

低温センター伊都地区ヘリウム液化・冷凍機性能試験

河江, 達也
九州大学低温センター

佐藤, 誠樹
九州大学低温センター

松尾, 政昭
九州大学低温センター

船木, 和夫
九州大学低温センター

他

<https://doi.org/10.15017/14695>

出版情報 : 九州大学低温センターだより. 3, pp.15-21, 2009-03. 九州大学低温センター
バージョン :
権利関係 :

低温センター伊都地区ヘリウム液化・冷凍機性能試験

河江達也、佐藤誠樹、松尾政昭、船木和夫、木下慎¹、伏見知朗¹、Nusselein Uwe²
九州大学低温センター、小池酸素工業(株)¹、Linde Kryotechnik²

九州大学低温センター伊都地区センター（以下、伊都地区センター）新設に伴い、ヘリウム液化・冷凍機が設置された。この装置は(1)液体ヘリウムの液化運転 (2) 10–70K の温度域で冷凍機運転 (3) ヘリウム液化と冷凍機の同時運転、という 3 タイプの運転が可能という他に例のない特徴を持つ。今回各タイプの運転について性能試験を実施した。これよりヘリウム液化機および冷凍機としての単独運転では仕様書のデータを大きく超える性能を示すことがわかった。また液化・冷凍同時運転では、液化・冷却能力はともに装置の温度とともに大きく変化した。T=15K では液化能力が 40 ㍈/時間、冷却能力は約 800W であった。一方 T=60K では液化能力が約 170 ㍈/時間以上であり冷却能力は 450W であった。

1. はじめに

九州大学低温センターを介した液体ヘリウムの利用者は工学系、理学系、農学系という広い学問分野、またその研究内容も基礎から応用研究と多岐にわたっている。それを反映してヘリウム寒剤の用途も、大型超伝導磁石あるいは T=1K 以下の極低温冷凍機の冷却のように 1 度に百㍈以上の大量の液体ヘリウムを消費する実験から、NMR や超伝導量子干渉磁束計(SQUID 磁束計)などの超伝導を利用した高精度測定装置の冷却のように長期間安定な液体ヘリウム供給が必要になる場合など様々である。平成 17 年度より工学研究院、システム情報科学研究院、超伝導科学研究センター等の伊都地区への移転が始まった。それにともない伊都キャンパスでの寒剤供給体制の整備が重要課題となった。さらに伊都地区センターに設置されるヘリウム液化機は、上のような多様な寒剤利用状況を十分に支援できるものでなければならなかった。幸い、多くの皆様に多大なご支援とご協力を賜り、平成 18 年度の概算要求で伊都地区センターに最新鋭の液体ヘリウム・冷凍機の導入が実現し、現在順調に稼働をはじめ新たな結果も得られるようになってきた[1-9]。そこで低温センターだよりの場を借りて、伊都地区センターに導入されたヘリウム液化・冷凍機の特徴と能力を紹介する。

このヘリウム液化・冷凍機の最大の特徴は従来の液体ヘリウムの製造に加えて、 $10\text{K} \leq T \leq 70\text{K}$ の温度域における冷凍機能も備えている点である。これにより MgB_2 や高温超伝導体などでできた超伝導磁石などの性能試験なども可能になった。さらにこの装置は、液体ヘリウムの製造に加えて冷凍運転も同時に行えるという非常にユニークな特徴を持っている。今回、隣接の超伝導科学研究センターに設置された疑似冷凍負荷と長尺トランスファーチューブを介して接続運転し、液化・冷凍能力の評価試験を行い、その結果を昨年ソウルで行われた第 22 回国際低温工学会議(ICEC22)で発表した。本稿はその発表内容 (i) 冷凍運転時の冷却能力 (ii) 液化・冷凍同時運転時の液化・冷却能力、が中心になっている[10]。

2. ヘリウム液化・冷凍機システム

図1に液化機本体の写真、図2に本液化・冷凍機の概略図を示している。主要設備となるヘリウム液化・冷凍機はリンデ社 LR280、液化冷凍機用圧縮機はKAESER社 ESD411であり、これらは低温センターに設置されている。この装置は195ℓ/時間あたりの液体ヘリウムが供給できる仕様となっている。これらに加えてヘリウムガスの回収設備、10,000ℓの液体窒素タンクなどが低温センターの主要設備と

