

人と熱との関わりの足跡（その9）
 —東北大学片平地区における極低温の研究—
Footprints of the Relationship between Humans and Heat (Part 9)
-Research of Low Temperature Science in the Katahira Campus of Tohoku University-

野島 勉（東北大学）
Tsutomu NOJIMA (Tohoku University)
e-mail: t.nojima@tohoku.ac.jp

1. はじめに

1952年、東北大学片平地区の金属材料研究所（金研）にヘリウム液化機が日本で初めて導入され、国内での絶対0度に迫る本格的な極低温研究が始まった。金研の低温施設には当時全国から多くの研究者が集まり、昼夜を問わず盛んに実験研究がなされるとともに、ここで培われた低温科学の知識が国内の研究機関に普及した。これらの歴史より、東北大学金研は「日本の低温科学発祥の地」と呼ばれる。しかし、実はそれ以前からのヘリウム液化に向けた努力と奮闘があった。

学内においてもヘリウム液化機導入後、低温科学研究は片平地区を中心として広範囲な分野へと波及し、液体ヘリウムの需要が急増することとなった。これに応えるため、1971年に全学共同利用施設となる「低温センター」が設立され、その後、現在の「極低温科学センター」へと発展を遂げている。最近では、東北大学全体での液体ヘリウムの使用量は年間25万リットルにも達するようになった。これは全国的に見ても屈指の値である。この発展は、ヘ

リウム液化機の能力向上だけでなく、ヘリウム供給・回収体制のソフト・ハード両面での進化に支えられたものであるが、同時にこれを可能にした歴代の低温関係の研究者、および技術職員の献身的な努力も見逃せない。

本稿では、過去の記録や筆者が見聞きした情報・体験を基に東北大学片平地区における極低温の研究に係る歩みについて紹介する。2021年に東北大学極低温科学センターは設立50周年を迎えた。偶然ではあるが、同年に本稿のきっかけとなった日本伝熱学会創立60周年記念でのシンポジウム講演の機会を与えられたことに、何かの縁を感じている次第である。

2. 東北大学における液体ヘリウム供給体制の歩み
 2.1 ヘリウム液化時代以前の奮闘（1929-1952）

東北大学での低温研究の歴史は、冒頭で述べた1952年より20年以上前の金研低温研究室建設までさかのぼることができる[1-4]。大正の末期（1925年頃）、極低温における金属研究の重要性を認識した金研初代所長の本多光太郎先生は、日本における低温科学研究の開拓の必要性を感じ、低温研究室の建設を立案した。当時欧州留学中であつた青山新一先生（当時理学部化学教室助教授、後に金研教授）を担当者に指名し、命を受けた青山先生は、液体ヘリウム発祥の地である、オランダライデン大学Kamerlingh Onnes研究所滞在を経て日本に帰国した。その後、1929-1930年にかけて、財団法人斎藤報恩会（仙台）から主な援助を受け、空気液化機および水素液化機を含む、低温研究棟が建設された（図1）。特に水素液化機は翌1931年に入所した神田英蔵先生（後に金研教授および低温センター初代センター長）により整備・運転され、液体窒素温度（77 K）よりはるか低温の液体水素温度（20 K）までの研究が可能となった。ここに日本の低温科学研究の礎が築かれたわけである。



図1 当時の金属材料研究所低温研究棟
 （斎藤報恩会より極低温科学センター低温科学部へ寄贈された写真）

当時の世界的な情勢を見ると、1908年にオランダライデン大学の **Kamerlingh Onnes** が大気圧での沸点 4.2 K のヘリウムの液化に成功し、1911年にこれを用いた水銀の超伝導を発見していた。1926年には断熱消磁による 1 K 以下の極低温到達への可能性も提案され、1933年にパークレイの **Giauque** が 0.25 K に達していた。一見、日本の低温研究はかなり後発であったように思えるが、1930年当時、液体ヘリウムが使える研究施設は世界中でも、ライデン大学の他、ドイツの **Physikalisch- Technische Reichsanstalt (PTR)**、ロシアのモスクワ大学、カナダのトロント大学等と数える程しかなかった[1, 3]。当時の液化方式は **Onnes** 型と呼ばれるカスケード方式(液体窒素および液体水素で冷却したヘリウムガスを **Joule-Thomson** 膨張で液化させる方式)を基にしたものであり、液体水素を必須としていた。加えてさらにこの方式では大量の液化が難しかったことが広く普及しなかった要因と思われる。よって国内初のヘリウム液化を目指して、すでに製品化の段階にあった水素液化機(最初の水素液化は 1892年 **Dewar** による)を導入したのは、賢明な判断であったと思われる。

とはいえ液体水素温度の研究でも当時としては日本で初めてのこともあり、デュワー(魔法瓶)用のガラス材料の選別から始まって諸所の低温技術に関する苦労があったようである[1, 5, 6]。1934年に英国ケンブリッジ大の **Kapitza** が、液体水素を使わず、断熱膨張と **Joule-Thomson** 膨張のみで大量のヘリウム液化が可能となる手法を開発して以降、青山先生らは、この方式でのヘリウム液化機実現へ向け新たな舵を切った[7, 8]。しかし **Kapitza** 型は材料および加工の両面において精度の要求が厳しかった。その上、第二次世界戦中における資材面、工作面での難や国内の基礎研究への厳しい風当たり等、様々な不運が重なり、試作のヘリウム液化機は未完成のまま終わった。当時の時代背景や諸事情については文献[2, 3-4, 6]を参照されたい。これとは別に神田先生は 1938年に脱着法という手法を用いて 6 K というところまで迫っていたことも記しておきたい[3, 4]。ヘリウム液化を目指してあらゆる方向からたゆまぬ努力が続いていた。

2.2 ヘリウム液化機の導入と発展 (1952-1971)

第二次世界大戦敗戦後の混乱からしばらくして、

日本全体における研究復興への気運が高まるとともに、金研でも袋井忠夫先生や神田先生の研究室でヘリウム液化に向けて研究が再開していた。1950年頃、袋井先生が **Journal of Applied Physics** の広告で、ヘリウム液化機が市販されていることを見つけ、同研究室の渋谷喜夫先生らに相談された。彼らは、「すでにヘリウム液化を誇る時代から、液体ヘリウムを利用して極低温物性を研究する時代になったという」観点からこれを購入すべく、政府(当時文部省)への予算要求に奔走された。これが **A. D. Little** 社製の **Collins** 式液化機である(図2)。その後様々な国内関係各所の先生方の尽力もあって要求が認められ、1952年に日本初となるヘリウム液化として金研に導入された。

