

宇宙用連続型 ADR システムの汎用化

物質・材料研究機構 沼澤健則、NASA/GSFC Peter Shirron、東工大 奥田雄一

Five Stage Continuous ADR System for Space Cryogenic Mission

¹Takenori Numazawa, ²Peter Shirron and ³Yuichi Okuda

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

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

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

³Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8550, 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. 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. A G-M cycle cooler with a 100 V compressor unit is used to cool the ADR and cryostat shieldings. 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. The ADR could provide stable temperature under the weak gravity, however, for the experiment of solid helium, the ADR could not achieve below 1K keeping with continuous cycle. This is the reason that the ADR did not have any thermal anchor like 1 K pot. We have been considered a new continuous ADR system which had 5 stages. This ADR will provide two continuous temperatures, 0.1 K and 1~2 K, by using with 3 stages and 2 stages continuous Carnot cycle, respectively.

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は、数 100mK 以下の超低温環境が不可欠である。

我々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 を試作し、航空機実験によって微小重力下で作動可能な ADR の作動試験を行った。その結果、微小重力における作動を実証するとともに、X 線マイクロカロリメータの駆動を確認した。しかし、固体ヘリウムの生成においては、その巨大な熱容量を十分に冷却することが困難であり、所定の目標に到達できなかった。

固定ヘリウムの生成は、連続型 ADR に内在する固有の問題を顕在化することとなり、より広範な ADR の応用に大きな課題を提供した。そこで、宇宙用極低温冷却機 WG では、この課題の解決に向けて、デザイン変更を検討した。

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、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。

本研究で開発された連続型 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 4 段連続型 ADR の構成概念図を示した。航空機実験においては気流などの外乱要因により大きな振動が冷凍機にかかり、熱ショートの問題が発生した。しかし、微小重力下においては安定した冷凍特性が得られている。また、地上実験においては X 線カロリメータの駆動も可能であり、宇宙用冷凍機としての潜在能力を確認できた。

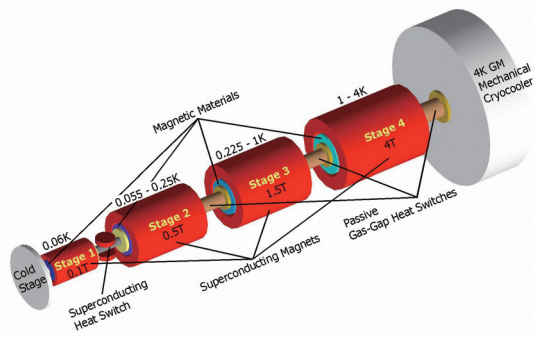


Fig. 1 Schematic of 4 Stage Continuous ADR.

固体ヘリウム生成実験結果

固体ヘリウムを生成する場合、約 17cc のセルにヘリウムガスを 20 気圧以上で圧縮し、0.3K 以下まで冷却しなくてはならない。Fig.2 はヘリウムセルを ADR でワンショット冷却した測定例である。最初は最も冷凍能力の高い第 4 ステージから消磁を開始し、その後第 1～第 3 ステージをほぼ同時に消磁させる。このときのヘリウムセルの温度は一時的であるが 1.5K まで低下し、その後も超流動温度を維持している。本実験が示していることは、4 段 ADR の最大パワーを集中的に使ったとしても、超流動温度までの冷却が精一杯で、固体ヘリウム生成温度までは行き着くことができないことである。

5 段式 ADR による汎用化

固体ヘリウム生成に見られる問題は、連続型 ADR の使い方において本質的な課題を提示している。すなわち、連続サイクルに至る過渡過程において、最低温度を発生するステージに設置された被冷却体の熱容量を十分に予冷できなければ、連続サイクルを駆動することができない点である。希釈冷凍機など、熱アンカーステージを有する冷却システムでは、被冷却体の予冷や配管等の熱侵入を効果的に

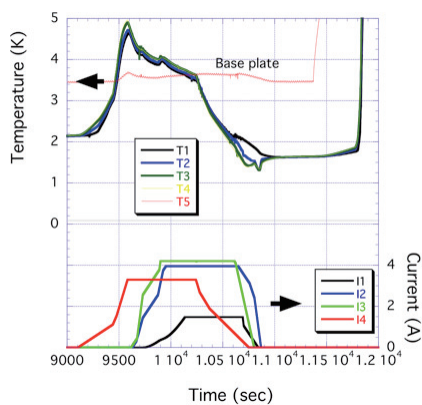


Fig. 2 Schematic of 4 Stage Continuous ADR.

除去することが可能である。一方、連続型 ADR では、各ステージが独立に冷凍サイクルを駆動しており、途中のステージで一定温度を発生するような使い方ができない。従って、固体ヘリウム実験のように巨大な熱容量を冷却するには、各ステージの大型化、あるいは磁場の大幅な増加が避けられない。

これを回避するための最も簡便な方法は、Fig.3 に示すような 1K ポットを設置することである。しかし、宇宙用冷凍機を考えると、本質的な解決にはならない。そこで我々は、4 段方式から 5 段方式に拡張し、2 つの冷却温度ステージをもつ ADR システムを検討した。Fig.4 に示すように、第 1 ステージから第 3 ステージで 0.1K を発生し、同時に第 4 ステージと第 5 ステージで 1 K 領域を連続して発生させる。固体ヘリウム実験においては、ヘリウムガスを第 4 ステージで予冷し、さらに配管等の熱侵入も除去することにより、第 1 ステージで 0.1K の安定した連続冷却が可能となる。

このように 2 つの連続型 ADR を並列に作動させることにより、1 K 領域のサーマルアンカー機能をもたせることが可能となり、熱設計の大幅な自由度が得られる。ただし、この方式では 0.1K までを 3 段で発生させるため、効率においてはやや劣ることになる。これには磁性体や磁場の性能向上が必要となるが、いずれも達成可能な課題であろう。

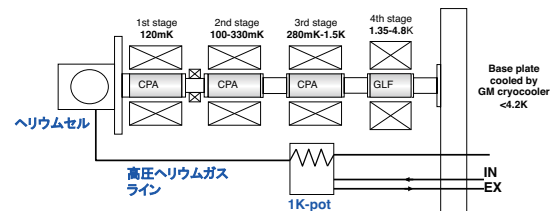


Fig. 3 4 Stage ADR System with an 1K pot.

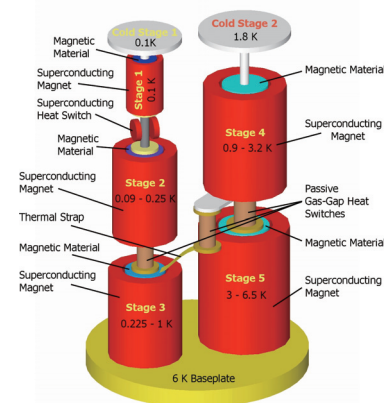


Fig. 4 Schematic of 5 Stage Continuous ADR.