

核融合工学部会セッション

JT-60SA プロジェクトの現状

Status of JT-60SA Project

(3) マグネット冷凍機システム

(3) Operation Results of Superconducting Magnet System and Cryogenic System for JT-60SA

*濱田 一弥¹, JT-60SA チーム¹¹ 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー部門 那珂核融合研究所

1. はじめに

JT-60SA のマグネットシステムは、18 個の D 型のトロイダル磁場 (TF) コイル、6 個の平衡磁場 (EF) コイル、1 個の中心ソレノイド (CS) から構成されている (Fig.1)。室温の電源から 4.5 K に冷却されたコイルに電流を供給するために、超伝導導体を使用した 26 系統の給電線 (フィーダー) と高温超伝導電流リード 26 本を使用する。TF コイルと高温超伝導電流リードは欧州が、EF コイル、CS 及びフィーダーは日本が製作を担当した。超伝導コイルは 4.5 K で動作するため、上記の超伝導機器は、80K のヘリウムガスで冷却された輻射シールドを有する断熱真空容器 (クライオスタット) 内に設置されている。

ヘリウム冷凍機は 4.5 K 換算で 9.5 kW の冷凍能力を有し、超伝導コイル、サーマルシールド、電流リードに冷媒を供給する。2020 年 3 月には冷凍機と被冷却体が低温配管によって接続され、システム全体が完成し、同年 10 月よりクールダウンを開始した。2021 年 1 月よりコイルの単独通電試験が開始された。

2. マグネットシステムとヘリウム冷凍システム

TF、EF は NbTi 導体を、CS は Nb3Sn 導体を使用し、Fig.1 に示すとおり、TF は 25.7kA、CS、EF は 20kA で運転される。超伝導コイル及びフィーダーには、通電試験時には約 1.9 kg/s の超臨界ヘリウムを供給する。高温超伝導電流リードは Bi 系高温超伝導体を使用し、定格の動作温度は 60 K である。

JT-60SA 冷凍システムの特徴は、圧縮機やタービン膨張機を安定に運転するため、超伝導コイルで発生する変動熱負荷による流量や温度の変動がこれらの機器の運転範囲内に収まるよう、自動的に制御できることである。ヘリウム冷凍システム全体の概略系統図を Fig. 2 に示す。冷凍機システムは、冷凍機コールドボックス (Refrigerator Cold Box: RCB) と超臨界ヘリウムを供給する補助コールドボックス (Auxiliary Cold Box: ACB) から構成される。ヘリウムガスは、8 台構成の圧縮機によって 1.5 MPa まで加圧され、RCB に送られる。RCB 内部では、液体窒素、3 段のタービン膨張機、多段式の熱交換器を用いてヘリウムを冷却し、ACB に 5~6 K のヘリウムを、高温超伝導電流リードへ 50K のヘリウムを、サーマルシールドに 1.5 MPa に加圧した 80 K のヘリウムをそれぞれ供給する。

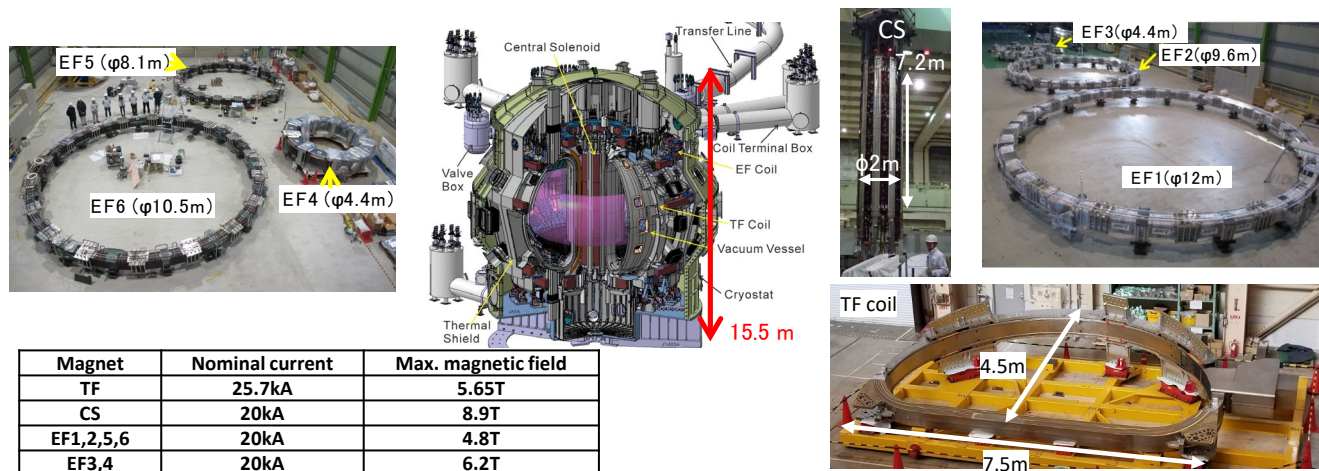


Fig. 1 Superconducting magnet system.