Collins 式液化機は図3にその概要を示すよう、2機の断熱膨張エンジンを有し、これによりヘリウムを約 10 K まで冷却後、**Joule-Thomson** 膨張により 4 K までさらに冷却して液化するという **Kapitza** 型の延長にあるものであった。膨張エンジンがレシプロからタービンに変わった現在のヘリウム液化機においても、その基本的な設計観念は受け継がれている。

この液化機は当時としても大変高価であり、戦後の復興途上にある国内情勢および国際情勢(当時、朝鮮戦争も勃発し **GHQ** の支配下にあった)より、2代目は当分買えないと考えられた。そこで予算交渉時の文部省の意向もあり、国内の物性研究者に共同利用されることとなった。いわば現在の全国共同利用施設の走りとなったわけである。導入までの苦労は袋井先生や渋谷先生の記録[2,9]に残っている。

導入直後、金研内でのヘリウム回収・精製設備も

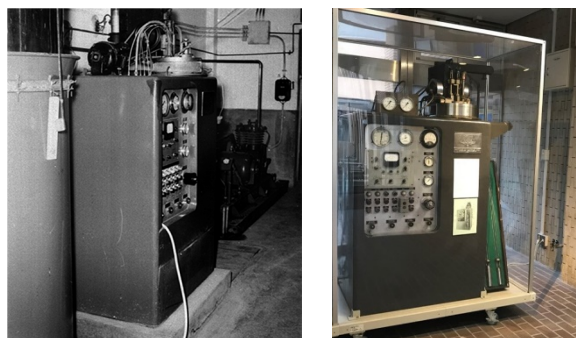


図2 日本初の **Collins** 式ヘリウム液化機
左：設置当時の写真(東北大学資料館写真データベースより)、右：現在金属材料研究所展示

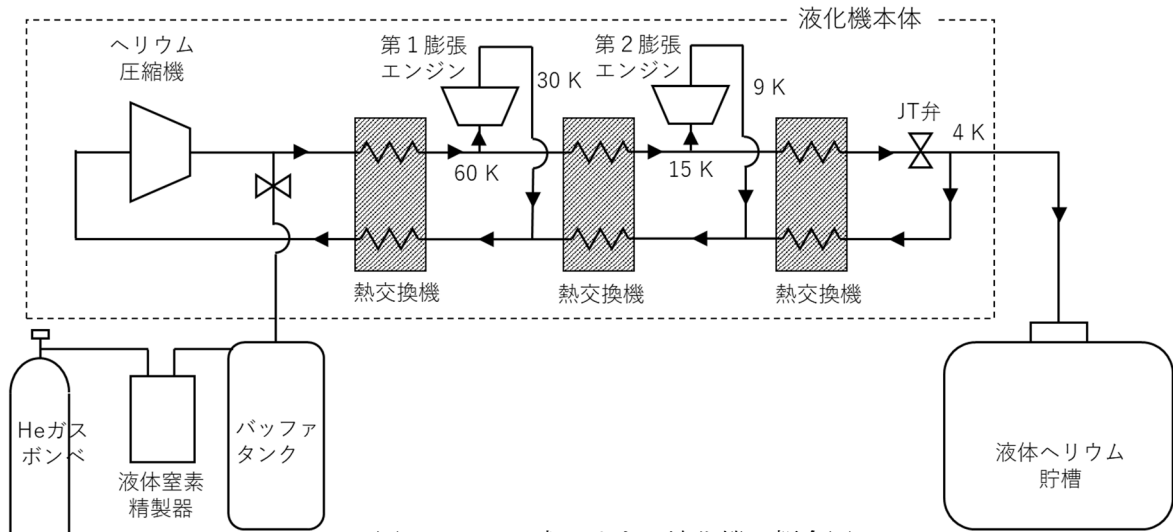


図3 Collins式ヘリウム液化機概念図

整備されるとともに、国内の大学、研究機関から、長い人は半年、短い人でも数週間滞在して、盛んな低温研究がなされた。こうやって東北大金研で培われた極低温研究の手法や設備設計、低温技術のノウハウは全国に普及することとなった。この間、ヘリウム液化能力も4 L/hから圧縮機を増強することによって8 L/hに上昇され、実験に使用された液体ヘリウム量は、年間600 - 800 Lに達した。当時の実験装置の容量が3 - 5 L程度とすると、一年中休みなく実験が行われていたことが伺える。

金研でのヘリウム液化機導入が成功を取めた背景に、液体水素時代に培われた研究者および技術職員（当時技官）の高い技術力と情熱があったことは特筆すべきである。製品化されてまだ間もないこともあり、この頃の液化機および圧縮機等の周辺機器は、日常的に故障が発生していたらしい。特に技術職員の方々は液化機および周辺機器の分解修理を含むメンテナンスを自力で実行されていた。これは低温（熱力学）・真空・高圧・機械・電気につながる幅広い知識と経験を持ち合わせないと不可能なことである。故障があった際には、日曜、祝日でも研究最優先とばかり献身的に対応されたという話である[10]。また、この時代の液化に使われた圧縮機は騒音が大きく、多くの技術職員は耳を悪くしたという話も聞く。現在とは比べ物にならない劣悪な環境の中、頑張ってこられたことが想像される。

金研でのヘリウム液化機導入が成功裏に進むにつれ、Collins式液化機は1958年の電気試験所（現NIMS）を皮切りに、東京大物性研、大阪大等々様々な大学、研究機関に導入されることとなった。

これにより全国共同利用施設として金研ヘリウム液化機の使命は徐々に役目を終えることとなる。

2.3 東北大学低温センター発足（1971-1996）

金研低温施設のヘリウム液化機は、全国的な共同利用研究のみならず、東北大学内の低温科学研究も著しく発展させた。当初から液体ヘリウムの利用範囲は、金研から片平地区にあった理学部、工学部、電気通信研究所（通研）へと広がっていたが、他の部局からも利用の要望も増え、8 L/hのCollins型液化機では学内需要に応えられない状況になってきた。実際、供給量は1970年には年間4,000 Lに迫る勢いであった。そこで初代センター長となる神田先生をはじめとする金研の関係者、片平地区低温研究関係者らの尽力により、1971年に全学共同利用施設となる低温センターが金研の構内に新しい建屋とともに設立された（図4）。

