

微小重力に適合した汎用超低温発生 ADR 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・Don Wegel
JAXA/ISAS 満田和久

Development of Continuous ADR System for Weak Gravity Missions

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

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

³JAXA / ISAS, Yoshinodai, Sagamihara, 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. We have been developing a new continuous ADR system 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 planned to test 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/GSFC and JAXA/ISAS..

Key words; ADR, Cryocooler

1. はじめに

宇宙環境を利用した基礎科学分野、特にX線天文学、赤外線天文学や基礎物理学において、極低温や超低温環境はミッションの成否に不可欠な技術要素として広く認識されている。Table1にはこれまでに実施された、あるいは計画されている極低温・超低温環境を必要とするミッションの例を示した。

高エネルギーX線検出の分解能を飛躍的に高めるX線マイクロカロリメータは、科学衛星Astro-E2において採用され、新たな宇宙像を捉える画期的検

出技術として活躍が期待されている。これをさらに改良したTES（超伝導遷移端センサー）型X線マイクロカロリメータやTES型赤外線ボロメータを搭載する科学衛星計画がJAXA、NASA、ESAにおいて、次々と提案・検討されている。このようなTESの作動には、100mK以下の超低温環境が不可欠である。

日本では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

Table 1 Examples of space missions for low temperatures.

Researches in Japan			
Research area	Subject of research	Mission name	Required cooling power
Space science	X-ray	Suzaku, NeXT, DIOS, XEUS (TES-typed X-ray microcalorimeter array)	0.4μW at 60mK 2 μW at 50mK
	Far infrared, submillimeter	SPICA (TES type bolometer)	2 μW at 50mK
Micro-gravity fundamental physics	Solid helium	Okuda project	100μW at 0.1K
	He3/He4 phase separation	Mizusaki project	< 1mW at 0.1-0.87K
	Superfluid helium	Murakami project	2K
	General relativity	Gravitational wave project	700mW at 7-9K
Researches in United States			
Space science	X-ray	MBE (microcalorimeter) Constellation-X (TES)	4mW at 50mK
	Far infrared, submillimeter	SPIRIT, SPECS, FAIR	< 10mW at 50 - 100mK
	Ultra violet	SUVO, EUV Solar	<10mW at 50-100mK
HEDS (micro-gravity fundamental physics)	Superfluid phase transition of liquid helium	DYNAMX, MISTE, SUE, BEST	2-3mW at 2K
	Solid helium and superfluid droplet	KISHT, SHE	0.5mW at 0.4-0.6K
	He3/He4 triple point	EXACT	1m-3mW at 0.5-2K
	General relativity	SUMO	2-3mW at 1-4K

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、より汎用的な ADR の実現を目標としている。本研究では典型的なニーズとして 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。

2. 断熱消磁冷凍機 ADR とは

従来から地上では超低温領域の発生に希釈冷凍機が広く使われている。宇宙用希釈冷凍機の開発も試みられているものの、本来、希釈冷凍機の作動には重力が必要であるため、宇宙実験で実用的に使用できる希釈冷凍機の実現は容易ではない。一方、より高温の 1K~4K 領域の発生には液体ヘリウム I および II が用いられているが、これらは地上から宇宙空間まで輸送されなくてはならない。寒冷の容量は有限であるため、ミッションそのものの寿命が寒冷に大きく依存するという制約をもたらしている。

ADR (Adiabatic Demagnetization Refrigerator) は磁性体の断熱消磁を用いた冷却方法で、1mK 以下の超低温の発生方法として広く普及している。ADR では、気体の圧縮・膨張によって発生する冷凍効果に対し、磁性体の磁化・消磁にともなう発熱・吸熱 (磁気熱量効果) を利用する。ADR は磁性体、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。

3. 連続型 ADR

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

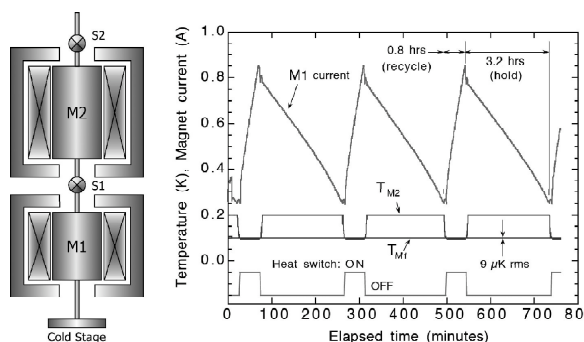


Fig.1 Concept of continuous ADR and example of experimental data.

