

小型 2 K 冷凍機を開発

- 安価に強磁場 NMR マグネット運転が可能 -

平成 13 年 7 月 9 日

独立行政法人物質・材料研究機構

概要

文部科学省の超伝導開発マルチコアプロジェクトでは、1GHz NMRや酸化物超伝導体による磁気分離など、超伝導の強磁場応用に取り組んでいる。この一環として、独立行政法人物質・材料研究機構の強磁場研究グループ佐藤明男主任研究員らは、(株)東芝と共同で、液体ヘリウム温度-269 (絶対温度4.2K) よりもさらに低い、超流動ヘリウム温度域(2K)まで冷却できる高性能小型冷凍機の開発に成功した。

超伝導マグネットは、通常、液体ヘリウムを用いて 4.2K に冷却される。冷却温度を 2 K 以下まで下げると、超伝導線材の性能が高まり、発生磁場を大きくすることができる。このため、20 T (テスラ) を越える強磁場マグネットは、超流動ヘリウムで冷却されて、2 K 以下で運転されてきた。

今回開発された冷凍機は、安価なヘリウム 4 ガスを作動媒体として用いており、絶対温度 2 K で 2 W の冷凍能力を持つ。これは、高価な液体ヘリウム 3 を用いる従来の小型冷凍機の能力をはるかに超える。

この冷凍機が開発されたことにより、冷凍機伝導冷却型の強磁場超伝導マグネットを、より安全、簡便かつ安価で運転することが可能となり、タンパク質構造解明用の 1 GHz NMR マグネットなどへの応用が期待される。

1. 超流動ヘリウム

液体ヘリウムの温度は、1 気圧の下で -269 (絶対温度 4.2 K) である。圧力を下げると、ヘリウムの温度は下がる。温度が 2.2 K 以下になると、ヘリウムは超流動という状態になる。この超流動ヘリウムは、熱伝導、熱伝達が極めてすぐれているから、超伝導マグネットを効率的かつ安定に冷却するための冷媒として適している。

2. 超流動ヘリウム温度域における冷却のメリット：超伝導特性の向上

超伝導とは、物質中を電流が電気抵抗ゼロで流れる現象である。この物質を超伝導体と呼び、超伝導体で構成される電線を、超伝導線材という。超伝導線材に電気抵抗ゼロで流し得る電流の値には限界がある。これは臨界電流と呼ばれ、これが大きいほど強い磁場を発生できる。臨界電流は、温度を下げれば下げるほど大きくなる。

超伝導マグネットは、通常、液体ヘリウムを用いて 4.2 K (-269) に冷却されるが、この冷却温度を 2 K 以下 (超流動ヘリウム温度域) まで下げると、超伝導線材の臨界電流特性が大幅に向上する。例えば、一般的に使用されている NbTi (ニオブ・チタン) 線材では、4.2 K から 2 K まで温度を下げると、10 T の磁場中における臨界電流値は約 5 倍に増加する。このような超流動ヘリウム温度域における性能向上を利用するため、800 MHz (18.8 T) 以上の強磁場 NMR のマグネットのような強磁場マグネットは、超流動ヘリウムで冷却され、運転されている。素粒子加速器用の超伝導マグネットなども、強い磁場を必要とする場合は、2 K 以下の温度に冷却して使用される場合が多い。

3 . 液体冷媒による冷却の問題点

液体ヘリウムや超流動ヘリウムのような液体冷媒による運転は、超伝導が破れマグネットがクエンチした場合、液状のヘリウムが一気に膨張し、蒸発するため、圧力上昇あるいは酸欠などの危険を伴う。このリスクは、1 GHz NMR のように超伝導マグネットが大型になるほど深刻である。これは液体冷媒を使用する限りにおいて、不可避の問題である。

