

次期赤外線天文衛星 SPICA のミッション部 冷却システムの検討

Study on cryogenic system for next IR astronomical telescope of JAXA/SPICA

総合技術研究本部 システム評価技術グループ 杉田寛之
宇宙科学研究本部 赤外・サブミリ波天文学研究系 中川貴雄、村上 浩
宇宙科学研究本部 宇宙探査工学研究系 大西 晃
宇宙科学研究本部 宇宙航行システム研究系 小川博之

Hiroyuki Sugita, Space systems evaluation engineering group, ISTA
Takao Nakagawa, Hiroshi Murakami, Department of infrared astrophysics, ISAS
Akira Ohnishi, Department of spacecraft engineering, ISAS
Hiroyuki Ogawa, Department of space systems and astronautics, ISAS

Abstract

This report describes the thermal design of the space infrared telescope of JAXA/SPICA. This advanced astronomical mission features long observation with high sensitivity and spatial resolution. The excellent performance of telescope is realized by the primary mirror of 3.5 m diameter and optical instruments cooled to 4.5 K or below. Thus, the cryogenic telescope requires efficient cooling system consisting of efficient radiators and mechanical cryocoolers. First, the thermal design of cryogenic system is analyzed to estimate the mission feasibility. Secondly, the developed mechanical cryocoolers are described. The BBM of ^3He -JT cryocooler for 1.7 K successfully reaches the required cooling capacity of 10mW at 1.7K in ground experiments.

1. はじめに

ASTRO-F に続く次期赤外線天文衛星 SPICA は、直径 3.5m の大型主鏡を持つ極低温望遠鏡を用いて中間赤外～遠赤外領域において世界最高の感度と分解能の天文観測を行うミッションである。現在、2010 年代初頭の打上げを目指して、JAXA 宇宙科学研究本部・赤外天文グループを中心に検討が進められている[1]。他の赤外線天文ミッションと比べて圧倒的な高感度観測を可能にする極低温冷却技術は、SPICA ミッションの成否を握る重要技術のひとつとなっている。

SPICA が観測を行う太陽-地球の第 2 ラグランジュ点では、衛星から見て太陽と地球がほぼ同一方向に常時存在し、時間的・空間的に安定した熱的環境が得られるため、放射冷却を効果的に活用できる利点がある。また、機械式冷凍機の採用により、従来の低温要求ミッションで使用されてきた液体ヘリウム等の寒剤が原則的には不要となるので、寒剤による観測寿命とミッション部の質量/体積の制約から解放される。(Fig.1)

これまでに著者らは、旧 ISAS 赤外天文グループと旧 NASDA 技術研究本部の共同研究テーマ（現在は JAXA 本部間協力テーマ）として、SPICA 実現のキー技術となる「ミッション部の熱設計解析」、「機械式冷凍機の開発」および「冷却系排熱システムの設計検討」等に取り組み、SPICA ミッションの熱的成立性を検討してきた[2,3]。本稿では、SPICA 冷却システムの検討と今後の課題について報告する。

2. 冷却システムに対するミッション要求

軌道上で 5 年以上に亘って長期観測を行う SPICA では、望遠鏡（主鏡、副鏡、光学ベンチ）を 5K 以下に冷却し、さらに光学ベンチに艤装される一部の検出器を 1.7K や 2.5K の温度

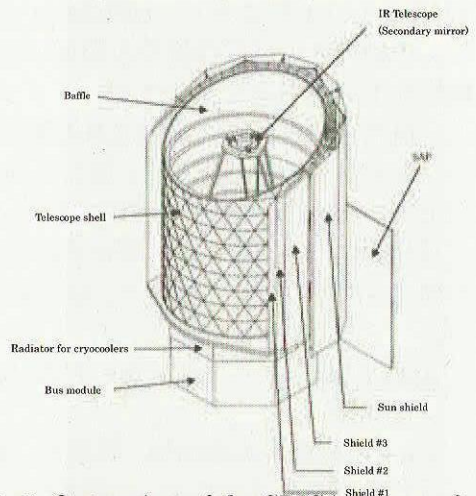


Fig.1. Outer view of the SPICA spacecraft.

