研究論文

連続型断熱消磁冷凍機

沼澤 健則^{*1,†}, 神谷 宏治^{*2}, 李 晶^{*3}, 中込 秀樹^{*3}, Peter SHIRRON^{*4}

Development of a Continuous Adiabatic Demagnetization Refrigerator

Takenori NUMAZAWA^{*1,†}, Koji KAMIYA^{*2}, Jing LI^{*3}, Hideki NAKAGOME^{*3} and Peter SHIRRON^{*4}

Synopsis: Adiabatic demagnetization refrigerator (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 weak gravitational conditions. In this study, we developed a continuous ADR system to provide constant cooling temperatures ~ 100 mK. The system consists of four stages of magnetic materials and magnets cascaded with heat switches. The magnetic materials, CPA and GdLiF₄, are used for three stages between 0.1 - 1.4 K, and a single stage between 1.4 - 4 K, respectively. Passive heat switches are used for three stages > 0.3 K, and a superconducting heat switch is used for the continuous stage at ~ 0.1 K. A Gifford-McMahon cycle cryocooler is used to cool the ADR and cryostat shieldings. The total mass of the flight model is less than 60 kg. Cooling tests with a transition edge sensor (TES) on the ground showed that the ADR provided continuous cooling temperatures from 105 - 120 mK, and it successfully operated the TES. Airborne flight experiments confirmed the ability of the cooling system under milli-gravity conditions. The experimental results showed that the ADR could provide stable temperature under a weak gravity. In conclusion, a continuous ADR system will be useful for many applications that require higher efficiency and compactness.

Keywords: ADR, cryocooler, low temperatures, ultralow temperatures, space cryogenics

1. はじめに

断熱消磁法は磁気冷凍において最も基本的な低温の発生方法であり、極低温や超低温の生成に広く用いられている。20 世紀初頭に開発された断熱消磁冷凍機 (Adiabatic Demagnetization Refrigerator = 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。これは一時的に低温を保持する冷却器であり、冷凍サイクルを駆動する冷凍機とは区別されるべきものである。これに対し、NASA の Peter Shirron は複数の ADR ユニットの結合し、適切なサイクルで駆動することにより、最低温度発生部を一定温度に保持する連続型

ADR の開発に成功した¹⁾。これによって、ADR 技術は実用冷凍機の水準まで高められることになった。

このような連続型 ADR が対象とするアプリケーションは、希釈冷凍機の代替をはじめとする広範なものであるが、開発の経緯としては宇宙応用に端を発している。すなわち、ADR の作動には重力が不要であり、小型・軽量化が可能ることから、宇宙用超低温冷凍機として理想的な特性を有する。特に、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) 型マイクロカロリメータの作動には、100 mK 程度の超低温環境が不可欠であり、連続型 ADR 開発の契機となった。

本研究においても、日本宇宙フォーラムの宇宙環境利用に関する地上研究が端緒となり、宇宙実験で要求される多様な極低温環境を実現するために汎用的な ADR の開発を目標とし、物質・材料研究機構が NASA、JAXA との研究協力によって実施している^{2,3)}。この研究では、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 の実証試験が行われた。これに引き続き、科学研究費「宇宙創成の物理」において、熱設計のリファインが行われた。

本稿ではこれまでのデータを集約し、4 段の ADR ユニットから構成される連続型磁気冷凍機の構造と特性について報告する。

Received December 2, 2014

^{*1} (独) 物質・材料研究機構 環境・エネルギー材料部門
〒305-0003 茨城県つくば市桜 3-13

NIMS, 3-13 Sakura, Tsukuba, Ibaraki 305-0003, Japan

^{*2} 日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所

〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

JAEA, 801-1 Koyama, Naka, Ibaraki 311-0193, Japan

^{*3} 千葉大学大学院 都市環境システム専攻

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

Chiba University, 1-33 Yayoi, Inage, Chiba 263-8522, Japan

^{*4} NASA / Goddard Space Flight Center,

Code 552, Greenbelt, MD 20771, USA

[†] E-mail: Numazawa.takenori@nims.go.jp

DOI: 10.2221/jcsj.50.96

2. 連続型 ADR

2.1 動作原理

ワンショット型 ADR による低温発生の間欠性を排除するため、連続型 ADR では 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¹⁾。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 の吸熱能力は M1 の吸熱量と排熱量の合計を上回る必要がある。

