小型 2K GM 冷凍機の開発

包 乾^{*1,†}, 許 名堯^{*1}, 土屋 彰広^{*1}, 李 瑞^{*2}

Development of Compact 2K GM Cryocoolers

Qian BAO^{*1,†}, Mingyao XU^{*1}, Akihiro TSUCHIYA^{*1} and Rui LI^{*2}

Synopsis: Conventional 4K GM (Gifford-McMahon) cryocoolers, while providing highly reliable cooling solutions for large-scale superconducting applications such as magnetic resonance imaging (MRI) and superconducting magnets, encounter several difficulties including physical size and temperature reached when being fitted into a superconducting electronic device system. To create a suitable cooling solution for such devices, we developed a new, compact 2K GM cryocooler. The heat exchanger and regenerator were optimized using a numerical simulation method developed for 4K GM cryocoolers. Although development is still in progress, we successfully reduced the total length of the expander cylinder to about 240 mm. A series of performance tests of the prototype unit have shown that, under no-load conditions, the lowest temperature at the second stage reached about 2.1 K and temperature oscillation was less than ± 21 mK. With a 1 W / 20 mW heat load, the temperature was 44.4 K at the first stage and 2.23 K at the second stage, which we believe shows sufficient cooling capacity for small-scale superconducting electronic device cooling. As future work, we will focus on a compact design for not only the expander cylinder, but also the compressor and drive system, and finally provide a complete compact cooling system solution.

Keywords: simulation, regenerator, Gifford-McMahon cryocooler, cryocooler

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

1. はじめに

GM (Gifford-McMahon) 冷凍機は連続的に寒冷を供給する装置として、シンプルな構造で信頼性が高く、MRI (Magnetic Resonance Imaging) 用超伝導電磁石の冷却を始めとし、その他の超伝導電磁石の冷却など様々な分野で利用されている。1980 年代から GM 冷凍機の性能向上を目指した研究は継続的に行われており、Kuriyama らは GM 冷凍機の運転パラメータの最適化を¹⁾、Li らはバルブタイミングの最適化を行い²⁾、4K GM 冷凍機の大幅な性能向上を達成している。最近でも Xu と Morie の研究により、4K GM 冷凍機の効率を従来の約 30% 向上させた実績がある³⁾。

一方、近年では、超伝導電子デバイスの急速な発展に伴

い、冷却ソリューションへの要求仕様も非常に多岐に亘るようになってきている。超伝導デバイスの一例として、情報通信研究機構(NICT)で行われている単一光子検出システム SSPD の開発事例が挙げられる⁴⁾。この装置に使用される超伝導デバイスは、使用環境温度がより低温になるほど測定ノイズも軽減されるため、従来の 4K GM 冷凍機よりも低い温度環境を提供できる冷凍機が求められる。またシステム全体を構築する際、コンパクトに纏めることが重視されるため、必然的に冷凍機にもより小型であることが要求されることになる。

現在、製品として市場に出ている小型の 4K GM 冷凍機に、住友重機械工業製の RDK-101D があり、この冷凍機の仕様を Table 1 に示す。膨張機シリンダーの全長は 442 mm で、同社の汎用的な 1W タイプの 4K GM 冷凍機 RDK-408D と比べると 6 割程度の体格である。4 K にて 0.1 W の冷凍能力を供給できるが、最低到達温度が 3 K 以上と高く、前述する超伝導電子デバイス用冷凍機としては適切ではないと考えられる。また冷凍機運転に伴う 2 段ステージの温度振動幅が ± 30 mK 以上あるため、超伝導電子デバイスに対してノイズ源となる可能性がある。このような背景を受け、著者らは 2012 年度から、2K 小型冷凍機の開発に着手した。要求される冷凍性能及び小型化に関して、信頼

