

4KGM 冷凍機ロータリーバルブの最適化設計 The Optimum Design of a Rotary Valve in a 4K GM Cryocooler

森江 孝明, 許 名堯(住友重機械工業)

MORIE Takaaki, XU Mingyao(SHI)

E-mail: Tkk_Morie@shi.co.jp

1. はじめに

4KGM 冷凍機は、超電導機器応用に際して不可欠である極低温環境を作り出す目的で様々な分野において用いられている。現在では、特に高磁界環境を必要とするシステム(NMR、加速器装置等)における超電導電磁石冷却用冷凍機としての用途が主である。GM 冷凍機の応用面における大きな利点の一つとして、運転を開始した後は、長期に渡り安定した冷却環境を提供できる点がある。

最近、住友重機械工業では、従来の 4KGM 冷凍機の冷凍効率を大幅に向上させた高効率 4KGM 冷凍機の開発を行い、従来比 25%以上の向上に成功している[1, 2]。

今回、上記効率面での改良と並行し、長期運転時における性能安定性の観点から、キーコンポーネントであるロータリーバルブを中心とした駆動系の寿命、信頼性に関しても同時に改良を行ったのでそれについて報告する。

2. 運転に際してのロータリーバルブ摺動トルクの検討

現在、4KGM 冷凍機に使用しているロータリーバルブは、ガスの高低差圧を利用したガス押し付けシール方式を採用している。運転差圧とバルブの受圧面積から大よその平均シール面圧は決まるが、今回、冷凍機内各所の圧力を測定した実測データに基づき、より正確に一周期中でのシール面圧を評価することを行った。Fig.1 にバルブの詳細な流路形状も考慮した際の冷凍機運転一周期中におけるバルブシール面圧、及びバルブ摺動トルクの計算結果を示す。

3. 冷凍性能とのトレードオフ設計

今回、圧縮機の小型化に伴い、冷凍性能の観点からはバルブ流路面積の低減を許容し、バルブサイズ縮小によるシールに必要な押し付け力自体の低減を試みた。設計に際し、冷凍性能に大きな影響を及ぼすシール面圧に関しては、上記シミュレーションにより適正に保つように調整し、合わせて流路形状自体を改善することにより、押し付け力を低減させつつ同等の冷凍性能を達成している。Table 1.に従来のバルブと改良型バルブに関して、冷凍性能の実験結果、及び見込まれる押し付け力の値の比較データを示す。冷凍性能をほぼ維持したまま、押し付け力を大幅に低減させる事が可能であることが分かる。

押し付け力を低減させることは、バルブ摺動に際して、磨耗粉の発生量を低減させると共に、回転軸受けに使用しているベアリングへの負荷自体が低減される。これにより、長期連続使用に伴う破損の危険性、及び封入グリス漏れによる内部汚染量の低減、負荷軽減によるベアリングの小型化等、利点は大きい。

4. 設計した低負荷バルブ

Fig.2 に今回試作した負荷を低減させたロータリーバルブの概略図を示す。サイズを低減させた事が大きな改良点の一つである。当日は、上記改良型ロータリーバルブの設計報告と合わせ、駆動部全体として、コールドヘッド駆動用電動機にかかる負荷を低減させた実験結果を合わせて示し、従来より更に長期運転時の信頼性を向上させた 4KGM 冷凍機の開発内容に関して報告する予定である。

参考文献

1. M.Y. Xu and T. Morie, Cryocoolers 17 (2012) 253-259
2. T. Morie and M.Y. Xu, Cryocoolers 17 (2012) 247-251

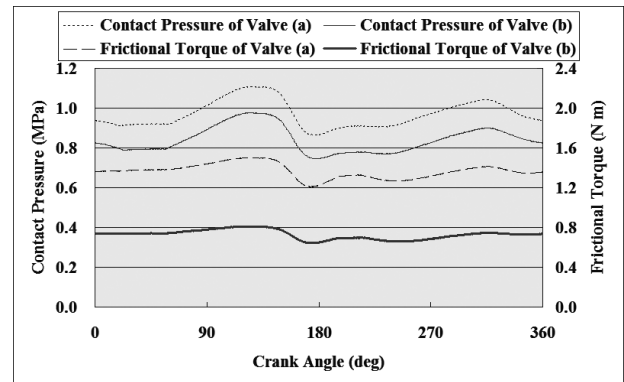


Fig.1 Comparison of contact pressure and frictional torque on a conventional valve (a) and a novel valve (b).