低温センターは、液体ヘリウムを供給と低温実験機器開発という2本柱の使命をもって組織構成された。単なる液体ヘリウムの供給のみならず、低温物性物理学、低温工学の先導的發展を図った訳である。供給関係では、国産第1号機となる日本酸素社製60 L大型ヘリウム液化機（図5）、同社製ヘリウム回収・精製圧縮機、総量1,260 m³の回収ガスボンベカードル、フィリップス社製水素液化機等の設備が主力機器として新たに導入された。60 L/hというヘリウム液化能力は当時としては飛びぬけて大きなものであるが、これをさらに国産製としたことは、ヘリウム液化機開発に挑んできた神田先生の強い思いによるものと聞く。神田先生は青山先生とともに



図4 1973年当時の低温センター建屋
(東北大学低温センター1973年広報誌より)

に前述の Collins 型液化機導入以前から、日本酸素と共同してヘリウム液化機の試作を行っていた。ヘリウム液化機の完全国産化は関係者の悲願でもあったように推測される。

機器開発関係では、共同利用実験室を設け、そこに当時としては最高スペックとなる 10 T の磁場を発生する NbTi 超伝導マグネットとクライオスタット、NMR 用 6 T 高均一超伝導マグネット、リークディテクター等の実験機器が整備された。10 T 超伝導マグネットは当初予定されたスペックの磁場が出せず、当時機器開発の担当をされていた金研の能登宏七先生や坂爪新一先生は苦労されたようである。線材の見直しをして、まき直しを行うことにより予定の性能を引き出すことに成功した。その後、1978年に 8 mK までの極低温、9 T までの強磁場で実験が行える ^3He - ^4He 希釈冷凍機(米国 SHE 社製)も整備された。希釈冷凍機の納入にまつわる詳細は金研の小林典男先生の記事が極低温科学センターだよりに掲載されている[11]。これら共同利用機器に関して、一日で消費される液体ヘリウム量が 10 T マグネットでは 15 L、希釈冷凍機で 20 L と、当時としてはかなり大きかったことも目を引く。つまり通常の研究室では簡単に維持できない装置を用いた実験が、低温センターの豊富な液体ヘリウム供給に支えられて可能となった訳である。実際、これらの装置は学内のみならず学外からの研究者にも頻繁に利用され、利用日数は 10 T マグネットでは年間 300 日、希釈冷凍機で 150 日に達した。

液体ヘリウム供給関係に話を戻すと、低温センターの目新しい機能として、各部局に設置されたサブセンターの存在が挙げられる。供給回収フロー図

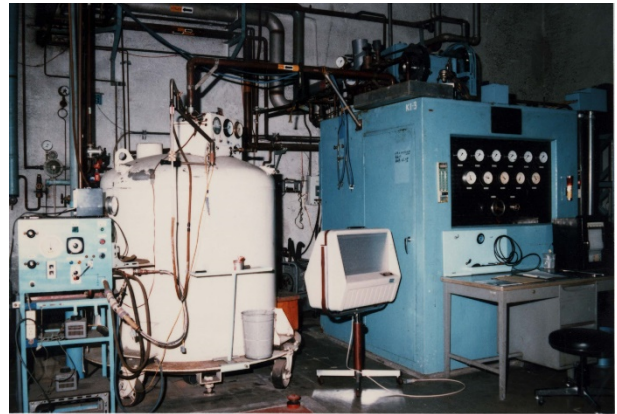


図5 日本酸素社製 60L ヘリウム液化機
(写真：東北大学極低温科学センター蔵)

(図 6) に示すよう、低温センターより遠く離れた部局の研究者は、サブセンターにトラック運搬された 100 L や 50 L の中型容器から、実験装置や小分け容器へ液体ヘリウムの汲み込みができ、サブセンター内で使用後のガスヘリウム回収もできるようになった。低温センターへ直接出向かなくてもサテライトとして機能するサブセンターで主な用事が済む仕組みである。これにより、研究者にとって液体ヘリウムの利便性はかなり良くなり、液体ヘリウムの需要やそれを利用する研究分野は年々と増加していった。サブセンターは 1971 年に金研と工学部(青葉山地区)、1972年に通研(片平地区)、1976年に理学部(青葉山地区)、1981年に科学計測研究所(科研、片平地区)へと順次設置されていった。但し人員の追加は厳しく、どこのサブセンターも各部局所属の技術職員によって運営されていた。低温センターとサブセンター間の情報交換や技術交流は自然となされ、各部局の技術職員は「低温」というワードで連携されていた(低温関連の技術職員による忘年会や旅行といった交流も頻繁に行われていたらしい)。

一方、低温センターではサブセンターで充填された回収ガスポンペを替わりの空ポンペに交換し、低温センターへトラックで運搬するという日々の業務が発生することとなる。一回の運搬で可能な量は 5 本組ボンベカードル 35 m³(液体に換算して 50 L) である。これは年間 10,000 L 供給した場合の一日の使用量に相当する。これに加え、前述の液体ヘリウム中型容器の供給・回収のための運搬も加わることになる。ヘリウムの蒸発は待って欲しくないため、どんな悪天候の中でも必要となれば、低温センター