ACBは、熱交換器を収めた7m³容量の液体ヘリウムタンク（ダンパー）、超伝導コイルには超臨界ヘリウムを供給するためのターボ式低温ヘリウム循環ポンプ(Cold helium circulator)2 台、及び低温ヘリウム圧縮機（Cold helium compressor）を有している。ダンパーは、コイルの変動熱負荷により蒸発するヘリウムを一時的に閉じ込めて、RCBへの戻り流量を制御しながら制御して、圧縮機やタービンへの影響を緩和する役割がある。これにより、冷凍機内のタービン膨張機や圧縮機の安定した動作を維持できる。超伝導コイルに4.5 K以下のヘリウムを供給するため、熱交換器での温度差を考慮して、ダンパー内の液体ヘリウムの温度を4.3 Kにする必要がある。そのため、低温ヘリウム圧縮機を用いて、ダンパー内を0.11 MPa まで減圧して排気して飽和蒸気圧を下げる。コイルがクエンチした場合には電流を高速遮断するが、その時、冷媒の圧力が上昇するので、所定の圧力に達した時に、屋外のクエンチタンクにガスを放出し、回収する。

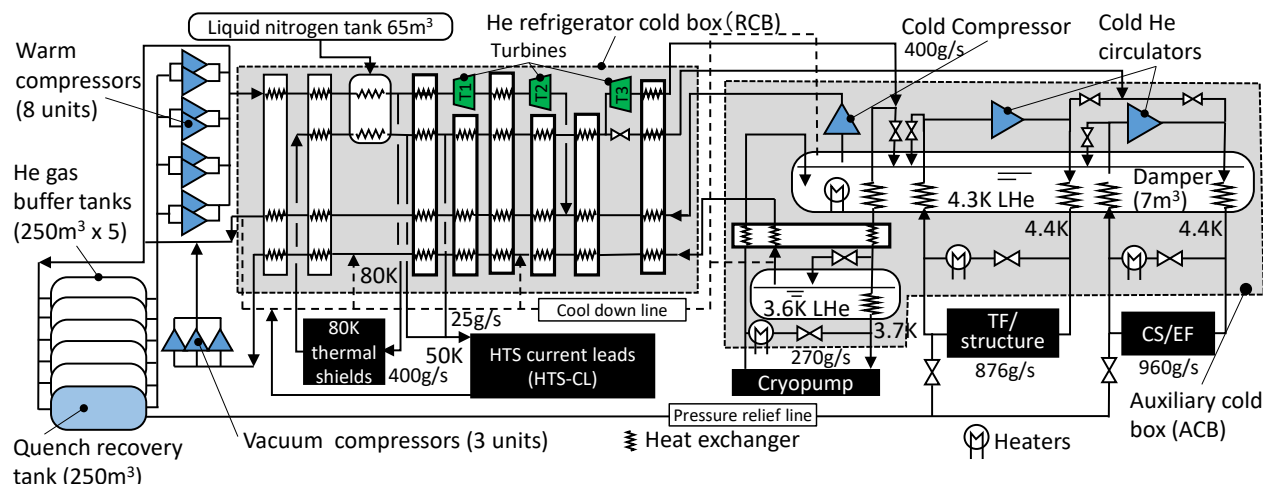


Fig. 2 Helium cryogenic system.

3. 統合コミッショニングにおける運転

冷却開始前に、1.5MPaにクライオスタット内機器を加圧してヘリウムリーク試験を行った。リーク量は基準である 1×10^{-6} Pam³/s以下であった。その後系内のヘリウムガスの高純度化のため、真空排気とヘリウムガスによる置換を行った上で、精製器を通して、ヘリウムガスを5日間循環させ、水分、空気成分を除去した。その結果、低温での運転が可能な不純物レベル(N₂, O₂:10ppm以下、露点:-70°C以下)に到達し、クールダウンを開始した。

クーダウン中、冷媒の入口、出口、TFコイル構造物に取り付けた温度計及びコイルの巻線の電気抵抗値から換算した温度を参考に、以下の条件でコイル温度を制御した。(1) 入口と出口の温度差: 35K以下、(2) 18個のTFコイルの温度差: 10K以下、(3) TFコイル構造物と巻線の温度差: 25K以下。

今回、初めての冷却運転であり、途中で温度均一化のための保持運転を実施するなど、クールダウンを完了するのに50日を要した。通電試験では、まず、EF/CSについて、クエンチ検出器を調整し、最大5kAまで個別に通電を行った。TFコイルについては、クエンチ検出器調整後、Fig. 3に示すとおり、TFコイル電流を段階的に増やしコイルの定格電流である25.7kAを達成した。現在EFコイルとフィーダーの接続部の絶縁不良により統合試験運転を中断しているが、補修改良を行った上で、トカマクプラズマ着火を目指す。

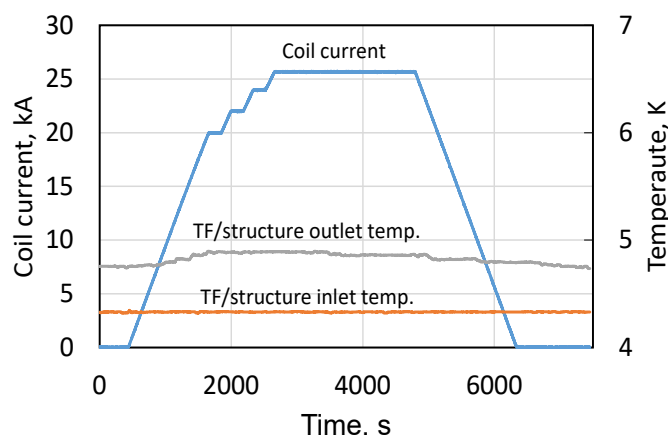


Fig. 3 TF coil 100% energization test.

*Hamada Kazuya¹ and JT-60SA team¹

¹National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Naka Fusion Institute