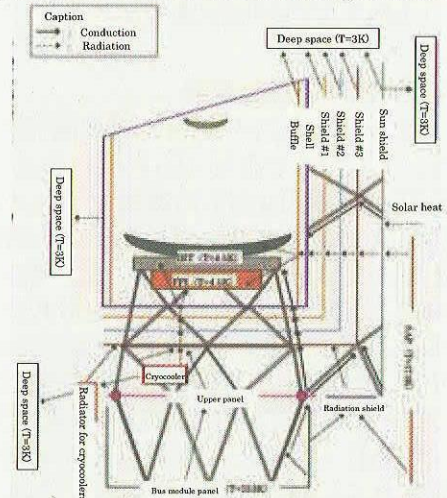


Fig.2. Schematic drawing of the SPICA cryogenic system.

環境下で動作させる必要がある。ASTRO-F を始め従来の赤外線天文観測ミッションの多くでは、超流動ヘリウム等による寒剤冷却方式が用いられてきたが、SPICA では、寒剤の質量/体積および保持期間に起因する観測上の制約を克服するため、Fig.2 のような断熱/放射冷却構造と機械式冷凍機システムを効率的に組み合わせた冷却方式がこの極低温域では世界で初めて採用される[2]。Table 1 に、望遠鏡、観測光学系および検出器からの機械式冷凍機に対するミッション要求を示す。

SPICA に搭載される機械式冷凍機は、赤外線天文ミッション ASTRO-F 用に開発された 20K 級 2 段スターリング冷凍機[4]と、地球大気観測ミッション ISS/JEM/SMILES 用に開発された 4K 級冷凍機[5]の技術が基盤となっている。したがって、20K 級の 2 段スターリング冷凍機と、4K 級の JT (ジュール・トムソン) 冷凍機については、既開発品の冷却能力向上と、軌道上での 5 年以上に亘る長期連続運用に耐えうる信頼性向上が主要な開発課題となる。一方で、1K 級と 2K 級の JT 冷凍機は新規開発品となる。SPICA に搭載される機械式冷凍機の仕様および開発課題を Table 2 に示す。

3. 4K 級冷凍機の開発

望遠鏡は放射冷却と冷凍機により 5 K 以下に冷却されるが、この 4K 級冷凍機は、既に国際宇宙ステーションの大気観測ミッション JEM/SMILES の超電導フィルタ冷却用として開発されている冷凍機[5]の発展改良型である。特に、ミッション期間が SMILES の 1 年に対し、SPICA は 5 年以上の長期となることから、作動ガスの品質保持や圧縮機の安定運転といった冷凍機の信頼性向上が必須となる。また、ミッション部の鏡筒、断熱シールド、構造支持材等から構成される断熱/放射冷却構造の熱設計マージンを確保する観点から、現在の 30 mW@4.9 K の冷却能力を向上 (~50 mW) させる必要がある。

具体的には、後述する前段の 2 段スターリング冷凍機の冷却能力向上 (高効率化) に加えて、以下のような課題に取り組んでいる。

- ① JT 回路 (オリフィス等) および熱交換器の最適化および試作試験
- ② JT 圧縮機の流量増加、高圧化、駆動周波数増による小型化
- ③ 作動ガスの品質保持、冷凍機の冗長構成等による信頼性向上
- ④ 地上での評価試験方法の確立

4. 1K 級冷凍機の開発

光学ベンチ内の焦点面観測機器のひとつである遠赤外検出器は、1.7K まで冷却する必要がある。これまで、前述の JEM/SMILES 用 ^4He -JT 冷凍機をベースにして、1.7 K でより高い飽和蒸気圧を持つ ^3He ガスを用いた ^3He -JT 冷凍機の新規開発を進めてきた (Fig.3 と Fig.4) [3]。 ^3He を用いる場合でも、JT 回路中で 1.7 K での 8 kPa から 300 K の 7 atm まで作動ガスを昇圧する必要があるため、2 段一体型リニア真空ポンプと 2 段一体型リニア圧縮機による 4 段階の圧縮が行われる。Table 2 に示すように、1.7 K で 10 mW の要求能力に対し、すでに試作試験機 (BBM) によって 12 mW の冷却能力 (AC 入力 162.3W) が実証されている。今後の課題としては、高効率化と信頼性向上を主眼に、低圧駆動バイパス弁の開発や、 ^3He ガスに関連する運用や