Received October 10, 2014

^{*1} (株)住友重機械工業株式会社 技術研究所
〒188-8585 東京都西東京市谷戸町 2-1-1
Sumitomo Heavy Industries, Ltd., Technology Research Center,
2-1-1 Yato-cho, Nishitokyo, Tokyo, 188-8585, Japan

^{*2} (株)住友重機械工業株式会社 精密機器事業部
〒188-8585 東京都西東京市谷戸町 2-1-1
Sumitomo Heavy Industries, Ltd., Precision Equipment Group,
2-1-1 Yato-cho, Nishitokyo, Tokyo, 188-8585, Japan

[†] E-mail: Qin_Bao@shi.co.jp
DOI: 10.2221/jcsj.50.125

Table 1 Specifications of the RDK-101D 4K GM cryocooler and corresponding prototype target in this research

Item	RDK-101D	Prototype target
First stage cooling capacity at 60 K	3 W	1 W
Second stage cooling capacity at 4 K	0.1 W	20 mW
No-load second stage temperature	Over 3 K	2.2 K
Total height of expander	442 mm	Under 300 mm
Temperature oscillation displacement	Over ± 30 mK	± 20 mK

性を確保したまま満足させるため、実績のある RDK-101D を開発機の原型とし、新型試作機的设计開発、及び一連の実験検証を行った。

本開発の開発目標を現行 RDK-101D の性能仕様と合わせて Table 1 に記載する。主な技術課題として、膨張機シリンダーの長さを約 7 割以下に短縮すること、及び最低到達温度を 2.2 K 以下にすることが挙げられる⁵⁻⁸⁾。本稿では、試作機開発で用いた GM 冷凍機性能向上の技術、及びそれを適用した最新の試作機性能試験結果について報告する。

2. シミュレーションと設計指針

Xu らは流体の基本方程式に基づき、作業ガスのヘリウム、冷凍機に使用されている構造材料、及び蓄冷材の物性の温度依存性を考慮し、さらに冷凍機二段式の構造もモデルに取り入れた一次元シミュレーションコードを作成した。このシミュレーションコードは、1W 4K GM 冷凍機の性能試験結果を良く再現できていることから、妥当性も十分であると考えられる⁹⁾。

本開発は、まず現行 RDK-101D の各冷凍損失を把握することから始めた。その際、実験では直接測定できるパラメータが限られるので、上記シミュレーションコードを用いて解析を行っている。

RDK-101D の構造概要を Fig. 1 に示す。ディスプレイサの往復運動及びヘリウムガスの高低圧切り替えはスコッチヨーク・ロータリバルブ機構で行っている。計算に使用した条件は以下である。

1 段蓄冷器径は 44 mm で蓄冷材は青銅の #150 メッシュ、2 段蓄冷器径は 18 mm とし、蓄冷材は直径 0.44 mm の鉛玉と HoCu₂ 玉の構成としている。冷凍機運転周波数は 1 Hz とし、圧縮機の高圧はそれぞれ 2.28 MPa、0.89 MPa に設定される。1 段及び 2 段ステージの温度はそれぞれ 45 K、4.2 K で固定している。

計算により求められた PV 仕事、実在気体の非理想性を考慮した理論冷凍能力と各冷凍損失量を Table 2 に示す。

Fig. 1 Schematic drawing of a two-stage GM cryocooler.

Table 2 Simulation results of cooling capacity and losses of the RDK-101D

Item	First stage at 45 K (W)	Second stage at 4.2 K (W)
PV power	17.5	3.27
Cooling power after considering real gas effect	17.2	0.56
Regenerator loss	3.5	0.24
Shuttle loss	1.8	0.06
Pumping loss and thermal conduction loss through cylinder wall	3.2	0.20
Radiation loss	1.5	0.00
Net cooling capacity	7.1	0.06