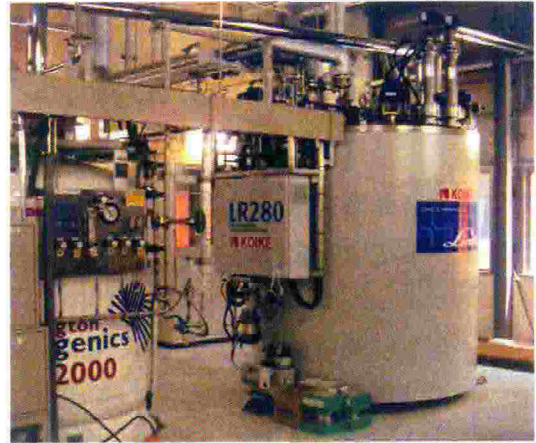


図1：Linde社製ヘリウム液化・冷凍機LR280（右）と液化ヘリウム容器（左）

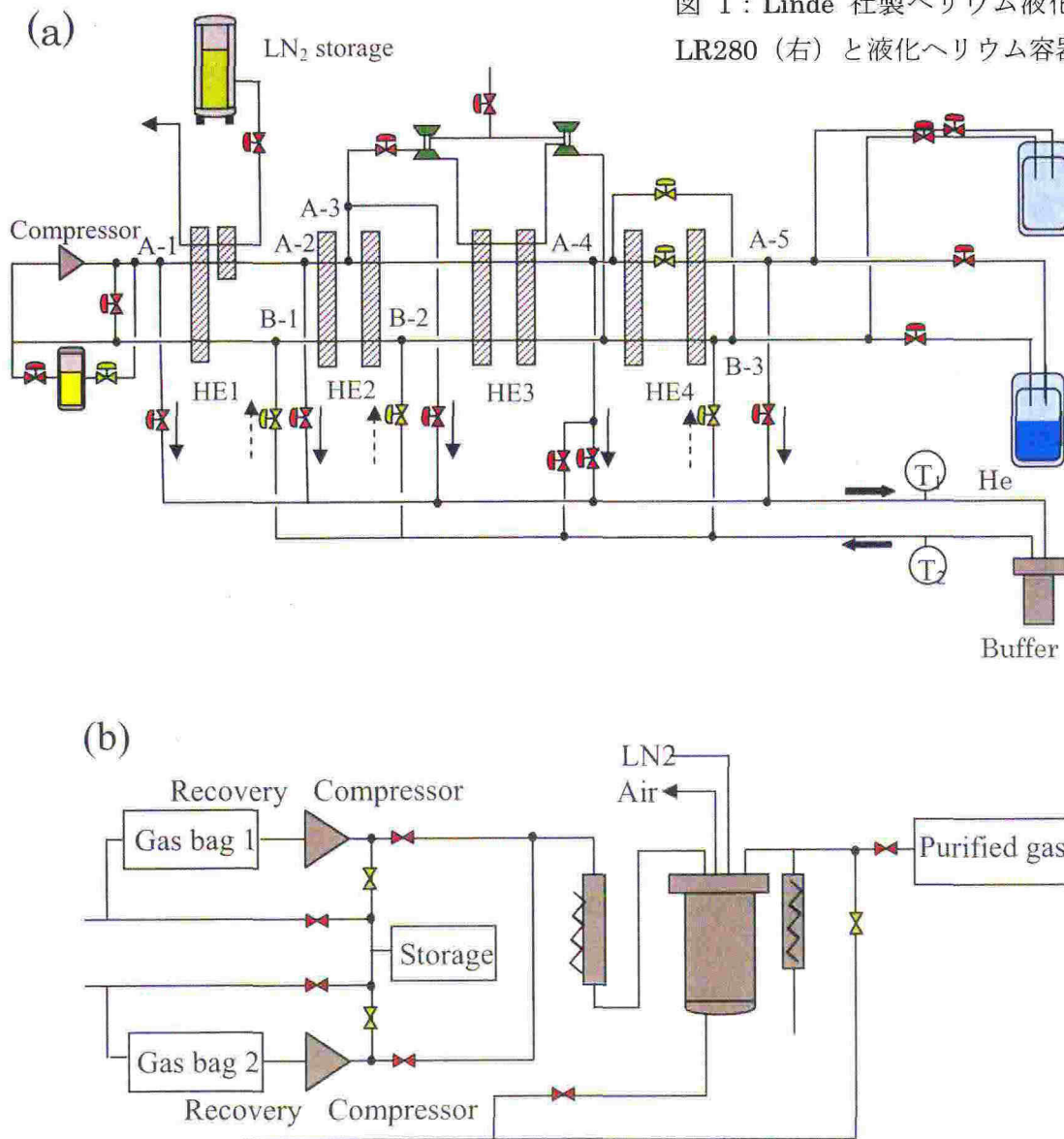


図2：(a)はLR280液化・冷凍機的气体フローチャートを示す。冷凍運転では矢印方向にガスが流れ、バッファ装置を経由して本体に戻ってくる。(b)に示すヘリウム回収、精製システムは液化機本体とは独立に運転される。

して設置されている。この液体窒素タンクは伊都地区各研究室への液体窒素の供給用としてだけでなく図 2(a)に示すように液化・冷凍運転を行う際のヘリウムガスの予冷に使用されている。

製造された液体ヘリウムは、低温センター、超伝導科学研究センターのそれぞれに設置された 2,000 ℓ 容器に貯蔵され、それぞれ独立にくみ出しが行えるようになっている。両センターは独立の建屋になっているため、液体ヘリウムは約 10 メートルの長尺トランスファーチューブを通り低温センターから超伝導科学研究センターに移送される。現在得られているこの装置の最大液化能力は 230 ℓ/時間であり、仕様書を超越する能力が得られている。このヘリウム液化・冷凍機は回収ヘリウムガスの精製システムが図 2(b)のように液化・冷凍機本体から切り離されている。これによりガスの精製作業が液化運転とは独立に実施できるようになり、上述した冷凍機運転、液化・冷凍機の同時運転など様々な状況に応じて柔軟に対処できるようになった。

