

技術紹介

JT-60SA 向け極低温設備の製作

Manufacture of Cryogenic Equipment for JT-60SA

中島 章治*	青木 淳*	萩原 琳太郎*	林 卓弥***
NAKASHIMA Shoji	AOKI Jun	HAGIWARA Rintaro	HAYASHI Takuya
宮井 玲*	熊木 卓也*	高橋 亘**	市瀬 大輔*
MIYAI Ryou	KUMAKI Takuya	TAKAHASHI Tooru	ICHINOSE Daisuke

1. はじめに

「地上に太陽を」をスローガンに始まった核融合技術の開発は、現在では超大型国際プロジェクトとしてフランス南部カダラッシュ（マルセイユから北東に 60 km）に国際熱核融合実験炉（ITER）の建設が進められている。核融合炉は核融合エネルギーを取り出すことができる装置であり、重水素-三重水素燃料 1 g から石油約 8 トン分のエネルギーを得ることができる。燃料となる重水素は、海水中に豊富に存在するため資源枯渇の心配がない。もう一方の三重水素は、炉内で人工的に作り出すことが可能である。

ITER の建設が進む中で、日本では ITER 計画を補完し、将来の原型炉の設計にも役立てられる研究活動が開始されている。その一つが、日本の核融合実験炉 JT-60 を超伝導化する JT-60SA 計画である。JT-60SA はプラズマを閉じこめるための超伝導コイルをはじめ、サーマルシールド、クライオポンプ等の極低温機器を備えており、それら機器の能力を最大限発揮させるためには極低温ヘリウム（以下、冷媒と呼ぶ）の供給が必要不可欠である。

当社は、ヘリウム冷凍機で生成された冷媒をクライオスタットに移送するための、直径では国内最大級となるトランスファラインと、冷媒を被冷却機器に分配するためのバルブボックス 11 基を、量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所に納入した。

2. 設備概要

クライオスタットと納入機器の接続イメージを図 1¹⁾（クライオスタット本体は一部の内部構造を可視化している）に示す。また、ここではそれぞれの納入機器の特徴を述べる。

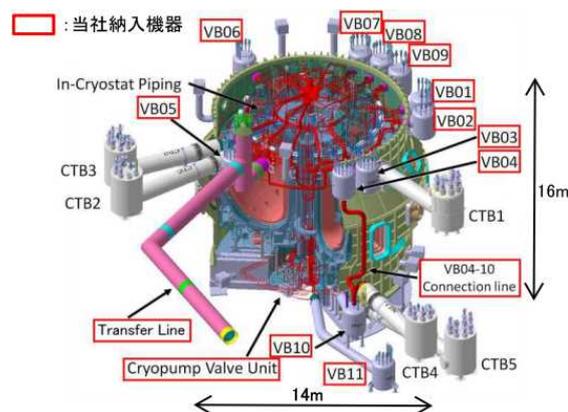


図 1 クライオスタットと納入機器の接続イメージ

2.1 トランスファライン

トランスファラインは全長約 50 m、外径 965 mm の真空外管内に、内径 800 mm のサーマルシールド、冷媒が通る内管 9 本（100A×6 本、50A×3 本）を有し、別室に設置されたヘリウム冷凍機から最小限の入熱で冷媒をクライオスタットまで移送する通り道である。その製作は当社グループのジェック東理社で行われた。トランスファラインは中間位置を境に A ユニットと B ユニットに便宜上分けられ、ヘリウム冷凍機側の A ユニットは現地で据え付けまでを実施した。クライオスタット側の B ユニットに関しては、クライオスタットが建設中のため単品で納入した。トランスファラインの外観写真を図 2 に示す。



