

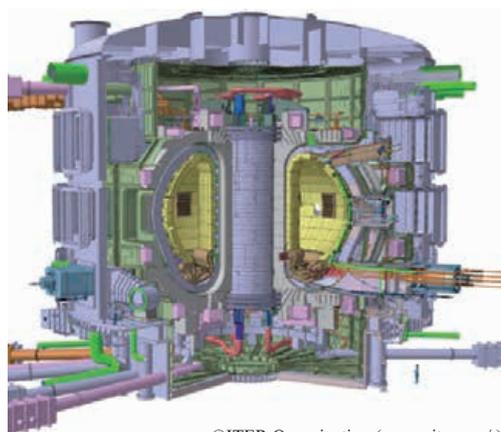
地上に太陽！？ 夢のエネルギー源を実現させる

ITER 向け超臨界圧ヘリウム循環ポンプ

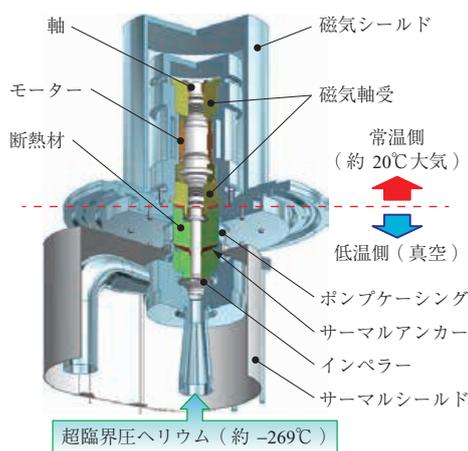
ITER とは、太陽と原理的に同じ核融合反応を地球上で実現させるという壮大なプロジェクト。この実現には超伝導コイルを絶対零度近くの温度で維持しなくてはならない。その冷却を実現させるキーハードとは？

株式会社 IHI
回転機械セクター 開発部

藤咲 克弥



©ITER Organization (www.iter.org/)
国際熱核融合実験炉 ITER



超臨界圧ヘリウム循環ポンプ断面図



超臨界圧ヘリウム循環ポンプ外観

ITER プロジェクト

現在、フランス南部サン・ポール・レ・デュランスに建設が進められている ITER (国際熱核融合実験炉) は、太陽や星を輝かせているのと原理的に同じ核融合反応を地球上で実現させ、核融合エネルギーの取り出しが人工的に実現可能なことを実証する、超大型国際プロジェクトだ。

核融合エネルギーを実用化するには、1 億℃以上にもなる高温・高密度のプラズマを炉の中に発生させ、閉じ込めておく必要がある。炉の中で発生させたプラズマを制御するには、大電流と強力な磁場を発生する超伝導コイルが用いられる。直径約 30 m、重量 2 万 3 千 t にも及ぶかつてない巨大実験炉は、プロジェク

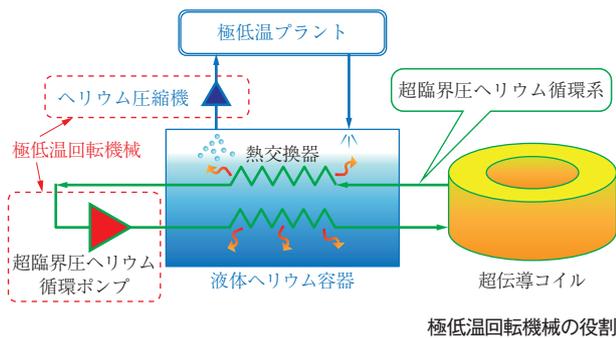
ト参加各国が技術力を結集し製作した、さまざまな超伝導コイルを組み合わせて構成されている。