PV 仕事（膨張仕事）は各ステージで 17.5 W と 3.27 W と計算されるが、実在気体の効果を考慮すると、1 サイクルで発生する寒冷は単純に PV 仕事と考えることはできず、以下の式で表すことができる：

$$Q_c = \alpha_T \cdot T \phi PdV \quad (1)$$

ここで α_T は気体の膨張係数、 T, P, V はそれぞれ膨張空間内の温度、圧力及び容積である。これより実際に得られる理論冷凍能力は 1 段で 17.2 W、2 段で 0.56 W に低減する。ラムダ点温度近傍におけるヘリウムの膨張係数の温度依存性を考慮した場合の冷凍能力に関しては、文献[10]にて詳細に検討されている。Table 2 から分かるように、各損失の中で蓄冷器損失が最も大きく、特に 2 段に関しては、理論冷凍能力の 40% 以上が蓄冷器損失で消費されていることが判明した。また室温からシリンダーを通して侵入する熱伝導損失も 2 段の冷凍能力に大きな影響を与えていることが明らかになった。

Fig. 2 Filling pattern inside the second-stage displacer after introducing new material.

上記シミュレーションにより算出された正味の冷凍能力の確からしさは、実験においても検証されており、多少の誤差は見られるものの、この結果をベースに設計を進めるに十分な精度が得られている⁹⁾。

3. 試作機的设计

3.1 開発目標を実現するための方策

冷凍機本体の大幅な小型化を実現するにあたり、1-2 段間連結部の短縮、削減可能な構造部材を排除することに加え、蓄冷器本体も短くする必要がある。しかし蓄冷器性能は冷凍能力に大きく影響しており、単純な短縮化設計では蓄冷器効率が低下し、それに伴い冷凍性能の大幅な低下が予想される。そこで本開発では、2 種類の新型蓄冷材を導入することにより、従来より短い長さにおいても高い蓄冷器効率を実現した。**Fig. 2** は新型蓄冷材を使用した蓄冷器構造の概略を示している。従来の蓄冷材ビスマスに代わり亜鉛蓄冷材を使用、また低温側に Gd_2O_2S (GOS) を追加し三層構造とした。

2 段蓄冷器の高温側に亜鉛球を導入することで、短縮化に伴う蓄冷器効率の低下を抑えた。亜鉛材を使用した理由は、10~30 K の温度領域における比熱特性にある。**Fig. 3** に亜鉛と従来の蓄冷材であるビスマスの比熱の温度依存性を示す。

実機において、2 段蓄冷器高温側の温度は 30 K 前後であり、この温度領域においては、亜鉛の比熱はビスマスよりも低くなる。このため、高温側のヘリウムガスは、ビスマスを充填した場合より温度が高くなり、これに伴い密度も低減する。その結果、高温側の蓄冷器内部の死容積に滞留するヘリウムガス量が低減され、膨張室での膨張仕事を向上させることができるためであると考えられる。詳細については文献[11]で紹介されている。

実際に上記効果を検証するため、RDK-101D シリンダーを使い性能比較試験を行った。2 段蓄冷器の高温側を従来の蓄冷材ビスマスで充填した場合と、亜鉛蓄冷材で充填した場合のそれぞれの到達温度を **Table 3** に示す。この試験では 2 段蓄冷器の低温側に使用している蓄冷材に関しても $HoCu_2$ の一部を新型蓄冷材 Gd_2O_2S (GOS) に入れ替えている。GOS は 5 K 以下の温度領域において比熱特性が $HoCu_2$ よりも優れていることは Numazawa らの論文で説明

Fig. 3 Heat capacity comparison of bismuth and zinc.

されている¹²⁾。 GOS 蓄冷材と $HoCu_2$ の比熱データを比較した結果を **Fig. 4** で示す。

更にもう一つの大きな冷凍損失となっている室温部からの熱伝導損失を低減するため、膨張機シリンダー構造を **Fig. 5** で示している段付き形状に変更した。熱伝導損失とは、室温部から膨張機シリンダーを介した熱伝導による熱侵入のことである。熱伝導による熱流束は良く知られるように下記のフーリエの式で表される：

Fig. 4 Heat capacity comparison of GOS and $HoCu_2$.