図 2 トランスファライン外観

* エンジニアリング本部 PEC SCE プロジェクト部

** エンジニアリング本部 PEC SCE エンジニアリング部

*** エンジニアリング本部 PEC ASU エンジニアリング部

2.2 バルブボックス

バルブボックスは高さ 2 m, 直径 1.4 m の真空容器内に、サーマルシールドとバルブ 3~11 台を有している。トランスファラインにより移送されてきた冷媒は、バルブボックスで主管から枝管に分岐し、クライオスタット内の被冷却機器に分配される。分配量は各々の系統に設置されたバルブによって調整される。クライオスタットが建設中のため、11 基全て単品で納入している。バルブボックスの外観写真を図 3 に示す。



図 3 バルブボックス外観 (左下写真は内部配管)

3. 設計要求

適用される法規は高圧ガス保安法の冷凍保安規則および耐震告示であるが、法規制による耐震性以外にも内管の熱収縮によって生じる熱応力、耐放射線・耐磁場、低ヒートロスなどを考慮した設計が求められた。ここでは重要なポイントを紹介する。

3.1 耐震設計

高圧ガス配管となる内管の外径が 45 mm 以上であるため、高圧ガス保安法の配管耐震告示が適用されるとともに JT-60SA の設計思想にも合わせる必要があった。トランスファラインにおいては、真空断熱マルチ配管の外管まで配管耐震告示に従った耐震強度解析をした事例は初めてであり、難易度の高い解析となった。

外管・容器の耐震強度解析に関しては、モデリングから解析まで自社のシミュレーション部門にて FEM 解析を実施している。外部サポートに関しては、鋼構造設計規準等に基づき発生応力が許容応力以下であることを確認した。一例としてトランスファライン外管の耐震強度解析の結果を図 4 に示す。

内管の耐震強度解析に関しては、Bentley 社の配管

応力解析ソフト AutoPIPE を使用した。外管・容器の地震による変位量が、内管サポート部の強制変位量として入力されるため、内外管を連動させてのトライ&エラーによって許容条件を探る解析となった。

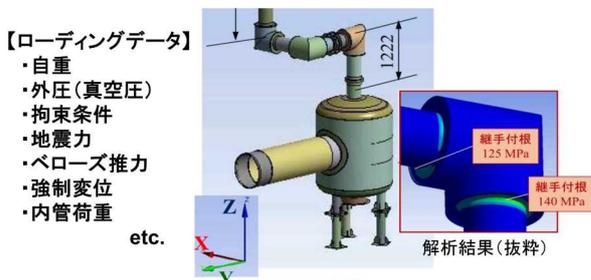


図 4 耐震強度解析モデルと解析結果

3.2 熱応力設計

通常、極低温機器の内管にはベローズやフレキシブルチューブと呼ばれる可とう管が配管熱収縮を吸収する目的で使用されることが多い。しかし、本機器では、高い配管内圧力、比較的大口径であること、組立性などの理由により可とう管を可能な限り使用しない設計とした。

熱応力の解析は、冷媒の通液によって冷却される内管に対して行われた。解析ソフトは内管の耐震強度解析と同じ AutoPIPE を使用した。熱収縮時の吸収量を確保するためには、サポート箇所を減らすことで内管を動けるようにする必要があるが、耐震設計の面では配管は固定した方がよく、バランスするサポート条件を見つける必要があった。一例として熱応力解析の結果を図 5 に示す。

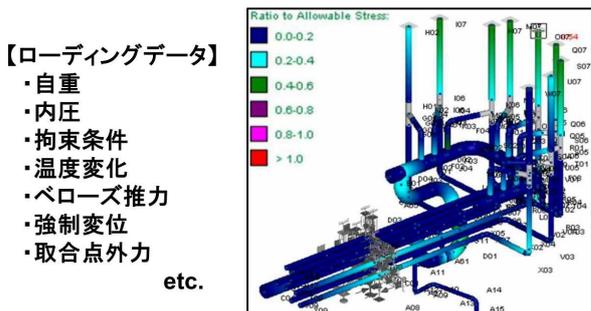


図 5 熱応力解析モデルと解析結果

3.3 耐放射線・耐磁場

核融合炉向け装置では、耐放射線・耐磁場対策が必要となる。本件では、放射線量 20 KGy, 磁場 0.1 T 以上の厳しい環境に対応できる機器が要求された。特に注意すべき機器にバルブがあるが、以下の対策により技術的要求を満足した。