次に冷凍運転の方法について簡単に説明する。磁場中にある超伝導体は交流ロスのため大きな冷凍負荷になる。そのため転移温度が液体窒素温度を超える高温超伝導体などについて交流ロスを研究するためには、液体ヘリウムの蒸発温度($T=4.2\text{K}$)以上の広い温度範囲で大きな冷却能力を持つ冷凍機が必要になる。この装置はヘリウムガスの循環ラインを液化用と冷凍用の 2 種類取り付けることで、大型冷凍機としての機能も併せ持つような構造になっている。図 2(a) に本装置のヘリウムガスの循環経路を示す。液化運転の場合は高圧ヘリウムガスは熱交換器 HE1~HE4 および膨張タービンを出た後 J-T 弁を通り液化され容器に貯蔵されていく。一方、冷凍運転では図 2(a) に示した各温度ステージ A-1~A-5 からガスを取り出し、そのガスを冷媒として循環させている。このとき A-1 は室温、A-2 は窒素温度、A-3, A-4 はそれぞれタービンの入り口、出口温度、A-5 は J-T 弁の入口温度に対応するガスを供給している。この各温度にあるガスを目的温度になるように混ぜ合わせることで、冷凍機的气体出口温度 T_1 を調節している。

冷凍機が制御不能にならないよう安全に運転を行うには、冷凍機に戻ってくる循環ガスの温度 T_2 を出口温度 T_1 より十分高くして一定に保つ必要がある。この冷凍機では T_2 が T_1 に対して $T_2 = T_1 + 10\text{K}$ で安定に動作するように設計されている。このためガス温度制御用にバッファ装置が、冷凍実験を行う超伝導科学センターに設置されている。図 2(a) に示すように、冷凍機から長尺トランスファーチューブを通



