

# 日本初のヘリウム液化機： 大阪市立大学における超低温開発の歴史

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 大阪市立大学大学史資料室 公開日: 2024-09-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 畑, 徹 メールアドレス: 所属: 大阪市立大学
URL	<a href="https://doi.org/10.24544/ocu.20171208-066">https://doi.org/10.24544/ocu.20171208-066</a>

<b>Title</b>	日本初のヘリウム液化機：大阪市立大学における超低温開発の歴史
<b>Author</b>	畑, 徹
<b>Citation</b>	大阪市立大学史紀要. 3 巻, p.120-126.
<b>Issue Date</b>	2010-10
<b>ISSN</b>	1884-3522
<b>Type</b>	Departmental Bulletin Paper
<b>Textversion</b>	Publisher
<b>Publisher</b>	大阪市立大学大学史資料室
<b>Description</b>	
<b>DOI</b>	10.24544/ocu.20171208-066

Placed on: Osaka City University

## 日本初のヘリウム液化機

—大阪市立大学における超低温開発の歴史—

畑 徹

### 1. 低温の歴史とノーベル賞

低温の歴史は、常温では気体であるものを液体にすることから始まった。オランダで初めて気体の液化に成功した1799年がそのスタートと言える。最初は、アンモニア気体が液体化され、その後、炭酸ガス、硫化水素と続いた。なかなか液体にできないことから永久気体と呼ばれていた酸素が液化されたのは1877年で、さらには、窒素、水素の液化が可能となっていった。そして、ついに1908年に最後の永久気体であったヘリウムガスが、国際的な競争の中これもオランダのライデン大学で液化に成功した。これですべての気体は液体になることが実験的に証明された。

1気圧のもとでヘリウムガスが液体になる温度は、約 $-269^{\circ}\text{C}$  ( $-273.15^{\circ}\text{C}$ を絶対零度と呼ぶので、絶対温度では4.2K (ケルビン))であった。この低温は、激しい国際液化競争の末に獲得されたものであったが、人々がこの低温を最初に何に利用しようとしたかが、その後の低温の歴史を決定づけることとなった。当時、低温を得たものの何に應用できるかはまったく想像できなかったせいかも知れないが、最初の低温利用として、金属の電気抵抗は絶対零度になったらゼロになるのか、あるいはある一定値に落ち着くのか、さらには無限大になるのかを確かめることに使われた。当時、金属の電気抵抗は温度が下がるにつれて直線的に小さくなっていくことは知られていたので、その行き着く先がどうなるかを突き止めようとした純粋な科学的興味であったといえる。金属の中でも不純物だけである合金は電気抵抗の変化が小さいことは既に知られていたので、できるだけ純粋な金属で電気抵抗の温度変化が調べられた。当時、最も純粋にできる金属として水銀が選ばれた。水銀は低温では固体になるが、室温で液体状態であるため、蒸留によって最も純度を上げることが容易であったからである。この水銀を選択したのが大発見に繋がった。1911年に、カマーリングオンネスらは水銀の電気抵抗がある温度以下で突然ゼロとなることを見出した。あまりにも不思議であったため、測定の間違いかも知れないとそのチェックのために1年を費やした後初めて発表された。このある温度とは4.15 Kで、液体ヘリウムを少しだけ減圧することで簡単に得られる温度であったことが幸いした。後に、水銀がこの温度以下では電気抵抗ゼロの世界、即ち「超伝導」に飛び移ったためとわかった。2年後に、カマーリングオンネスはノーベル賞を受賞することになる。しかし、この奇妙な電気抵抗ゼロの世界はどのように出現したのかを説明する理論は、46年間も多くの研究者を悩

