

STF2 超伝導加速空洞用クライオモジュールの開発

DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING RF CRYOMODULE FOR STF2

立木智裕, 柳澤剛, 井上典亮, 仙入克也

Tomohiro Tsuiki, Takeshi Yanagisawa, Fumiaki Inoue, Katsuya Sennyu

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, Mihara, 729-0393, Japan

Abstract

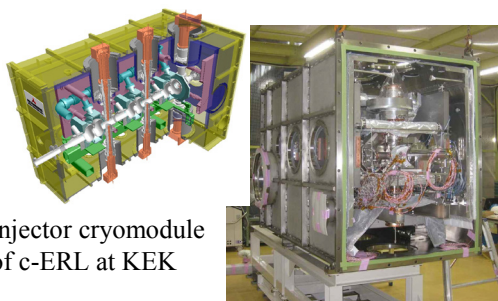
MHI has supplied the superconducting RF cavities and cryostats for STF2 superconducting RF cryomodule at KEK. This report provides the detail of STF2 cryostat development.

1. はじめに

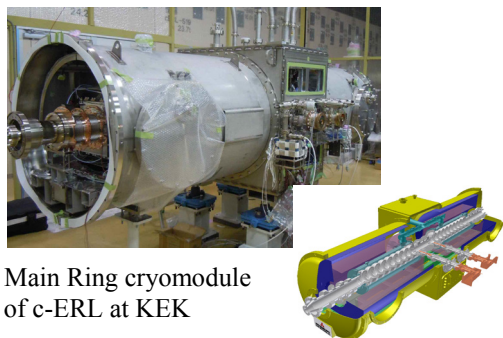
次世代加速器の国際リニアコライダー(ILC)への適用を目指し、KEK では超伝導 RF 試験施設(STF)が稼働し、超伝導加速技術の開発が行われており、現在は、超伝導空洞を 12 台収納した STF2 超伝導加速空洞用クライオモジュールの開発が進められている[1]。

MHI では、これまで STF 向けに超伝導加速空洞を開発・供給してきた[2][3]。STF2 計画では、超伝導空洞の供給に加え、その空洞を収納するクライオスタットの設計・製造も担当した。

MHI はこれまでに、KEK にて実施された、TRISTAN, KEKB-Crab, cERL 入射部&主加速部など多数の超伝導クライオモジュールを設計・製造し、その技術を蓄積してきた(Figure 1)[4]。今回はこれらの経験を踏まえつつ、ILC に向けた試験機としてのクライオモジュールの設計・製作を行ったのでここに報告する。



(a) Injector cryomodule of c-ERL at KEK



(b) Main Ring cryomodule of c-ERL at KEK

Figure 1: MHI cryomodules.

2. STF2 クライオモジュールの開発

STF2 超伝導加速空洞用クライオモジュールは、空洞 8 台を収納した上流側の「CM-1」と空洞 4 台を収納した下流側の「CM-2a」からなる。特に「CM-1」は ILC の標準モジュールを想定して計画された。

但し、種々の制約条件により設計及び治具等に変更を加えた。

2.1 真空容器

クライオモジュールは内蔵する超伝導空洞を極低温に保持する為、断熱真空容器に収納される。「CM-1」の真空容器の主要部は全長約 12000mm、直径約 965mm の円筒鉄管である。

今回、KEK 所有の既存の組み立て治具の一部が活用できること、組立エリアへの搬入口のサイズ、製造の難易度等を考慮し、真空容器の主要部分は 3 分割で製造することとした(Figure 2)。

組立手順は、3 分割の真空容器をそれぞれ順番に組み込んでいく手順とし、組立治具を設計した。結果、設計治具は一体化組立で検討したものより小規模化し、組立エリアも省スペース化した。

一方で、接続はフランジ締結であり、その気密性の確認試験が、全体組立完了後にしか実施できなかった為、接続時には注意して作業を行う必要があった。



Figure 2: Vacuum vessel.

2.2 配管のフランジ接続

STF2 クライオモジュールには、超伝導空洞に液体ヘリウムを供給する為の 2K ヘリウム配管、侵入熱を遮断する為の熱シールドを冷却する 5K ヘリウム配管、80K 窒素配管が組み込まれている。2K ヘリウム配管の戻りガス配管は、ガスリターンパイプ (GRP) と呼ばれる直径約 300 mm の配管であり、超伝導空洞を含む内容物を吊り下げサポートする役割を担っている。

本モジュールでは、GRP を含む各種配管の接続部をすべてフランジ取り合いとした (Figure 3)。これは、クライオモジュールの分解・再組立を容易にする為である。

多数のフランジ締結部が発生することとなったが、すべての締結部に対し、ヘリウムリーク試験と運転圧状態での気密試験を実施し、漏れのないことを確認した。

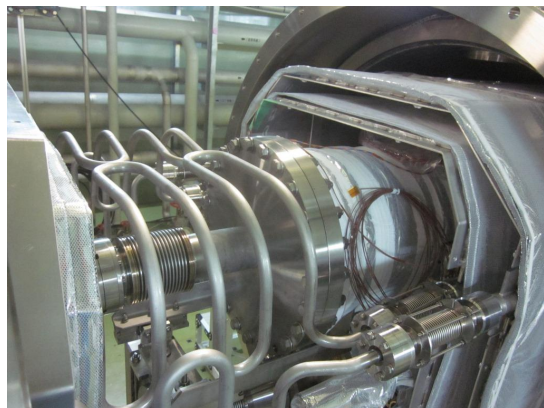


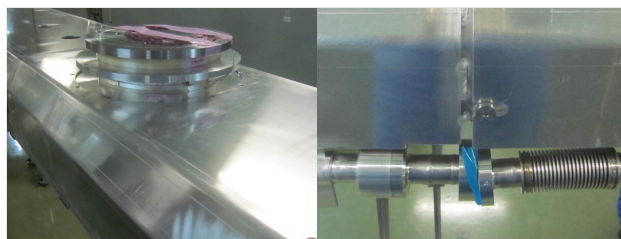
Figure 3: Connection flanges of pipes.

