

## 宇宙環境に適合する極低温冷凍技術の検討

沼澤 健則 (NIMS), Peter Shirron (NASA/Goddard)

### Space Experiment on International Space Station

Takenori Numazawa\*, Peter Shirron

\*NIMS/Tsukuba Magnet Lab., 3-13 Sakura, Tsukuba, Ibaraki 305-0003

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

**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. For the space applications in low temperatures, our working team has been concentrated the ADR system design cooperating with NASA. We developed a continuous ADR system to provide constant cooling temperatures  $\sim 0.1$  K. This 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. In order to solve this issue, we have been considered a new continuous ADR system with 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, however, the system will become to be complicated. We are also considering 3 stages ADR with 1 K continuous stage as a thermal anchor. This system will have more flexibility for many space applications.

**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。

我々はすでに宇宙環境利用公募地上研究 (2005 年~2007 年) 等により、世界で 2 例目となる連続型 ADR の開発を NASA との研究協力によって実施している。本研究では、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 ADR の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。

このような経験をもとに、我々は宇宙環境利用委員会において宇宙環境に適合する極低温冷凍技術に関する研究チームを構成し、これまでの ADR 技術を再検討し、より広範な宇宙応用を目指して日本における ADR 技術の基盤を確立することを目的に活動している。

#### 連続型 ADR システムにおける課題

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 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となっている。最低到達温度は 100mK で、約  $100 \mu\text{W}$  の冷凍能力をもつ。Fig.1 には 4 段連続型 ADR の構成概念図を示した。

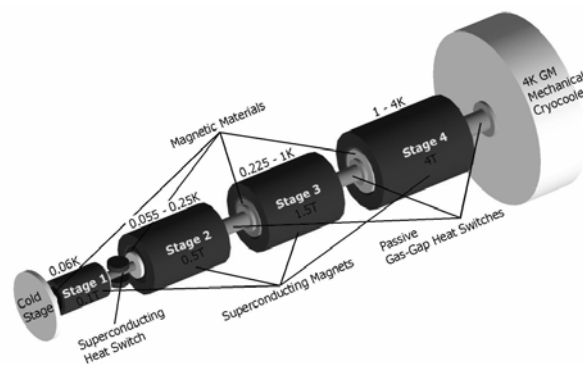


Fig. 1 Schematic of 4 stage continuous ADR.

地上実験においては X 線カロリメータの駆動を確認し、また、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。しかし、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、その結果、温度の上昇、あるいは冷凍サイクルが突然不安定となる現象が発生した。この原因は主として熱スイッチにおける熱ショートによるものと考えられた。熱スイッチは Fig.2 に示すように、2つの櫛形状のフィンが対向して設置されており、熱ショートはフィン同士が物理的に接触することによって発生するものと推測された。そこで、NASA において構造解析手法を用いて調べたところ、航空機内では局所的に想定外の G が装置内にかかり、物理的な接触を排除できないという結論を得た。この問題は、衛星打ち上げ時に冷凍運転を行わない限り深刻な問題とはならないが、接触による損傷の可能性がゼロではないことを示しており、NASA における熱スイッチ再設計の契機となった。現在、Astro-H に使用される熱スイッチでは、材料強度および形状の変更が行われており、熱スイッチのショートの確率はきわめて低くなっている。

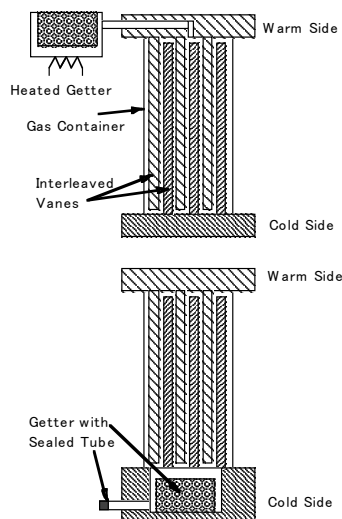


Fig. 2 Schematic of active (top) and passive (bottom) heat switch.

もう一つの課題は、固体ヘリウム生成実験において明らかとなった問題で、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除去することが可能であるが、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。

### 連続型 ADR システムの汎用化への検討

上記において、2 番目の課題は ADR システムに内在する固有な問題である。これを回避するために、我々は 1K 領域に定常温度で冷却するステージを設置することと、高温側のステージに任意温度で作動可能なアクティブ型の熱スイッチ(Fig.2)を採用することを検討している。従来、アクティブ型熱スイッチは作動時間が遅いため連続型 ADR には使用困難と考えられていたが、作動ガスの吸着剤や熱入力方式の改良によって、作動特性に大幅な改善が見られ、ほぼ問題ないレベルまで到達している。

一方、熱アンカーステージの設置は、4 段方式から 5 段方式に拡張することとなり、システムの複雑化を招く。この点については、さらに検討する余地があり、今後の議論を NASA も含めた研究チームで進めていきたい。なお、センサーのような必ずしも連続的に定常温度を要求しない仕様では、段数を 5 段から 3 段へ簡略化することが可能である。1K~4K 領域で連続ステージを設置した例を Fig.3 に示した。この場合、1K 領域で熱アンカーとしての利用が可能となる。

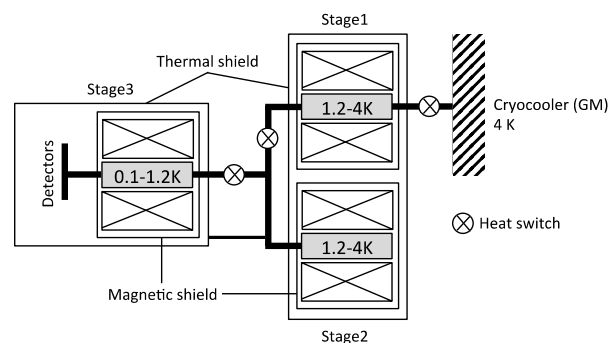


Fig. 3 Concept of 3 stage ADR system with a thermal anchor.

### まとめ

本チームでは、より現実性の高い 3 段の ADR システムについて実証も含めた検討を進めており、宇宙用冷却システムの汎用化へ向けて重要な技術と認識している。また、公募地上研究遂行において明らかとなった課題は、その後の NASA における ADR 開発に大きく反映されており、今後も双方の密接な交流をはかっていく。