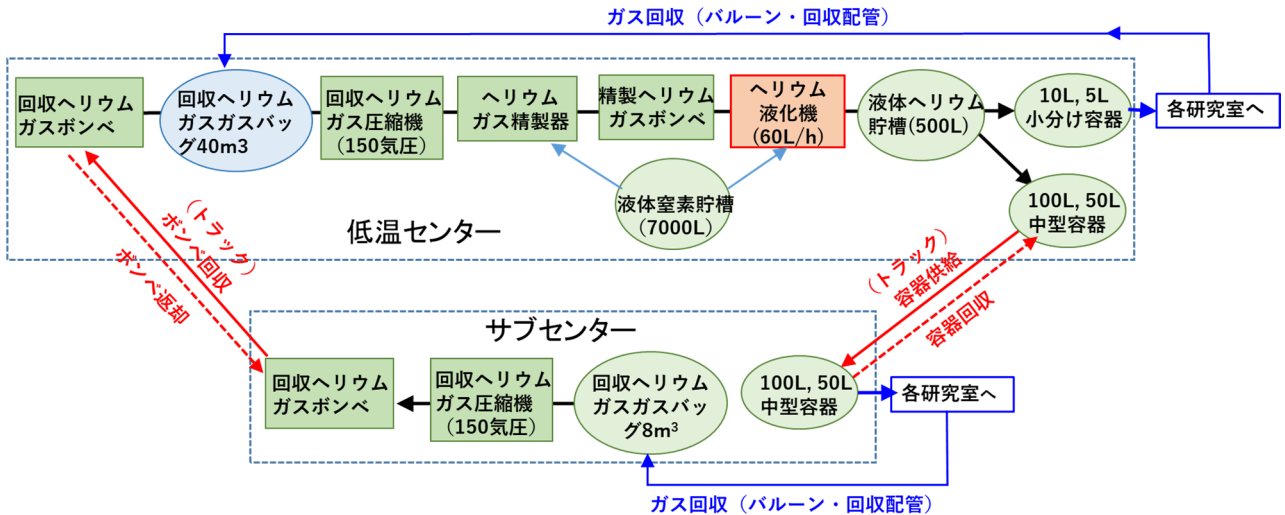


図6 低温センターとサブセンターのヘリウム供給・回収フロー図

の技術職員はサブセンターにトラックで出向いた。低温センターに昔から在籍していた技術職員との世間話では、運搬にまつわる思い出話が今でもよく出てくる。

さて順調に動き始めたように見えた低温センターの60L液化機および周辺機器は、設置から5年を待たず膨張エンジントラブルや圧縮機ピストン破損等といった問題を起こすようになった[12]。それでもCollins型液化機の時代から培われた技術力により、長期の中断なく安定供給がなされていたようである。10年後の1981年には液体ヘリウム使用量は20,000Lに達し、15年後の1986年までに4年計画の液化機の大規模改修を行いながらも年間使用量が40,000Lに達している。20年後の1991年には、60,000Lとさらに増加を続け、故障続きの液化機は満身創痍となりながらもフル稼働といってよい状況となった(ヘリウムの汲み込みロス等を考慮に入れると、使用量の倍以上の液体ヘリウムを製作していた)。そこでより高い液化能力を持つヘリウム液化機への更新が学内からも強く要望されるようになった。

学内の低温センター関係者の多大な尽力により、液化機更新の予算要求が認められ、1993年にそれまでの2.5倍となる150L/hの能力を持つヘリウム液化機(スイス・リンデ社製TCF50型)を含むヘリウム液化システムが導入されることとなった(図7)。この能力上昇は膨張エンジンがレシプロ式からタービン式になったこと、当時職人芸であったJT弁をはじめするバルブ調整が自動化されたことに

よる。

液化能力の上昇に加え、この3代目の液化機の新たな特徴は、液化機本体がヘリウムガスの精製機能を内部に持つことであった。ユーザーより回収されてきたヘリウムガス中には、空気をはじめ多くの不純物が含まれており、これらが低温で固化すると液化機の膨張エンジンに大きなダメージを与える。よって、2代目の液化機までは、図6に示すよう、ヘリウムを液化する前段階として、液体窒素による精製処理を行わなければならなかった。内部精製装置の追加により、この作業の必要性がなくなり、高い液化能力も相まって技術職員の労働環境は大幅に改善されたと言える。この結果、1996年には70,000Lまで増加した液体ヘリウムの需要へも十分対応

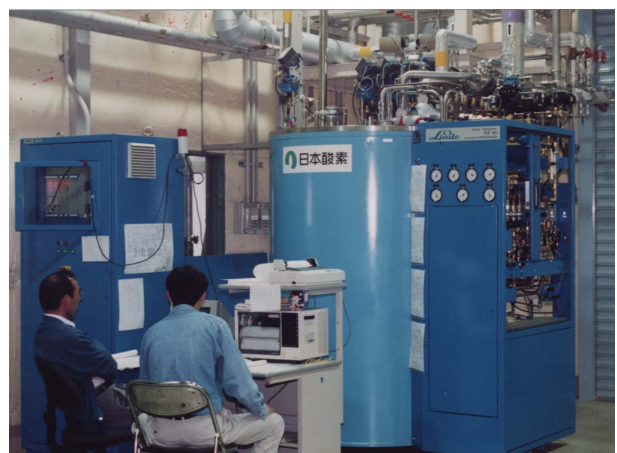


図7 リンデ社製150Lヘリウム液化機(写真：東北大学極低温科学センター蔵)

できるようになった。

2.4 極低温科学センターへの発展（1996-現在）

東北大学における極低温科学研究の新たな飛躍を期して、1996年に「低温センター」は理学部物理学学科で独自に運営されていた「理学部附属極微量エネルギー物理学実験施設」と統合し、「極低温科学センター」として新たに発足することになった。これまでの低温センターは極低温科学センター低温科学部として、片平地区の金研、通研、科研、流体研、反応研等の研究所群への低温研究支援を、極微量エネルギー物理学実験施設は極低温科学センター極低温物理学物部として、青葉山地区の理学、薬学、工学研究科の支援を行うよう分業体制が敷かれた。これにより片平地区の低温科学部では、それまで行っていた青葉山地区への液体ヘリウム配達やガスボンベ回収業務がなくなった。

この改組と同時に、片平地区では、関連部局からの予算協力を得て、地下の共同溝を通して液体ヘリウムを使用する建物をつなぐヘリウムガス回収網が建設された（図8）。この結果、建物毎に回収配管とガスバッグ、回収ガスを圧送するための小型のペビコンを設置すれば、どこでも液体ヘリウムを用いた実験が可能となった。これに伴いサブセンターに

設置された回収ガス圧縮機と高圧ガスポンペは廃止され、ガスポンペのトラックによる運搬業務もなくなった。センターの業務負担が低減すると同時に研究者の液体ヘリウムの利便性はさらに大きくなり、結果として液体ヘリウムの需要はさらに増加することとなった。極低温科学部による青葉山地区への液体ヘリウムでの供給体制が整う2000年までには、年間使用量が120,000Lまでに達した。

それまで調子よく働いていた3代目ヘリウム液化機も2006年頃から、電子部品やバルブ類の故障が頻繁に起こるようになり、同年液化用圧縮機も大きな故障に見舞われた。通常、液化機およびその周辺機器の寿命は、概ね10年と言われており、この不具合は設置から13年間のフル稼働状態に近い酷使によるものと考えられた。そこで更なる液化能力と効率向上および省電力化を狙った、液化システムの更新の計画を立てることとなった。