Table 1. Comparison of the expectation of exerted force on the valves and 2nd temperature with 1.0 W heat load.

	Conventional Valve	Novel Valve
Exerted Force (kN)	0.62	0.35
2 nd Temperature (K)	3.98	4.00

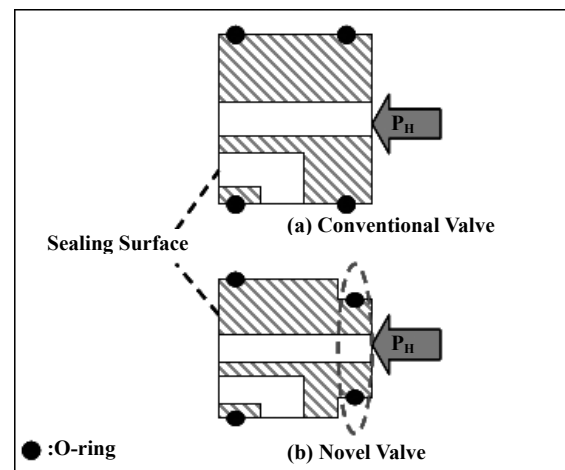


Fig.2 Schematics of a conventional valve (a) and a novel valve (b).

理想 GM 冷凍機と現実 GM 冷凍機 Ideal and real GM refrigerator

朱 紹偉(同济大学)

ZHU Shaowei(Tongji University)

E-mail: swzhu@tongji.edu.cn

1. INTRODUCTION

It is a general understanding that GM refrigerators were low efficiency. After the 13% efficiency was achieved by an active buffer pulse tube refrigerator, 14% efficiency of the GM refrigerator also was reached. In this paper, the ideal and real GM refrigerator are discussed based on isothermal model, which is useful for the efficiency up of GM refrigerators. The efficiency up of the GM refrigerator is very important for the energy saving of cryopumps, MRI, and other systems which use GM refrigerators as cooling source.

2. PULSE TUBE AND GM REFRIGERATOR

The ideal active-buffer pulse tube refrigerator has no intrinsic valve loss. The efficiency is equal to that of no work recovery brayton cycle. This is the reason that the active buffer pulse tube refrigerator can reach high efficiency. There are two differences between the GM refrigerator and the active buffer pulse tube refrigerator. One displacer is solid and one is gas. One expansion work is recovered, one is not. So the theory efficiency of the GM refrigerator is higher than that of the active buffer pulse tube refrigerator, higher efficiency should be got by the GM refrigerators.

3. IDEAL GM REFRIGERATOR

Figure 1 shows the schematic of the GM refrigerator. The working process is as following. The low pressure valve is opened, the displacer moves to the left to push gas flow out at low pressure. The low pressure valve is closed, the displacer continues move to the left, the cold gas in the cold space is pushed to the room temperature space, the pressure increases to the high pressure. The high pressure valve is opened, the displacer moves to the right to pull the high pressure gas into the cold space. The high pressure valve is closed, the displacer continues move to the right, gas in the warm space is pulled to

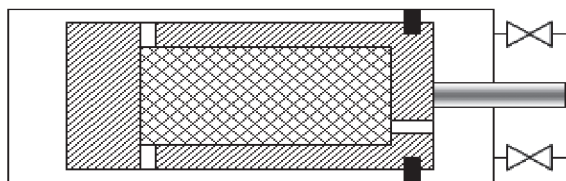


Figure 1 Schematic of GM refrigerator

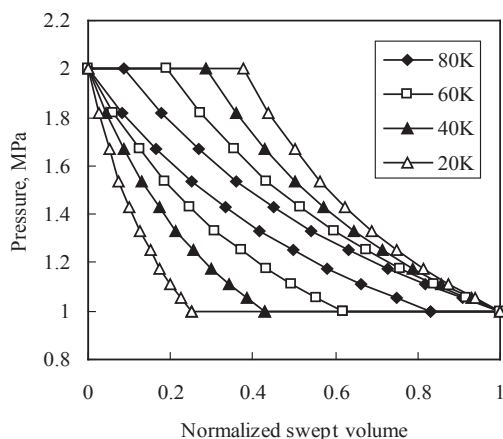


Figure 2 Ideal PV diagrams

the cold space, the pressure decrease to the low pressure. Figure 2 shows the ideal PV diagrams of the GM refrigerator at different refrigeration temperatures. The efficiency of the ideal GM refrigerator is equal to Carnot efficiency.

