

# 1 K 以下級宇宙用冷却機の開発

筑波大 村上正秀、物質・材料研究機構 沼澤健則・神谷宏治、宇宙用極低温冷却機 WG

## Development of Space Cryocoolers of Below-1K-Class

Masahide Murakami, Takenori Numazawa\*, Koji Kamiya\*  
and Space Cryocooler Working Group Members

Univ. of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8573 E-Mail: [murakami@kz.tsukuba.ac.jp](mailto:murakami@kz.tsukuba.ac.jp)

National Institute for Materials Science, Tsukuba, Ibaraki 305-0047

**Abstract:** The R&D activities of the working group for space cryocoolers of below-1K-class is introduced. The current target is the ADR development for  $\mu$ -g physics experiment onboard ISS as well as baseline study for below-1 K-cryocooler for IR and X-ray astrophysical observations.

**Key words;** ADR, Cryocooler

### 1. 宇宙用極低温冷却機 WG の活動

本 WG は、以下の二つの目標を追求するものであり、H16 年度選定 WG (低温物理) からの発展形態としての活動を目指している。

宇宙環境利用科学分野における低温物理実験 (量子液体・固体、臨界点ダイナミクス等) が提案され地上実験が続けられる中で、次の段階ではこれを発展させ、微少重力環境下での実験へ進むべきことが結論された。その際、予め解決しておくべき課題の一つが、「宇宙環境で利用できる低温実験用冷凍機の開発」であり、本 WG はこれを工学から支えるものである。宇宙環境下で作動し得る原理に基づく、宇宙環境適合型の 1 K 以下級冷凍機は、日本には存在せず、また欧米においても開発段階で宇宙実用段階にまでは進んでいない。

最近の宇宙観測機器においては、低温冷却が決定的な条件となる分野、赤外線 (特に遠赤外) や X-線天体物理観測、が現れ格段の成果が上がりつつある。1 K 以下級冷凍機開発は、その将来を支える重要な課題でもある。ここで必要とされる性能を持つ冷凍機は、作動原理が物理の基礎に深く依存する一方で、高度な技術的ノウハウを必要としており、このことからこれらの上記 2 目標を併せて追求することがごく自然であり、相互啓発的でもあると判断される。

さらに、その他の低温関連の物理実験や理工学実験における新規の展開の可能性を促す事を目標として、先行的に低温実験用冷凍機の性能・信頼性を向上させておくことも重要と考える。

一方、このような目的の実現と継続的発展には、宇宙と低温に関する理工学という両刀使いのできる担当者育成が重要であり、この観点から若手の育成に務めることも目標に含めることとし、情報交換、開発のための組織作り、の意味も込めて本 WG の設

立を期している。

### 2. 1 K 以下級冷却機の開発

本格的な極低温宇宙ミッションは、70 年代から 80 年代にかけて開発が行われた、超流動液体ヘリウム (He II) 利用の低温冷却システムから始まった。He II の利用は、超流動性という厄介な性質の克服が必要であったが、それも成功裡になされ、その低温性 (2 K 以下) とポーラスプラグを用いた  $\mu$ -g 環境下での気液相分離の容易性という大きな利点が生かされた。その先駆は、83 年に打ち上げられた IRAS であり、その後 COBE、ISAS による IRTS、ISO と時代と共にそのシステム規模の大きさや温度の低さなどの点で進化を遂げて行った。

この時代のミッションでは、温度としては 2 K 以下、冷却能力で 100 mW オーダという低温性能が要求されていた。しかし、このような冷媒貯蔵型システムでは、重くて嵩ばる冷媒タンクや最外郭真空断熱槽の必要性、ミッション寿命が冷媒の消耗で制限される、液体ハンドリングに関わる複雑性による信頼性の低下、などが指摘されてきていた。このような問題の解決への切り札として提案されたのが機械式冷却機であり、スターリングやパルス管冷却機の開発が促進された。その利用により、重量や嵩の大幅な改善による大型鏡の利用に道が開かれた他、軌道に投入後に冷却を開始するという常温打ち上げが可能となり、射場操作の単純化が可能となった。それでも、温度の低さや 2 相共存状態で規定される温度基準を持つと言った液体冷媒のメリットが重みを持つ場合には、両方を併用するハイブリッド冷却系が採用されたりもしている。

今後の動向は、これまでと同様、赤外線はもちろん、X-線天体観測の分野においても、冷却能力は小さいがさらなる低温度 (1 K 以下級) システムの要求ということになり、ここに磁気冷却機などのいわ

ば次世代型が要求されるようになってきている。

### 3. 磁気冷却機 (ADR) の特徴

磁気冷却機は磁性体の断熱消磁を用いた冷却方法で、ADR (Adiabatic Demagnetization Refrigerator) の名称で知られている。ADR は 1mK 以下の超低温の発生方法として広く普及しているが、数 10mK から数 K 領域における実用化例は少ない。

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。Fig.1 に示すように、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、宇宙用冷却機として理想的な特性を有する。