大学内でのマスタープランへの組み入れ、さらに文科省への予算要求を含め、様々の関係者の協力を得て、2009年度に200L/hの能力をもつ液化機（リンデ社製L280型）を含む、4代目のヘリウム液化システムへの更新が実現した（図9）。このシステムではこれまで以上の高効率化（液体ヘリウム1L当たりの電力量と液体窒素量の低減）も図られたが、



図8 東北片平キャンパスヘリウムガス回収網（赤線）と共同溝内の配管の写真（左上）



図9 リンデ社製 200L ヘリウム液化機
(写真：東北大学極低温科学センター蔵)

特筆すべき新規性は、小分け容器に組み込むための、液体ヘリウムポンプが導入されていることである。これにより、これまで 30 分程度かかっていた 100 L 小分け容器への汲み出しが、5 分程度で済むようになった。この効果もあって 2018 年にまでには、年間使用量が 160,000 L を超えるまでに至った。供給先も、従来からあった金研，多元物質科学研究所（多元研，旧科研・反応研・素材研が統合）に加え，2009 年に原子分子材料科学高等研究機構，2014 年より星陵地区の東北メディカルメガバンクが新たに加わった。

図 10 に 1971 年の低温センター設立から現在に至るまでの東北大学全体の液体ヘリウム使用量の推移を示す。2000 年以降は，極低温物理学部による青葉山地区への供給の合算となっているが，概ね 2/3 が低温科学部（片平地区）分である。これまで述べて来たように，東北大学での液体ヘリウムの使用量は年々増加の一途をたどってきた。2009 年から 2012 年は，液化システム更新と東日本大震災の影響，2020 年以降は新型コロナウイルス感染症の流行が原因で，実験数が減り使用量が落ち込むものの，それらを除くと年間 250,000 L（片平地区で 160,000 L）という全国でも屈指の使用量を記録している。今後も急増こそはないにしても，減少することはないという見込みである。

あらためて振り返って見ると，液体ヘリウム供給の上昇は，その時々でのネックとなっていた問題（液化能力，内部精製機作業，回収ガス運搬作業，ヘリウム汲み出し時間）を順次改善したことによると気づく。もちろん，これらがうまく機能したのは，

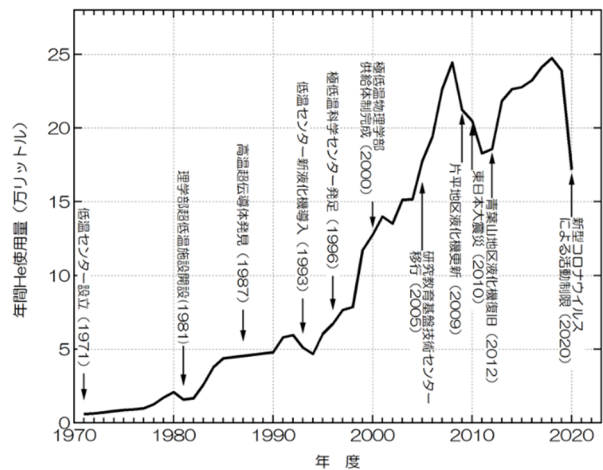


図 10 東北大学における液体ヘリウム使用量の推移（1971 年から現在）

ハード面での変化に対し，現場の職員が新たな機能への理解，それに伴うルール作りとシステム構築，ユーザーへの情報発信や個別指導等々とソフト面でも柔軟に対応できたからである。ヘリウムの注文を一つとっても，現在ではかつての電話・ファックスから Web サイトからの注文へと変わり，リアルタイムでの回収率や使用料金がわかるようなシステムへと進化させたことが，ユーザーの利便性につながっている。また近年の高効率な液化システムの内部は複雑であり，ブラックボックス化しているため，故障の際は，分解修理という職人技だけでは太刀打ちできず，コンピュータ制御や通信部をいかに理解・利用して早期に原因を特定するかにもかかっている。これからも変貌する業務内容に，「低温」という専門性を失うことなくいかに対応できるかが，今後の更なる発展のカギとなるであろう。

3. 東北大学の極低温の研究の歴史

これまで，液体ヘリウム供給の歩みについて述べてきたが，極低温の研究の歴史について以下簡単に述べる。1952 年以前の液体水素を用いた低温研究では，水素液化機を整備した神田先生の研究室の成果が主となる。

神田先生らは来たるべく液体ヘリウム時代の準備期間として，また日本で液体水素温度（20 K）を手にした数少ない（多分当時は唯一の）研究室として，様々なテーマに取り組んでいた。例として，(1)凝縮気体の物性（フッ素液体と固体），(2)液体水素温度までの相転移の研究（酸素の 3 重点以下の相転移曲線），(3)低温でのカロメトリー（アルコールの

液体・固体比熱，熱緩和，ガラスを含む結晶成長過程)，(4)低温での光の分光（ベンゼンやトルエンの吸収スペクトル），(5)低温 X 線カメラ，等がある[1]。室温や窒素温度でやってきた物性実験を，水素温度でも同じようにできるようにするという方向性があったように伺える。とにかく当時は何をしても相当開拓的であったということであるし，ここで培った低温実験技術は後の液体ヘリウム時代においても大いに役立った。

さらに低温の数少ない研究者として，物性物理学以外の問題も持ち込まれ，液化ガス製造の諸問題（空気液化プラントでの爆発問題や重水素の製造）にも取り組んだ。当時の苦労や研究の詳細は文献[1]を参照されたい。

最初のヘリウム液化機が導入された 1952 年からは，研究の方向やスピードが一変したようである。というのも Collins 式液化機の普及もあって，世界的にも低温物理学が定着しつつあり，競争の時代であったためである。前述したように，液体ヘリウムを利用した低温実験は全国共同利用の研究だけでなく，学内でも通研，理学部，工学部での研究に使われていた。勉強不足なこともあり，筆者は全部の研究を把握しきれていない。ここでは筆者の所属する金研でのテーマの一部を抜粋する。

当時の世界的な流れとして，低温での磁気共鳴（NMR や ESR）と超伝導を含む金属の基礎物性があった。金研の神田先生の研究室では，古くから金研での磁性研究の学風もあったことから，固体水素の NMR や固体酸素の帯磁率，Fe 塩（ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 等）や Co 塩（ $\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 等）の ESR や常磁性緩和の研究が行われた[1]。特に Fe 塩や Co 塩の研究は，日本のお家芸となる「低次元磁性」の走りとなった。これらの研究のため，断熱消磁法を用いて 0.03 K の極低温にも達していた（断熱消磁に用いた大型水冷マグネットやガラスのクライオスタットは，斎藤報恩会の博物館に展示されていたが，閉館とともにそのレプリカが極低温センター低温科学部に移されている）。

