

新型 2 段スターリング冷凍機に関する研究

Research and Development of Advanced Two-stage Stirling Cryocooler

総合技術研究本部 宇宙熱技術グループ 杉田寛之、佐藤洋一
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 高エネルギー天文学研究系 満田和久
宇宙科学研究本部 宇宙情報・エネルギー工学研究系 平林 久

Hiroyuki Sugita, Yoichi Sato, Spacecraft Thermal Engineering Group, IAT
Takao Nakagawa, Hiroshi Murakami, Department of Infrared Astrophysics, ISAS
Kazuhisa Mitsuda, Department of High Energy Astrophysics, ISAS
Hisashi Hirabayashi, Department of Space Information and Energy, ISAS

Abstract

The advanced two-stage Stirling cryocooler has been developed for the cryogenic system of next space missions such as SPICA, NeXT and ASTRO-G by JAXA. In order to meet the cooling requirements of these missions, improvement of cooling performance and mechanical reliability is required, based on the existing two-stage Stirling cryocooler with cooling capacity of 0.2 W at 20 K, which is working on the infrared astronomical satellite AKARI (ASTRO-F) launched in 2006/2/22. This paper describes the cooling capacity evaluation test by simulating contamination of the working gas and mechanical attrition reduction by flat-spring-supported displacer for development of the advanced two-stage Stirling cryocooler.

1. はじめに

20K 級 2 段スターリング冷凍機は、2006 年 2 月に打上げられた赤外線天文衛星「あかり (ASTRO-F)」搭載用に開発され⁽¹⁾、2 段目冷却ステージで 0.2 W @ 20 K の冷却能力 (1 段目冷却ステージ: 1 W @ 70 K、電力入力: 90 W) と、1.5 年の設計寿命を有している。本冷凍機は、国際宇宙ステーション ISS/JEM の地球大気観測ミッション SMILES の 4 K 級冷凍機⁽²⁾の予冷機としても搭載される予定である。また、この 1 段目だけを利用した 1 段スターリング冷凍機⁽³⁾は、2005 年に打上げられた X 線天文衛星「すざく (ASTRO-EII)」に搭載され現在稼動中であり、今後、月周回衛星 SELENE (2007 年打上げ予定) および金星探査衛星 Planet-C (2010 年打上げ予定) にも搭載予定となっている。

さらに、現在、JAXA 宇宙科学研究本部を中心に計画または検討が進められている次期赤外天文衛星 SPICA⁽⁴⁾、次期 X 線天文衛星 NeXT、次期電波天文衛星 ASTRO-G (VSOP-2) などの次世代天文ミッションでは、飛躍的な高感度・高分解能観測と長期間観測の両立を目指しており、その実現には望遠鏡や観測センサの低ノイズ化のための機械式冷凍機技術が必要不可欠となる。特に、これらの先進的な天文ミッションに共通的に搭載される 20K 級 2 段スターリング冷凍機は、1 K 級、2 K 級および 4 K 級 JT (ジュール・トムソン) 冷凍機の高効率化のための低温化 (15 K 程度)、長期観測ミッションに対応した長寿命化 (5 年以上)、高空間分解能の観測ミッションに求められる低擾乱化などの技術課題を克服する必要がある。

2. 研究の概要

冷凍機に対する高度化なミッション要求に応えるため、JAXA の共通基盤技術として、冷却能力と信頼性の向上を図った新型 2 段スターリング冷凍機の開発が望まれる。本報告では、まず現行の 20K 級 2 段スターリング冷凍機の仕様および性能を述べ、次に赤外線天文衛星「あかり (ASTRO-F)」での軌道上性能評価、作動流体汚染の模擬による冷却性能評価試験、構成部品ベーキングによるアウトガス評価試験、および機械的な磨耗・疲労対策の結果について報告する。

