

宇宙用汎用連続型 ADR 超低温冷凍システムの開発

物質・材料研究機構 沼澤健則・神谷宏治、NASA/GSFC Peter Shirron
JAXA/ISAS 満田和久

Development of Continuous ADR System for Weak Gravity Missions

¹ Takenori Numazawa, ¹ Koji Kamiya, ² Peter Shirron and ³ Kazuhisa Mistuda

¹ National Institute for Materials Science, Tsukuba, Ibaraki 305-0003, JAPAN

E-mail: Numazawa.takenori@nims.go.jp

² NASA / Goddard Space Flight Center, Code 552, Greenbelt, MD 20771, USA

³ JAXA / ISAS, Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, JAPAN

Abstract: Adiabatic Demagnetization Refrigeration (ADR) does not use working fluids contrary to conventional refrigerators that make use of the fluid density difference, which leads to superiority of the ADR under the weak gravity condition. In this study, we developed a continuous ADR system to provide constant cooling temperatures ~ 0.1 K. The system consists of four stages of magnetic materials and magnets cascaded with heat switches. The magnetic materials CPA and GdLiF₄ are used for 3 stages between 0.1K and 1.4 K, and single stage between 1.4 K and 4 K, respectively. Passive heat switches are used for the stages > 0.3 K and a superconducting heat switch is used for the continuous stage at ~ 0.1 K. A G-M cycle cooler with a 100 V compressor unit is used to cool the ADR and cryostat shieldings. Total mass of flight model is less than 60 kg. Cooling tests with Transition Edge Sensor on the ground showed that the ADR provided continuous cooling temperatures between 105 mK and 120 mK and it successfully operated the TES. Airborne flight experiments confirmed the ability of the cooling system under the micro-gravity condition. The experimental results showed that the ADR could provide stable temperature under the weak gravity, however, strong vibrations coming from turbulence or takeoff affected to the stability of ADR cycle.

Key words; ADR, Cryocooler

はじめに

微小重力環境下における固体ヘリウムなどの量子固・液体の基礎科学実験や、高エネルギー X 線検出の分解能を飛躍的に高める TES (超伝導遷移端センサー) 型 X 線マイクロカロリメータを搭載する科学衛星において、数 100mK 以下の超低温環境が不可欠である。

本研究は日本宇宙フォーラムの宇宙環境利用に関する地上研究 (2005 年～2007 年) によって、宇宙実験で要求される多様な極低温環境条件を実現するために汎用的な ADR の実現を目標とし、物質・材料研究機構が NASA、JAXA および宇宙用極低温冷却機 WG との研究協力によって実施されたものである。連続型 ADR を開発するとともに、航空機実験によって微小重力下で作動可能な ADR の実証試験を行った。

連続型 ADR

ADR (Adiabatic Demagnetization Refrigerator) は磁性体の断熱消磁を用いた冷却方法で、磁性体、磁石、熱スイッチというシンプルな構成要素からなり、電磁的な操作のみでカルノーサイクルが駆動でき

るため、原理的に高い冷凍効率が得られる。また、ADR の作動には重力が不要で、小型・軽量化が可能なことから、汎用宇宙用冷凍機として理想的な特性を有する。

これまでに開発されてきた宇宙用 ADR は 1 回だけの断熱消磁で低温を発生する、いわゆるワンショット冷却に特化したものであった。これに対し連続型 ADR では、2 つ以上の磁性体ユニットを用い、相互に位相をずらしてサイクルを駆動する連続型カルノーサイクルを実行する。これによって ADR で問題となっていた冷凍の間欠性を排除することが可能となった。

本研究で開発される連続型 ADR の主な特長として、大きな冷凍能力 (100mK で 100 μ W)、幅広い発生温度 (60mK～100mK)、液体ヘリウムを使用しない無冷媒システムがあげられる。このような ADR を実現するためには、磁性体、超伝導マグネットおよび熱スイッチで構成される冷凍ユニットを 4 段で直列に結合し、並列してカルノーサイクルを駆動するシステムが必要である。Fig.1 には作製された連続型 ADR の構成図と写真を示した。ADR と実験部を内蔵したクライオスタットの総重量は

65kg であり、アルミニウムを多用した設計により大幅な軽量化を達成した。また、ADR 計測制御ユニットを一体化することにより、消費電力の低減化をはかり、航空機実験の電力・重量条件を当初設計値よりも余裕をもって満足することができた。