そして、それぞれの超伝導コイルの能力を最大限に引き出すために必要不可欠なキーハードが、超臨界圧ヘリウム循環ポンプだ。

超臨界圧ヘリウム循環ポンプの役割

超伝導コイルに強力な磁場を発生させるためには、極低温まで冷却し、その状態を維持し続けなければならない。その冷却材として使用されるのが超臨界圧ヘリウムだ。

超臨界圧ヘリウムは、絶対零度近くの温度約 -269℃の地球上の自然界には存在しない極低温の流



体である。このような極低温下でも凍らず流体であり、外部から入った熱を良く吸収する性質があるため、超伝導コイルを強制冷却し、超伝導状態を維持する極低温システムの冷却材として、現在最適であると考えられている。

循環ポンプは超臨界圧ヘリウムを吸い込んで圧送し、液体ヘリウム容器の中にある熱交換器と超伝導コイルの間を循環させる。超伝導コイルを冷やすことで逆に超臨界圧ヘリウムは暖まるが、熱交換器に戻ってきて熱を取り除かれて再び元の極低温まで冷やされる。

世界中の核融合や加速器の研究所が、極低温冷媒を用いた極低温システムを利用しているが、そのなかでも超臨界圧ヘリウム循環ポンプや、IHI 技報第 53 巻第 3 号で紹介した欧州合同原子核研究所 (CERN) 向けヘリウム圧縮機といった極低温回転機械が、性能と信頼性の面で非常に重要視される。回転機械の性能が良いほど極低温システム全体の効率が良くなり、運用コストが低減できることと、長期間安定して運用し続けなければならないことがその理由だ。

ITER 実現のための要求仕様

ITER の核融合反応時には、膨大な熱負荷変動に伴う超臨界圧ヘリウムの温度・圧力変化が起きる。ITER の極低温システムは、この変動を最小限に抑えてコイルの超伝導状態を維持し続けるために、高度にコントロールされたシステムである。また、その規模は核融合炉としては世界に類を見ない。

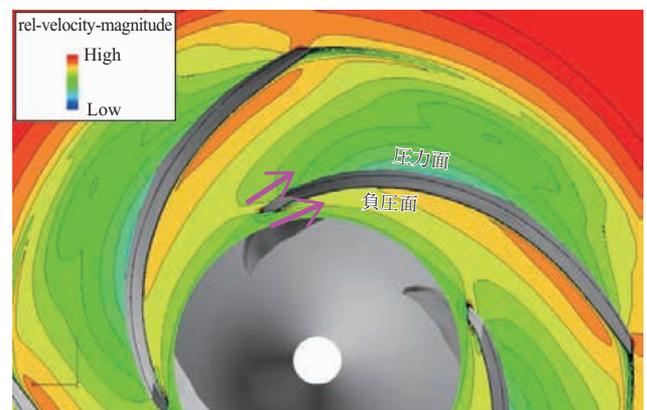
この巨大な極低温システムを成立させるため、超臨界圧ヘリウム循環ポンプ開発に課された要求仕様は、定格流量 2.21 kg/s という、これまでの世界最大ポンプの 2 倍以上の流量だ。さらに定格流量を含む広い運

転範囲において、断熱効率 70% 以上という高効率が要求される。また、流量や効率の性能以外の面においても、超伝導磁石の発する強力な磁場雰囲気中で安定して運転できることや、核融合反応中に発生する放射線下での耐久性、国際的な法規・規格への対応といったさまざまな要求項目をクリアしなければならない。

特に流量については、これまで世界中のどのメーカーにも経験がない要求のため、1 社単独での開発では要求を満足できないリスクが高い。ITER プロジェクト参加国で極低温システムの調達を担当するインドの研究機関 (ITER-India) は、ヘリウム循環ポンプの開発リスク低減を目的として、世界各国の極低温回転機械メーカーに対して競争入札を行った。入札に参加したメーカーから書類選考で上位 2 社に絞られた後、実際にヘリウム循環ポンプをそれぞれ 1 台ずつ製作し、ITER の極低温環境を模擬した試験装置で評価試験を実施した。性能や信頼性など多角的な視点で審査され、最終的により優れたメーカーが ITER に必要となる全ての循環ポンプ (合計 5 台) の製造を担当する。