金研の袋井先生・武藤芳雄先生の研究室では，超伝導，ドハースファンアルフェン効果，合金の輸送特性，半導体の電流磁場効果，化合物半導体の光・超音波物性，高い臨界温度の超伝導化合物，といった低温での金属物性を開拓した[13]。特に超伝導の研究は，後に金研に設置された強磁場超伝導材料研

究センター（当時超伝導材料開発施設）での強磁場マグネット開発にもつながる（金研で低温と強磁場は深いつながりをもって発展してきた歴史もある）。

この他，通研では超伝導エレクトロニクス等，理学部では超伝導体，磁性体の極低温における基礎物性等，工学部では超伝導マグネット応用等において様々な研究が展開されるようになった。

1971 年に低温センターが設立されから，その利便性向上もあって，低温科学研究の分野はより学内の広い範囲へと広がっていった。開設以前の金研，通研，理学部，工学部に，教養部，科研，非水溶液化学研究所（非水研）が加わり，それぞれ核断熱消磁・光物性，微粒子磁性・重い電子系，分子物質の光物性等が研究されるようになった。その後 1980 年代に入ると，歯学部（1980 年），医学部，抗酸菌病研究所（1983 年），薬学部（1986 年）いった部局も液体ヘリウムを利用するようになった。そこでは液体ヘリウムは極低温の基礎研究ではなく，SQUID（超伝導量子干渉計）といった超伝導デバイスや，MRI（NMR-CT）や NMR（分子構造解析用）装置内の超伝導マグネットを冷却する手段として使われるようになった。

低温センター 20 周年記念誌（1991 年）に金研の増本健先生（第 7 代低温センター長）が「液体ヘリウムは，かつては低温科学研究に携わる人達だけの秘境の霊泉でしたが，液体ヘリウムの利用は今では広く一般の科学研究における必須の実験手段になって来ているのではないのでしょうか」と述べられている[14]。つまり低温センター開設 20 年後には，当初基礎研究の一部でしかなかった低温科学の分野が，低温の素子やマグネットといった機器開発へ使われ，やがてはそれらを組み入れた低温機器利用を含む分野まで広がったことになる。

1996 年に極低温科学センターに改組されてからも，上記の分野広がり維持されつつ，液体ヘリウムを使った実験数は増加した。図 11 に 2020 年の東北大学における研究テーマの分布を示す。物性基礎が全体の約 50%，物性応用と材料研究が合わせて約 25%を占めている。化学・生物・薬学・農学研究が 15%と比較的大きな割合となるが，このほとんどが NMR に利用されている。数は少ないが，医学・医療関係（1%）や素粒子・原子核・放射光（0.5%）にも，守備範囲は広がっている。

共同利用機器を用いた低温実験環境の提供は，極

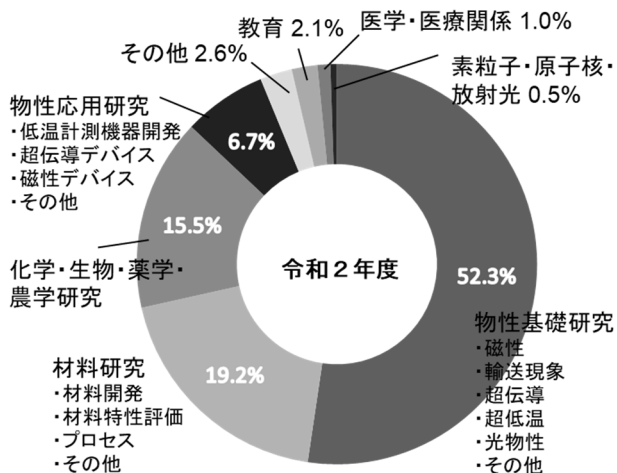


図 11 液体ヘリウムを利用した研究テーマ分布

低温科学センター改組後もセンターの液体ヘリウム供給と並ぶもう一つの柱となる業務であった(2006年の法人化後、共同利用の部分は解除されたが、ユーザーの強い要望もあり現在でも実質的には継続されている)。上述の通り、低温センターの時代では10 Tの超伝導マグネットや希釈冷凍機はその主力機器であったが、低温実験装置の普及やヘリウム供給能力の大幅な向上とともに、10 T以上の磁場を発生する装置は一般の研究室レベルでも所有可能となり、1 K以下の極低温に到達可能な研究室も珍しく無くなってきた、それとともに、センターの共同利用頻度は減少してきた。2000年くらいから、共同利用実験室の方針を「一般の研究室では長期維持管理が難しい装置を集中管理して使いやすくする」、つまり低温を必ずしも専門としない研究室へターゲットを変更し、実験室の再整備を進めてきた。現在では、共同利用設備として、SQUID磁化測定装置(MPMS)2台、SQUID顕微鏡システム、リークディテクター2台、9/11T超伝導マグネット、トッピング式³He冷凍機、ファラデー型マグネット付³He冷凍機、ベクトル超伝導マグネットシステム、小型希釈冷凍機が整備されている。特にSQUID磁化測定装置、各種超伝導マグネット、希釈冷凍機の利用頻度は高く、夏期と冬期の休業期間を除いて、常に実験室で誰かが実験している状況に戻ってきている。この状況は今後の新既学内低温研究者開拓へのきっかけとなるかもしれない。

4. ヘリウムを取り巻く環境の変化

「ヘリウムの一滴は血の一滴」とは、1952年当初

から低温センター設立後もしばらくの間、研究者の間で使われてきた教訓である。これは当時ヘリウムガスの入手が難しく[3]、その貴重なヘリウムを苦勞して液化していたわけであるから、領けることである。当時の先生方の話を聞くと、液体ヘリウムの供給は、朝から15分刻みのスケジュールで行われ、15分経ってもヘリウムが装置に溜まらない時は、予冷不足・技術不足として中断されるという厳しいものだったらしい[15]。いわば供給者主導でヘリウム実験が行われたと言ってよいであろう。筆者が低温の研究を始めた1980代後半には、研究室の先生から昔話として聞いてはいたが、すでに「血の一滴」という意識は薄れていたように思う。