4. REAL GM REFRIGERATOR

Figure 1 shows that the PV area at 80K is too narrow. It is not realistic. In real design, the valves are closed a little late to increase the PV area. Figure 3 shows the ideal PV diagram and it changes with temperatures. In real GM refrigerator, the pressure is not increased to high pressure when the displacer reaches the left end. There is a pressure difference across the high pressure valve after the high pressure valve is opened. The pressure is not decreased to the low pressure when the displacer reaches the right end. There is a pressure difference across the low pressure valve after the low pressure valve is opened. Then the theory efficiency is lower than Carnot efficiency, but the PV area is largely increased compare to that of the ideal one. With temperature decreasing, the PV diagram is gradually changed to near ideal one, at 20K, becomes ideal one. So for a given GM refrigerator, there is a maximum efficiency, because the valve loss is increased with temperature increasing and other losses such as regenerator losses are decreased with temperature increasing.

The valve loss can use valve efficiency which is the ratio of the exergy flow after valves over the exergy flow before valves to judge. The valve efficiency also can be called cycle efficiency.

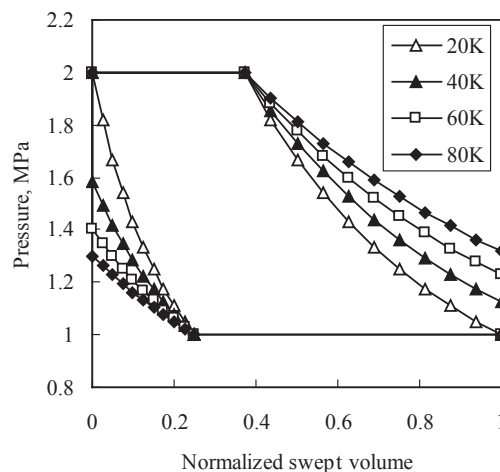


Figure 3 Real PV diagrams

5. CONCLUSION

The theory efficiency of the ideal GM refrigerator is same as Carnot efficiency. So the efficiency of GM refrigerator can be higher than that of the active-buffer pulse tube refrigerator. At lower refrigeration temperature, the PV diagram of the GM refrigerator is near ideal condition. At higher refrigeration temperature, it is a little far away from ideal condition.

6. REFERENCE

Matsubara, Y., FUTURE TREND OF PULSE TUBE CRYOCOOLER RESEARCH, ICEC 2004, Beijing China.

磁気冷凍システムの異なる再生器形状の比較

Comparison of different regenerator geometries design for magnetic refrigeration system

李 晶(NIMS&千葉大学); 沼澤 健則(NIMS); 松本(金沢大学); 中込秀樹(千葉大学)

LI Jing, NUMAZAWA Takenori (NIMS); MATSUMOTO Koichi (Kanazawa univ); NAKAGOME Hideki (Chiba univ)

E-mail: sita19@gmail.com (9 point)

1. Introduction

Magnetic refrigeration is considered to be 20 to 30% energy efficiency improvement comparing to the compressor refrigeration technology. It uses water as refrigerant which is friendly to the environment. Moreover, it does not use compressor which means it can be designed compact and quiet.

One of the important problems in magnetic refrigeration (MR) system is regenerator geometry for the efficient heat transfer between magnetic material and heat transfer fluid which is the major loss mechanism in cooling system. In order to improve the performance of MR system, it is important to point the advantages & disadvantages of different regenerator geometries. Packed sphere and flat plate regenerator are widely used in MR system. Meanwhile, micro-channels structure has a potential to be a proper regenerator design for the high rate of heat and mass transfer in both from experimental and theoretical studies in the literature. 1-dimension models of 3 kinds of regenerators have been constructed. Micro-channel structure regenerator is considered to be micro-channels with rectangular cross section. 3 kinds of regenerators have been compared from the point view of performance and entropy generation. Finally, the suggestions of Optimized regenerator geometries design for different magnetic refrigeration systems will be given.