3. 成果の概要

3-1. 20K 級 2 段スターリング冷凍機の仕様および性能

赤外線天文衛星「あかり (ASTRO-F)」に搭載されている 20K 級 2 段スターリング冷凍機の断面概略図を Fig.1 に示す。本冷凍機は、圧縮機、2 段目ディスプレイサを有するコールドヘッドおよび連結パイプから構成される。圧縮機は振動低減のためツイン対向型リニア駆動ピストンを採用し、ピストン支持機構としてリニアボールベアリング支持方式を採用することにより、ロングストローク運転と低周波数運転を可能にしている。圧縮機の設計ストロークは 30 mm、圧縮容積は 9.5 cm³ である。コールドヘッドの 2 段目ディスプレイサの寸法は $\phi 15 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 、 $\phi 6.5 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 、設計ストロークは 6 mm である。また、ステンレスメッシュを蓄冷材 (再生器) に使用している。ディスプレイサ駆動部には圧縮機と同様、リニア駆動方式を採用している。駆動ドライバを除く冷凍機全体の重量は 9.5 kg であり (圧縮機: 7 kg、コールドヘッド: 2 kg、アクセサリ: 0.5 kg)、作動流体であるヘリウムガスの封入圧力は 1 MPa である。この冷凍機の開発要求仕様を Table 1 に示す。冷却能力は室温環境下において 0.2 W @ 20 K (90 W 入力)、連続運転期間は 1.5 年以上が求められる。

Table 2 は本冷凍機の地上性能試験の結果であり、入力電力 50 W と 90 W による冷凍機駆動時の熱負荷に対する各冷却ステージ温度を示している。90 W 入力時に要求仕様 (2 段目冷却ステージ: 0.2 W 以上 @ 20 K) を満足している。

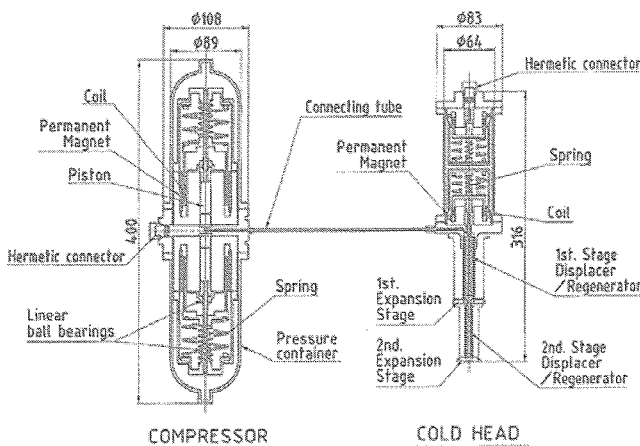


Fig.1 Schematic drawing of 20 K-class two-stage Stirling cooler

Table 1 Specifications of 20 K-class two-stage Stirling cooler for AKARI (ASTRO-F)

Cooling capacity	> 0.2 W @ 20 K
Driving power	< 90 W
Service life	> 1.5 year
Mass	< 10 kg
Environmental temperature	> 200 K

Table 2 Results of evaluation test for cooling capacity

Power input (W)	Temperature / Heat load	
	1st-stage	2nd-stage
50 W	90.3 K / 1 W	21.8 K / 0.2 W
90 W	71.5 K / 1 W	18.4 K / 0.2 W

3-2. 20 K 級 2 段スターリング冷凍機の軌道上性能

赤外線天文衛星「あかり (ASTRO-F)」は 2006 年 2 月 22 日に M-V ロケット 8 号機により打上げられ、現在、順調に軌道上での天文観測を行っている。衛星ミッション部には 3 台の近中間赤外カメラ (IRC: Infrared Camera) と 1 台の遠赤外サーベイヤー (FIS: Far-infrared Surveyor) が搭載され、波長 2-200 μm の赤外線サーベイ観測を行う。望遠鏡システムは有効径 67 cm の主鏡と焦点距離が調整可能な副鏡から構成される。ミッション部は望遠鏡自身の赤外放射および検出器の暗電流低減のために 6 K 以下に冷却される。「あかり (ASTRO-F)」には 170 L の超流動ヘリウムと 20 K 級 2 段スターリング冷凍機を併用した冷却系が搭載されている。

Fig.2 に「あかり (ASTRO-F)」の冷却系概略図を示す。冷却系はヘリウムタンク、観測装置を支持する SIA サポート (SIA: Scientific Instrument Assembly)、蒸発ヘリウムガスで冷却される 2 層のシールド板 (IVCS: Inner Vapor Cooled Shield および OVCS: Outer Vapor Cooled Shield)、真空容器