一方、最近の強磁場超伝導マグネットは、そのほとんどがエポキシなどで含浸されて安定性を向上したマグネットであり、マグネットの超伝導線が直接超流動ヘリウムに触れているわけではない。したがって、超流動ヘリウムが、優れた熱伝導性や熱伝達性を持つとしても、マグネットに直接触れていないので、その熱的安定性に直接寄与していない。

4 . 開発した 2 K 冷凍機

超伝導マグネットを 2 K レベルまで冷却するためには、1 W (ワット) 級の冷凍機が必要である。2 K の小型冷凍機の開発は、これまでも試みられているが、いずれも冷凍能力が非常に小さいか、あるいは希少で高価なヘリウム 3 ガスを使用するシステムであり、実用的なレベルに達していなかった。

今回開発した冷凍機は、1.8 K における冷凍能力が 0.6 W , 2 K においては 1.9 W 以上である。また、入力は、約 8.8 kW、2 K における COP は 2.2×10^{-4} であった。これは、ヘリウム 3 を用いた 2 K 冷凍機 (1.13 W、2 K) の COP 値 (8.76×10^{-5}) に対して、倍以上の高い効率である。

(COP : 冷凍能力を所要動力で割ったもの)

5 . 開発の意義

まず、冷凍機からの熱伝導によって超伝導マグネットを冷却できれば、冷媒蒸発に起因する暴発や窒息の危険性がなくなることが挙げられる。すでに、4 K レベルの小型冷凍機を使って、手軽に 10 T レベルの強磁場を発生できる伝導

冷却型のマグネットはすでに国内だけで百数十台以上出荷され、液体ヘリウムを必要としない簡便さから、研究機関で盛んに使われている。

次に、今回の2 K冷凍機は、従来の2 K温度発生技術に比べて、経済性と簡便性の点で優れている。2 K以下の温度を作るためには、これまで用いられた手段は、次の2つであった。

液体ヘリウムを真空ポンプで減圧する。

低温ポンプを備えた、冷凍能力が数百W以上の超大型のヘリウム液化機によって冷却する。

前者は一定時間毎に液体ヘリウムを補給しなければならず、後者は大型の施設でしか実現できない。

さらに、2 K以下の冷却が低コストで簡便にできれば、安価なNbTi（ニオブ・チタン）超伝導線材のみで、10 Tを越える磁場を発生できる可能性がある。あるいは、冷却によって超伝導特性が大幅に向上するから、Nb₃Sn（ニオブ3錫）のような高価な超伝導線材の使用量を減らすこともできる。その結果、10 Tを越える強磁場では、2 K冷却マグネットは、同じ磁場発生能力の4 K冷却マグネットよりも製作コストを安く抑えることも可能である。

6．技術的ポイント

今回開発した2 K冷凍機は、4 Kの小型冷凍機で実績のあるGM / JT（ギフォード・マクマフオン / ジュール・トムソン）サイクルを採用している。作動ガスも一般に使用されるヘリウム4を用いた。そのため、4 Kレベルの小型冷凍機で確立された信頼性を維持しながら、低コスト化を図ることが可能となった。

2 K - GM / JT冷凍機のキー・コンポーネントは、JT回路の熱交換器である。超流動ヘリウムを発生させるには、1.6 kPaに減圧する必要がある。一方、1 Wクラスの冷凍能力を発生させるためには、熱的に高効率で小型の熱交換器を開発することが必要である。このため、以下の開発を行った。

低圧力損失 / 高効率の小型熱交換器の開発

銅球充填型の熱交換器を採用し、流路内に熱伝導の良い銅球を充填することで、圧力損失を減らしながらも伝熱面積を十分確保することに成功した。

コンプレッサに真空ポンプを組み合わせた減圧機構の開発、

1.6 kPaを発生させる減圧機構として、JTの高圧側圧力を発生させるコンプレッサに真空ポンプの排気側をつないで、閉サイクルを構成した。真空ポンプのオイルが冷凍機の低温部に回らないようにフィルターを設けることで、信頼性を確保した。