2. Approach

- (1) 1 dimension model has been constructed which can simulate various regenerators with no geometry limitation in [1].
- (2) Packed sphere and flat plate regenerator have been compared from the point view of performance and entropy generation in [2].
- (3) Construct Micro-channel regenerator

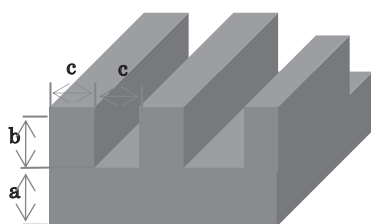


Fig.1 Micro-channel structure

According to [3], the laminar friction factor or flow resistance reaches a minimum value as

$$\frac{\min(b,c)}{\max(b,c)} = 0.5$$

In order to keep the ration between the fluid and material as 0.356, the dimensionless ration a/b is 1.

3. Result & discussion

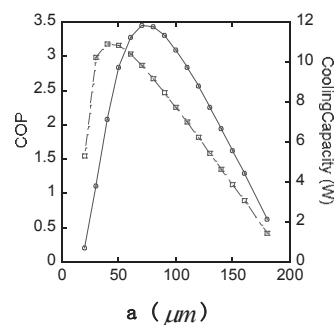


Fig.2 COP& Cooling Capacity VS a (um) in Micro -channel regenerator

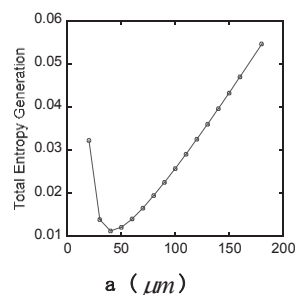


Fig.3 Total Entropy Generation VS a(um) in Micro -channel regenerator

Compared to the simulation results of flat plat and packed sphere regenerator, Micro-channel regenerator does not show any advantage. It shows similar cooling capacity and smaller COP. However, according to [3], heat transfer coefficient increased between 300% and 900% compared with the theoretical value for laminar flow based on a Nusselt number of 4.36, which implies that the experiment results might be much better than the simulation results.

References

1. J.Li et al. A Modeling study on the Geometry of Active Magnetic Regenerator, ADVANCES IN CRYOGENIC ENGINEERING: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference - CEC, Volume 57, pp. 327-334(2011)
2. Li.J et al. A Modeling study on the Geometry of AMR Regenerator: Comparison of Flat plate and Packed Sphere Regenerator, proceeding of ICEC24-ICMC 2012, pp. 223-226 (2012)
3. XF Peng, GP Peterson: Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996

PLTS-2000 実現のための核断熱消磁冷凍予冷用希釈冷凍機の製作

Construction of a Dilution Refrigerator Used as Precooling of Nuclear Demagnetization Refrigeration for Realization of the PLTS-2000

中川 久司 (産総研 計測標準研究部門) ; 畑 徹 (大阪市立大学大学院 理学研究科)

Nakagawa Hisashi (National Metrology Institute of Japan, AIST)

; Hata Tohru (Graduate School of Science, Osaka City University)

E-mail: hisashi-nakagawa@aist.go.jp

1. はじめに

PLTS-2000 は 2000 年に国際度量衡委員会で採択された国際温度目盛で、900 μK から 1 K の温度範囲を ^3He の融解圧と温度との関係、融解圧曲線上の4つの定点により定義している[1]。我々は、この温度目盛を実現し、極低温温度计の校正サービスを行うための装置を製作している。温度目盛の実現には ^3He を核断熱消磁冷凍により、1 mK 以下の十分低温まで冷却する必要がある。ここでは、我々が製作した核断熱消磁冷凍予冷用の希釈冷凍機とその冷却試験の結果について報告する。

2. クライオスタットと ^3He 融解圧温度计(MCT)