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。この革新的な概念は実験による実証の成功により、ADR を真の実用冷凍機とするための大きな飛躍となった¹⁾。

2.2 仕様と特長

連続型 ADR の主な仕様と特長を Table 1 に示した。連続型 ADR は約 100 mK 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、4 段の ADR ユニットの用いている。これを 2 段にすることも可能であるが、超電導磁石、磁性体質量および冷凍効率の最適化から、4 段の優位性が実証されている¹⁾。個々の ADR ユニットの構成は磁性体、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 Stage 1 から 4 K 領域を発生する Stage 4 までは直列に接続される。Fig. 2 には連続型 ADR の構成概念図を示した。個々の ADR ユニットのカルノーサイクルの位相を半分ずつずらして駆動し、最低温度発生部を一定に保持しながら、熱を順次高温端へ移動させる。ADR ユニッ

Table 1 Specification of continuous ADR

- Refrigeration power: 100 μW at 100 mK
- Fast cycle: ~ 30 min
- Cooling temperature: ~ 100 mK
- Sample space: 150 mm dia., 150 mm height
- Temperature stability: ± 1 mK at 100 mK
- Expelling temperature > 4.2 K
- Compact and light weight < 100 kg
- Helium-free: use of 4 K mechanical cooler

ト相互の熱リンクは熱スイッチの ON/OFF で行われるため、熱スイッチの効率 (スイッチ比と熱通過率) は全体の冷凍効率に大きく影響することに注意する。

この方式のメリットは、各ユニットが休むことなくカルノーサイクルを駆動するため、サイクル周波数の大幅な高速化が可能となることである。例えば、従来の宇宙用ワンショット型 ADR では、1 サイクルが 8 時間から 24 時間程度であったのに対し、本研究では 30 分までの短縮化を達成している。サイクル周波数の高速化は単位時間当たりの冷凍能力を増加させるため、磁場強度、磁性体質量の減少が可能となる。従って、システム全体としての小型・軽量化に大きく寄与することになる。

2.3 主要コンポーネント

連続型 ADR の主要コンポーネントは、磁性体、熱スイッチ、超電導磁石、クライオスタット等である。

2.3.1 磁性体

Stage 1 から Stage 3 までは CPA ($=\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)、Stage 4 には新開発の GLF ($=\text{GdLiF}_4$) 磁性体を使用した。各ステージの磁性体が作動する温度、磁場、質量を Table 2 に示した。CPA は従来から断熱消磁冷凍機に広く用いられている磁性体であるが、熱伝導性に乏しく、かつ空気との反応性が高いため、シールドされた容器内で結晶化し、直ちに封入される。この容器は熱伝導率を高めるために、銅製のワイヤー形状となっており、磁性体はワイヤー中に結晶化する。Fig. 3 には封入前 (左) と完成した CPA 磁性体 (右) の写真を示す。CPA の質量は約 100 g で

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

Fig. 2 Schematic of four-stage continuous ADR.