であるアウターシェル、コンポーネントを支持するサポートストラップ、配管系、望遠鏡への迷光入射を防ぐためのバフフルから構成される。冷凍機はアウターシェル上に2台取り付けられ、各50W入力で運用される。冷凍機の2段階冷却ステージはIVCSと接続されており、IVCS先端からの熱放射と相まってヘリウムタンクへの熱侵入を低減し、寒剤である超流動ヘリウムの蒸発を抑制している。冷凍機の搭載により、ヘリウムが枯渇するまでの期間が約2倍になると推定されている。

次に Fig.3 に「あかり (ASTRO-F)」に搭載されている冷凍機のテレメトリデータを示す。「あかり (ASTRO-F)」は打上げ後、高度700kmの太陽同期軌道に投入され、軌道上での姿勢が確立した後、2006年4月13日にクライオスタット開口部の望遠鏡蓋(アパチャーリッド)が分離され基本観測モードに移行した。2台の冷凍機は、打上げ後に起動動作確認を終え、計100Wの入力電力で定常運用されている (Fig.3 (a))。アパチャーリッド分離とともに、クライオスタット開口部からの放射冷却が促進され、冷凍機2段階冷却ステージと冷却対象であるIVCSの温度は低下しそれぞれ設計温度である20K、30Kに安定していることが確認できる (Fig.3 (b))。「あかり (ASTRO-F)」では、超流動ヘリウムによる観測寿命は1.5年と予測されており、ヘリウムが消費された後は冷凍機のみによる観測も計画されている。

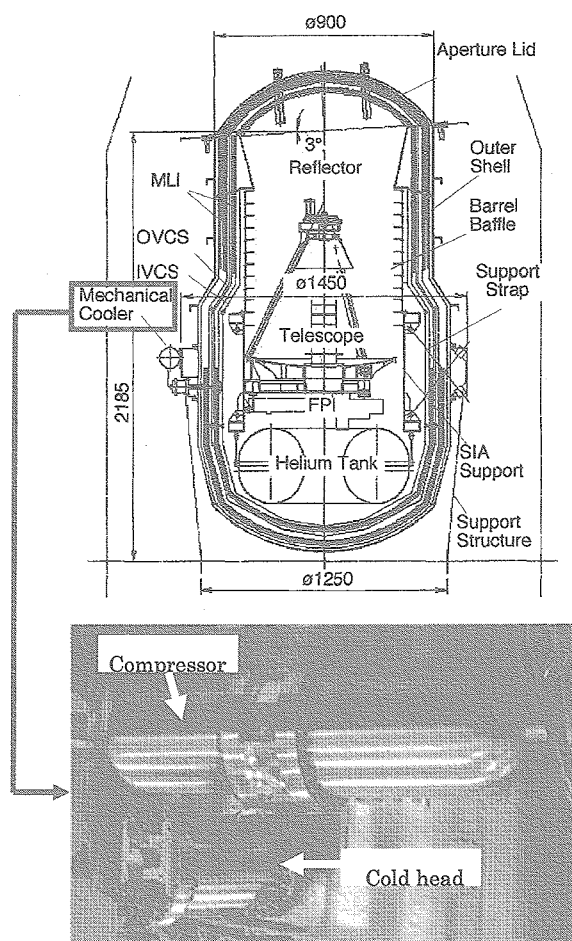
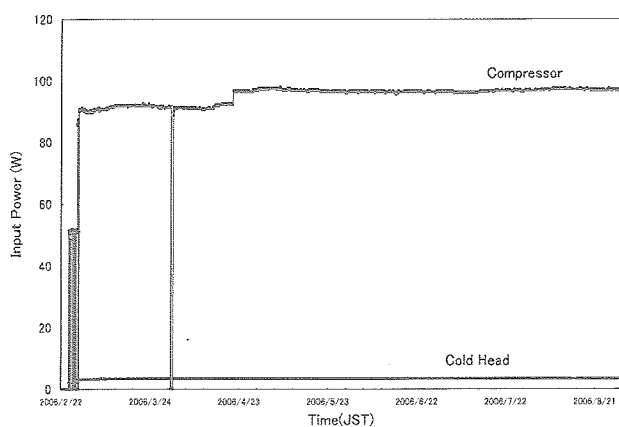
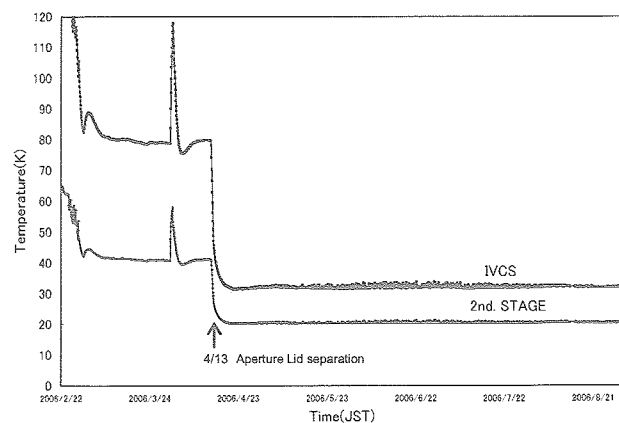