ませた後、1957年になってやっと構築された。この理論は、3人の頭文字を取ってBCS理論と名付けられ、1972年にノーベル賞受賞となった。

1937年にカピッツァらは、金属の電気抵抗とは異なる低温でのもう一つ大きな発見をした。これが「超流動」と呼ばれるもので、約2 Kで液体ヘリウムが新しい状態に突然移ることが見出された。1978年にカピッツァもノーベル賞受賞となる。この超流動は、液体が粘性なしに流れることができる状態を意味する。例えば、回っているバケツに入れた水は、バケツといっしょに回転するが、バケツの回転を止めると粘性によりエネルギーを失いやがては静止する。ところが、超流動の液体ヘリウムは、バケツの回転を止めても回り続ける。後に、1972年に通常のヘリウムガス（質量数4なのでヘリウム4と呼ぶ）の同位体であるもう一つのヘリウム（質量数が3で軽く、ヘリウム3と呼ぶ）も0.002 Kで超流動になることが発見され、このヘリウム3の超流動と金属の超伝導とは同じ理論の上に立っていることも証明された（2003年ノーベル賞 レゲット超伝導と超流動の理論に関する先駆的貢献）。

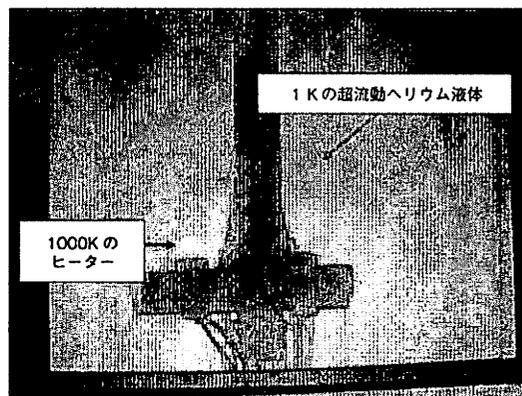
このように、低温の歴史は「超伝導」、「超流動」の発見によって発展してきた。最近では、1986年にいわゆる「高温超伝導」（転移温度 $T_c=90$  K）と呼ばれる銅酸化物（セラミックス）での超伝導の発見。1995年 原子気体の凝縮（BEC）の発見（超流動の対応した現象）。いずれもノーベル賞受賞となる。2001年 新しいタイプの物質、金属 $MgB_2$ における「超伝導」の発見。2008年 鉄系化合物の「高温超伝導」の発見（従来は銅系化合物だった）と「新しい超伝導の発見」がいまだに続いている。もし低温ではなく室温で超伝導が実現すれば、エネルギー損失のない様々な機器開発が可能となり世界が一変する革命となると考えられているからである。

## 2. 超伝導、超流動の不思議な性質

なぜこのように「超伝導」「超流動」研究が盛んに行われてきたかは、室温では想像できない不思議な性質を示すからである。以下に、よく引用される例を写真で示す。

### ① 低温での不思議な現象1—「超熱伝導」

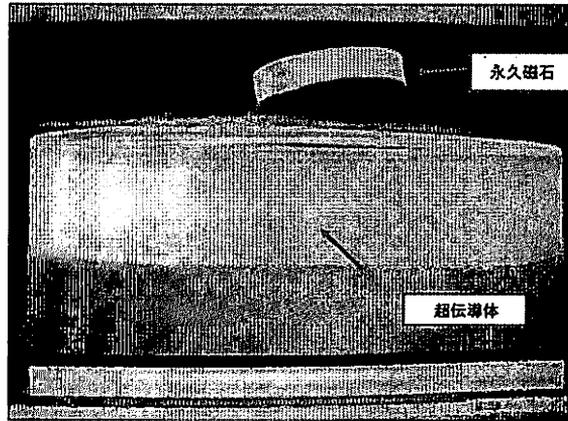
2 K以下になると液体ヘリウムは超流動状態に転移する。この状態では、金属の銅よりも熱伝導度が一桁以上よいため、沸騰が起らず、熱が瞬時に表面まで伝わる。そのため、1000 Kと1 Kとが沸騰なしに共存する状態が生まれる。この超流動状態