7．今後の展望：超伝導マグネットの研究開発に与えるインパクト

今回実用的な2 K冷凍機を開発したことにより、大型超伝導マグネットを、

簡便かつ安定的に2 Kレベルで運転することが可能になった。これまで運転員が付きっきりで運転してきた超流動ヘリウム冷却の大型マグネットも、小型冷凍機によって、無人で冷却されるようになるだろう（人件費の削減）。安全で簡便な2 Kレベルのマグネット冷却が可能になれば、より安価な超伝導線材で強磁場を発生することが可能になり、強磁場マグネットの低価格化が進むだろう。このように今回の2 K冷凍機は、これからの超伝導マグネットおよび強磁場の研究開発に大きなインパクトを与えるものと期待される。

この成果は7月16日からウィスコンシンで開催されるCEC（低温工学国際会議）で発表される。

< 従来の冷凍機との比較 >

	冷凍能力（2K）	作動ガス	入力 （GM+JT+真空ポンプ）
今回の冷凍機（'01）	1.9 W	ヘリウム4	8.8 kW
従来の冷凍機（'98）	1.13 W	ヘリウム3	12.9 kW

問い合わせ先

独立行政法人 物質・材料研究機構

総務部総務課広報係（電話：0298-59-2026）

（研究内容に関すること）

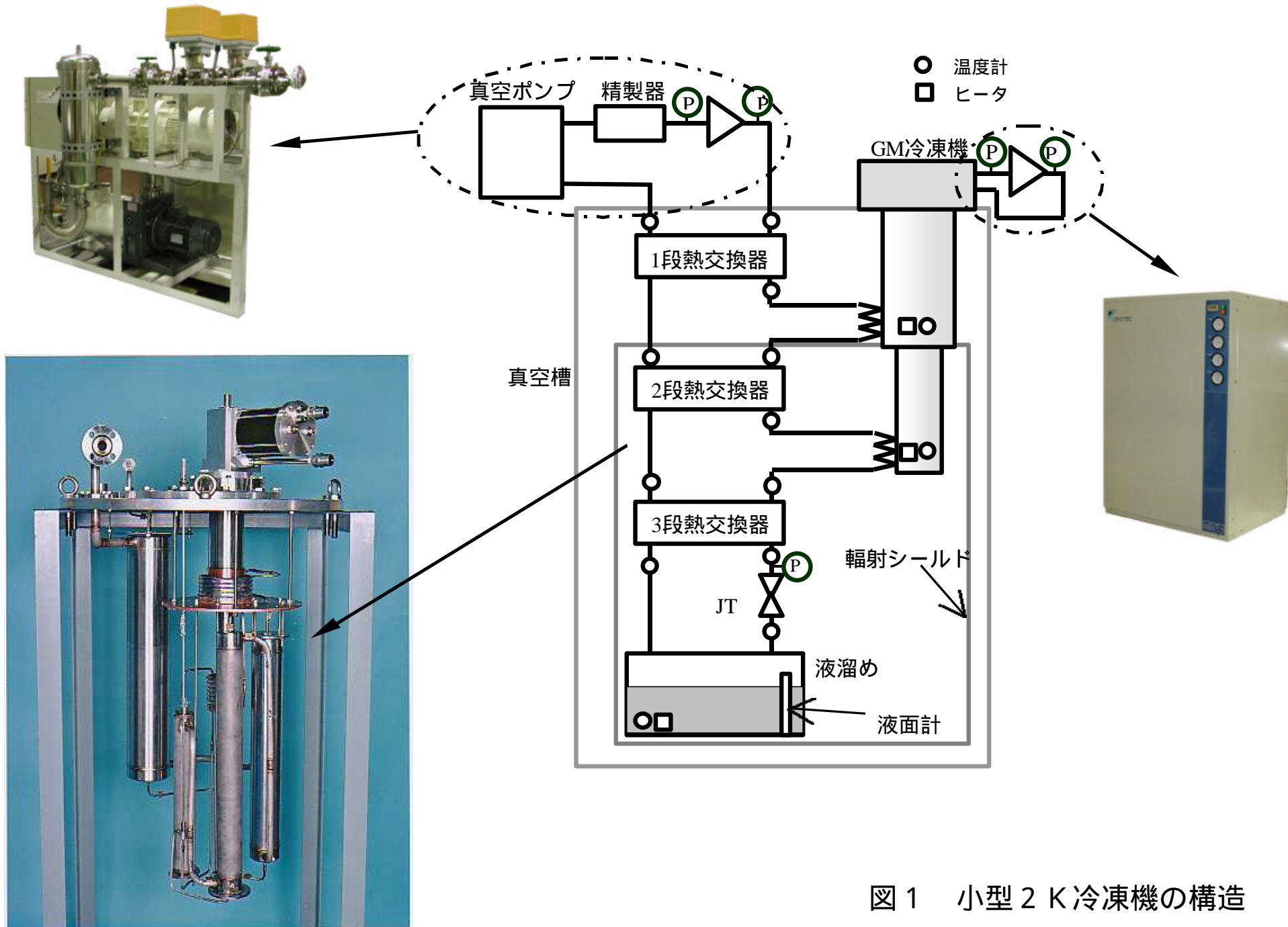
同機構 材料研究所 強磁場グループ

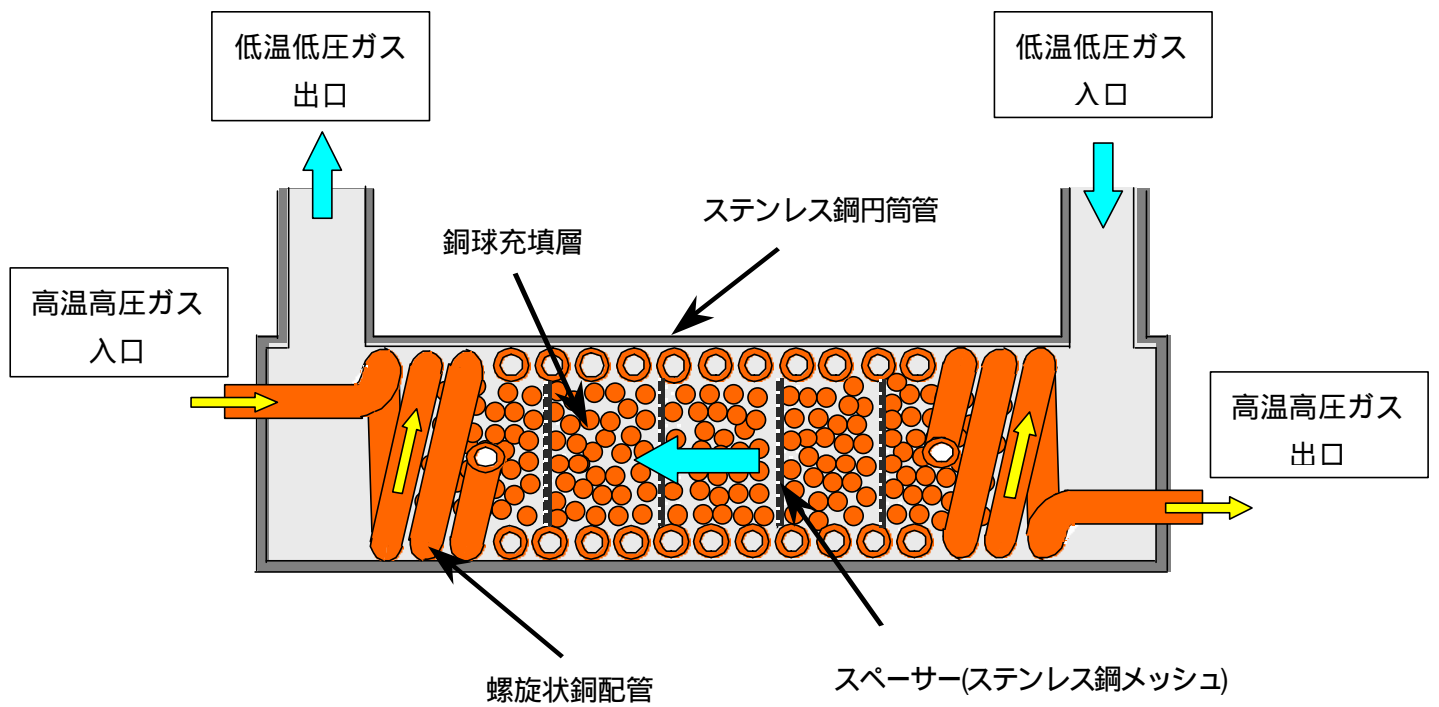
佐藤 明男（電話：0298-59-5039）e-mail: SATO.Akio@nims.go.jp