2.3 熱シールド

クライオモジュールには外部からの侵入熱から内容物を保護する為、熱シールドが設けられる。本モジュールには 5K シールドと 80K シールドが設けられており、サポートポストと呼ばれる支持機構で支えられている。

従来の設計では、熱収縮を吸収する為に 1ヶ所のサポートポストに熱シールドを固定し、他のサポートポストでは熱シールドがスライドできる機構として、ブレード線等で熱接触を確保する構造となっていた。

今回の設計では、熱シールドをサポートポスト毎に分割し、それぞれのサポートポストと固定して熱接触を確保するとともに、分割部でスライドできる構造として熱収縮を吸収する構造とした。配管にはベローズを設置した。分割した熱シールドは、それぞれ冷媒供給配管が溶接される構造となっており、個別に冷却される。これにより、サポートポスト部の熱接触の向上が期待できる。



(a) Support post & Thermal shield (b) Connection part

Figure 7: Thermal shield.

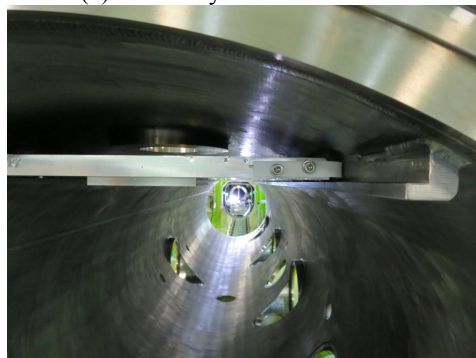
2.4 真空容器組立治具

クライオモジュールの組み立ては、まず内容物を組み立てた後 (これをコールドマスと呼ぶ)、真空容器を (あるいは真空容器に) 端から挿入していく手順となる。コールドマスは GRP を強度部材としているが、組み立て中に正規のサポート位置ではない両端支持となった場合、中央部が約 20 mm 程度たわむと考えられ、吊り下げられている超伝導空洞への負荷の発生、空洞及び配管の接続シールド部及びベローズへのダメージ、空洞アライメントのずれなどの悪影響が発生する可能性がある。

この為、真空容器組立の際は、コールドマスのサポート箇所を複数用意し、真空容器の移動に合わせてサポート箇所を変更することでたわみを抑制した。また、真空容器の一部に予めガイドレールを設けておき、そのレール上をスライドする治具にコールドマスをサポートさせることで、真空容器挿入中のたわみをさらに低減させた。



(a) Assembly of vacuum vessel



(b) Assembly jig and guide rail

Figure 4: Assembly of Vacuum vessel.

3. 組み立て

製造した各機器及び治具を KEK に搬入し、「CM-1」及び「CM-2a」の組み立て作業を実施した。「CM-1」を組み立ててビームラインに設置した後、「CM-2a」を組み立て「CM-1」の下流に搬送し、両者を接続した。

STF2 超伝導加速器用クライオモジュールは、今後、冷却試験、Low power 試験、High power 試験、ビーム試験等の実施が予定されている。



Figure 4: STF2 cryomodule.

4. まとめ

MHI では、KEK 向け STF2 超伝導加速空洞用クライオモジュールにおいて、これまで行ってきた超伝導空洞の供給に加え、クライオスタットの設計・製造・組立を担当した。今後は今回の経験を踏まえ、ILC に向けたクライオスタットの設計、組み立て手順・治具の検討、コストダウン検討を行っていく予定である。

また、本稿では詳しく述べなかったが、超伝導クライオモジュールに関しては、関連法規（高圧ガス保安法）への対応が必要であり、本モジュールも法規に則った試験を受検している。ILC が日本に建設される場合、現行の方法では検査人員不足など、製造・運用に対応できないことが予想される。これについても今後検討を進めていく。

謝辞

STF2 超伝導加速空洞用クライオモジュールの製造に当たり KEK の山口誠哉氏、仲井浩孝氏、加古永治氏、原和文氏をはじめ多くの方々にご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T.Shishido, et al., "Construction of STF2 Cryomodule consisting of Twelve 1.3 GHz 9-cell SC Cavities. ", 本学会, MOOL12.
- [2] T.Yanagisawa, et al. "Status of the Superconducting Cavity

Development for ILC", SRF2013, Paris, France, (2013), MOP055.

[3] H.Hara, et al., "Superconducting Cavity R&D for ILC at MHI", 本学会, SUP047.

[4] H.Hara, et al., "The Development of Cryomodule for c-ERL at MHI", 第 10 回日本加速器学会年会, SUP044.