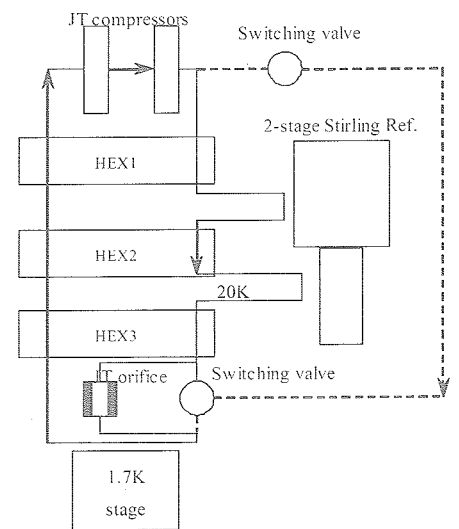
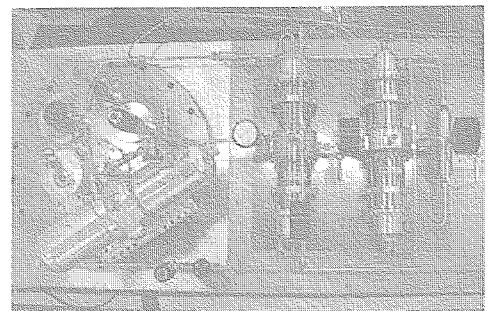


Fig.3. ^3He -JT circuit with 2-stage Stirling cryocooler for 1.7 K.



(a) JT circuit with heat exchangers.



(b) JT compressors (right) and 2-stage Stirling cryocooler.

Fig.4. Breadboard Model of 1K-class cryocooler.

精製方法の確立にも取り組む必要がある。

5. 20K 級冷凍機の開発

20K 級の 2 段スターリング冷凍機[4]は、SPICA に搭載される予冷用、4K 級、2K 級、1K 級の全ての冷凍機に使用されるという点において、最も高い信頼性が要求される冷凍機と言える。そこで、長期連続運用時のスターリング冷凍機の性能変化を調べるため、作動ガス (He) に対する CO₂ および N₂ の不純ガス汚染を模擬した評価試験を実施した。その結果、それぞれ汚染限度が 500 ppm と 1000 ppm 程度であることが明らかになった。(Fig.6)

また、ミッション部の熱設計マージンを確保する上でも、その冷却能力の向上が及ぼす影響は極めて大きい。これまでに膨張部 2 段目シリンダ径を 7 mm から 8 mm へサイズアップすることで、既存のスターリング冷凍機の 60% の能力向上 (325 mW@20 K、AC 入力 98 W) を達成できた。

2 段スターリング冷凍機の今後の開発課題としては、Table 2 に示したように他の冷凍機同様、能力向上 (低温化) と信頼性向上が挙げられるが、現在、能力向上を目指し、より大きな体積比熱を持つ蓄冷材の試作評価を実施中である。

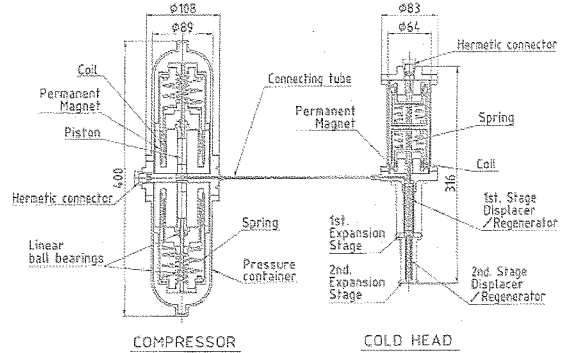
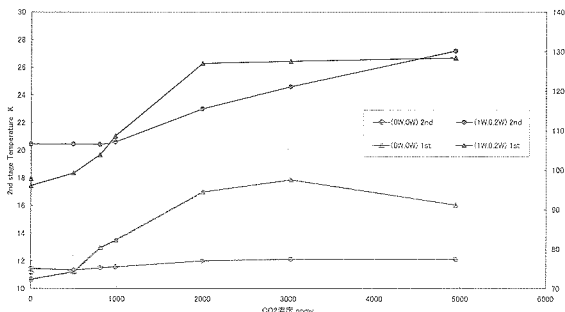
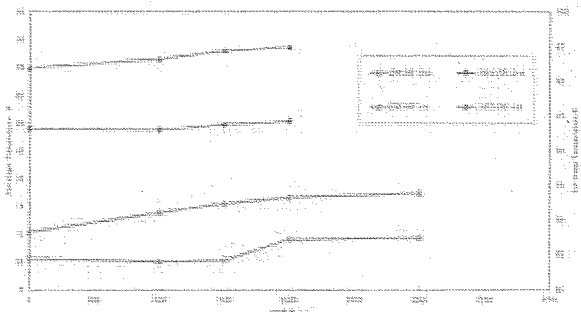


Fig.5. 20K-class 2-stage Stirling cryocooler.



(a) Contaminated case with CO₂ gas.



(b) Contaminated case with N₂ gas.