和田 仁（電話：0298-59-5024）

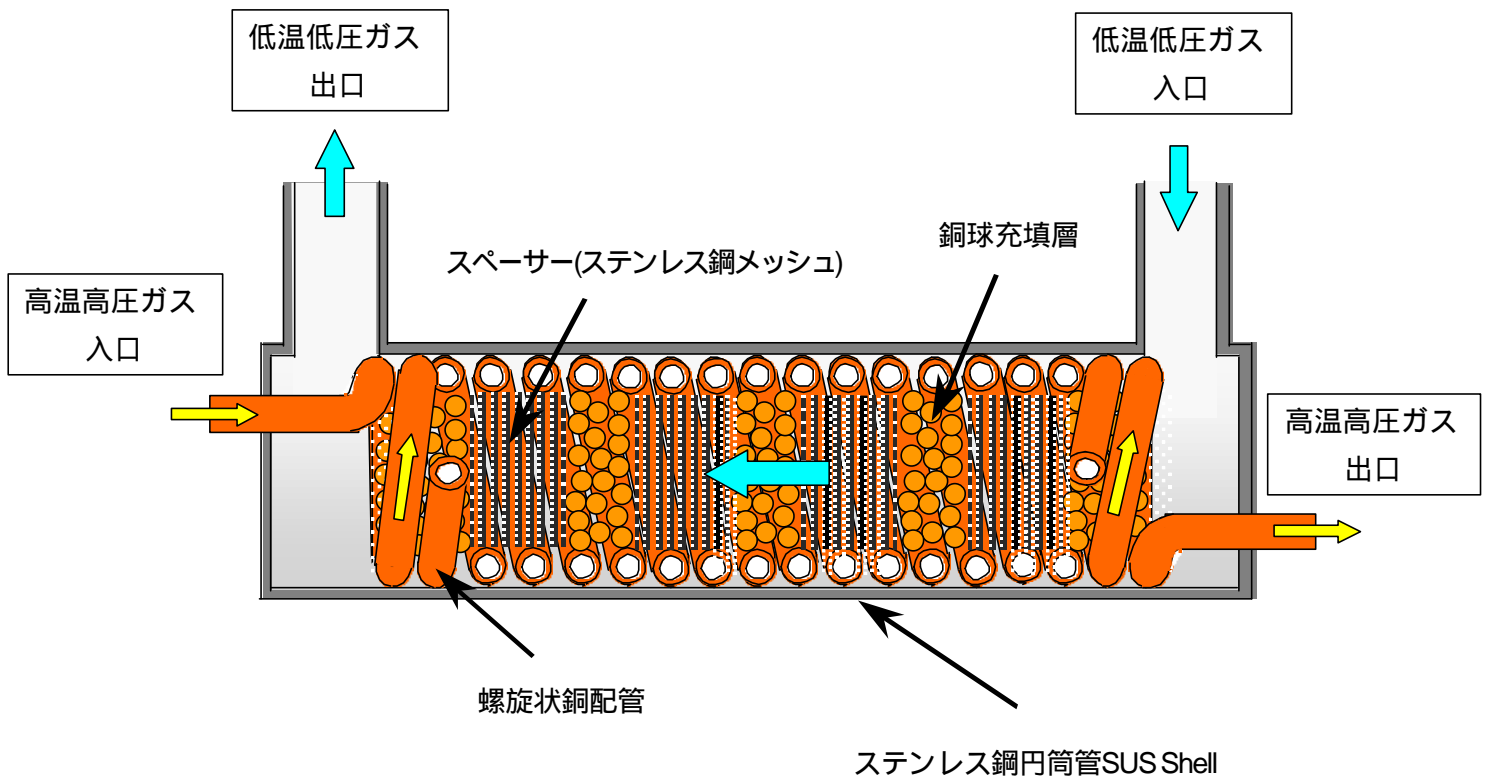


写真 小型 2 K 冷凍機 (本体)