Table 2 Specification for ADR stages

Stage	Operating Temperature	Refrigerant	Field	Weight*
1	100 mK	CPA	0.1 T	0.57kg
2	85 ~ 280 mK	CPA	0.5 T	0.57kg
3	250 mK ~ 1.0 K	CPA	1.5 T	0.57kg
4	0.9 K ~ 4.5 K	GLF	4.0 T	0.83kg

* Refrigerant + Magnet

あり、設計値に対し約 97%の結晶が生成されている。

冷凍サイクルの高速化に際し、Stage 4 の磁性体は特別な意味をもつ。すなわち、Stage 1 から吸熱された熱は Stage 2 と Stage 3 を経由して Stage 4 に至るが、Stage 4 磁性体の吸熱量が十分に大きくなければ、冷凍サイクルの駆動が困難となる。従って、Stage 4 では磁場と磁性体質量が増加することになるが、これを最小限に抑えるためには、磁性体そのものの性能を向上させることが有効である。ここで開発された GLF は、従来材料である CPA や GGG (=Gd₃Ga₃O₁₂) に対し、平均 30%の冷凍能力の増強を達成している⁴⁾。Fig. 4 には、GLF と GGG との磁場に対するエントロピー変化量（吸・排熱量に比例）の比較結果を示した。GLF は GGG よりも 20%~60%高いエントロピー変化が得られることがわかる。

2.1.2 熱スイッチ

熱スイッチは連続型 ADR において効率を左右する中核的なコンポーネントである。熱スイッチは磁性体やマグネットと同様にステージ毎に用意する必要がある。Fig. 5 には、それぞれの熱スイッチの ON/OFF における熱コンダクタンスを示した。実線は ON 状態、点線は OFF 状態のコンダクタンスを示す。作動温度の条件から、Stage 1 (0.1K) には超伝導熱スイッチを、Stage 2~Stage 4 には NASA で開発された Passive 型 Gas Gap 熱スイッチ (PGGHS)を用いた。作製された PGGHS の内部構造を Fig. 6 に示す。通常の Active 型 Gas Gap 熱スイッチと構造は類似しているが、封入するヘリウムガスの精密な圧力制御と補助的な吸着材を使用することが特徴である。磁性体の温度変化のみで内圧を制御し、特定の温度で熱コンダクタン

Fig. 4 Entropy changes in GLF and GGG.

ス比 1000 以上を実現する。Active 型ではヒーターによるガス圧制御が必要であるため、熱損失の発生が避けられないが、Passive 型では圧力変化が自律的に発生するため、ヒーター加熱による熱損失が存在しない。従って熱効率が低いとともに、スイッチング時間も数秒以内で高速である。ただし、Stage 1 は作動温度が低く Gas Gap スwitchの使用が困難であるため、従来から一般的に使用されている Sn の超伝導熱スイッチ (SCHS) を用いている。超伝導熱スイッチの駆動は、超伝導熱スイッチに隣接して設置された超伝導コイルの磁場によって行う。Fig. 7 には

Fig. 5 Conductance of heat switches.

Fig. 3 CPA for Stages 1 – 3.

Fig. 6 Passive gas gap heat switch.

Fig. 7 Superconducting heat switch (a) and superconducting Helmholtz coil (b) in Stage 1.

Stage 1 の超伝導熱スイッチと超伝導-常伝導のスイッチ操作を行うヘルムホルツ型コイルを示した。

2.3.3 超電導磁石

磁性体の外側に設置されるマグネットは磁性体と一体化して用いられるため、磁性体の外径に合わせて4ステージ分が必要となる。各マグネットに要求される発生磁場はTable 2 に示されている。高密度化をはかるため、0.1 mm フィラメント径の極細超電導線を使用した。その結果、Stage 4 では直径 38 mm に 4 T の磁場を約 4 A で発生させることが可能となった。**Fig. 8** には製作されたマグネットを示した。マグネットの内側には磁性体が設置されるが、有効磁場を高めるため、コイルと磁性体との間隙を可能な限り小さくする必要がある。さらに、振動や磁気力に耐えうるように十分な強度で両者が結合されなくてはならない。一方で、磁性体は熱的にマグネットと接触してはならない。このような条件を満足するために、熱伝導率の低いスペーサーを用いマグネットと磁性体間のクリアランスを確保するとともに、ケブラーワイヤーの張力によって振動を吸収する方式を採用した。両者間の間隙は 1 mm 以下となっている。

マグネットの外側には磁気シールド（ケイ素鋼板）を設置した。センサー等を設置する Stage 1 周辺の漏洩磁場は

Fig. 8 Superconducting magnet.