一方、現在の状況を見るとヘリウムの注文は極低温科学センターのホームページ上でいつでもでき、100 L単位で供給日や時間も指定して入手できる。センターの技術職員が、利用者の要望に応じて準備する、利用者主導の体制となり、液体ヘリウムを使った極低温実験はかなり身近になったと感じる。特に物性科学研究では、液体ヘリウムは研究に必要なインフラの一つと言われるまでになっている。

ところが、近年「ヘリウム危機」と呼ばれるヘリウムの入手困難な状況が幾度となく生じるようになってきた。現在世界中で出回っているヘリウムは天然ガスの副産物として産出され、0.3~1%のヘリウム濃度の天然ガスを低温分離精製することによって得られるものである(昔はモナズ石中にあるヘリウムを高温で熱することにより抽出して得ていたらしい)。しかしヘリウムを含む天然ガス田は世界中でも米国(57%)、カタール(28%)、アルジェリア(9%)、オーストラリア(3%)、ロシア(2%)、ポーランド(1%)といった限られた場所にしかなく(括弧内の数字は2018年の(株)ガスレビューの発表による産出割合)、日本はヘリウムの調達を100%輸入に頼っている。天然ガス田があればそこに必ずヘリウムが存在するのではなく、分子が小さく軽いため透過しやすいヘリウムを溜め込むための、特殊な岩盤構造を持ったガス田にしかヘリウムがないのが実情である。日本は過去には米国から95%を輸入していたが、2018年に予定された米国土地管理局(BLM)での備蓄ヘリウム輸出終了を見越して、カタールにその軸足を移しつつある。2021年の財務省統計によると米国から54%、カタールから44%の輸入へと変化している。いずれにせよ日本

におけるヘリウムの入手は国際情勢に左右される不安定な要素を常に抱えていることになる。

記憶に新しいのは、2002年の米国湾岸スト、2007年の米国でのヘリウムプラントの不具合、2012年の米国での複数のヘリウムプラントの不具合と定期メンテナンス重複、2017年のカタール断交、2019年以降の需要と供給のアンバランスによるタイト化、による国内ヘリウム不足である。特に2019年以降のタイト化は、米国のシェールガス（ヘリウムを含まない天然ガス）による置き換えやBLMの民間払い出し、中国・韓国等アジア圏でのヘリウム需要国の新興等、の複合要因によるものである。この原稿を書いている2021-2022年では、これに新型コロナウイルス感染症の影響による米国コンテナ船積荷の遅延問題も重なり、学術研究用のヘリウムが国内ではほとんど入手できない状況になっている。

日本におけるヘリウムの用途は、本稿の主題である低温（冷却）だけでなく、多岐にわたっている。図12に2021年の国内ヘリウム販売実績の内訳を示す（日本産業・医療ガス協会の発表による）。液体としての利用は医療分野における磁気共鳴画像イメージング（MRI、16%）であり、液体ヘリウムが磁気共鳴現象に不可欠な強磁場を発生させる超伝導マグネットの冷却に使用される。一方、ヘリウムはガスとしても半導体（17%）や光ファイバー（9%）の製造プロセスに欠かせないものとなっている。これはヘリウムガスの持つ高い熱伝導性や化学的安定性（反応がないこと）による。その他、ヘリウムの原子サイズが小さい（小さな穴でも透過することや天然の空気にほとんど含まれない（質量分析しやすい））ことを利用して、リークテスト（13%）にも広く使われている。溶接や分析、バルーン・飛行船、その他も含めると、ガスとしてのヘリウム用途が75%以上を占めることになる。

液体ヘリウムの学術研究利用に戻ると、その国内販売量は全体の5%程度にしかない（図12中の低温工学がこれに相当）。研究機関にはヘリウム液化システムが設備されている所も多く、蒸発したガスを回収して再液化していることから、実際の使用量として比較したら、その割合は30～40%程度まで増えると予測されている。とはいえ「ヘリウム危機」と言える現状において、医療と産業（経済）を優先させれば、もともと商業的需要の小さい学術研究にヘリウムが回ってこないことは致し方ない

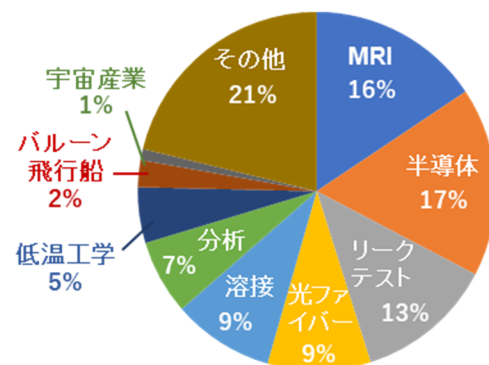


図12 2021年国内ヘリウム販売量の内訳（日本産業・医療ガス協会の報告データを集計）

ことなのかもしれない。低温科学研究が過去だけでなく未来においても産業に多大な影響をもたらすこと（例えば、MRI、量子コンピュータ、リニア新幹線、核融合炉等々）を考えると、この危機の中でもなんとか低温科学の火が絶えないようにさせたいものである。様々の方面から支援・協力を低温関係者の一人として切に願っている（2019年12月に「ヘリウム危機」に臨んでの緊急声明が、日本の6学会、2協議会、40研究機関の共同で発表されている[16]）。

一方で石油と同様にヘリウムも掘り続けると近い将来（30年～40年後）枯渇してしまう、というより根本的な危機も囁かれて久しい。この場合、(i)新たなヘリウム生産技術、もしくは(ii)ヘリウムの代替となる原子・分子を使った技術、の開拓が必要であろう。(i)に関しては、例えば大気中に含まれる微量（500 ppm程度）のヘリウムを採取する方法や将来的には核融合の副生成物として発生するヘリウムを採取する方法等が可能性としてはある。しかしこれらは大量生産には向かず、かつコストのかかる方法であることから有望とは言えないかもしれない。新たな技術の出現に期待している。

(ii)に関して言えば、絶対0度付近の極低温環境を得るための寒剤としてのヘリウムの代替はない。現在使われている主な寒剤は、液体酸素（大気圧での沸点90 K）、液体窒素（77 K）液体水素（20 K）があるが、これを減圧して（蒸気圧を下げて）さらに冷却しようとしても、3重点（酸素で54 K、窒素で63 K、水素で14 K）で固化してしまうため、それより低温に達することが難しい。ヘリウムには