地上における実験結果

試作された ADR 装置は、まず地上において冷却ステージに TES 型 X 線マイクロカロリメータを取り付け、100mK オーダーを 24 時間以上にわたり安定して発生・維持が可能であることを確認した。Fig.2 には 120mK と 105mK における連続運転データの一例を示した。このときの温度安定度は $\pm 200 \sim 600 \mu\text{K}$ であった。これは、安定度よりも冷凍能力を重視した運転に設定したためであるが、連続型 ADR 本来のポテンシャルとしては、 $\pm 210 \mu\text{K}$ 以下まで安定化させることが可能である¹。本冷凍機を用いて TES を作動させた結果、分解能として約 30eV (105mK) が得られた。

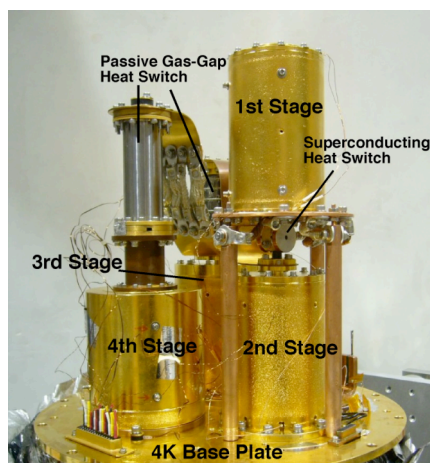
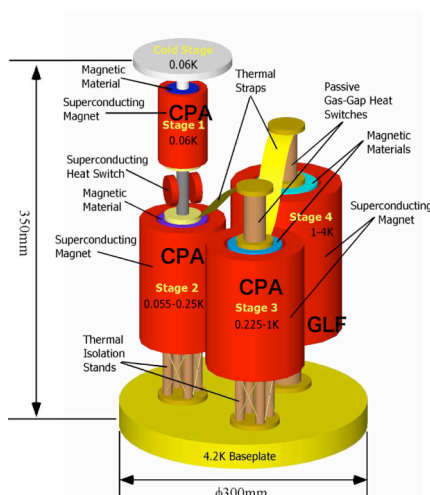


Fig. 1 Continuous ADR main parts.

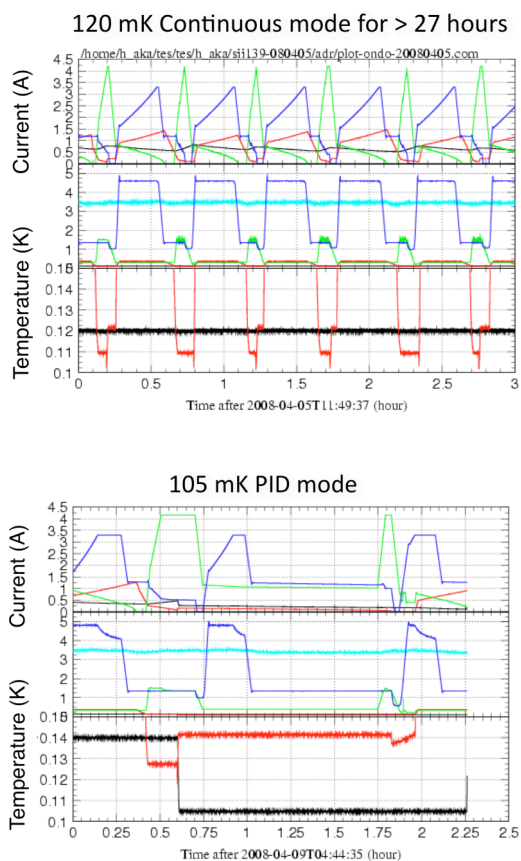


Fig.2 Continuous operation for 120 mK and 105 mK.

航空機による実験結果

2007 年 12 月と 2008 年 3 月に名古屋空港において、航空機実験を合計 8 回実施した。

本実験では、1) 冷凍システムが微小重力下で作動可能であるか、2) 作動可能である場合に、どの程度の温度が発生できるか、3) TES やヘリウムの冷却が可能であるか、について重点的に調べた。

1) に関しては、2つの問題をクリアしなければならない。第一に予冷用機械式 GM 冷凍機が作動すること、第二は ADR そのものの作動である。また、飛行前の実験準備において、電源が連続的に供給されないという問題があった。航空機への搭載や駐機場への移動の際に電源の供給が停止するため、せっかく冷却した ADR の温度が上昇し、冷凍サイクルをやり直さなくてはならない。このため、いかに急速に冷凍サイクルを復帰させるかが、実験遂行の鍵となった。これに関しては関係各位の努力によって、駐機場における待機時間を増やすことで解決した。

しかし、最大の問題は離陸や巡航時における乱気流による大きな揺れであった。特に離陸時における振動によって、ADR の熱スイッチにショートが発

生した。この場合、ADR のサイクルを初期状態から再開する必要があるが、定常サイクルに至るは2時間以上要するため、離陸からパラボリックフライトに至る過程で連続作動モードを実現することは不可能であった。

