

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: A new continuous Adiabatic Demagnetization Refrigeration (ADR) system has been developed to provide the cooling temperatures between 0.06 K and 4 K. The system will consist of multi-stages of magnetic materials and magnets cascaded with heat switches for each temperature range. The ADR cooler is being tested to confirm the ability of the continuous ADR system under the milli-gravity condition in airborne flight experiments. The ADR development will be accomplished through the collaborative works with NASA/SGFC and JAXA/ISAS.

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。

2005 年度より日本宇宙フォーラムの宇宙環境利用に関する地上研究において、汎用連続型 ADR の開発が開始された。本プロジェクトは物質・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試作機の開発を行い、微小重力物理研究分野や宇宙天文分野において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 の実現を目標としている。ここでは 2 種類の実験対象を取り上げ、NASA と共同で連続型 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 の実証試験を行う。

連続型 ADR の開発経過

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。

Fig.2 には開発と実験のスケジュールを示した。2007 年 11 月には ADR およびクライオスタットの開発が終了し、2007 年 12 月に一回目の航空機実験を実施している。さらに、2008 年 3 月には固体ヘリウムの実験を行う予定である。

連続型 ADR の基本試験結果

試作された ADR 装置は、まず地上において各種冷却試験を行い、100mK を安定に発生すべく冷凍サイクルのチューニングを施した。その結果、冷却ステージに TES 型 X 線マイクロカロリメータを取

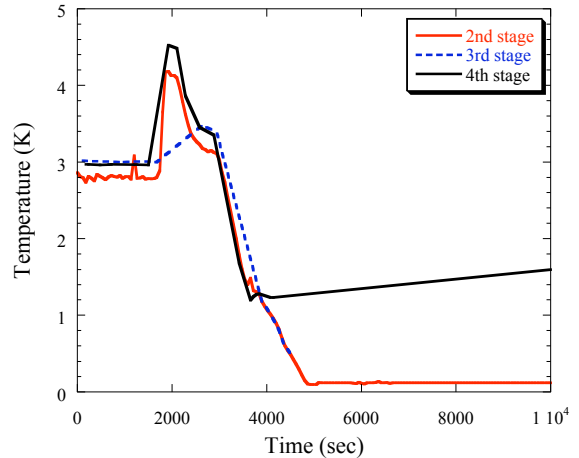
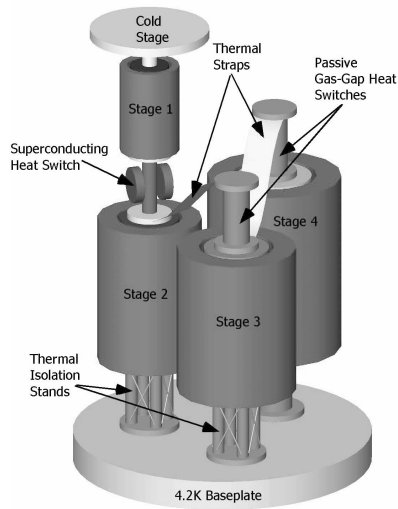


Fig.3 Temperature profiles of ADR stages operating on Carnot cycles.

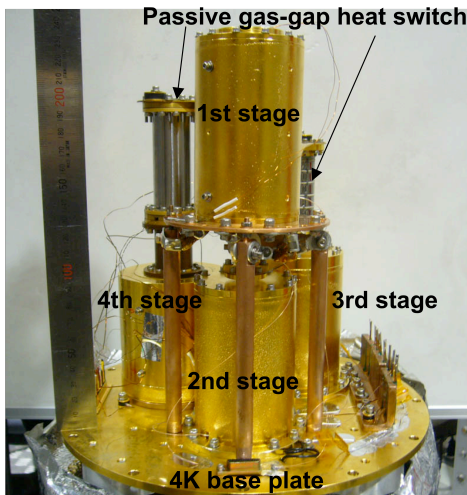


Fig. 1 Continuous ADR main parts.

り付け、100mK オーダーを2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.3 には温度と磁場に対する PID 制御によって約

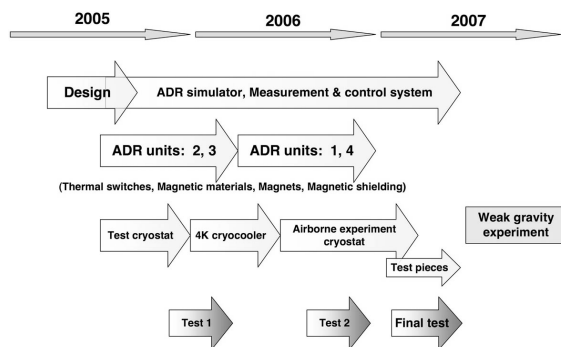


Fig.2 Development schedule of the continuous ADR.