ト冷却に特化したものであったため、一定温度を連続的に発生・維持することが困難であった。このため、ADR の使用者はその特性をよく理解し、限られた冷却時間の制約下でミッションを遂行しなくてはならなかった。宇宙において超低温や極低温をより簡便なクライオシステムとして提供するため NASA の Peter Shirron は 2 つ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提案した。これによって ADR における冷凍の間欠性を排除することが可能となった。

Fig.1 には、その構造模式図と実証実験結果を示す。冷凍負荷に接続された磁性体ユニット (M1) は擬似的に一定温度 T_{M1} を維持するカルノーサイクルを実行する。M1 が排熱過程にあるとき、熱スイッチ S1 を介して接続された磁性体ユニット M2 は吸熱過程を実行する。M2 は M1 から排出された熱を吸収するだけでなく、同時に冷凍負荷からの熱も汲み上げる作用を有する。すなわち、M2 は M1 の 2 倍以上の吸熱能力をもつように設計される必要がある。このシステムでは M1 は常にバッファとして熱負荷を一定温度 T_{M1} で吸熱することになり、冷凍の間欠性は全く生じない。実証データが示すように、 T_{M1} はわずか $9 \mu K$ rms の変動で一定温度を維持する。この革新的概念の実証は ADR を真の実用冷凍機とするための大きな飛躍となった。

4. 汎用連続型 ADR の開発

開発される ADR の主な仕様と特長を Table 2 に示した。大きな冷凍能力 (100mK で $100 \mu W$)、幅広い発生温度 (60mK~100mK)、液体ヘリウムが不要な無冷媒化の実現等の特長は、従来の ADR 開発と一線を画すものであり、宇宙における超低温実験の困難さを格段に緩和するものと期待される。ADR は 60mK で最低温度を発生し、4 K で熱を排出するカルノーサイクルを駆動する。このような広い冷凍温度幅をカバーするためには、4 段の冷凍ユニットが必要となる。冷凍ユニットは磁性体、超伝導マグネットおよび熱スイッチで構成され、最低温度を発

Table 2 Characteristics of Continuous ADR.

- Refrigeration power: $100 \mu W$ at 0.1 K
- Cooling temperature: 60mK - 100mK
- Sample space: 200mm dia. X 100mm high
- Temperature stability: $\pm 1mK$ at 100mK
- High efficiency > 40 Carnot %
- Expelling heat temperature > 4.2 K
- Helium free with a 4K Mechanical cryocooler

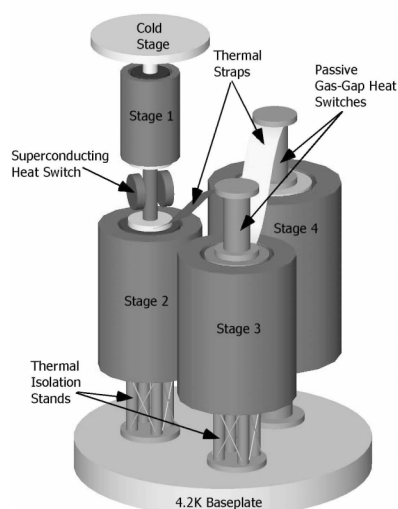


Fig. 2 Continuous ADR main parts.

生する Stage1 から 4K 領域を発生する Stage4 までは直列に接続される。Fig.2 には連続型 ADR の空間配置を考慮した構成図を示した。

連続型 ADR の開発には、構成するキーコンポーネント、制御・計測プログラム、航空機実験用クライオスタットなどの要素を効率よく進めて行かななくてはならない。Fig.3 には開発のスケジュールを時系列的に示した。2006 年末時点における進捗状況はほぼ計画通りであり、ADR の基本コンポーネントは 90%程度が完成している。2007 年前半に地上における駆動試験を行い、後半から航空機による微小重力実験を予定している。以下に、基本コンポーネントの開発状況を示す。

(1) 熱スイッチ

Stage1 に超伝導熱スイッチを、Stage2 から Stage4 には新開発の Passive Gas Gap Heat Switch (PGGHS) を用いる。Stage1 には試料冷却部が接続され、定常的に 100mK 以下の超低温環境の維持が保証される。各ステージからの排熱は最終的に冷

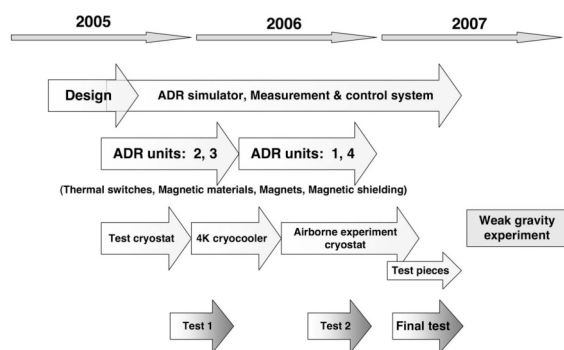


Fig.3 Development schedule of the continuous ADR.

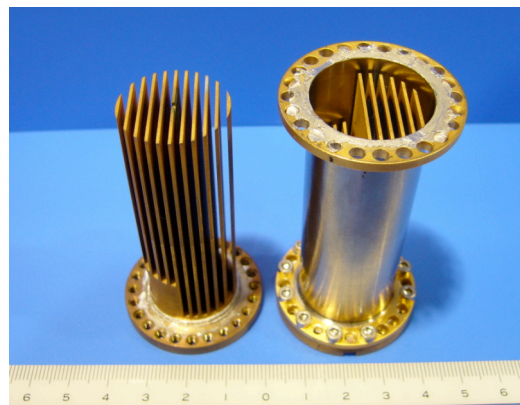


Fig. 4 Passive Gas-Gap Heat Switch.