高効率ポンプインペラー



CFD 解析による定格点でのインペラー内部流れの様子

高効率ポンプインペラー

超臨界圧ヘリウム循環ポンプを開発するにあたり、性能のいちばんの要となる部品がインペラーである。インペラーは超臨界圧ヘリウムを無駄なくスムーズに圧送しなくてはならない。IHI は長年積み重ねた膨大なテストデータと、最新の高性能インペラー解析技術をバランスよく融合させ、最適なインペラー形状と流路形状を作り上げることに成功した。

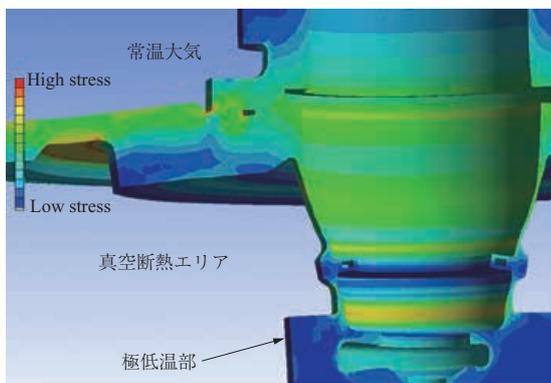
インペラーの性能を十分に発揮させるためには、1/1 000 mm 単位で設計された精密かつ複雑な形状を、実際のものづくりで実現しなければならない。インペラーの製作は、出来上がり形状の安定性に優れたロストワックス金型方式の精密鋳造を行ったうえ、完成したインペラーを三次元計測で詳細に寸法確認し、また、X 線による品質検査を厳重に実施して、高品質なものづくりを実現した。

高効率を実現する徹底した断熱構造

約 -269°C の超臨界圧ヘリウムを循環させるインペラーからわずか数十 cm 上は常温大気環境であり、その間の温度差は約 300°C にもなる。インペラーと並んで極低温回転機械の効率を大きく左右する要因が、この厳しい温度差によって常温側から低温側のケーシングに伝わっていく熱の影響だ。極低温のヘリウムには決して不要な熱を伝えてはならない。

熱侵入は、特に熱を伝えやすい金属製のケーシングの肉厚を薄くすればするほど、小さく抑えることができる。

一方で、ケーシングは自身の低温収縮によって生じる応力や、内部の圧力変化、接続された配管から受け



圧力・熱収縮・外力を考慮したケーシングの強度解析 (変形倍率 $\times 100$)

る外力といったさまざまな荷重を受けたあらゆる状態を想定し、それに耐えられるようにケーシング形状を最適化しなければならない。

これら相反する設計要求を高次元で両立させるため、想定される運転条件全ての温度、圧力、外力を考慮し、最新の熱・構造シミュレーション技術を駆使して開発を進めた。その結果、厚みわずか数 mm のケーシングで十分な強度をもたせながら、入熱を最低限に抑える最適構造に到達した。

IHI のものづくり力を結集して製造したケーシングは、安全確認のため行った耐圧試験や、約 -269°C の試験運転を経ても変形などの異常は生じず、品質の高さを証明した。

ケーシング内部には高性能の断熱材を配し、熱の侵入を最小限に抑えている。軸の常温部からインペラーへかけての中間付近にはサーマルアンカーと呼ばれる吸熱部品を配置し、軸を伝って超臨界ヘリウムに侵入しようとする熱を捉えて、外へと逃がす構造としている。

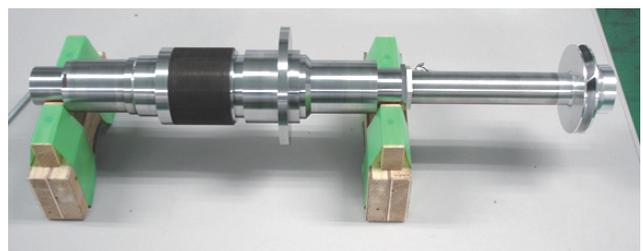
ポンプの低温部分はその周囲が真空断熱されているが、常温側の構造物から真空空間を伝わってふく射熱がわずかに侵入してくる。このわずかな熱でさえ逃がさず徹底的に排除するために、低温側ケーシング全体をサーマルシールドで覆い、ふく射熱をシャットアウトしている。