120mK で一定温度を維持しているデータの一例を示した。TES を作動させ、X線パルスを検出することによって所定の分解能が得られた。

第一次航空機実験

2007年12月10日から2週間、ダイヤモンドエアサービス（名古屋空港）において、MU-300 航空機に本冷凍システムを搭載し、冷凍特性の基本試験を実施した。航空機実験は合計4回行われた。

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 の冷却によってX線が検出できるか、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 ADR を無冷媒化するために使用している予冷用機械式 GM 冷凍機の作動である。GM 冷凍機では圧縮機を使用しており、微小重力下でオイル漏れの可能性が指摘されている。しかしこれまでに実施例はなく、製造メーカーでもその可否について意見が分かれている。第二は ADR そのものの作動であるが、微小重力下における本質的な問題は存在しない。しかし、航空機実験に特有な重力ノイズの発生によって、作動条件が限定される可能性がある。

また、飛行前の実験手順において電源が連続的に供給されないという問題がある。冷凍システムの航空機への搭載や航空機の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ければならない。

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 のサイクルを全て初期状態から再開しなくてはならないため、離陸からパラボリックフライトに至る過程で一定温度を保持することは不可能であった。そこで、最小限の冷凍サイクルで低い温度を発生させるために、手動によって「揺れに合わせてながら」サイクルを駆動することが必要であった。

揺れの指標となる飛行中における重力変化は鉛直方向で+2G から-0.1G、進行方向で±0.1G 程度であったが、乱気流による急激な G の変化は Gas-Gap 式熱スイッチのショートを頻繁にもたらした。一方、微小重力下ではむしろ安定した特性を示し、通常よりも滑らかなパラボリックフライトを実施した場合、最低到達温度として 150mK が達成されている。Fig.4 には熱スイッチがショートした場合(a)と、安定している場合(b)の測定例を示した。なお TES を設置した冷却ステージの温度は 130mK 以下に到達

しなかったため、航空機上において TES の作動を確認するには至っていない。

まとめ

ADR の開発は連続運転モードの制御に課題を残しているものの、概ね終了したと考えられる。また、微小重力下における ADR の作動特性には特段の問題は見られず、宇宙環境における ADR の有効性を確認できた。一方、航空機実験での使用には、離陸と巡航飛行における揺れ対策が不可欠であることがわかった。NASA と共同開発した本 ADR 装置は、衛星打ち上げを想定した 12G 程度の衝撃には耐えられる設計である。しかしこれは強度上の設計値であり、運転時における衝撃に対しては不十分であることが明らかとなった。このように、航空機実験では宇宙実験とは別の意味で、これに特化した実験技術が必要であることを痛感させられた。

3月に予定されている第二次航空機実験では、離陸時からヘリウムセルを 0.5K 以下に保持することが必要であり、熱スイッチのショートを防がなくてはならない。現在、第一次航空機実験で得られた貴重なデータを解析し、クライオスタット全体の振動を抑制する機構を検討中である。

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) 沼澤健則、微小重力に適合する汎用冷却システムの開発、日本マイクロ重力応用学会誌、VOL.23, No.3, 2006, pp.139-144.

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ている。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。

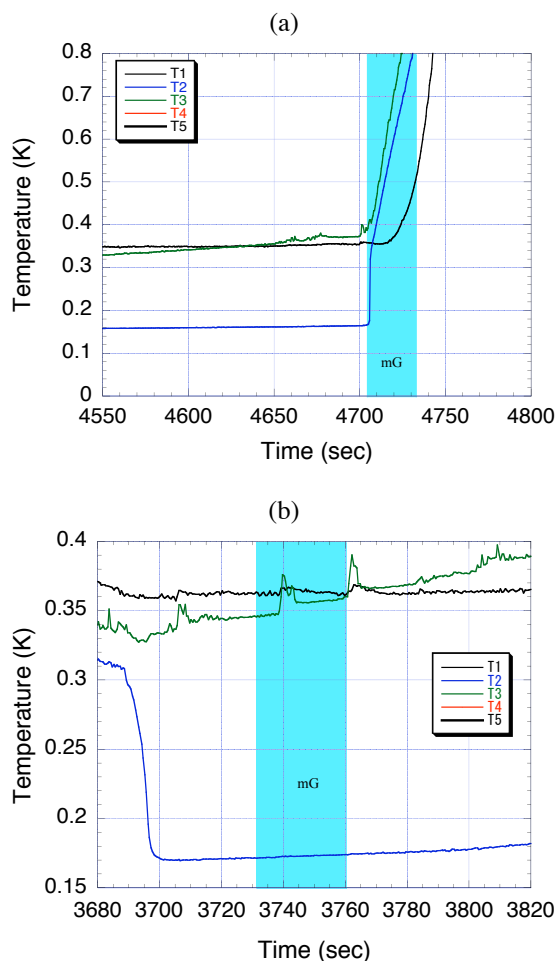


Fig. 4 Temperature profiles of ADR stages during flight experiment.