計承認に向けて、TBMの安全実証試験（高熱負荷試験、流動腐食試験、高温高圧水噴出試験、ベリリウム-水蒸気反応試験）を実施する。

4. ITERの実験・運転 と「ITER日本研究チーム」

ITERの運転期では、プラズマ実験に加えて、各機器の運転・改善と評価、核融合システムとしての技術評価など、原型炉に向けた核融合理工学の様々な観点からITER計画を進めていく必要がある。物納機器は実際の運転を経て評価が完了する。また、「トカマクシミュレータ」のようなシステムの評価や予測能力を開発することもITERを用いて是非進めていくべき事柄である。TBMでは、日本としての技術目標を達成することも求められる。なおITERで発生する大量のデータは、六ヶ所研のITER遠隔実験センターにおいて、国内に高速転送できる見込みが進んでおり、今後、ITERの実験運転を見据えて、大規模データの情報処理技術の開発が必要である。

ITERの実験・運転への日本からの参加は、長期滞在者（ITER機構職員や派遣等）が60-70名、短期参加者&遠隔データ利用者が200名程度と想定される。これらの人材は、ITERの科学ミッションを達成するためだけでなく、ITERの経験を日本に持ち帰り原型炉の開発に役立てるためにも必要である。長期滞在者については、帰国後は原型炉の開発に携わるキャリアパスを準備するなどの人材還流システムを整備していくことも重要である。

上記のような「ITER参加者」（若手研究者や学生も含め）が、有効に研究開発を実施するため、量研では「ITER日本研究チーム」の検討を進めている。これは、「日本のITERを用いた理工学研究の実施母体」であり、その組織の主要機能は以下である。

- ・ ITER機構実験運転チームとの連携
 - ・ TBM活動のITER機構との連携・国内連携
 - ・ ITPA活動の支援と国内連携
 - ・ BA活動との連携（含：JT-60SAの活用）
 - ・ 原型炉特別チームとの連携
 - ・ 予測&解析コードの提供&共同開発
 - ・ 遠隔参加・データアクセス&解析予測計算機等研究環境の整備・運営
 - ・ ITER職員応募サポート
 - ・ 研究支援（旅費、研究費 など）
- 今後、国内で幅広く議論を進めていきたい。

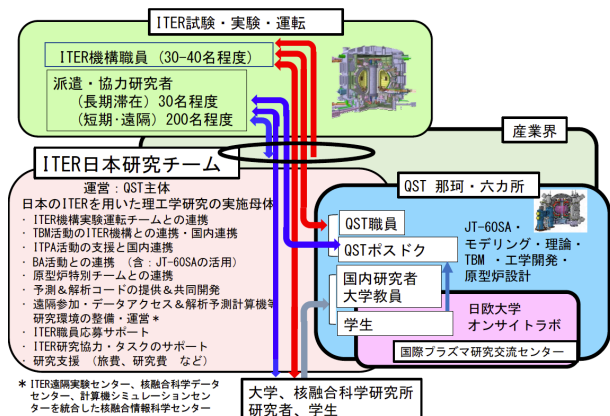


図3 ITER日本研究チームの役割