Fig. 5 The new cylinder wall structure.

$$\dot{Q} = -k \int \nabla T \cdot \vec{dA} \quad (2)$$

ここで k はシリンダー材料の熱伝導率、 A はシリンダー断面面積を表している。段付き構造は、シリンダー断面面積を減らすことで、この熱伝導損失を低減する効果がある¹³⁾。また、均一に薄肉化を行うよりも高い耐圧強度が確保されることも構造解析から分かっている。

Table 2 に示した通り、4.2 K において輻射熱損失は他の損失に比べ小さいが、より低温領域の 2 K においては性能に影響を及ぼす可能性があったため、試作シリンダーにおいては Fig. 6 に示すよう表面にめっき処理を施した。

上述した性能改善策をシミュレーションプログラムに反映させ、冷凍能力を計算した結果を Table 4 に示す。Table 2 に示した従来機の結果と比較すると、1 段冷凍能力は短縮化に伴う性能低下が見られるが、2 段冷凍能力は蓄冷器損失と伝導損失が低減されたため、大幅に性能が改善していることが分かる。

3.2 シリンダー長さの短縮化

従来品の GM 冷凍機においては、小型化への要求がそれ程高くなかったため、構造的に短縮化の余地は幾つか残されていると考えられる。今回着目した部品の一つに、1 段と 2 段ディスプレイサの連結機構があり、この部品の改良により約 21 mm の短縮化を達成した。蓄冷器を含んだディスプレイサに関しては前述した方策により、1, 2 段合わせて約 78 mm 短縮している。

Table 3 No-load temperature with respect to the type of regenerator material at the warm end of the second-stage regenerator

Regenerator material	First stage temperature (K)	Second stage temperature (K)
Bismuth	45.7	2.46
Zinc	42.2	2.41

Table 4 Simulation results of cooling capacity and losses of the prototype unit

Item	First stage at 45 K (W)	Second stage at 4.2 K (W)
PV power	13.8	2.59
Cooling power after considering real gas effect	13.5	0.37
Regenerator loss	3.8	0.04
Shuttle loss	1.3	0.04
Pumping loss and thermal conduction loss through cylinder wall	3.1	0.16
Radiation loss	1.3	0.00
Net cooling capacity	4.0	0.13

Fig. 6 The prototype cylinder compared to the RDK-101D cylinder.

ここまでで紹介した性能向上方策及び短縮化方策を反映させた試作機を製作した。試作に関しては、短縮化を段階的に行い、都度性能を確認することで、性能面、サイズ面から最適な設計を模索しながら進められた。最新の試作機の外観を Fig. 6 に示す。全長で従来より 85 mm の短縮化を実現しており、約 240 mm となっている。次章から示す性能試験結果もこの試作機にて得られた結果である。

4. 性能試験結果

4.1 性能試験方法

試作機の性能を確認するため、以下の装置及び試験条件にて一連の試験を行った。冷凍機システムは試作機シリンダーと従来の空冷圧縮機 CNA-11B の組み合わせで構成されている。CNA-11B は 100 V / 50 Hz 及び 100 V / 60 Hz の商用電源両方にて運転可能であるが、本稿で報告する試験結果はすべて 100 V / 50 Hz にて行った結果である。この条件において、圧縮機の消費電力は 1.1 kW 程度である。

Fig. 7 に実験の概略を示す。圧縮機と膨張機は 1 m のフレキシブル管で接続されている。膨張機のモータハウジング部分は大気中に置かれるが、低温になるシリンダー部分は真空気密環境に設置されている。なお、冷凍機 2 段部分は室温からの輻射の影響が大きいと考えられるので、1 段

Fig. 7 Schematic drawing of the experimental system.

