

次期赤外線天文衛星SPICA冷却システムの概念設計

佐藤洋一、杉田寛之、山脇敏彦、岡本篤(ARD/JAXA)
 中川貴雄、塩谷圭吾、村上浩、小川博之(ISAS/JAXA)
 村上正秀(筑波大学)
 高田誠、高井茂希、吉田誠至、恒松正二、金尾憲一(住友重機械工業)
 SPICAプリプロジェクトチーム



SPICAの概念図

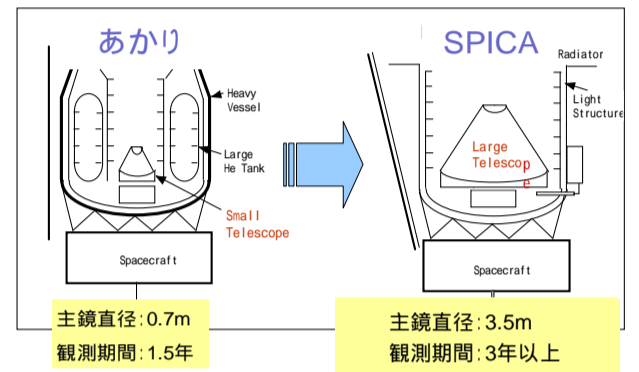
2017年の打上げを想定している次期赤外線天文衛星SPICAは、JAXAを中心に国内外機関との連携のもと、プロジェクト化に向けた概念設計を進められている野心的なミッションである。SPICAでは、従来の寒剤冷却方式ではなく、太陽-地球ラグランジュ第2点(L2)の安定した熱環境と機械式冷凍機を利用した全く新しい冷却方式を用いて、口径3.5mで4.5Kの極低温大型望遠鏡を実現し、高感度・高空間分解能の赤外線天文観測を長期間(3年以上)に亘って行うことを目指している。SPICAの最大の特徴のひとつである無寒剤冷却を実用化するため、これまでにAKARIやJEM/SMILESでの開発実績をベースとして、4K級ジュールトムソン冷凍機、およびその予冷機である20K級2段スターリング冷凍機の冷却能力と信頼性の向上に取り組み、試作モデル(BBM)により4.5Kで50mWの冷却能力の実証に成功した。また同時に、L2における効率的な断熱放射冷却構造は、この冷凍機の性能を最大限に活用する上で必須であり、これまでに衛星システムの重量やレイアウトなどの制約条件のもと、熱・構造設計の詳細化を進めた結果、ミッションの成立解を見出すことができた。

SPICAの概要

「あかり(ASTRO-F)」に続く、日本の赤外線天文衛星(欧州、韓国、米国との国際協力を検討中) H-IIAロケットにより「太陽-地球の第2ラグランジュ点(Sun-Earth L2)」へ(2017年頃) 「銀河や星の誕生と進化の解明」、「太陽系外惑星の直接検出」などが目的

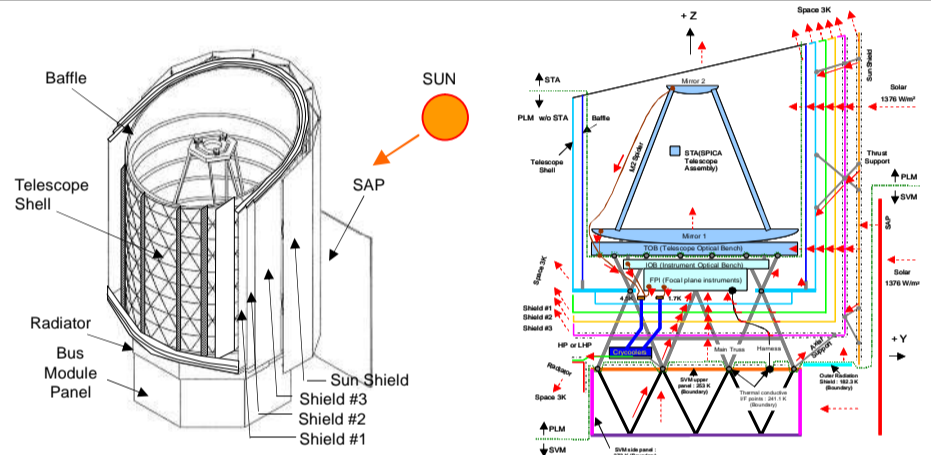
冷却系への要求: 「4.5K温度環境」、「低消費電力」、「3年以上の高信頼性」、「低擾乱」