- ・シール材には、一般的なテフロン製やNBR製ではなく、耐放射線性の高いPEEK製やEPDM製を使用
- ・自動調節バルブのポジションは本体分離型を採用し、計装空気調節には磁場環境に強いピエゾバルブを採用
- ・磁場対策として自動ON/OFFバルブの計装空気供給用電磁弁も本体から分離設置

3.4 低ヒートロス

冷媒への入熱を最小化するためには、伝導伝熱および輻射伝熱の2つを低減しなければならない。

伝導伝熱として最も影響が大きいのは内管のサポート部分である。本設備では内管のサポート材として低熱伝導率かつ高強度であるガラスエポキシ樹脂のG10を使用した。また、バルブは低温用長軸弁を使用しているが、ステム鞘管から80Kのサーマルアンカーをとることで温度分布を最適化し、内管への入熱が低減されている。

輻射伝熱対策としては、サーマルシールドを施工した。サーマルシールドは80Kに冷却されることで、外管から内管への直接的な輻射伝熱が大幅に低減される。さらに輻射伝熱を低減するために、サーマルシールドと内管には多層断熱材(MLI)が施工されている。輻射伝熱を低減する層構造を図6に、トランスファライン全体の侵入熱量(計算値)を表1に示す。

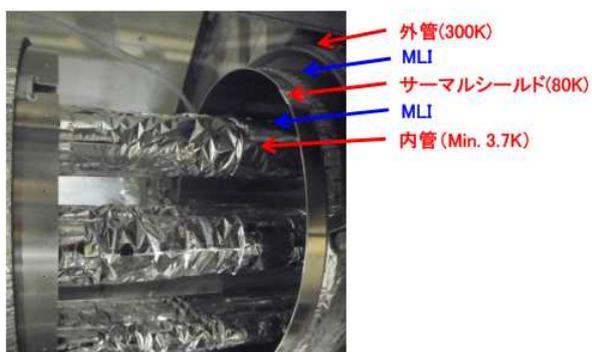


図6 トランスファラインの内部層構造

表1 トランスファラインへの侵入熱量

	3.7K, 4.4K	50K	80K
被冷却体	100A : 4本 50A : 2本	50A : 1本	100A : 2本 サーマルシールド
侵入熱量(計算値)	91.6 W	5.5 W	393 W
顧客要求値	≤97 W	≤9 W	≤430 W

4. 工場製作と現地工事

極低温機器の製作において、MLIの施工管理が重要な要素となる。MLIが最大のパフォーマンスを得られるように厳密な施工管理を実施した。

現地工事に関しては、当社グループの大陽日酸エンジニアリングのサポートを得て、トランスファラインのAユニット(ヘリウム冷凍機側)が現地で据え付けされた。放射線管理区域を含む計4部屋にまたがる工事となり、各ユニットの据付・接続、MLI・サーマルシールドの施工、外管の溶接、各種検査等の約5か月に亘る現地工事を無事故無災害で完工した。なお、外管のHeリークレートは、 $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下という要求値を満足している。現地工事の様子を図7に示す。



図7 現地工事の様子

5. まとめ

JT-60SAの完成と全体試運転(ファーストプラズマ)は2020年に予定されている。

極低温ヘリウムを移送・分配する設備は、超伝導コイルをはじめとする極低温機器の冷却に必要な不可欠な技術である。本設備の設計・製造・現地工事という一連の過程で得られた技術を今後の超伝導応用技術の更なる発展に活かしていきたい。

謝辞

本設備の設計から現地工事の完了まで多くのご協力を頂いた量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所の関係者の皆様、並びに製作をいただいたエイシア工業株式会社(バルブボックスの製作メーカー)、株式会社ジェック東理社、大陽日酸エンジニアリング株式会社の各関係者に対し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 夏目他, 2017年度秋季低温工学超伝導学会, 2C-p02 より引用して改変