は、人工衛星に積まれた高感度赤外線カメラのセンサー冷却に利用されている。

## ② 低温での不思議な現象2—「磁気浮上」

多くの物質は低温になると超伝導状態に相転移する。室温で超伝導になる物質が発見されれば世界が一変するとまで言われており、より高い温度で超伝導になる物質探し競争が展開されている。超伝導状態になると磁力をはじき返す性質を有するので、磁石を近づけると反発力が働き、磁石が浮く。下の写真の白いもやもやは、空中の水蒸気が低温の超伝導体で冷やされたための霧である。超伝導体の磁気浮上力は、通常の磁石の反発力に比べ非常に大きく、2025年に開通予定の東京一名古屋間の中央リニア新幹線は、この磁気浮上で列車を浮上させ、列車を走らせる予定になっている。山梨県にある実験路ではすでに時速500kmが達成されている。



## 3. 大阪市立大学での超低温開発の歴史

1908年のオランダでのヘリウムガスの液化から、42年後の1950年が日本での低温の始まりと言える。1950年に東北大にヘリウム液化機が輸入された。日本で国産のヘリウム液化機が製作されたのは、さらに14年後の1964年である。このとき、大阪市立大学と東京大学物性研究所がほぼ同時にヘリウムガスの液化に成功した。これを契機に、本学は絶えず日本の低温開発の先陣を走っていくことになる。1970年には希釈冷凍機の自作に成功し、日本で初めて0.02



Kに到達し、1977年には液体ヘリウムの断熱加圧法により0.001 Kをつくり出し、1980年には本格的な断熱消磁法により0.0003 Kを実現、1987年には2段消磁により0.00002 Kに到達した。その後、ヘリウム3-4混合液体の0.000097 Kまでの冷却に成功し、これが今でもヘリウム3-4混合液体の世界最低温度となっている。現在では、商業品よりも性能よく、本格的な希釈冷凍機を自作できる研究機関は世界的にも4カ所しかなく、日本では本学だけとなった。

#### 4. 超低温の生成方法

現在の超低温の生成方法を整理すると、下記のような手順で行われる。

- ①ヘリウムガスの液化により、絶対温度で4.2 K (1気圧) を得る。
- ②次に、この液体ヘリウムを減圧することにより、1.2 K (0気圧) を得る。
- ③質量数の異なる2つのヘリウムガス (ヘリウム4とヘリウム3) を液化し、ヘリウム3分子をヘリウム4分子中に噴射することにより0.003 Kが得られる (希釈冷凍機)。
- ④超電導磁石を用い、強力な磁場を発生させ、金属銅中の原子核にある小さな磁石の向きを揃える。このとき発熱するので上記の希釈冷凍機でその熱を奪い去る。
- ⑤その後、希釈冷凍機と熱的に切り離し磁場をゆっくりと小さくしていくと、磁場に比例して温度が下がり (断熱消磁法)、 $\sim 0.00002$  Kが得られる。

#### 5. 温度はどこまで下がっているか

超低温では、室温のようにすべてのものが同じ温度にはならない。したがって、冷やされるものによって最低温度は異なってくる。以下に、現在の世界の最低温度を示す。

- ①核スピン温度では、25 n K (銅)、560 p K (銀)、280 p K (ロジウム)
- ②電子系の温度では、 $12 \mu$  K (銅)、 $1.5 \mu$  K (白金)
- ③液体ヘリウムの温度では

$$1 \text{ m K (4He)}, 0.1 \text{ m K (3He)}, \underline{97 \mu \text{ K (3He-4He)}}$$

(大阪市大の記録)

- ④気体分子の温度では、170 n K (Rb),  $2 \mu$  K (Na)

(注: Kは絶対温度の単位で度を表す。

$$1 \mu \text{ K} = 0.000001 \text{ K}, 1 \text{ n K} = 0.000000001 \text{ K}, 1 \text{ p K} = 0.000000000001 \text{ K})$$