Fig. 9 Schematic of a four-stage continuous ADR system.

可能な限り小さくする必要がある。磁気シールドやマグネットの配置を工夫することにより、TES や SQUID などの磁場に敏感な検出器でも影響を受けないオーダー（1 Gauss 以下）まで漏洩磁場を減少させるように設計した。

2.3.4 ADR システム

上記の ADR コンポーネントを組み合わせた ADR 冷凍システムの構成を、**Fig. 9** に示した。超伝導熱スイッチは Stage 1 と Stage 2 の磁性体を間に設置されている。実際の配置は Fig. 2 と異なり、コンパクト化や航空機実験における耐震性を考慮して決定されている。**Fig. 10** には、4 段の ADR システムの写真を示した。

2.3.5 クライオシステム

Fig. 11 には ADR を組み込んだ航空機実験用クライオスタットの構造図を示した。ADR は GM 冷凍機（住友重機械 RDK-101D）と結合され、最低温度発生部には試料空間（最大で 20 cm³）が設けられる。ADR と GM 冷凍機用各配線以外に、TES カロリメーターおよびヘリウム実験用

Fig. 10 Main part of the four-stage continuous ADR.

Fig. 11 Schematic of the ADR and cryogenic system.

配線ポートが設けられている。また、予冷時間を短縮化するために、液体窒素用配管が設置され、4 K ステージの熱交換器によって ADR や試料の予冷を行う。GM 冷凍機から ADR への振動を抑制するため、クライオスタットのフランジから本体を吊すロッドの途中に制震機構を設けた。Fig. 12 には、クライオスタットのフランジに設置された ADR 本体部の写真を示した（作業性のため天地が逆になっている）。ADR と試料空間は、45 K と 4 K の熱シールドと MLI（Multi Layer Insulation）で覆われる（写真ではシールドはついていない）。重量および寸法は航空機実験条件に適合するように設定され、直径 440 mm、高さ 890 mm、総重量 60 kg までに小型・軽量化された。重量に関してはアルミ材料を多用した効果が大きい。

Fig. 12 Picture of the ADR and cryogenic system.

2.3.6 計測・制御系

ADR の駆動に必要な装置として、温度制御装置と超電導磁石用電源があげられる。これらは 4 ステージ分用意する必要があるため、複雑な構成で大型化することが避けられない。我々は NASA と共通の仕様で温度制御装置と超電導磁石電源とを一体化した ADR コントローラの製造を LakeShore 社に依頼した。これによって電源や計測器等を 1 ユニットに集積化することが可能となった。ADR の制御は LabView 上で開発されたプログラムによって、パソコンから GP-IB を経由して行われる。ADR 制御プログラムは一種のサイクルシミュレータであり、仮想的な装置情報を与えることにより、あたかも実際のサイクルが実行されているかのように、ADR の特性を調べることができる。これによって ADR で要求される仕様を満足するパラメータ条件を調べるとともに、その結果は直ちに実際の冷却試験にフィードバックすることができる。以上のように、ADR 側で必要な計測・制御装置は ADR コントローラとプログラムを実行するノートパソコン、GP-IB インターフェイスのみとなり、消費電力と質量の点で大幅な小型化が達成された。

3. 地上における実験

3.1 連続サイクルの駆動

4 段式 ADR の作動は複雑であるため、ここでは初期状態からの駆動方法について Fig. 13 をもとに説明する。

- ・初期状態では Stage 間の熱スイッチは全てオンである。
- ・Stage 4 を励磁し、GM 冷凍機へ排熱する。
- ・Stage 4 を消磁し温度が下降すると、GM 冷凍機間の熱スイッチがオフとなる。
- ・Stage 4 が所定の温度に到達すると Stage 3 の励磁が開始され、Stage 3 から Stage 4 へ排熱する。
- ・Stage 3 の排熱終了後、Stage 3 が消磁を開始すると温度低下によって Stage 4 間の熱スイッチがオフとなる。

Fig. 13 Sequence of the four-stage continuous ADR.