Fig.2 Cross-sectional view of AKARI (ASTRO-F) cryostat and photograph of installed two-stage Stirling cryocooler



(a) Transition of input power to two set of compressor and cold head



(b) Transition of measured temperature on IVCS and 2nd stage of two-stage Stirling cryocooler

Fig.3 AKARI (ASTRO-F) telemetry data

3-3. 新型2段スターリング冷凍機の開発

機械式冷凍機は、赤外線、X線、電波等の観測センサ冷却用の極低温熱制御デバイスであり、観測センサへの飛躍的な高感度化と長期観測の要求に伴い冷凍機の高性能化が必要となる。Table 3に示すように、特にスターリング冷凍機は最近の軌道上実績に加え、今後多くのミッションへの搭載が予定もしくは検討されている。これらを確実に実現するため、現行の20 K級2段スターリング冷凍機をベースとした新型2段スターリング冷凍機の開発が求められている。ここでは、現行冷凍機の信頼性評価を目的として、不純ガスによる冷却性能劣化評価試験、アウトガス発生源と発生量の定量的評価、フラットスプリングを用いたディスプレイサ支持による機械的磨耗・疲労の軽減対策の実施結果について述べる。

Table 3 Stirling cooler application

Mission	Cooling object	Cooling capacity (Configuration)
SUZAKU (X-ray Astronomy Satellite)	X-ray spectrometer	2.5W @ 100K (1 stage)
AKARI (Infrared Astronomy Satellite)	Telescope and detector	0.2W @ 20K (2 stage)
SELENE (Lunar Exploration Satellite)	Gamma ray spectrometer	1.5W @ 80K (1 stage)
ISS/JEM/SMILES (Earth Atmosphere Observation)	Superconductive submillimeter mixer	0.2 W @ 20K (2 stage)
Planet-C (Venus Climate Satellite)	Near-infrared camera	1 W @ 65K (1 stage)
ASTRO-G (Radio Astronomy Satellite)	Low noise amplifier	0.2W @ 30K (2 stage)
Earth Observation Satellite (TBD)	TBD	1.2W @ 70K (1 stage)
NeXT (Next X-ray Astronomy Satellite)*	Soft X-ray spectrometer	0.2W @ 20K (2 stage)
SPICA (Next Infrared Astronomy Satellite)*	Telescope and detector	0.2W @ 20K (2 stage)

*International collaboration mission

(1) 不純ガスによる冷却性能劣化評価試験

新型2段スターリング冷凍機の開発にあたり、軌道上長期運用の冷却性能の変化を調査するため、不純ガスによる作動流体の汚染を模擬した評価試験を実施した。不純ガスとしてCO₂、N₂を想定し、それぞれの体積濃度範囲を0~5000 ppmv、0~3000 ppmvに設定した。結果をFig.4に示す。Fig.4(a)はCO₂の場合であるが、濃度が500 ppmvを超えると1段目冷却ステージの温度は急激な上昇を示した。これは、濃度500 ppmvの分圧に対するCO₂凝固温度(146K)が冷凍機1段目冷却ステージ温度よりも高いため、CO₂が1段目ディスプレイサ内の蓄冷材部で固化したことによるものと考えられる。また、不純ガスの固化が原因で、コールドヘッドの動きが不安定になることが確認された。一方、不純ガスがN₂の場合、濃度の増加に伴い1段目および2段目冷却ステージの温度が徐々に増加していく(Fig.4(b))。これらの結果から、冷凍機2段目冷却ステージ温度は、不純ガスCO₂、N₂濃度がそれぞれ500 ppmv以下、1000 ppmv以下であれば、安定した冷却性能を発揮することができ、一方の1段目冷却ステージ温度は、作動流体の汚染に対して比較的影響を受けやすいことが分かる。