図 3 : ガス温度調整用バッファ装置

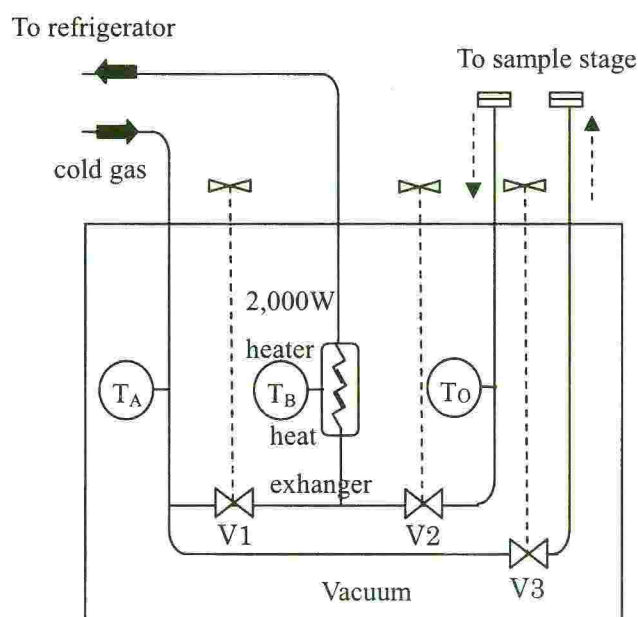


図 4 : バッファ装置の概略図。 T_A, T_B, T_C はそれぞれ 温度計を表す。本実験中にはバルブ V_1 は開、 V_2, V_3 は閉となっている。循環ガスは熱交換器を通して 2,000W ヒーターで加熱される。

てきた低温のヘリウムガスはバッファ装置で加熱され温度 T_2 に昇温された後、B-1, B-2, B-3 部を通して液化・冷凍機に戻っていく。

図3にガス温度制御用のバッファ装置の外観を示している。大きさは直径 0.7m 高さ 1.3m あり、ステンレス製真空容器からできている。図4の装置概略図に示すように断熱真空相内にはガス加熱用ヒーター、銅製の熱交換機、バルブが取り付けられている。今回のテストでは冷凍機本体の冷却能力をテストしたため、図4で示すバルブ V1 を開け V2 および V3 を閉じ試料を取り付けない状態で行った。つまりバッファ装置自体が疑似負荷となっている。一方実際の交流ロス実験などは、バッファ装置の先にトランスファーチューブを延長して V1 バルブを閉じ V3 バルブを開けてガスの循環ラインを確保した上で行う。双方の場合ともにガスは熱交換器部でヒーター加熱され、温度 $T_2 = T_1 + 10\text{K}$ となるように制御される。

3. 冷凍運転モードにおける冷却能力

冷凍機運転ではヘリウムの液化は行わないので、装置で発生する寒冷はすべて負荷の冷却に使用できる。したがって本実験結果が、現段階における本冷凍装置の冷却能力といえる。上述のように本実験ではバッファ装置内のバイパスバルブ V-1 を開け V-2 と V-3 は閉じ、冷凍機のガス出口温度 T_1 に対して、戻りガス温度 $T_2 = T_1 + 10\text{K}$ となるようにヒーター出力を制御した。図5に示すように戻りガスの温度 T_2 は、加熱後数分以内に安定になった。実験中、冷凍機の出口温度 T_1 とガスがバッファ装置内に入ってきたときの温度

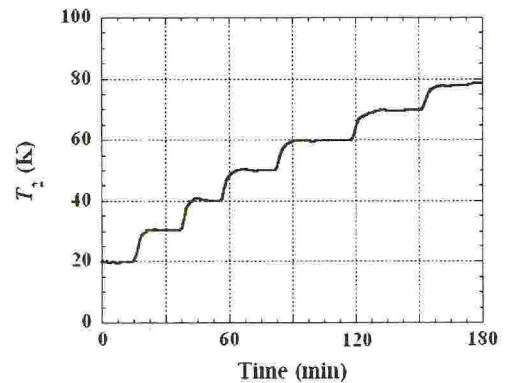


図5：冷凍機へのガス戻り温度 T_2 の時間変化

T_A はほぼ一致していた。これより途中配管における熱の侵入は小さく、ガス温度の上昇はヒーター加熱によって発生したと考えている。

図6にガスの出口温度 T_1 を 5K から 70K まで変化させたとき、戻りガス温度 $T_2 = T_1 + 10\text{K}$ とするために必要であった熱量をプロットしている。これが各温度における冷却能力になる。 $T_1 = 10\text{K}$ で極大値をとっているが、これは本冷凍装置の最大冷却能力に対応する。あるいは諸パラメーターが $T_1 = 10\text{K}$ 近傍で最大冷凍能力が得られるように設定されているともいえる。 $T_1 = 10\text{K}$ より高温側では冷却能力は一旦低下し $T_1 = 40\text{K}$ で極小となり、より高温側では上昇に転じている。さらに $T_1 = 60\text{K}$ および 70K ではヒーターの最大値