クライオスタットの操作系、真空系、測定系のすべてを実験室の広さ 6 m \times 6.5 m のスペースに設置するという制限と、扱いやすさの観点から核断熱消磁用クライオスタットとしては比較的コンパクトに設計した。全長 1.9 m のクライオスタット本体は除振構造の架台に設置している。主な真空配管はコンクリートブロック内に収め、T 字型溶接ベローズ配管を介してクライオスタットに接続するなどして、真空ポンプからの機械的振動伝達が低減されるようにしている。クライオスタット本体は剛性を持たせるため、薄肉パイプ材などで補強している。また実験空間へ侵入する電磁波ノイズを低減するためのシールド等については現在、製作中である。核断熱消磁冷凍を用いた超低温実験は、通常、数ヶ月間から1年間以上の長期間にわたり、その間希釈冷凍機が連続して安定に働く必要がある。そのため、 ^3He - ^4He 混合ガス循環系が不純物ガスなどで閉塞しにくいよう循環系主要真空ポンプに磁気軸受ターボ分子ポンプを使用し、ガス精製用トラップを多段設置している。希釈冷凍機本体の主な特徴は、混合ガス液化過程の効率化と長期運転を可能にする大容量1Kポット、実験インサート用70 ϕ アクセスポート、直径 133 ϕ \times 高さ 444 の実験空間などである。今回、希釈冷凍機の冷却試験に合わせ、PLTS-2000 の定義計器である MCT[2]を試作し、冷凍機に実装した。MCT の感温部は容量歪み圧力センサーとなっている。電極の一つは、固液共存状態の ^3He を収めた試料室壁を成すダイアフラムに固定され、それと対向する固定電極とで平行平板コンデンサーを形成し、試料室内の融解圧を静電容量の変化として‘その場’測定する。静電容量と圧力との関係式は室温部にある精密圧力計を基準にして得られる。また、より小さな不確かさでの測温が必要ならば、融解圧曲線上の定点を観測するなどして静水压補正などを考慮する必要がある。

3. 希釈冷凍機冷却試験の結果

希釈冷凍機の各低温部にカーボン抵抗体などの温度计、混合室フランジには MCT を取り付け、1K ポット、分溜室および混合室内には、2つの同心円筒管で製作した容量型液面計を設置した。同軸 12 本、ツイストペア 16 対の測定配線および ^3He 試料導入用キャピラリー 2 本が実験空間まで導入されている。混合ガス循環量は、分溜室に注入する熱量により制御し、その大きさは冷凍能力の測定データ、シングルショット運転およびマスフローメーターより見積もった。混合室の到達温度は MCT により測定した。Fig. 1 に 2010 年(□)と 2012 年

(○、●:前者は循環量の調節から約 2 時間、後者は約 12 時間後のデータ)の冷却試験時に得られた循環量と混合室壁での到達温度との関係を示す。到達最低温度は、循環量 130 $\mu\text{mole/s}$ の時、4.0 mK であった。但し、250 $\mu\text{mole/s}$ 以上では循環ガスに ^4He が混入し始める。2010 年時に比べ、2012 年時の方がより高い循環量において到達温度が低下した。これは、例えば混合室のインジウムシールされている蓋とフランジ部間の温度差を小さくするよう熱リンクを取るなどした結果、実験空間への熱流入量が低減したためと考えている。100 mK における典型的な冷凍能力の大きさは、330 $\mu\text{mole/s}$ の時、230 μW であった。ヘリウムバスへの液体ヘリウム移送間隔は 5.5 日であった。一方、当装置を設置している研究所において 2011 年の東日本大震災(つくば市、震度6弱)とその後の大きな余震を経験したにもかかわらず、装置に大きな損害はなく、冷凍機性能の劣化は見られなかった。これは除振システムがうまく働いた事、冷凍機の剛性が高いことが要因と考えている。以上から、この希釈冷凍機を用いて 4 mK までの実験および核断熱消磁冷凍の予冷が行えるようになった。

4. まとめ

我々は、PLTS-2000 の温度標準を実現するために必要な装置の一部である核断熱消磁冷凍予冷用希釈冷凍機を製作した。今後は核断熱消磁冷凍機などの製作を行い、PLTS-2000 を実現し、50 mK から 650 mK の温度範囲において MCT を用いて直接、極低温温度计に対する校正サービスを行う予定である。