(2) 構成部品ベーキングによるアウトガス評価試験

冷凍機の運用中に、構成部品からのアウトガスにより作動流体が汚染され冷却性能の劣化をもたらすことが懸念される。冷凍機組み立て前に行うベーキング作業に際して、主なアウトガス発生源を特定するため、コールドヘッド及び圧縮機の構成部品の材料についてアウトガス成分、ベーキング効果に関するデータを調査した。また、文献ではデータが得られない部位として、磁気回路および駆動コイルを抽出し、これらのテストピースによるアウトガス成分およびその変化量の測定を実施した。測定には恒温槽内に設置された真空容器を用い、その内部にテストピースを入れベーキングを行いアウトガス量の時

間変化を測定することによりその総量を推定する。これらの文献および過去に実施した試験より得られたアウトガス成分、ベーキング効果のデータからは、冷凍機内部で発生する不純ガスはコイル、マグネット、接着剤からのものが大部分を占め、その総量は 3.5 g 程度になることが推定される (Table 4)。このアウトガスを低減する対策として、構成部品の面接触部位を減らし接着剤の使用量を減らすことも今後検討する。

Table 4 Presumption value of outgas

Test piece	Amount of outgas (g)
Magnet	1.26
Coil	1.98
Adhesion bond and otherwise	0.25
Total	3.49

(3) 機械的磨耗・疲労対策

現行の 2 段スターリング冷凍機の 1 段目および 2 段目ディスプレイサ両端のシール部は、シリンダと接触する構造であるため、長時間運転の際の磨耗によるクリアランス拡大や不純ガス発生は避けられない。このような冷凍機の信頼性低下や発生擾乱の要因の一つと考えられる機械的磨耗・疲労の対策として、シリンダとの「非接触」構造を可能とするフラットスプリング支持方式の 1 段目ディスプレイサを試作し、2 段スターリング冷凍機コールドヘッドに組み込み、冷却性能を測定した。その結果、両冷却ステージ熱負荷時において、従来支持方式のディスプレイサよりも、1 段目および 2 段目の冷却ステージはそれぞれ冷却能力が向上することが確認された (Fig.5)。ディスプレイサとコンプレッサの駆動位相差やストローク調整により、さらに性能が向上することが期待される。1 段目ディスプレイサをフラットスプリング支持にしたものの、2 段目ディスプレイサは構造上、先端部の接触を回避できない。そこで 2 段目ディスプレイサ先端部のシール・クリアランスを従来のものより拡大した場合の冷却性能を評価した。その結果、クリアランスが従来 of 2.5 倍程度までは冷却性能への影響が少ないことが確認され、クリアランスの拡大により磨耗を一層低減し、長寿命化できることが明らかになった。

4. まとめ

現在、軌道上で観測が行われている赤外線天文衛星「あかり (ASTRO-F)」の冷却系として搭載されている現行の 20K 級 2 段スターリング冷凍機が、軌道上で設計要求の温度環境を維持していることが確認できた。また、次期ミッション要求への対応として、現行冷凍機の冷却能力および信頼性向上を目指し、以下のような評価試験および対策を実施し、結果を得た。

- (1) 不純ガス CO₂、N₂ 混入による作動流体の汚染を模擬した冷却性能評価試験を実施した。CO₂、N₂ 濃度がそれぞれ 500 ppmv 以下、1000 ppmv 以下であれば、安定した冷却性能を維持できることを確認した。
- (2) 冷凍機構成部品のベーキング時に発生するアウトガス発生部位の特定とその総量を推定した結果、3.5 g 相当のアウトガス低減が必要である。
- (3) 冷凍機コールドヘッドの 1 段目ディスプレイサ部をフラットスプリング支持にすることで、シリンダとの非接触を実現し冷却性能を向上させることができた。
- (4) シリンダとの磨耗を低減するため、2 段目ディスプレイサ先端部のクリアランスを従来 of 2.5 倍程度まで拡大したが、冷却性能への影響はほとんどないことが確認できた。