- ・ Stage 3 が所定の温度に達すると、Stage 2 の励磁が開始され、Stage 2 の排熱が Stage 3 へ移動する。
- ・ これと並行して Stage 4 は励磁を開始し、所定の温度で GM 冷凍機間の熱スイッチがオンとなり、排熱する。
- ・ 以降、Stage 2, Stage 1 についても同様のサイクルを逐次駆動し、最終的にはそれぞれの Stage が独立してカルノーサイクルを駆動するようになる。

初期状態で重要なことは、各 Stage が熱スイッチの作動温度まで十分に冷却されることであり、Stage 相互間の伝熱が十分でない場合には、高温側磁性体のサイクルを複数回繰り返す必要がある。このような制約は熱スイッチの作動温度が固定されていることに起因しており、Passive 型 Gas Gap 熱スイッチを使用するシステムに特有なものといえる。

3.2 実験結果

Fig. 14 には、4 K から 140 mK に至る連続型 ADR の温度変化を示した。GM 冷凍機の吸熱温度は約 4 K で一定であり、初めは全ての磁性体がこの温度からスタートするが、消磁が開始することで Stage 4, Stage 3 と順次温度が降下してゆき、6 サイクル後には Stage 1 が所定の 140 mK に到達していることがわかる。Fig. 15 には、定常サイクルでの各ステージの温度変化を示した。Stage 1 は PID 制御によって 120 mK を維持しており、それ以外の Stage は独立してサイクルを駆動していることがわかる。熱スイッチがオン状態のときには、それぞれの温度がオーバーラップしていることに注意する。これは各 Stage 間での熱移動のために、所定の温度差が必要なためである。

本研究で開発された連続型 ADR の典型的な 1 サイクルの周期は 30 分であった。これは従来のワンショット型に比べて数十倍高速化されている。一方、温度の安定性は高速化と引き替えに多少低下し、 105 ± 0.25 mK, 120 ± 0.6 mK が得られた。設計上の安定度は 100 mK で ± 1 mK であり、要求仕様はほぼ満足できたと考えられる。なお、冷却用試料として TES を Stage 1 に設置し、作動特性の試験を行って

Fig. 14 ADR cycle from 4 K to 140 mK.

Fig. 15 Continuous ADR cycle providing 120 mK.

いる。これを Fig. 16 に示した。実際には TES のみならずそれに付随する SQUID アンプも 105 mK で冷却し、信号検出に成功した⁹⁾。冷凍能力の評価に関しては、4 K ステージから最低温度発生部 (Stage 1) に熱が直接的に流入するため、計測線を含めた熱量を評価する必要がある。これは連続運転における PID 制御と深く相関があるため、冷凍能力は温度安定性とのトレードオフとなる。TES を用いた実験における計算では、 $120 \text{ mK} \pm 0.6 \text{ mK}$ で $100 \text{ } \mu\text{W}$ をほぼ満足していることがわかった。

4. 航空機による微小重力実験

4.1 概要

本研究での ADR はそもそも宇宙応用を対象として開発した経緯があるため、その一環として、微小重力下での作動特性を解明することは必須であると考えられた。そのため、消費電力、サイズ、重量等の基本仕様は、航空機実験の制約に適合するように考慮され、結果として小型・軽量化、省電力化が達成されている。なお、航空機実験で使用された連続型 ADR は初期の 1 号機であり、現在改良中の 2 号機とは一部の特性が異なっている。

Fig. 16 First stage with TES and SQUID.