口径3.5 mの大型軽量主鏡(STA)と光学ベンチ(IOB)を4.5Kに冷却(4.5Kステージ)
 複数の焦点面検出器(FPI)のうち、遠赤外線検出器 SAFARI, BLISSを1.7Kに冷却(1.7Kステージ)
 3年以上の長期観測を実現するため、放射冷却と機械式冷凍機を最大限に活用した無寒剤冷却方式



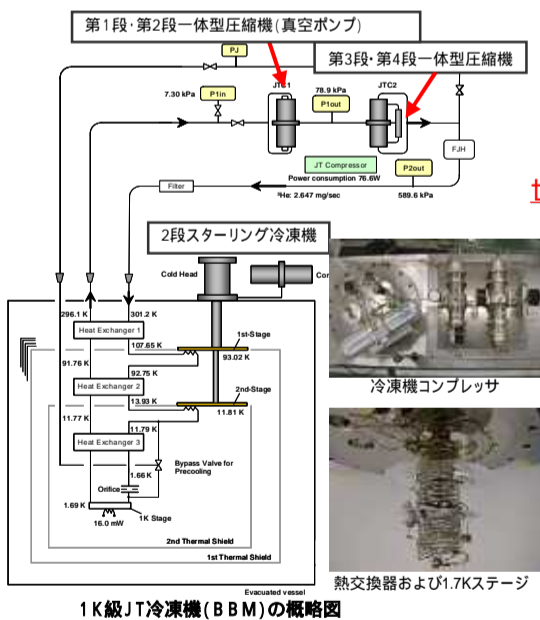
冷却システムの熱設計

- 4.5Kステージ(主鏡、光学ベンチ)での焦点面検出機器発熱量を15mW以下と仮定した場合、外部熱侵入量25mW以下を許容
- 1K, 4K級ジュールトムソン冷凍機をそれぞれ2式冗長構成とする
 - 4K級ジュールトムソン冷凍機(40mW@4.5K: 開発実績)を設計検討のベース
 - 遠赤外線検出器 SAFARI, BLISS冷却用に1K級ジュールトムソン冷凍機を使用
- 太陽光やバス部からの熱侵入を低熱伝導トラスや多層断熱放射シールドにより遮蔽
- 高効率排熱システムによる冷凍機総発熱量720W@273Kの排熱
- 衛星バス部のI/F条件を明確にしてミッション部、バス部双方の熱的成立性を評価(4.5Kステージ熱侵入量39.6mWを導出)
- 設計精度および信頼性の向上に向けて熱数学モデルの詳細化および低温材料物性(熱伝導率、比熱、線膨張率)の評価を実施中



1K級冷凍機: 「2段スターリング冷凍機+³He-ジュール・トムソン冷凍機」

JEM/SMILES用4K級JT冷凍機をベースに作動ガスを⁴Heから³Heでより高い飽和蒸気圧を持つ³Heガスに変更 日本独自方式により、SPICA遠赤外線検出器用に新規開発



これまでの成果
 ・部分改良型2段スターリング冷凍機(BBM)を予冷機として適用
 冷却能力: 16mW > 10mW@1.7K(要求値)
 消費電力: 165.6 W < 180W(要求値)