ステージと熱的に連結された輻射シールドに覆われる構造としてこれを防いでいる。

ヘリウムガスの充填量は、20℃においてゲージ圧 1.95 MPa を基準とし、試験時の室温に応じて、充填ガス量が毎試験同じになるよう充填圧を調整している。

温度計測は 1 段と 2 段シリンダーの先端ステージに温度センサーを取り付けて行う。詳細配置を Fig. 8 に示す。1 段温度計測には PtCo センサーを用い、2 段温度計測には CERNOX センサー (CX-1050-SD Lake-Shore 社) を用いた。CERNOX センサーの温度応答性は 1.5 ms @ 4.2 K と、冷凍機の運転周波数 1 Hz と比較して十分速く、運転一周中に発生するステージの温度振動を正確に検出することが可能である。また CERNOX センサーのセンサー電流による自己発熱は 10^{-5} W 程度と小さく、2 段性能には殆ど影響はないと考えられる。

熱負荷用のヒータはマンガニン線を巻き回したものを使用し、1 段は輻射シールドの外周に巻かれ、2 段は直接ステージに巻かれている。これらのセットアップにて後述する冷凍能力のロードマップも作製している。

4.2 試験結果と冷凍性能ロードマップ

性能試験は以下の手順にて行われる：

- (1) 室温状態から冷凍機を起動する；
- (2) 1 段と 2 段温度が安定するのを確認する；
- (3) 線材型ヒータにより所定の熱負荷を与える；
- (4) ステップ 2 と 3 を繰り返し、温度と熱負荷量の値を記録する。

Fig. 8 Temperature sensor and heater arrangement.

Fig. 9 A typical cool-down curve of the current prototype unit.

Fig. 9 は運転開始から定常冷却状態に達するまでの各ステージ温度の測定結果を示しており、1 段温度と 2 段温度は運転開始後 3.5 時間程度で最低温度に到達する。本試験では 1 段ステージに 0 W, 1 W, 2 W, 4 W の熱負荷を、2 段ステージに 0 W, 20 mW, 40 mW, 100 mW の熱負荷の合計 16通りの熱負荷を与え各温度を測定した。Fig. 10 に上記試験にて作成された冷凍性能ロードマップを示す。無負荷時の到達温度は 39.5 K / 2.10 K (1 段温度/2 段温度) であり、2 段において従来の RDK-101D では到達できなかった 3 K 以下の冷却温度を実現できることが確認された。また 1 W / 20 mW (1 段負荷/2 段負荷) の負荷条件においても、温度 44.4 K / 2.23 K を実現し、Table 1 に示す本開発の目標値を達成できていることが確認された。また 4 W / 40 mW の熱負荷条件においても 2 段ステージは 3 K 以下の温度を保持できている。これらの性能試験結果から、今回開発した試作機は特に最低到達温度の観点から従来の RDK-101D を大きく上回る性能を有し、超伝導電子デバイス等のアプリケーション冷却用途において冷凍性能とコンパクト性の両立を実現できる冷凍機であることが確認された。

なお、測定時における圧縮機の消費電力は、無負荷時の場合で 1.09 kW、4 W / 0.1 W の場合で約 1.13 kW となっている。

4.3 2 段ステージの温度振動

冷凍機運転 1 サイクル中に行われる吸排気行程により、2 段ステージの温度は脈動すると考えられる。この温度変動の大きさによっては、冷却対象の超伝導電子デバイスの測定精度に悪影響を及ぼす可能性があるため、本開発では第一章で述べたように 2 段ステージ温度振動を ± 20 mK 以内に抑えることを目指している。なお、ここで言う温度振動とは、各ステージ温度安定後の長期的な温度推移ではなく、冷凍機運転 1 サイクル中の吸排気切り替え行程により引き起こされる温度変動のことを指す。

Fig. 11 に 2 段ステージの温度振動を測定した結果を示す。Fig. 11a は無負荷の状態での温度振動を、Fig. 11b は

Fig. 10 Load-map graph for the current prototype unit.