2007 年 12 月と 2008 年 3 月に名古屋飛行場（小牧）において、航空機実験を合計 8 回実施した。航空機による微小重力の発生方法は他所に譲るが⁵⁾、航空機が放物運動飛行（パラボリックフライト）を行うことによって、約 20 秒間にわたりミリ G オーダーの微小重力が生成される。一回の航空機実験で 5~10 回のパラボリックフライトが行われた。

4.2 微小重力実験結果

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 等の冷却が可能であるか、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くてはならない。第一に予冷用 GM 冷凍機が作動すること、第二は ADR そのものの作動である。さらに、飛行前の問題として、実験準備段階で電源が連続的に供給されないという課題に直面した。これは航空機への搭載や駐機場への移動の際に電源供給が停止することに起因するが、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くてはならない。このため、いかに急速に冷凍サイクルを復帰させるかが、実験遂行の鍵となった。これに関しては、ADR の冷凍サイクルを高速化するとともに、関係者の努力によって駐機場における待機時間を増やすことで解決した。

実際の実験で遭遇した最大の問題は、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 のサイクルを初期状態から再開する必要があるが、定常サイクルまでには 2 時間以上を要するため、離陸からパラボリックフライトに至る過程で連続作動モードを実現することは不可能であった。また、定常航行時でもジェットエンジンからの微小な振動が、ADR 各 Stage の温度上昇を引き起こした。

Fig. 17 Thermal short during taxiing.

Fig. 18 Temperature change in the second stage at microgravity.

以上のような振動問題を回避するためクライオスタットに除振機構を設置した結果、巡航中での熱ショートはほとんど起こらなくなった。しかしながら、離陸時における急激なショックは吸収不可能であった。一方、ADR そのものは微小重力下できわめて安定した特性を示し、最低到達温度として 144 mK が達成された。Fig. 17 には熱スイッチが滑走路移動時（taxi）にショートした例、Fig. 18 には微小重力発生前後での Stage 2 の測定例を示した。グレー領域で示した微小重力下では不要な振動がなくなるため、むしろ地上よりも安定した特性を示していることがわかった。また、離陸時の熱ショートは航空機実験固有の問題であり、実際の宇宙実験との関連はないため（ロケット飛行時に実験は行われない）、宇宙応用には何ら問題がないことが明らかとなった。以上のように、航空機実験においては連続作動に至らなかったものの、ADR そのものの微小重力における冷却特性の貴重なデータを得ることができた。

5. まとめと今後の展開

本研究で得られた結果をまとめ、課題を提示する。

- ・連続型 ADR 装置を構築し、安定した連続カルノーサイクルの駆動を達成した。これは NASA 以外では初めての成功例である。
- ・連続サイクルにおける最低到達温度は 105 mK で、ほぼ設計通りの性能であった。
- ・TES カロリメーターを連続型 ADR として初めて冷却し、信号検出に成功した。
- ・各 Stage のカルノー効率率は最大で 80%に達し、全体では 30~50%程度であると見積もられた。
- ・ADR が微小重力下で作動可能であることを実証した。
- ・微小重力環境は振動発生を抑制するため、ADR の温度安定度を向上させることが明らかとなった。
- ・航空機実験における振動問題を解析し、除振対策を施した。その結果、大幅な改善が見られた。

Fig. 19 Concept of five-stage ADR with a thermal anchor at 1 K.

- ・史上初めて、GM 冷凍機の微小重力下での作動特性試験を実施した。その結果、航空機実験による短時間の微小重力環境では大きな問題を生じないことがわかった。
- ・連続型 ADR 特有の課題として、最低温度発生部を除く各 Stage の温度が常に周期的に変化するため、定点温度で熱侵入を吸収する、いわゆるサーマルアンカーが 4 K から 100 mK の間に存在しないことがあげられる。希釈冷凍機の場合、1 K ポットを利用して配線からの熱侵入を抑制することは一般的である。これに対応するため、**Fig. 19** のように、中間温度に連続型 Stage を設置する方法が考えられており、原理的な検証は終了している。ただし、この方法は段数の増加を意味し、例えば 4 段型の場合には、5 段まで拡張する必要がある。
- ・現在、我々は航空機実験用連続型 ADR をベースにリファインモデルを開発中である。マグネットのパワーリードに高温超伝導体を採用し熱侵入量の大幅な低減をはかるとともに、温度安定性の向上を目指している⁷⁾。
- ・連続型 ADR には上記のような課題があるものの、効率や小型・軽量化において大きなメリットがあることは明らかであり、今後の普及が期待される。