凍温度 4 K の機械式冷凍機 (GM 冷凍機) によって吸収される。PGGHS の内部構造の写真を Fig.4 に示す。PGGHS は容器内に封入されたヘリウムガス圧力を温度変化と吸着材だけで制御することにより、熱入力を全く必要としない熱スイッチである。本 ADR では ON 状態の熱伝導率として従来の 4 倍にあたる 40mW/K を実現しなくてはならない。熱交換面積の増加によって所定の条件をクリアすることが確認されている。

(2) 磁性体

Stage1 から Stage3 までは CPA ($=\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)、Stage4 には新開発の GLF ($=\text{GdLiF}_4$) 磁性体が使用され、冷凍能力のさらなる増強をはかる。Fig.5 には完成した CPA 磁性体の写真を示す。GLF は従来材料である GGG に対し、平均で 30%の冷凍能力が増加することが実験結果から確認された。なお、各磁性体ユニットと冷却ステージには磁気シールドが施され、試料設置空間における漏れ磁場は数ミリ gauss 以下となり、超伝導磁石の使用によるリーク磁場は最低限に抑制される。

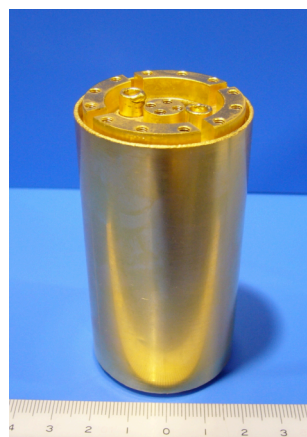


Fig.5 CPA magnetic material unit.

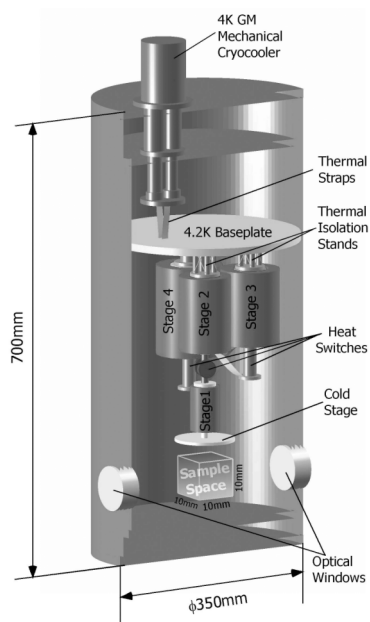


Fig. 6 ADR and cryogenic system.

(3) クライオスタット

航空機実験に対応するために、強度や重量を考慮したクライオスタットの設計と部品製作が終了し、組み立て段階に入っている。Fig.6 にはクライオスタットの構成概念図を示した。試料空間は下部に設置され、2種類の実験装置（超高感度光子検出センサーおよび固体ヘリウム結晶の成長）を想定した構造がとられている。前者では 60mK で数 μ W、後者では 100mK で 100 μ W の冷凍能力が各々要求されている。微小重力下において ADR の作動には本質的な困難が存在しないものの、機械式 4K 冷凍機や各種制御用機器と結合したトータルな冷却システムとしての評価試験は、これまでにほとんど行われ

たことがない。Fig7 には航空機内における ADR 装置を用いた実験イメージを示した。本機の開発によって、今後の宇宙衛星に搭載される超低温冷却システムの基盤データが得られるものと期待される。

5. まとめ

現状における開発は、ほぼ工程表通りのスケジュールで進行している。これは NASA の全面的な協力によるところが大きい。宇宙における極低温や超低温環境の実現は基礎科学分野のみならず、工学応用分野でもその重要性が高まるものと予測される。本研究では航空機実験による微小重力試験結果をもとに、ISS や科学衛星への搭載も視野に入れ、積極的に国内外のプロジェクトへ応用展開をはかっていく予定である。

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) T. Numazawa, K. Kamiya, P. Shirron, M. DiPirro and K. Matsumoto, submitted to AIP Conference Proceedings (2006).

謝辞

本研究は、日本宇宙フォーラムの宇宙利用に関する地上公募研究によって行われている。

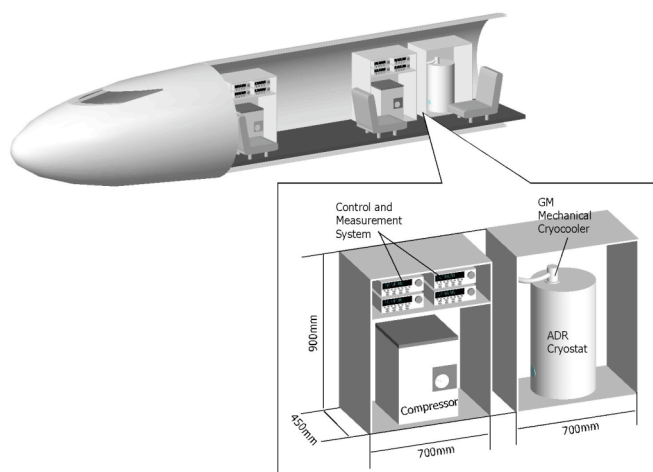


Fig.7 ADR system for airborne flight experiment.