

氏名(本籍)	なら さき かつ ひろ 榎 崎 勝 弘 (福岡県)				
学位の種類	博 士 (工 学)				
学位記番号	博 甲 第 6308 号				
学位授与年月日	平成 24 年 7 月 25 日				
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当				
審査研究科	システム情報工学研究科				
学位論文題目	1K 級冷凍機の熱設計と長寿命化に関する研究				
主	査	筑波大学教授	博士(工学)	西 岡 牧 人	
副	査	筑波大学教授	工学博士	松 内 一 雄	
副	査	筑波大学准教授	博士(工学)	笠 原 次 郎	
副	査	筑波大学助教	博士(工学)	高 田 卓	
副	査	筑波大学名誉教授	工学博士	村 上 正 秀	

論 文 の 内 容 の 要 旨

本論文は、世界で初めて室温から超流動ヘリウム温度 (1.8K) 以下の冷凍能力を有する閉ループの機械式 1K 冷凍機の開発を行い、10mW@1.7K という冷却目標を達成した際に得られた、多くの工学的知見をまとめたものである。開発した冷凍機は宇宙用として世界初のもので、その達成した冷却効率は世界的に見ても群を抜くものである。

第一章ではまず、宇宙での低温技術を使った観測のトレンドと冷凍機使用のメリットを解説するとともに機械式宇宙用冷凍機の種類と各国の開発状況を紹介した。更に次世代赤外線天文衛星「SPICA」の紹介としてミッションの科学目的、SPICA に至る赤外線望遠鏡の経緯、SPICA ミッションの概要、SPICA 冷却系の概要を述べた。最後に本研究の対象である 1K 級冷凍機の位置づけを示した。

第二章では予冷機としての二段スターリング冷凍機と、ヘリウム 3 (^3He) を作動流体として使用するジュールトムソン (JT) 冷凍機を組み合わせた 1K 級冷凍機の構成と作動原理、および冷却の発生原理としてジュールトムソン効果と断熱膨張について熱力学的に説明した。更に、 ^3He の物性値について考察し、設計に必要な物性値を推算しこれを数表の形でまとめた。また 1K 級熱設計手順を提案し、JT 冷凍機の熱サイクルの最適化のために熱バランス解析を検討した。そしてそれに基づいて冷却目標の「10mW@1.7K」を得るための熱バランス解析を実施し、最適解を求めた。続いて、予冷機である二段スターリング冷凍機の効率、蓄冷機の重要性、低温化のための蓄冷機の多段化について熱力学の観点から考察するとともに、本研究開発に使用した二段スターリング冷凍機の構造、特徴、冷却能力について解説した。また、JT 熱交換器の熱伝達係数と圧力損失を含めた熱設計手順を提案し、JT 系全体の圧力損失を 16.88 Torr という超低压に抑えることが可能であることを確認した。

第三章では、まず第二章で提案した熱設計手法を適用して設計製作した 1K 級冷凍機とその試験装置の概要を説明し、次にその冷却性能試験結果を示した。その中で、無負荷最低到達温度は 1.466K、熱負荷試験では 12mW を与えた場合の 1K ステージ温度は 1.678K と、目標の 1.7K 以下を達成したことを示した。続いてこの試験結果と熱バランス解析、熱交換器の効率、JT 低压系の圧力損失、JT 圧縮システムの消費電力の

比較検討を実施し、設計の妥当性を検証した。その結果、1K ステージの冷却能力は熱バランス解析の最適解とよく一致しているとともに、熱交換器の効率と JT 低圧系の圧力損失も実験データと計算値が良く一致しており、提案した熱設計方法が実機の設計に適用できることを示した。一方 JT 圧縮システムに関しては、一段ピストンが圧縮仕事をする時の背圧によるアシストを等価バネ定数がする仕事と考えて補正した結果、10%以内の誤差で一致するようになった。

第四章では、まず宇宙用冷凍機として重要視される長寿命化の要求に関して検討し、特に封入ヘリウムガスに対する不純ガスの影響が冷却性能劣化の主要因であるということ述べた。それに基づき、一段冷却ステージ温度付近で固化点を持つ CO_2 及び二段冷却ステージ温度までに固化点をもつ N_2 を混入させて、それらの濃度による JT 冷凍機の冷却能力の劣化傾向を測定し、寿命への影響を検討した。その結果、ヘリウム 4 の場合は不純ガスによる冷却性能の低下を抑えるためには運転期間中に発生する不純ガスの量を CO_2 400ppm 以下、 N_2 2000ppm 以下に抑えればよいことを明らかにした。また発生する不純ガスを許容値以下にするために、アウトガスの少ない材料選定、ベーキングの温度と時間、保管を含めた製造管理、ガス製造手順等について検討するとともに、発生した不純ガスをトラップするためのゲッターの必要量についても検討を行った。

第 5 章では結言として、本研究で得られた結果をまとめるとともに、今後の技術課題を抽出した。

審査の結果の要旨

本研究で著者らが開発した冷凍機は宇宙用として世界初のもので、その達成した冷却効率は世界的に見ても群を抜くものである。この冷凍機により、超流動ヘリウム温度 (1.8K) 以下の冷却温度を必要とする遠赤外線検出器の冷却が可能となった。この達成成果により、世界的に見ても画期的な寒剤を搭載しないで放射冷却と機械式冷凍機のみでの冷却方式で望遠鏡や遠赤外線検出器を冷却する次世代赤外線望遠鏡計画である SPICA の実現に大きく貢献できたと考える。そして、これらの開発を遂行するに当たって著者が得てきた多くの新しい知見は、低温工学において重要な意義を有している。

平成 24 年 1 月 25 日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。