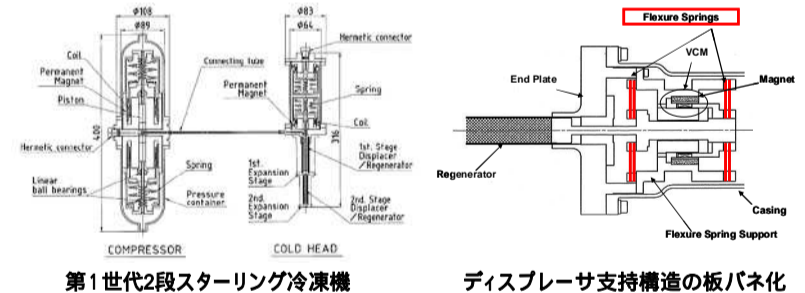
世界最高効率で16mW@1.7Kの実証に成功!

現在の取り組み

- 高効率化、低擾乱化(<0.1N)、低圧駆動バイパス弁の検証
- ASTRO-H/SXS用1K級JT冷凍機EMによる評価試験の実施
- 冷凍機立ち上げシーケンスの検討
- 冷却性能評価(設置角度、環境温度等)
- 試験環境設備を構築し、寿命評価試験をスタート(目標5年以上)
- 遠赤外線検出器SAFARI排熱に対する過渡性能の評価

20K級冷凍機: 「第2世代2段スターリング冷凍機」

2段スターリング冷凍機を予冷機として少なくとも4台搭載する必要あり
 冷却能力: 0.2W@20K(あかり実績: 第1世代) 0.2W@15K程度
 ミッション期間: 1.5年(あかり実績) 5年以上(目標)

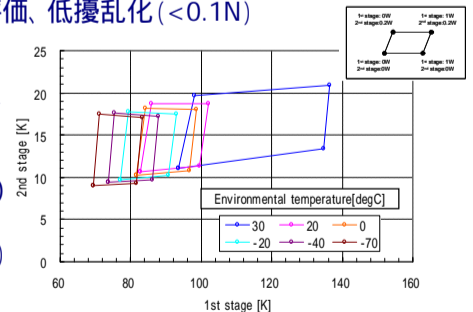


これまでの成果

- 【冷却能力】2段ディスペンサの直径の拡大(8mm)、駆動条件の最適化
- 【信頼性向上】支持部板バネ化による摺動磨耗の低減、アウトガス成分調査、アウトガス低減対策品の試作・評価、低擾乱化(<0.1N)

現在の取り組み

- ASTRO-H/SXS用として第2世代2段スターリング冷凍機EMの設計・製作
- 冷却性能評価試験
 性能維持温度範囲(-70 ~ 30)で0.2W@20K以下の冷却性能
- 単体寿命評価試験(目標5年以上)
- 駆動回路BBMの試作・評価



4K級冷凍機: 「2段スターリング冷凍機+⁴He-ジュール・トムソン冷凍機」

SPICA搭載にむけて冷却能力の設計マージンと信頼性確保が必要不可欠

- 冷却能力: 30mW@4.5K 50mW@4.5K(160W以下)
- ミッション期間: 1年(SMILES) 5年以上(目標)

これまでの成果

【冷却能力向上】予冷機に部分改良型2段スターリング冷凍機を適用
世界最高効率で50mW@4.4K(入力159.9W)の実証に成功!

【信頼性向上】

- 改良型JT圧縮機の試作(ピストンの板バネ支持化、駆動周波数Up(30 ~ 52Hz)による小型化)
- アウトガス低減対策(接着材低減、ベーキング)

現在の取り組み

- JT圧縮機の低消費電力化(70W以下)に向けた最適化、擾乱低減(<0.1N)

冷凍機用排熱システムへの「ループヒートパイプ」の採用検討

- 冷凍機コプレッサ部の発熱(最大720W@300K)をラジエータまで輸送し深宇宙へ放熱
- ループヒートパイプ: 長距離大容量の熱輸送特性、熱輸送シャットダウン機能
- 地上試験時の性能予測、自在なレイアウト性、ETS-搭載展開型ラジエータ軌道上実験の成果
- ヒートパイプ: ラジエータ面内埋め込みにより放熱効率を向上、豊富なフライト実績