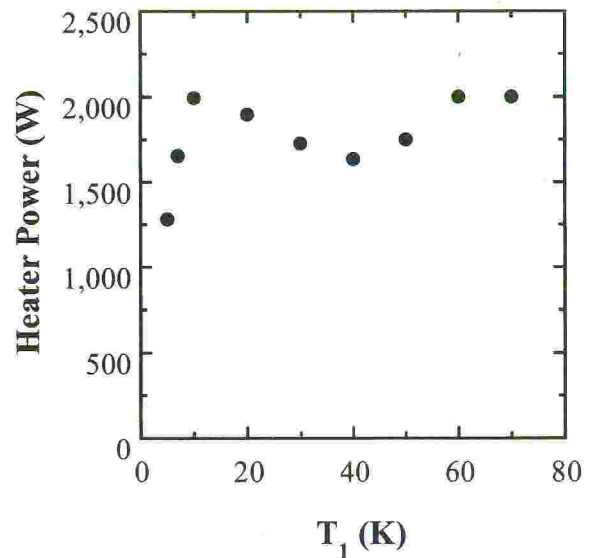


図6：冷凍運転モードにおいて、循環ガス温度を $T_2 = T_1 + 10\text{K}$ に昇温するため必要なヒーター値の T_1 依存。ヒーター値は装置の冷却能力に対応する。

2,000W で加熱しても、戻りガスの温度はそれぞれ $T_2=69.9\text{K}$ および 79.8K に抑えられ $T_2-T_1=10\text{K}$ の温度差が得られなかった。つまり $T_1=60\text{K}$ 以上では、2,000W 以上の冷却能力が得られるわけである。 $T_1 \geq 40\text{K}$ における冷却能力の上昇は装置内を流れるガスの設定方法と強く関連している。図2に示すとおり、冷凍機から出てくるガスは A-1 から A-5 までの各温度ステージにあるガスを混ぜ合わせ、出口温度 T_1 になるよう調整したものである。このため T_1 の設定温度が高くなると、熱交換機 HE1 を通して液体窒素で予冷されたガスの割合が増える。したがって $T_1 \geq 40\text{K}$ の冷却能力の上昇は装置本来の冷却能力に加え、液体窒素による寒冷が付加されたことを意味している。

本装置(LR280)の冷却能力として仕様書では表1に示すようにそれぞれ $330\text{W}@4.4\text{K}$, $1,440\text{W}@20\text{K}$, $1,575\text{W}@60\text{K}$ である。図6の実験データは各温度において仕様書を超越するものとなっており、冷凍機モードに関する現在の設定が本装置の能力を十分に引き出すものになっていることがわかる。

4. 液化・冷凍同時運転モードにおける冷却能力

次に液化・冷凍同時運転モードにおける液化および冷却能力を調べた。冷凍能力の実験条件は冷凍運転のみの場合と同様に、 $T_2=T_1+10\text{K}$ となるようにパツファ内のヒーターを調節した。この運転モードでは $T_1=10\text{K}$ 以下の温度では、戻りガスの温度 T_2 が低くなりすぎるため実験ができなかった。また冷凍運転同様に T_2 はヒーター加熱後数分以内に安定になった。

実験結果を図7に示す。この運転モードではヘリウムを液化しているため冷凍機としての冷却能力はかなり小さくなる。ガス出口温度 T_1 に対する冷却能力の変化は以下の特徴が見て取れる。まず $T_1=15\text{K}$ 近傍で冷却能力が最大になる。また $T_1 \geq 50\text{K}$ で冷却能力が増加に転

じているように見える。低温側で冷却能力の極大が現れ、高温側で冷却能力が上昇するという特徴は3章で既述した冷凍運転モードの結果と定性的に一致しており、冷凍運転時の特徴といえるだろう。またヘリウム液化能力を見てみると、 $T_1=15\text{K}$ で約 $40\text{L}/\text{時間}$ から T_1 の上昇とともに液化能力は急激に上昇することがわかる。 $T_1 \geq 50\text{K}$ では $170\text{L}/\text{時間}$ 以上というように、ヘリウム液化運転モードにおける装置の仕様値 $195\text{L}/\text{時間}$ に近い液化能力が得られた。