新型 2 段スターリング冷凍機技術の早期確立に向けて、一層の冷却能力および信頼性の向上、低擾乱化に向けた継続的な取組みが望まれる。

参考文献

- [1] K. Narasaki, S. Tsunematsu, K. Otsuka, M. Kyoya, T. Matsumoto, H. Murakami, T. Nakagawa, "Development of Two-stage Stirling Cooler for ASTRO-F," *Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference – CEC, Vol.49*, pp.1428-1435, 2004.
- [2] K. Narasaki, S. Tsunematsu, S. Yajima, A. Okabayashi, J. Inatani, K. Kikuchi, R. Satoh, T. Manabe, M. Seta, "Development of Cryogenic System for SMILES," *Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference – CEC, Vol.49*, pp.1785-1794, 2006.
- [3] K. Narasaki, S. Tsunematsu, K. Kanao, K. Otsuka, S. Hoshika, K. Fujioka, K. Tsurumi, M. Hirabayashi, "Development of Single Stirling Cooler for Space Use," *Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference – CEC, Vol.51*, pp.1505-1512, 2006.
- [4] H. Sugita, T. Nakagawa, H. Murakami, A. Okamoto, H. Nagai, M. Murakami, K. Narasaki, M. Hirabayashi, "Cryogenic infrared mission "JAXA/SPICA" with advanced cryocoolers," *Cryogenics* 2006;46:(149-157)

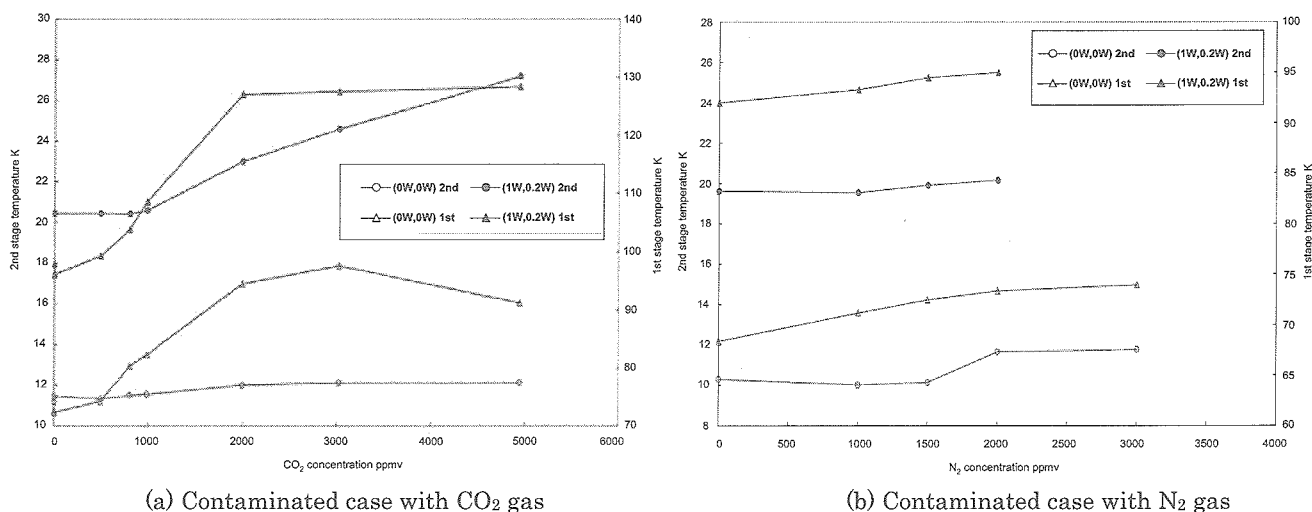


Fig.4 Cooling performance of two-stage stirling cryocooler with contaminated working gas

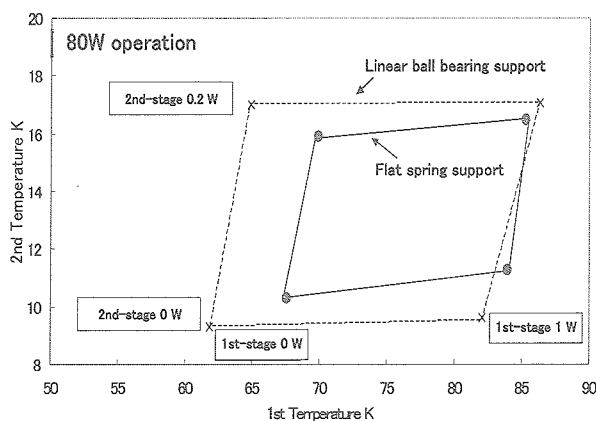


Fig.5 Improved cooling capacity due to displacer supported by flat springs