1 W / 20 mW の熱負荷を与えている状態での温度振動の測定結果を示している。無負荷状態での温度振動は約 ± 21 mKとなっており、ほぼ ± 20 mK の目標を達成できている。また、Fig. 11b の結果と比較すると熱負荷の増加と共に温度振動も増大していることが分かる。

この振る舞いはヘリウムガスの物性に起因していると考えられる。ヘリウムガスは、ラムダ点近傍温度において気体の非理想性が非常に強くなり、式(1)の膨張係数 α_T が温度降下と共にゼロに近づき、ラムダ点に対応する温度で終にはゼロになる。本冷凍機の運転低圧力条件下でのラムダ

点对応温度は約 2.05 K であり、上述した理由からこの温度以下になることはできない。Fig. 11a を見ると、温度振動幅の下限側は約 2.05 K となっており、これより低い温度には到達できないため、結果として熱負荷を与えた場合よりも温度振動幅が小さくなっていると考えられる。この振る舞いを考察する一例として Fig. 12 に 0.9 MPa と 2.1 MPa におけるヘリウムのエントロピー・温度曲線の計算結果を示している。高低圧二つの曲線が交差する点では、減圧による寒冷が発生しない。ラムダ点近傍温度における気体の非理想性が冷凍性能へ及ぼす影響に関しては Xu らの研究で詳しく紹介されている¹⁰⁾。

本試作機では、温度振動が十分に小さいことが確認されたが、更に温度振動を抑制する手段として

- (1) 冷凍能力を向上することで、熱負荷を受けてもラムダ点近傍温度を保持するようにする；
- (2) 2 段ステージの熱抵抗と熱容量を程良く増やすことで、膨張室からの温度振動の伝達を抑える方法；

が有効であると考えられる。

5. まとめ

超伝導電子デバイス冷却用途に適切な小型極低温冷却ソリューションを提供するため、4K GM 冷凍機 RDK-101D をベースとし、冷凍機サイズの短縮化、より低い温度環境の提供の 2 点を目標とし、新小型 2K GM 冷凍機の開発を行った。

本開発は、新型蓄冷材の適用、新型段付き構造シリンダーの採用、シリンダー表面めっき処理などの技術を用い、冷凍性能を犠牲にすることなく従来 RDK-101 シリンダーより 85 mm の短縮に成功し、全長 240 mm とすることができた。性能試験の結果、無負荷状態で 39.5 K / 2.10 K、1 W / 20 mW の熱負荷においても 44.4 K / 2.23 K を実現し、超伝導電子デバイス装置使用にあたって十分小さなノイズ環境を提供できることが確認された。また、2 段ステージの温度振動も ± 21 mK 以内に抑制され、アプリケーション使用に問題のないレベルを達成できている。

今後は冷凍機駆動部及びクライオスタットの小型化にも注力し、最終的にはクライオスタットを含めたコンパクト冷凍システムとして纏め、超伝導電子デバイス冷却用冷凍機として実機搭載を目指していく予定である。

本研究成果は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究 (光・量子情報通信用超伝導単一光子検出システムの小型化技術に関する研究開発) により得られたものである。

Fig. 11 Temperature oscillation on the surface during the second stage under (a) no-load conditions and (b) 1 W/20 mW conditions.

Fig. 12 Entropy-Temperature relation curves of helium at 0.9 MPa and 2.1 MPa.