回転機械の信頼性を高めるために

極低温システム中を流れるヘリウムへの異物の混入を防ぐため、潤滑油を用いずに軸を磁気力で浮上させる磁気軸受を採用した。

軸とインペラーには非常に精密なバランス修正を施すことで、低回転から高回転まで全ての運転領域で、極めて安定した運転を実現した。

また万が一停電などで設備が電源喪失した場合は、



精密なバランス修正を行った軸



低温循環試験装置は量研機構現有システムに接続して運転・計測
(量研機構施設内)



低温循環試験装置に設置した IHI 製ポンプ

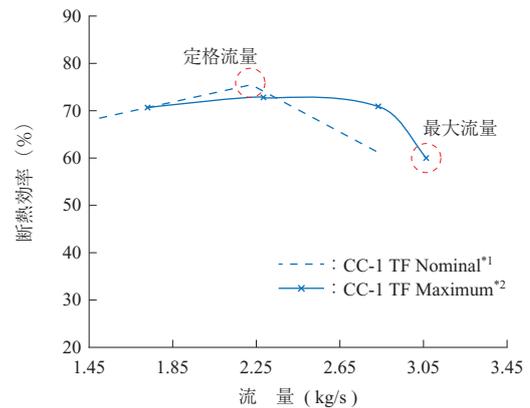
モーター軸の回転運動エネルギーを利用して、ポンプが安全に停止するまで自己発電してモーター軸浮上コントロールをし続ける機能を設けるとともに、万が一モーター軸が暴れて浮上できなくなっても、インペラがケーシングに接触して損傷しない軸系とし、二重の安全対策を施した。

さらに、モーターや磁気軸受、センサー類が実験炉の超伝導コイルから発せられる強い磁場の影響で誤作動しないように、外部磁場を遮断する磁気シールドを新たに開発した。

低温環境試験装置とポンプ性能評価

ITER は国際プロジェクトであり、日本では国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（量研機構：旧称日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門）が国内をリードしている。量研機構と ITER-India の取り決めに基づき、本ポンプは別途用意された低温循環試験装置に搭載され、量研機構の那珂核融合研究所（茨城県）施設内の現有運転設備に接続された後、実負荷試験が行われた。

試験は 2015 年 11 月にスタート。量研機構の設備



(注) *1: CC-1 TF Nominal : 定格回転数運転

*2: CC-1 TF Maximum: 最大回転数運転

©ITER-India

性能試験結果 (資料提供: ITER-India)

を駆使し、世界をリードする日本の研究者をはじめ、日印関係者全員の力を結集して数多くの実負荷試験が一つひとつ慎重に行われた。

1 か月に及ぶ実負荷試験の結果、要求仕様である定格流量 2.21 kg/s において断熱効率 73% 以上を記録し、要求をクリアした。また定格点を超えての運転では、世界最大となる流量 3.0 kg/s 以上の能力を発揮した。

将来の実運用では、効率や流量といった性能だけでなく、長時間連続運転中の安定性や、急な圧力・温度変化が伴う運転条件下での信頼性なども極めて重要である。これら全ての条件を模擬した実負荷試験も連続的にを行い、安定・安全に持続運転可能であることを実証した。

今後の展開

試験を終えて ITER-India より、IHI の超臨界圧ヘリウム循環ポンプは全ての要求仕様を満足していると高い評価を受けた。

IHI は今後も極低温回転機械技術を磨き上げ、超伝導応用技術のみならず、極低温を必要とするさまざまな分野の要求にベストマッチした製品開発を行い、世界の発展に貢献していく。

問い合わせ先

株式会社 IHI

回転機械セクター 営業部

電話 (03) 6219 - 5071

URL : www.ihico.jp/compressor/development/