第3 熱交換器構造



第1・第2 熱交換器構造

図2 熱交換器概念図

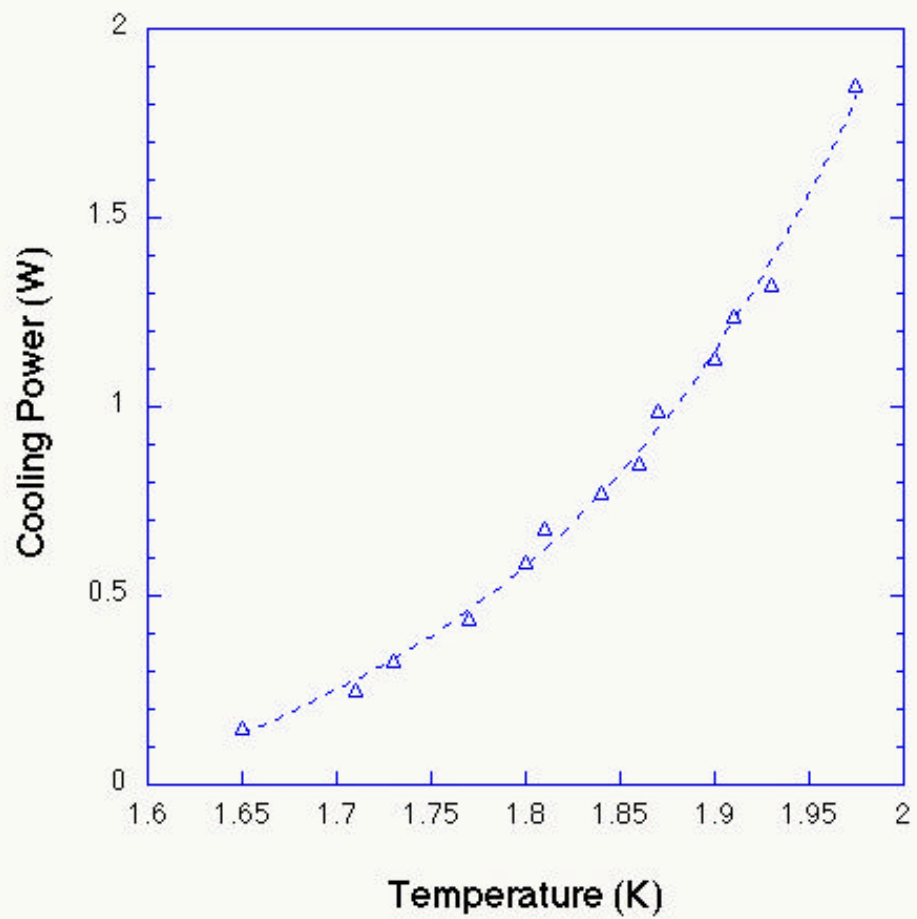


図3 冷凍能力の温度依存性