量子効果の影響で、この3重点がないことが鍵となっている（ただし、液体水素は20 K以上の環境で十分な場合（例えば高温超伝導体をつかった応用等で）、冷却に使用した後、蒸発ガスを発電や燃料電池等のクリーンエネルギーに変換できるため、低温とエネルギー輸送を組み合わせた応用に発展できそうである）。一方、半導体や光ファイバー作製プロセスに不可欠なガスとしてのヘリウムの代替え技術も、模索されてはいるが見つからない。上述のようにヘリウムガスの高い熱伝導性と化学的不活性さといった特徴が必要なわけだが、両方を同時に満たす代替え元素はないというのが現状であろう。

以上のようにヘリウムは低温科学研究だけでなく様々な用途（特に産業面）で利用されているが、それを取り巻く入手環境は、これからは安泰とはいえない。筆者が関係する低温科学研究といった比較的小さな利用規模で考えると、上述のような国際情勢や資源問題に左右されないためには、研究機関において100%に近いヘリウムリサイクル率を実現することが理想であろう（現状、東北大学では91%で上げ止まりとなっている）。貯蔵能力も含めたヘリウム液化システムが輸入量変動に対するバッファとなることも期待できる。そうすると今以上の利用者への啓蒙と回収設備の徹底的な管理が求められ、「ヘリウムの一滴は血の一滴」に近い教訓が戻る時代が再び来るのかもしれない。

5. おわりに

東北大学片平地区を中心とした、日本の低温科学発祥の地としての、液体ヘリウム供給体制の歩みと研究の歴史と現状を振り返ってきた。筆者が東北大学で職を得たのは、1999年であり、それ以前から今日に渡る90年以上の歴史は、過去の文献や先輩諸氏から伝え聞いた事象を中心にして文章にした。十分注意して、調べたつもりではあるが、正確な史実を反映していない箇所も残っているかもしれない。特に初代、2代目のヘリウム液化機を導入するまでの経緯は、本稿に登場する先生方だけでなく様々な方の関与があり、よりドラマチックな展開があったと聞く（本稿ではそこまで踏み込めなかった）。補足や修正部があればご指摘いただければ幸いである。

近年、GM冷凍機やパルス管冷凍機といった冷凍機の進歩と普及により、液体ヘリウムを消費しなく

ても、電気さえあれば4 K以下の極低温環境が得られるようになった。これらの冷凍機では動作流体としてヘリウムが使われるが、閉じたガス回路内で使われるため実質的なヘリウム消費にはつながらない。医療現場ではMRI装置に対して冷凍機を接続して、蒸発したヘリウムガスを液体に再凝縮させるシステムが普及しつつある。実際、図12におけるMRIの割合は2018年度では19%であり減少傾向にある。一方、東北大学の現状を見ると、冷凍機を導入する研究室の数は増え、液体ヘリウムの需要は減少するものと予測されたが、依然としてその兆しは見えない。冷凍機そのものが高価なこともあるが、装置の維持に必要な電気料金やメンテナンスにかかる費用がネックになっているようだ。ヘリウム液化機で大量生産することによるコストダウンや、それぞれの実験方法の利点と欠点（例えば、冷凍機では液体ヘリウムが不要であるが、冷えるのに時間がかかり、装置の構造も制限される）を勘案すると、今後液体ヘリウムと冷凍機をつかった実験装置の比率はある値でバランスするのではないかと予測している。

幸いなことに、東北大学極低温科学センター（片平地区）では、2022年3月に5代目となる液化システム（230 L/h）が導入される。青葉山地区では、2023年度の稼働を目指して次世代放射光施設の建設が進められており、ここでの液体ヘリウム供給も極低温科学センター（青葉山地区）がサポートすることになっている。これに伴って、学外へのヘリウム液化サービスに向けた体制を整えつつある。ヘリウム不足の続く昨今において、東北大学のヘリウム供給・回収システムの機能が大学内だけでなく、学外（特に東北地方の地域産業）にも有効活用される時代がくることを期待している。

謝辞

本原稿の作成にあたって、佐々木孝彦先生（金研教授、極低温科学センター長）から様々な資料の提供をいただいた。これらの資料には、以前に退職された武藤芳雄先生と小林典男先生（いずれも金研教授）が研究室に残されたものも多く含まれる。ここに感謝します。

[本稿について] 本稿は、2021年に郡山で開催された日本伝熱シンポジウムのオーガナイズドセッション「人と熱との関わりの足跡」におけるご講演

に修正・加筆して頂いたものである。ご講演と本稿のご執筆に心から感謝したい。(熱の科学技術史研究会)

参考文献

- [1] 神田英蔵, 低温 40 年の回顧と反省, 物性 1972 年 1 月号, (1972) 1-1.
- [2] 袋井忠夫, わが国における低温物理研究の起源, 低温工学, **3-5** (1968) 240.
- [3] 武藤芳雄, 低温研究発祥の地・仙台, 低温工学, **33-6** (1998) 354.
- [4] 小林典男, 金属材料研究所における低温研究の歩み, 金属材料研究所創立百周年記念誌, (2017) 201.
- [5] 神田英蔵, 軌道にのった極低温の実験研究, 科学, **25-2** (1955) 59.
- [6] 長崎誠三, ヘリウムはなぜ液化できなかったか?, 固体物理, **13-10** (1978) 614.
- [7] 青山新一, 講義 XI, 金属の研究, **12** (1935) 282.
- [8] 青山新一, 液体ヘリウム温度による低温の研究, 科学, **9-12** (1939) 445.
- [9] 渋谷喜夫, 思い出と所感, 低温工学, **10-1** (1975) 23.
- [10] 丹野武, 河野三尾留, 熱き心をもって, 東北大学低温センター15周年記念誌, (1986) 9.
- [11] 小林典男, 低温センターが生まれた頃, 東北大学極低温科学センターだより, **12** (2021) 12.
- [12] 佐藤常夫, 液体ヘリウムの供給状況, 東北大学低温センター5周年記念誌, (1976) 3.
- [13] 研究部門・研究施設の歴史, 金属材料研究所創立百周年記念誌, (2017) 69.
- [14] 増本健, 東北大学低温センター20周年にあたって, 東北大学低温センター20周年記念誌, (1991) 1.
- [15] 深瀬哲郎, 液体ヘリウム事情今昔, 東北大学極低温センターだより, 2 (2001) 1.
- [16] 例えば, 日本物理学会ホームページでの声明, <https://www.jps.or.jp/information/2019/12/helium.php>