Fig.6. Cooling performance of 2-stage Stirling cryocooler with contaminated working gas.

6. まとめ

本稿では、SPICA ミッションの成否を握る冷却システムの開発状況と課題について述べた。

これまで冷凍機開発を進めてきた結果、SPICA に搭載される機械式冷凍機の冷却能力は、ミッション要求を満足しており、ミッション部冷却系としての成立性が示されている。今後は、熱設計マージンの確保のための能力向上 (高効率化、低温化) と、信頼性向上 (長寿命化、低温環境下対策、検証/評価方法) に注力していく予定である。また、観測系への擾乱が懸念される圧縮機等からの発生振動低減や、冷凍機の冗長構成と運用方法についても、より詳細な検討と評価が必要と考える。

参考文献

- [1] T. Nakagawa et al, "SPICA: space infrared telescope for cosmology and astrophysics", *Advances in Space Research* 34(2004), p. 645-650.
- [2] H. Sugita, et al, "Space cryogenic system for SPICA mission", *Proc. SPIE Vol. 5487(2004)*, p.1625-1633.
- [3] K. Narasaki, et al, "Development of 1K-class mechanical cooler for SPICA", *Cryogenics* 44(2004), p.375-381.
- [4] K. Narasaki, et al, "Development of Two-stage Stirling Cooler for ASTRO-F", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 49(2004), p.1428-1435.
- [5] K. Narasaki, et al, "Development of cryogenic system for SMILES", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 49(2004), p.1785-1794.

Table 1 Mission requirement for cryocoolers

		Temp.	1 K class	2 K class	4 K class	20 K class	
Telescope (primary mirror, secondary mirror, optical bench)		> 5 K	—	—	> 15 mW: Parasitic heat	Only for precooling, Heat switch needed	
Mid IR : Imaging photometer / Spectroscopic instrument	Optics	> 10 K	—	—	N/A	—	
	Detector Si:As	4 K ±100 mK	—	—	15 mW: Parasitic heat included	—	
Far IR : Imaging photometer / Spectroscopic instrument	Optics	> 2.5 K	—	N/A	—	—	
	Detector	Short wavelength Ge:Ga	2.5 K ±50 mK	—	> 10 mW: Parasitic heat included	—	—
		Long wavelength Stressed Ge:Ga	1.7 K ±100 mK	> 5 mW: Parasitic heat included	—	—	—
Submillimeter : Imaging photometer / Spectroscopic instrument	Optics	> 2.5 K	TBD				
	Detector	(Plan 1) Ga:As	1 K	TBD			
		(Plan 2) Bolometer Array	100 mK	TBD			
Near IR : Imaging photometer (option)	Optics	> 30 K	TBD				
	Detector In:Sb	30 K+1K	TBD				

Table 2 Specifications and R&D items of cryocoolers

	Precooling 20K-class	4K-class	2K-class	1K-class
Configuration	2-stage Stirling (2ST)	2ST + ⁴ He-JT	2ST + ^{3or4} He-JT	2ST + ³ He-JT
Required cooling capacity	> 300 mW@20 K	> 30 mW@4.9 K	> 15 mW@2.5 K	> 10mW@1.7K
Power	< 90 W(AC)	< 160 W(AC)	< 180 W(AC)	< 180W(AC)
Life	> 5 years	> 5 years	> 5 years	> 5 years
Status	Astro-F ISS/JEM/SMILES	ISS/JEM/SMILES	New development	New development
Results with BBM or more	300 mW@20 K	30 mW@4.9 K	15 mW@2.5 K	12 mW@1.7 K
R&D items	(1) Improvement of cooling power of 2ST (Lower temperature) - New material for regenerator - Modification of regenerator structure (2) Improvement of reliability of 2ST - Methods of verifications or evaluations of service life - Measures for working gas degradation, selection of material, review of manufacturing process (3) Redundant configuration of cryocoolers, operational procedures in orbit, vibration resistance at launch (4) Reduction of compressor vibration			
	(1) Development of heat switches	(1) Improvement of reliability of JT compressors - Continuous running tests (2) Survivability of JT compressors in cold environment - Trial production of valves - Performance demonstration (3) Optimization of configuration and operational conditions of JT circuit		
		(1) JT compressors - Increase of flow rate - Increase of pressure	(1) Decision of ³ He-JT or ⁴ He-JT (2) Feasible with technology for 1K-class or 4K-class cryocoolers	(1) Efficient of JT compressors (2) Development of low- pressure-driven bypass valves (3) Purification of ³ He gas (4) Operational procedures of ³ He-JT