2005 年に打ち上げられた X 線天文衛星「すざく」には世界で初めて ADR が搭載され、宇宙での最低温度 60mK の発生に成功している。このように ADR は着実に宇宙用冷却機としてその有用性が認知されつつある。しかし、これまでの方式は 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。

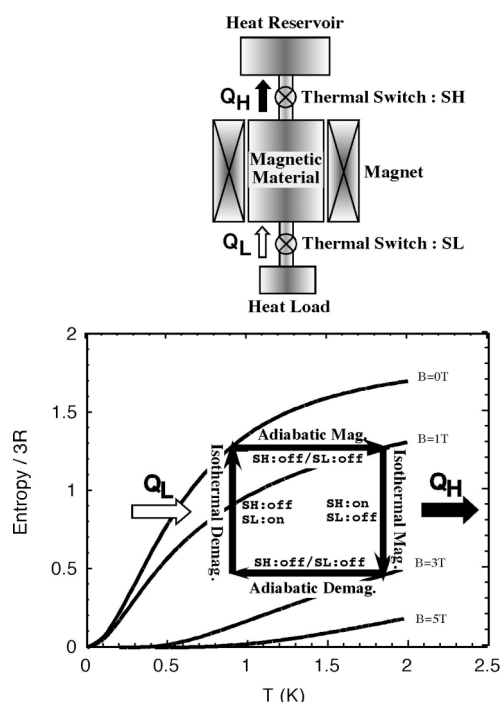


Fig.1 Fundamental scheme of Magnetic Carnot Cycle

### 4. 連続型 ADR

使用者側の負担を軽減し、宇宙においても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べきであるという機運が低温装置研究者間で生まれた。NASA の Peter Shirron は、ADR における冷凍の間欠性を排除するために 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。

Fig.2 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  $9 \mu\text{K rms}$  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。我々のグループは NASA のプロジェクトに立案段階から参加し、磁性材料開発を通して研究を大きく加速してきた。

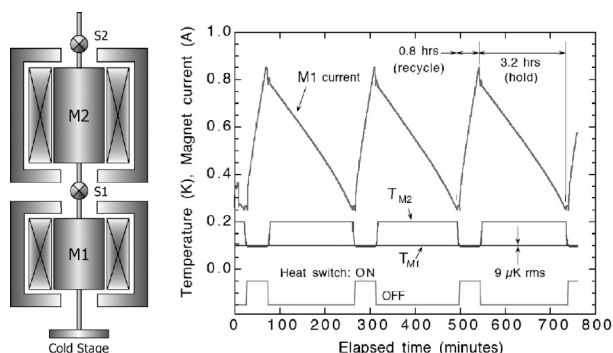


Fig.2 Concept of continuous ADR and example of experimental data

### 5. 日本における汎用連続型 ADR の開発

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 の開発が採択された。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

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。開発される ADR の主な仕様と特長を Table 1 に示した。特に、冷凍能力の増強 (100mK で  $100 \mu\text{W}$ )、幅広い発生温度 (60mK~100mK)、無冷媒化の実現 (液体ヘリウムを使用しない) 等の特長は、従来の ADR 開発とは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。

Fig.3 には連続型 ADR システム主要部の完成予想図を示した。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、最低温度を発生する Stage1 から 4K 領域を発生する Stage4 までが直列に接続される。各ステージにおける基本的仕様を Table 2 に示した。熱スイッチに関しては 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。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。

Table1. Characteristics of Continuous ADR

- Refrigeration power:  $100 \mu\text{W}$  at 0.1 K
- Cooling temperature: 60mK - 100mK
- Sample space: 100mm dia. X 100mm high
- Temperature stability:  $\pm 1\text{mK}$  at 100mK
- High efficiency > 40 Carnot %
- Expelling temperature > 4.2 K
- Compact & light weight < 20 kg
- Helium free: use of 4K Mechanical cryocooler

Table2. Specifications of Continuous ADR

Stage	Op. Temp.	Material*	Magnet	Weight**
1	60 mK	CPA	0.1 T	0.5 kg
2	55-280 mK	CPA	0.5 T	1.7 kg
3	250 mK-1.0 K	CPA	1.5 T	2.4 kg
4	0.9-4.5 K	GLF	4 T	3.1 kg

\*CPA=  $\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 、GLF= $\text{GdLiF}_4$