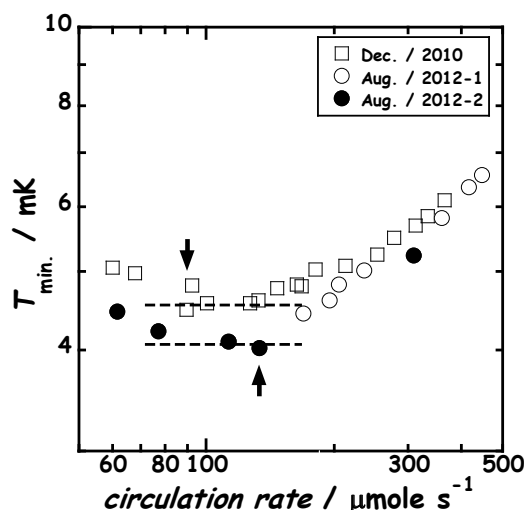


Fig. 1 The minimum temperature measured with the ^3He melting curve thermometer as a function of circulation rate

参考文献

1. R. Rusby, et al.: Journal of Low Temperature Physics, Vol. 126 (2002) pp.633-642
2. E. D. Adams: Review of Scientific Instruments, Vol.64 (1993) pp.691-611

ソープション冷凍機を用いた超伝導 TES ボロメータ型ミリ波検出システムの開発

Development of detector system with superconducting TES bolometer using closed-cycle ^3He sorption fridge

岡村 崇弘 (KEK), 金子 悠太 (東大), 鈴木 有春 (UCB), 都丸 隆行 (KEK)

OKAMURA Takahiro (KEK), KANEKO Yuta (Tokyo Univ.), SUZUKI Aritoki (UC-Berkeley), TOMARU Takayuki (KEK),

E-mail: takahiro.okamura@kek.jp

1. 緒言

現在 KEK-CMB(Cosmic-Microwave-Background) グループで行なっている POLARBEAR-II プロジェクトではミリ波帯域に感度をもつアンテナ結合された Al/Ti 超伝導 TES(Transition Edge Sensor) ボロメータを 7588 個用いることで、CMB の B モード偏光と呼ばれる偏光パターンの検出を目指している¹⁾。このプロジェクトで採用される Al/Ti ボロメータはソープション冷凍機を用いて 0.3K に冷却する必要があるため、現在我々は安定した 0.3K 環境構築のためのソープション冷凍機・ガスギャップヒートスイッチを組み合わせた冷却システムの基礎的研究ならびに CMB 観測用の光学フィルタやレンズ等の光学特性評価やノイズ研究を行うための小型のミリ波検出システムの構築を行っている。このミリ波検出システムは検出器として Al/Ti 超伝導 TES ボロメータ、プリアンプとして DC-SQUID を、冷却システムとしてはソープション冷凍機とアクティブガスギャップヒートスイッチ (AGGHS) を組み合わせたものである²⁾。今回は使用したソープション冷凍機を含むミリ波検出システムの冷却試験並びに動作試験結果に関して報告する。

2. ミリ波検出システムの構成

Fig.1 に開発したミリ波帯域における超伝導 TES ボロメータ型検出システムの構成を、Fig.2 に 1.4K シールド内側の冷却システムの構成を示す。冷凍機は Fig.2 に示すように ^3He ガスと ^4He ガス用の 2 つの活性炭ポットを有する所謂 Helium-7 型のソープション冷凍機であるが、 ^4He ポットが適切な動作をしないため、今回は ^3He ポットのみ動作させる Helium-3 型ソープションとして用いている。それ故ソープションが固定されるベースプレートは ^3He の液化温度よりも低くする必要があり、本システムは液体ヘリウム槽は真空引きすることにより約 1.4K にしており、使用しない ^4He ポットは 1.4K ベースプレートにアンカーされている。また DC-SQUID は 1.4K ベースプレートに設置した 2 重の磁気シールドの内側にマウントし 1.4K に保持し、一方でボロメータをマウントするフォーカルプレーンは 4N8 の無酸素銅の熱アンカーを介してソープションのコールドヘッドと連結されている。また DC-SQUID チップ内に SQUID を取り囲むようにマウントされているピックアップコイルと TES とは電気的に直列で接続させる必要があるが、ここでは SQUID チップからのボロメータへの熱侵入を抑えるために Nb-Ti ケーブルを用いて接続されており、DC-SQUID から室温側への信号取り出しはリン青銅ケーブルを用いている。