本研究の一部は、日本宇宙フォーラムの宇宙利用に関する公募地上研究、および科研費「宇宙創成の物理」によって行われた。また、ダイヤモンドエアサービス、首都大学東京・石崎研究室、金沢大学・藤本研究室および松本研究室、東工大・奥田研究室、JAXA・満田研究室および篠崎氏に甚大なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) P.J. Shirron, E.R. Canavan, M.J. DiPirro, J.G. Tuttle and C.J. Yeager: "A multi-stage continuous-duty adiabatic demagnetization refrigerator," *Adv. Cryo. Eng.* **45B** (2000) 1629-1638
- 2) T. Numazawa, K. Kamiya, P. Shirron, M. Deipiro and K. Mitsuda: "Development of continuous ADR system for weak gravity missions," *Proceedings of the 25th ISTS* (2006) 887-891

- 3) T. Numazawa, K. Kamiya, P. Shirron and K. Mitsuda: "Development of a continuous ADR system for weak gravity missions," *J. Phys.: Conf. Ser.* **150** (2009) 012032
- 4) T. Numazawa, K. Kamiya, P. Shirron, M. DiPirro and K. Matsumoto: "Magnetocaloric effect of polycrystal GdLiF₄ for adiabatic magnetic refrigeration," *AIP Conference Proceedings* (2006) 1579-1580
- 5) http://www.das.co.jp/new_html/service/01.html
- 6) 赤松弘規、星野晶夫、石崎欣尚、児嶋祐介、藤本龍一、満田和久、篠崎慶亮、神谷宏治、沼澤健則、高橋 健:「断熱消磁冷凍機による TES 型 X 線マイクロカロリメータの動作実験」、日本物理学会 2008 年春季年会 (2008)
- 7) K. Sonoda, S. Ueda, H. Nakagome, T. Tomaru and T. Numazawa: "Thermal design and the characteristics of the heat switch of continuous adiabatic demagnetization refrigerators (CADR) system for sensor cooling," *Cryogenic Engineering Conference* (2013)

沼 澤 健 則

1956 年 4 月生。1985 年東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程（エネルギー科学専攻）修了。科学技術庁金属材料技術研究所研究官を経て、現在、(独)物質・材料研究機構環境・エネルギー材料部門主席研究員。主に磁性エネルギー変換材料および極低温冷却技術開発に従事。低温工学・超電導学会会員。工学博士。

神 谷 宏 治 1969 年 1 月生。1999 年筑波大学大学院工学研究科博士課程（構造エネルギー工学専攻）修了。(独)物質・材料研究機構特別研究員を経て、現在、(独)日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所副主幹研究員。核融合技術に関する研究に従事。低温工学・超電導学会会員。工学博士。

李 晶 2013 年千葉大学大学院工学研究科博士課程（建築・都市科学専攻）修了。現在、三菱重工業(株)勤務。エネルギー関連技術に関する研究に従事。低温工学・超電導学会会員。工学博士。

中 込 秀 樹 1951 年 2 月生。1979 年東京大学工学系研究科博士課程（機械工学専攻）修了。(株)東芝主任研究員を経て、2004 年千葉大学工学部都市環境システム学科教授。エネルギー工学、環境工学に関する研究に従事。日本機械学会、低温工学・超電導学会会員。工学博士。

Peter SHIRRON Born in 1962.11. 1989, PhD in low temperature physics from the University of Illinois at Urbana-Champaign. 1989-present, senior aerospace engineer of NASA/Goddard Space Flight Center. Responsible for leading research efforts in cryogenic component and system development. A member of cryogenic society of America.