\*\*Material+Magnet

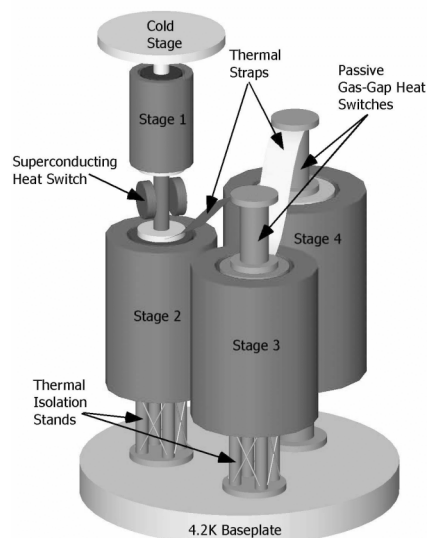


Fig.3 Continuous ADR main parts

このように小型の冷凍ユニットを複数段組み合わせることは、サイクルの高速化による冷凍能力の増加、システム全体の熱効率の最適化、冷凍温度領域の拡大、トータル質量の低減化に大きな効果があり、磁場・温度制御機構の複雑化によるデメリットをはるかに上回る結果が得られる。例えば、最低発生温度 60mK、排熱温度 4.2K の典型的な旧型ワンショット ADR の冷凍能力は 60mK で  $0.3 \mu\text{W}$ 、質量が 15Kg であるのに対し、表 2 に示す 4 段連続作動型 ADR システムでは冷凍能力が  $10 \mu\text{W}$  まで増加するとともに、質量は 7.7Kg まで減少する。

本研究で用いる磁性体は、第 1 から第 3 ステージまでは CPA ( $=\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ )、第 4 ステージには新開発の GLF ( $=\text{GdLiF}_4$ ) 磁性体を使用され、冷凍能力のさらなる増強をはかる。磁気シールドも含めた ADR ユニット全体の質量は 20Kg 以下と見積もられ、軽量・コンパクトな宇宙用冷却システムが構築できる可能性が高い。

以上のような汎用連続型 ADR は、Fig.4 に示すように観測用窓を備えたクライオスタットに納められる予定である。この ADR は地上のみならず、航空機を用いた微小重力環境のもとでも作動試験を行う。Fig.5 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。想定される実験は、超高度光子検出センサーの駆動および固体ヘリウム結晶の成長実験である。前者では 60mK で数  $\mu\text{W}$ 、後者では 100mK で  $100 \mu\text{W}$  の冷凍能力が各々要求されている。2 つの大きく異なる実験条件を 1 台の ADR で実現しようとする試みはこれまでになく、

冷却システムとしての高い完成度が要求されることになる。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 4 K 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。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。

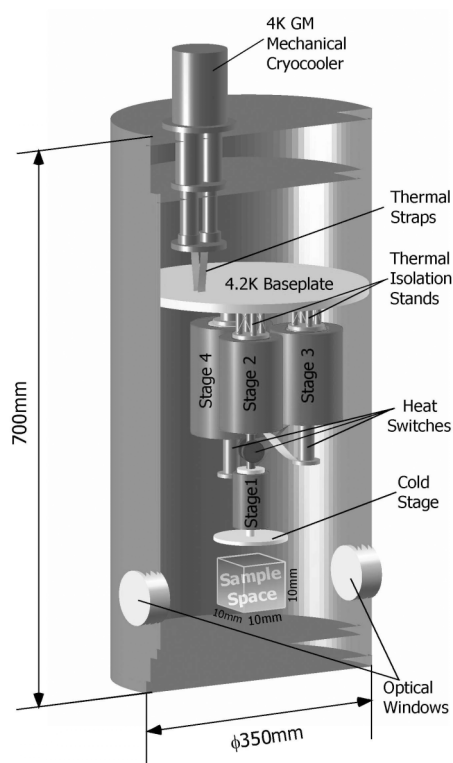


Fig.4 Continuous ADR system

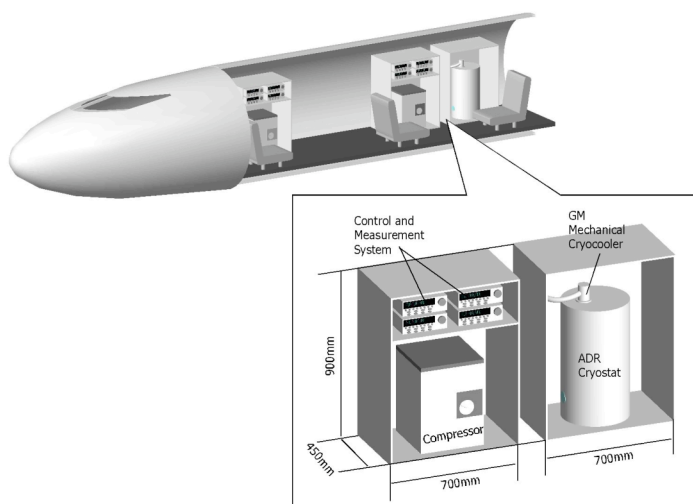


Fig.5 ADR system for airborne flight experiment

## 6. まとめ

今後、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。NASA や ESA ではすでに連続型 ADR の開発スキームが確立されつつあるが、日本においても本研究がその嚆矢となり、着実に実績を積み上げていくことが重要と考える。簡便な宇宙用冷却機の実現が、より多くの宇宙研究を生み出し、その裾野を拡げて行く一助となることを切望するものである。

## 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, K., Okano, T. and Matsumoto, K., *Physica, B* 329-333 (2003) 1656-1657.