#### 6. 日本初のヘリウム液化機の概要

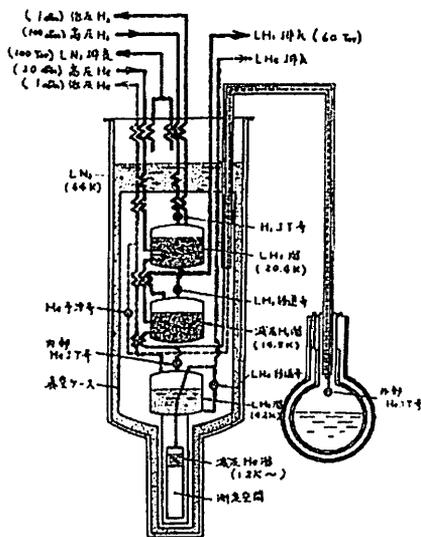
1964年に日本初のヘリウム液化に成功した本学のヘリウム液化機の最大の特徴は、液体窒素、液体水素を用い、徐々に温度を下げていくカスケード方式にあった。

現在では、予備冷却用には液体窒素のみを使い、液体水素は使わない方式で行われている。その手順は、①液体窒素（購入）：絶対温度77K（1気圧）を用い、減圧することにより約60K（0.1気圧以下）を得る。②次に、水素ガスを液体窒素で冷却した後、ジュール・トムソン膨張させ液化し減圧する。これで絶対温度15Kが得られる。③液体窒素、液体水素で冷却されたヘリウムガスをジュール・トムソン膨張させ液化する。これで、絶対温度4K（1気圧）が得られる。当時の水素液化能力は毎時10リットル、ヘリウム液化能力は毎時2リットルであった。

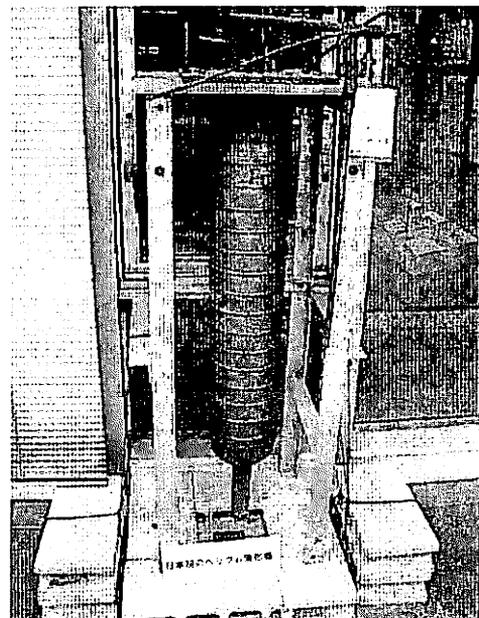
大阪市大のヘリウム液化機のもう一つの特徴は、当時液体ヘリウムを液化機から汲み取り、別の装置に移し実験を行うスタイルが常識的であったが、液化機内に測定空間を設け、液化から測定まで連続的移行できる世界的にも例のない画期的なものであった。

製作においては、日本では薄肉のパイプを工業的に生産する技術がなかったため、薄い板を丸く丸めてハンダ付けし強度を持たすためにでこぼこ加工（へら押し）を施すなど真空に耐える強度を持たせるのに非常な苦勞をしたそうである。この装置は本学独自のもので、工作技術センターの前身である金工室と民間企業数社の協力のもとで製作された。

装置の概略図と写真を以下に示す。この装置は、液化機本体部分のみで、実際には、これに繋がる水素ガスの圧縮機、ヘリウムガスの圧縮機、液体窒素の減圧ポンプ、液体水素の減圧ポンプ、液体ヘリウムの減圧ポンプが配置され、さらには、水素ガスやヘリウムガスを供給する大量の高圧ガスボンベ、使用したヘリウムガスを回収する大型のゴム風船が設置されていた。



装置の概略図



装置の写真（全長は約1.3 m）

## 7. 本学でのヘリウム液化施設の沿革

- 1964年 大阪市大, 初の国産ヘリウム液化機を自作。  
カスケード方式 (液体窒素, 液体水素) 毎時2リットル
- 1974年 ADL社のコリンズ型ヘリウム液化機の設置 (寄付)  
ピストン式 (金属) 毎時5リットル
- 1979年 液化機本体をCTI社製に置換 (寄付)  
ピストン式 (プラスチック) 毎時9リットル
- 1984年 小池酸素社の液化機を購入  
タービン式 毎時12リットル
- 1999年 Sulzer社の液化機 (中古) を設置 (寄付)  
タービン式 毎時40リットル
- 2005年 Linde社の新液化機を購入 毎時60リットル