上で得られた冷却能力、液化能力をもとに装置の持つ全冷却能力を計算した。その温度依存を図8に示す。全冷却能力は $T_1 \geq 40\text{K}$ で急激に増大している。一方、 $T_1 \leq 25\text{K}$ では $1,000\text{W}$ 程度で大きな変化はなく、また $T_1=15\text{K}$ 近傍で見られた冷却能力の極大も消失している。これを冷凍運転モードで得られた冷却能力と比較してみると、両者は以下のように大きく異なることがわか

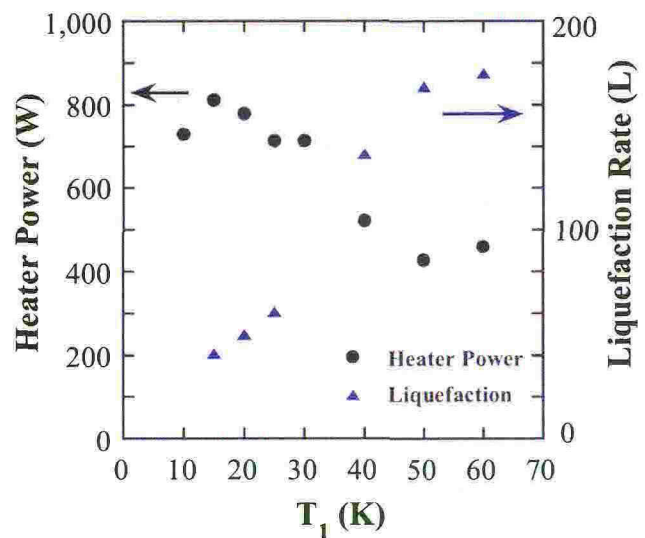


図7：同時運転モードにおけるヒーター値、液化能力の T_1 依存。

る。まず、同時運転モードでは $T_1 \leq 25\text{K}$ における全冷却能力は約 1,000W 程度なのに対し、冷凍機運転モードでは約 1,700W 以上と倍近い冷却能力が得られている。一方、高温側を比較してみると、同時運転モードの方が大きな冷却能力が得られている。この両モードにおける冷却能力の違いは、冷凍機運転において A-1 から A-5 で混合されるガス比率の違いに起因していると考えている。とくに同時運転モードでは低温側の冷却能力が下がり、高温側が強力になるような設定になっている可能性がある。

ここで仕様書データと同時運転モードの実験値を比較してみる。表 1 および図 7 に示すように同時運転モードでは $T_1 \leq 25\text{K}$ における冷却能力は 700W 以上が得られているが、これは仕様書 540W@20K に比べてかなり大きい。また、液化能力は $T_1 \leq 25\text{K}$ で 60 ㊦/時間以下しか得られておらず、仕様書 70 ㊦/時間@20K より小さい。一方、 $T_1 \geq 40\text{K}$ の高温側に注目すると、冷却能力は仕様書 1,000W@60K より小さいが、液化能力は仕様書 70 ㊦/時間@60K よりかなり大きい。以上明らかのように、現時点で得られた同時運転モードの実測値は仕様書データから大きくずれている。これについても原因は上述したように A-1 から A-5 で混合されるガス比率の問題と考えている。同時運転モードに関してはガス混合比を最適化することで、設計値が得られるように設定を改良していく必要がある。

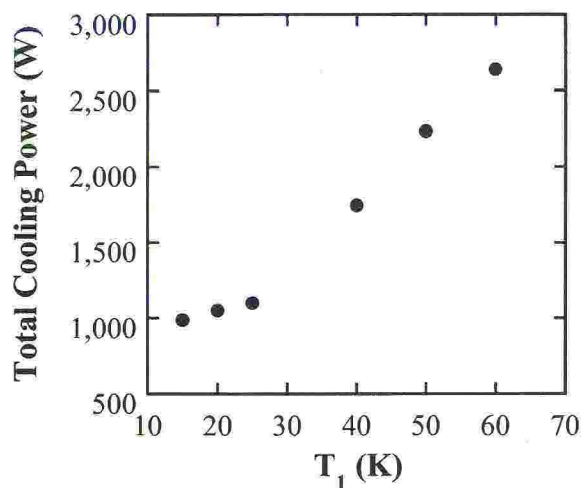


図 8：液化・冷凍同時運転から計算した装置の全冷却能力の温度依存。

表 1：液化、冷凍、液化・冷凍同時モードにおける仕様書と実験値の比較

	仕様書	実験値
液化モード	195 ㊦/時間	最大 230 ㊦/時間
冷凍モード	330W @ 4.4 K (冷却能力) 1,440W @ 20 K 1,575W @ 60 K	1,283W @ 5 K (冷却能力) 1,895W @ 20 K 2,000W 以上 @ 60 K
液化・冷凍同時モード	70 ㊦/時間 + 540 W @ 20 K 70 ㊦/時間 + 1,000W @ 60 K	50 ㊦/時間 + 779 W @ 20 K 175 ㊦/時間 + 460 W @ 60 K

