

極低温冷凍機のシステム適用に向けた検討

～熱侵入を防ぐ～

松下 智行 (まつした ともゆき) 富士電機株式会社 パワエレシステム事業本部 社会ソリューション事業部
特機システム部 担当部長

神田 尚明 (かんだ なおあき) 富士電機株式会社 パワエレシステム事業本部 社会ソリューション事業部
特機システム部 主任

要約 本稿では、極低温冷凍機を冷却対象のシステムへ適用する際に欠かせない熱侵入対策について、検討ポイントや評価方法、検証事例を紹介する。熱侵入の低減は、冷却効率向上のために不可欠であり、冷却部に真空断熱容器を用いることが多く、その真空劣化を防ぐ対策が、高信頼設計のポイントになる。更に、真空断熱では抑止できない、外気からの輻射熱や、配線からの熱伝導についても、別途低減対策を講じることで極低温環境が実現される。熱侵入の抑制で余分な冷却をしなくて済み、冷凍機のダウンサイジング、使用スペースの削減に効果がある。本稿では、冷却対象部位の模擬として、超伝導デバイスを想定したサンプルを用いて極低温環境の検証モデルを構築し、評価を行った実例を交え、極低温環境実現における検討プロセスを紹介する。

1. はじめに

1960年代に開発された小型冷凍機は、近年益々小型化され、搭載先の製品・システムの用途を広げている。代表的な分野として超伝導材活用や半導体型センサ冷却が挙げられる。超伝導では、極低温物性の完全導電性（電気抵抗ゼロ）の応用が検討、実用化されており、例として、エネルギー分野のケーブル・コイル・発電機・電力貯蔵装置、交通・輸送分野のリニアモーター・超伝導モーター、医療分野のMRI・心磁計・脳磁計・NMR、エレクトロニクス分野の超伝導コンピュータ・AD変換・非破壊検査・地殻中金属資源探査装置・通信用フィルタ等が挙げられる。一方、半導体型センサ冷却の場合、極低温レベルまでは冷却しないものが多く、主なものに赤外線センサへの適用があり、撮像素子自身が発する熱による熱雑音の影響を除去し、優れた検出感度・応答速度が得られる。更に、CCDイメージセンサについても同様な効果が得られるため、資源探査衛星・赤外線宇宙望遠鏡や天体望遠鏡にも採用されている。

何れの用途においても、50K～150Kの冷却温度を長期安定に維持することが求められる。また、寸法的に冷却設備の占有スペースが小さいほど、幅広い用

途に対応できる。設備の高信頼、小型化を実現する上で極低温技術と真空断熱技術は基盤技術として位置づけられる。真空断熱により熱侵入を抑え、効率良く対象物の冷却に専念させる環境を構築することで、より冷凍能力の小さいクラスの冷凍機を選定でき、省スペース化が実現できる。

極低温環境を得る手段としては、液体窒素や液体ヘリウム等の寒剤の使用によるものか、機械式の極低温冷凍機の使用によって実現される。システムの小型化には後者の冷凍機が優位であるが、仮に何らかの要因で、設計想定を超えた外部からの熱侵入が高頻度に起こると、運用不能に陥ったり、数年間レベルで継続的に過負荷、高温状態に晒され続けることで、冷凍機の性能が低下する可能性もゼロとは言えない。性能劣化要因は、冷媒ガス中に、不純物混入（コンタミネーション）や汚染ガスが発生し（アウトガス）冷却端付近に固着することで生じる。機械式冷凍機は、圧力容器構造を持ち、高圧の冷媒ガスを封入した状態で長期間無保守で運転されるため、設計、材料選定、製作工程に至るまで高レベルな管理が必要である。

また、冷却部位については、極低温レベルの環境実現のために、真空断熱構造とすることが一般的である。真空断熱容器で冷却部位を覆う形状となり、高真空状態の長期維持のために、容器内部におけるアウトガス