振動問題を回避するためクライオスタットに除振機構を設置した結果、巡航中での熱ショートはほとんど起こらなくなった。しかしながら、離陸時における急激なショックは吸収不可能であった。一方、微小重力下ではきわめて安定した特性を示し、最低到達温度として144mK が達成された。Fig.3 には熱スイッチがショートした場合(a)と、微小重力下において安定している場合(b)の測定例を示した。なおパラボリックフライト時に冷凍サイクルが連続作動に到達しなかったため、航空機上において TES やヘリウム実験の実施には至らなかった。

まとめと課題

連続型 ADR はタイトな制約の下で 2 回の飛行実

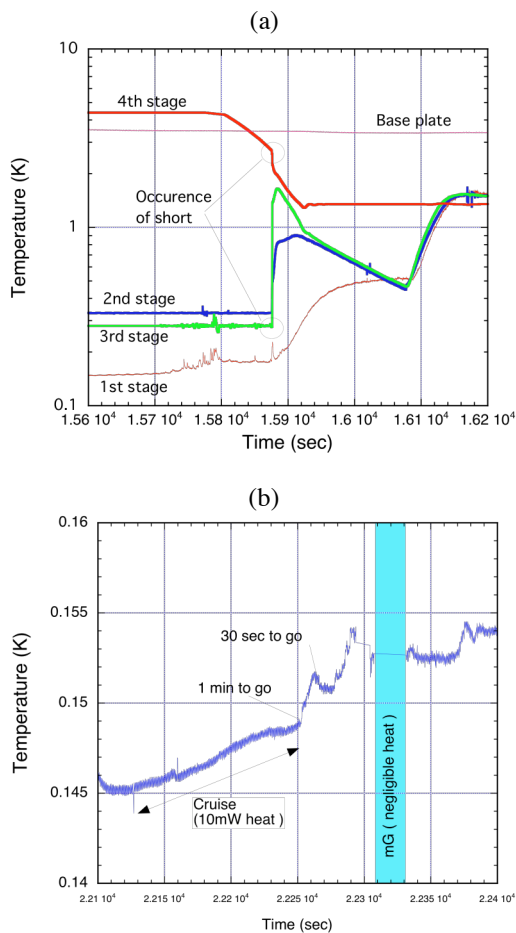


Fig. 3 Temperature profiles of ADR stages during flight experiment.

験を実施し、多くの成果を上げた。以下に要約する。

1. 連続型 ADR 装置を構築し、安定した連続カルノーサイクルの駆動を達成した。これは NASA 以外では初めての成功例である。
2. 連続型 ADR が微小重力下で作動可能であることを初めて実証した。
3. 微小重力環境は振動発生を抑制するため、ADR 性能を向上させることが明らかとなった。
4. TES カロリメーターを連続型 ADR として初めて冷却し、信号検出に成功した。
5. 航空機実験における振動問題を解析し、除振対策を施した結果、大幅な改善が見られた。
6. GM 冷凍機の微小重力下での作動特性試験によって、航空機実験による短時間の微小重力環境では大きな問題が生じないことがわかった。
7. 離陸時におけるショックは現状の除振機構で回避できなかった。航空機実験において、これを課題に設定して調べる必要がある。
8. 固体ヘリウムの生成が地上実験でも困難であった。これは、1 K の予冷ステージが不可欠であることを示しており、もう 1 段の ADR ユニットの増設する必要がある。

参考文献

- 1) Shirron, P.J., Canavan, E.R., DiPirro, M.J., Tuttle, J.G., and Yeager, C.J., *Adv. Cryo. Eng.* 45B (2000) 1629-1638.
- 2) Numazawa, T., Kamiya, Shirron, P., Deippiro, M. and Matsumoto, K., *AIP Conference Proceedings* (2006), pp. 1579-1580.
- 3) Numazawa, T., Kamiya, Shirron, P., Deippiro, M. and Mitsuda, K., *Proceedings of the 25th ISTS* (2006), pp. 887-891.
- 4) T. Numazawa, K. Kamiya, P. Shirron and K. Mitsuda, *Journal of Physics: LT24* (2009), to be published.

謝辞

本研究は、日本宇宙フォーラムの宇宙利用に関する公募地上研究によって行われた。航空機実験の実施にあたり、特段の配慮をいただいた日本宇宙フォーラムおよびダイヤモンドエアサービスに謝意を表す。また、実験協力をいただいた方々に感謝する;首都大学東京・石崎研究室、金沢大学・藤本研究室、東工大・奥田研究室、ISAS・篠崎研究員。