5. まとめ

九州大学低温センター伊都地区センター新設に伴い、液化・冷凍機が設置された。これはリンデ社の LR280 を主体とするヘリウム液化・冷凍機と循環ガスの温度制御を行うためのバッファ装置からなっている。この装置の性能試験より以下の結果が得られた。ヘリウムの液化運転では

最大 230 ℓ/時間の液体が得られている。冷凍運転モードでは 10K から 70K の温度域で 1,200W 以上の冷却能力が得られ、また $T=10\text{K}$ 近傍で約 2,000W の極大を示す。これら液化、冷凍単独運転で得られた性能は仕様書のデータを大きく超えるものである。液化・冷凍同時運転モードでは、液化・冷凍能力ともに装置の温度に大きく依存する。 $T_1=15\text{K}$ では液化能力が 40 ℓ/時間であり冷却能力は約 800W である。一方 $T_1=60\text{K}$ では 170 ℓ/時間以上の液体が得られたのに対して冷却能力は 450W である。これらについては当初予定していた能力が得られていない点があり、今後装置の設定を改善していく予定である。

なお最後になりましたが本研究を行うにあたり、九州大学低温センター、超伝導科学研究センター関係者をはじめとして多くの方々に支援をしていただきました。この場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

1. K. Kajikawa, K. Tomachi, N. Maema, M. Matsuo, S. Sato, K. Funaki, H. Kumakura, K. Tanaka, M. Okada, K. Nakamichi, Y. Kihara, T. Kamiya and I. Aoki
J. Phys. Conf. Ser., Vol. 97, 012140 (2008).
2. K. Funaki, T. Sueyoshi, K. Kajikawa, M. Iwakuma, K. Tanaka, M. Okada, H. Kumakura and H. Hayashi
J. Phys. Conf. Ser., Vol. 97, 012316 (2008).
3. Z. Zulkifli, T. Kiss, M. Inoue, K. Enpuku, N. Kashima, T. Watanabe, M. Mori, S. Nagaya, A. Ibi, S. Miyata, Y. Yamada and Y. Shiohara
Physica C, Vol. 468, Nos. 15-20, pp. 1518-1521 (2008).
4. M. Suenaga, M. Iwakuma, T. Sueyoshi, T. Izumi, M. Mimura, Y. Takahashi and Y. Aoki
Physica C, Vol. 468, Nos. 15-20, pp. 1714-1717 (2008).
5. K. Funaki, T. Sueyoshi, M. Iwakuma, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya
Physica C, Vol. 468, Nos. 15-20, pp. 1723-1726 (2008).
6. K. Tanaka, K. Funaki, T. Sueyoshi, Y. Sasashige, K. Kajikawa, M. Iwakuma, M. Okada, H. Kumakura and H. Hayashi
Supercond. Sci. Technol., Vol. 21, No. 9, 095007 (2008).
7. 船木和夫, 久保輝朗, 中尾彰浩, 佐藤誠樹, 松尾政晃, 柁川一弘, 田中和英, 岡田道哉, 熊倉浩明, 林秀美
低温工学, Vol. 43, No. 10, pp. 423-429 (2008).
8. K. Enpuku, T. Tanaka, Y. Tamai, F. Dang, N. Enomoto, J. Hojo, H. Kanzaki and N. Usuki
Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 10, pp. 7859-7865 (2008).
9. T. Kawae, K. Yaita, Y. Yoshida, Y. Inagaki, M. Ohashi, G. Oomi, K. Matsubayashi, T. Matsumoto and Y. Uwatoko
Rev. Sci. Instrum., Vol. 80, 025102 (2009).
10. T. Kawae, S. Sato, M. Matsuo, K. Funaki, M. Kinoshita, T. Fushimi and Nusslein Uwe
To be published in Proceedings of International Cryogenic Engineering Conference 22.