参 考 文 献

- 1) T. Kuriyama, Y. Ohtani, M. Takahashi, et al: "Optimization of operational parameters for a 4K-GM refrigerator," Adv. Cryog. Eng. **41** (1996) 1615-1622
- 2) R. Li, A. Onishi, T. Satoh and Y. Kanazawa: "Influence of valve open timing and interval on performance of 4K Gifford-McMahon cycle cryocooler," Adv. Cryog. Eng. **41** (1996) 1601-1607
- 3) M. Xu and T. Morie: "Development of high-efficiency 4K GM cryocoolers," Proceeding of the 24th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Material Conference (2012) 403-406
- 4) S. Miki: "Single photon detecting technology based on superconducting wire," KARC FRONT **24** (2013) 11-13 (in Japanese)
三木茂人:「超伝導ナノワイヤによる究極の光子検出技術を確立する」, KARC FRONT **24** (2013) 11-13
- 5) M. Xu, Q. Bao, A. Tsuchiya and R. Li: "Development of compact 2K GM cryocoolers," Abstracts of CSSJ conference **89** (2014) 43
許名堯, 包乾, 土屋彰広, 李瑞:「小型 2K GM 冷凍機の研究開発」, 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2014) 43
- 6) Q. Bao, M. Xu, A. Tsuchiya and R. Li: "Experimental investigation of compact 2K GM cryocoolers," Abstracts of CSSJ conference **89** (2014) 44
包 乾, 許 名堯, 土屋彰広, 李 瑞:「小型 2K GM 冷凍機の実験性能検証」, 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2014) 44
- 7) M. Xu, Q. Bao, A. Tsuchiya and R. Li: "Development of compact 2K GM cryocoolers," 25th International cryogenic engineering conference and international cryogenic materials conference (2014) paper #101
- 8) Q. Bao, M. Xu, A. Tsuchiya and R. Li: "Experimental investigation of compact 2K GM cryocoolers," 25th International cryogenic engineering conference and international cryogenic materials conference (2014) paper #109
- 9) M. Xu and T. Morie: "Numerical simulation of 4K GM cryocooler," Cryocoolers **17** (2012) 253-259
- 10) M. Xu, A. De Waele and Y. Ju: "A pulse tube refrigerator below 2K" Cryogenics **39** (1999) 865-869
- 11) M. Xu and T. Morie: "Numerical simulation of the second stage regenerator in a 4K GM cryocooler," Advances in Cryogenic Engineering, AIP Conference Proceeding 1573 (2014) 1143-1148
- 12) T. Numazawa, et al.: "A new ceramic magnetic regenerator material for 4K cryocoolers," Cryocooler **12** (2003) 473-481
- 13) M. Xu, K. Nakano, M. Saito, H. Takayama, et al.: "Study of low vibration 4 K pulse tube cryocoolers," Adv. Cryog. Eng. **57** (2012) 190-197

包 乾

1987 年 11 月生。2010 年中国上海交通大学機械工学部エネルギーと動力工学学科卒業。2012 年東北大学工学研究科博士前期課程（機械システムデザイン工学専攻）修了。2013 年より住友重機械工業(株)技術研究所勤務。小型低温冷凍機研究開発に従事。低温工学・超電導学会会員。

許 名 堯

1968 年 11 月生。1991 年中国西安交通大学エネルギーと動力工学学部冷凍と低温工学学科卒業。1997 年同大学院熱物理学工学研究科博士後期課程（低温工学専攻）修了。1998 年オランダ Eindhoven 大学極低温グループ勤務。2000 年より住友重機械工業(株)田無製造所勤務。主に小型極低温冷凍機の研究開発に従事。低温工学・超電導学会, 冷凍空調学会会員。工学博士。

土 屋 彰 広 2009 年住友重機械工業入社。極低温冷凍機, 超電導応用機器研究開発に従事。低温工学・超電導学会会員。

李 瑞 1960 年 7 月 18 日生。1982 年中国 Zhejiang University 熱物理学工学部低温工学科卒業。1990 年東京工業大学大学院理工学研究科応用物理学専攻博士後期課程修了。同年より住友重機械工業株式会社平塚研究所勤務。現在, 同社精密機器事業部所属。主に極低温小型冷凍機及びその応用の研究開発に従事。低温工学・超電導学会, 日本真空協会会員。理学博士。