3. 冷却試験結果

構築したシステムの冷却試験を行った結果、フォーカルプレーン到達温度は 0.42K で保持時間は約 6 時間となった。到達温度に関しては標準的なソープション冷凍機の到達温度 (~ 0.3K) より高いが、ソープション単体での到達温度とほぼ同じ値となったことから、フォーカルプレーンの熱設計に問題は無いと言える。Fig.3 に赤外線カットフィルタを塞ぎミリ波を遮断した際に取得した $I-V$ カーブを示す。ここでは詳細説明は省略するが、ほぼ設計値通りの Al/Ti 型超伝導 TES ボロメータの $I-V$ 特性が再現できており、開発したミリ波検出システムにおいて、冷却系並びに読み出し系に問題は無いことを確認した。これ以外にソープション冷凍機

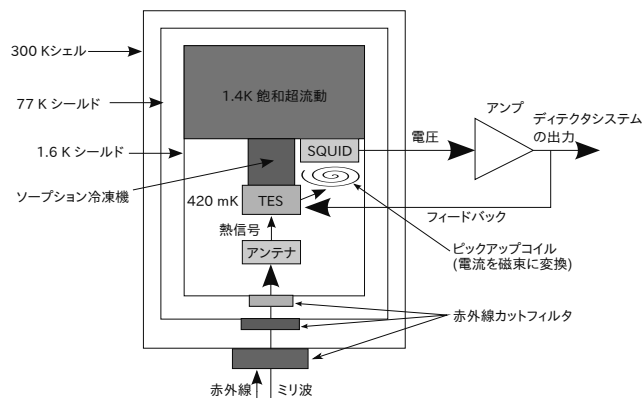


Fig. 1 Schematic configuration of superconducting TES detector system.

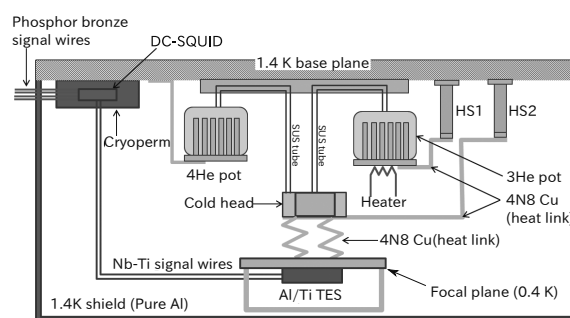


Fig. 2 Schematic configuration of cooling system including TES, SQUID, sorption and GGHSs inside the 1.4 K shield.

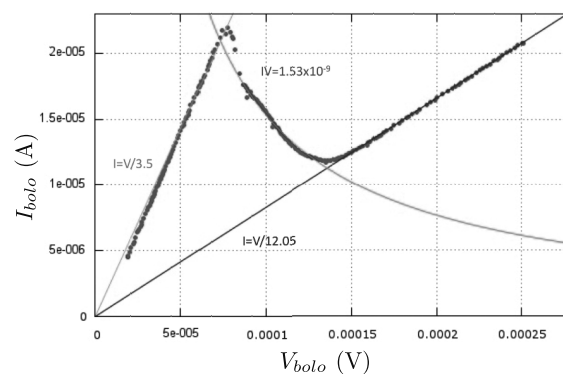


Fig. 3 Measured $I-V$ curve of Al/Ti TES bolometer under the dark condition.

の熱負荷測定、AGGHS の ON/OFF 特性、SQUID の動作試験等を行ったがこれらは講演時に報告する。

参考文献

1. 茅根裕司, "宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験 POLARBEAR による B-mode 測定の現状と今後" RESCUE 観測的宇宙論ワークショップ 2012.
2. Shih-Fu Lee, *et. al.* Applied Optics, Vol37, No.16, 3391-3397.