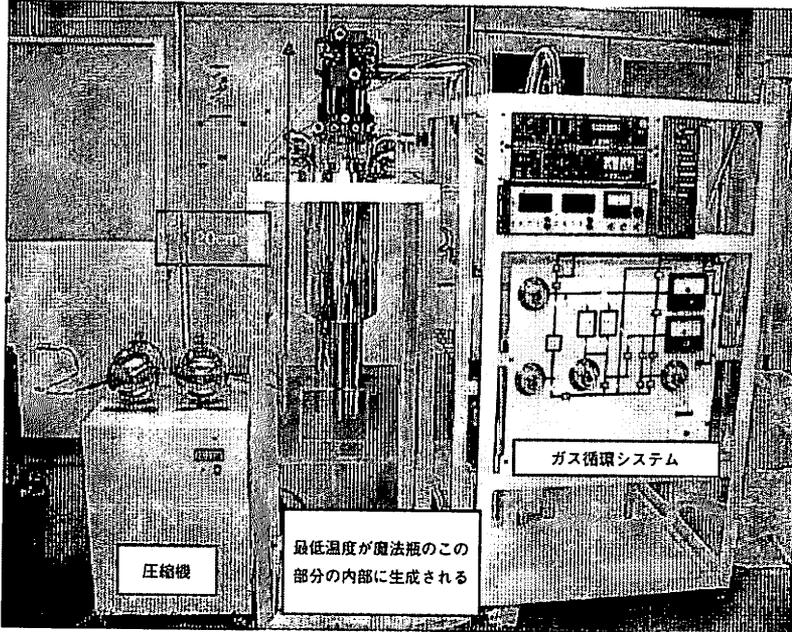
## 8. 主な研究成果 (論文等)

1. 液体ヘリウム3の熱伝導度測定により、ランダウ理論の検証を行う。
2. 固体ヘリウム3の磁化率測定より、磁気相転移での磁化の減少を発見。
3. 固体ヘリウム3の圧力効果を調べ、磁化のスケーリング則を発見。
4. 超流動ヘリウム3の第4音波測定より、超流動のコヒーレンス長を実験的に初めて導出。
5. ヘリウム3とヘリウム4の混合液中に立つ特異な波 (スピン波) を発見。
6. 核スピンの配列が電子の電気伝導度に大きな影響を与えることを発見。
7. 新規な超流動の発見を目指し、ヘリウム3とヘリウム4の混合液の0.0001 K (世界最低温度) までの冷却に成功。しかし、超流動転移は発見できず、転移温度はこれ以下であることが判明。
8. 膜状の超流動ヘリウム3では、3次元の超流動と異なる相転移を示すことを発見。
9. 超流動ヘリウム4中の量子化された渦の挙動を実験的に観測し、理論予測の再現に成功。

## 9. 液体ヘリウムを使用しない新しいタイプの希釈冷凍機

2006年には世界の5研究機関で液体ヘリウムを用いない新しいタイプの本格的な希釈冷凍機 (最低温度 $\sim 0.01$  K以下) の製作が始まり、日本でも本学が初めてこの最先端技術開発に成功した。液体ヘリウム (減圧して1 K) の代わりにパルス管冷凍機 (3 K) を用い、ヘリウムガスのジュール・トムソン膨張を利用した希釈冷凍機で、液体ヘリウムを貯蔵する部分が不要となるため体積的に $1/3$ 以下のコンパクトな冷凍機である。また、ヘリウムガスは密封され

ているので資源の保全にも有効である。また、完全自動化にも成功し、メンテナンスフリーという特色も有している。ただ、パルス管冷凍機に固有の振動があるため、防振対策が施されている。現在さらにコンパクトな2号機の製作が進められている。



(はた とおる・大阪市立大学理学研究科教授)