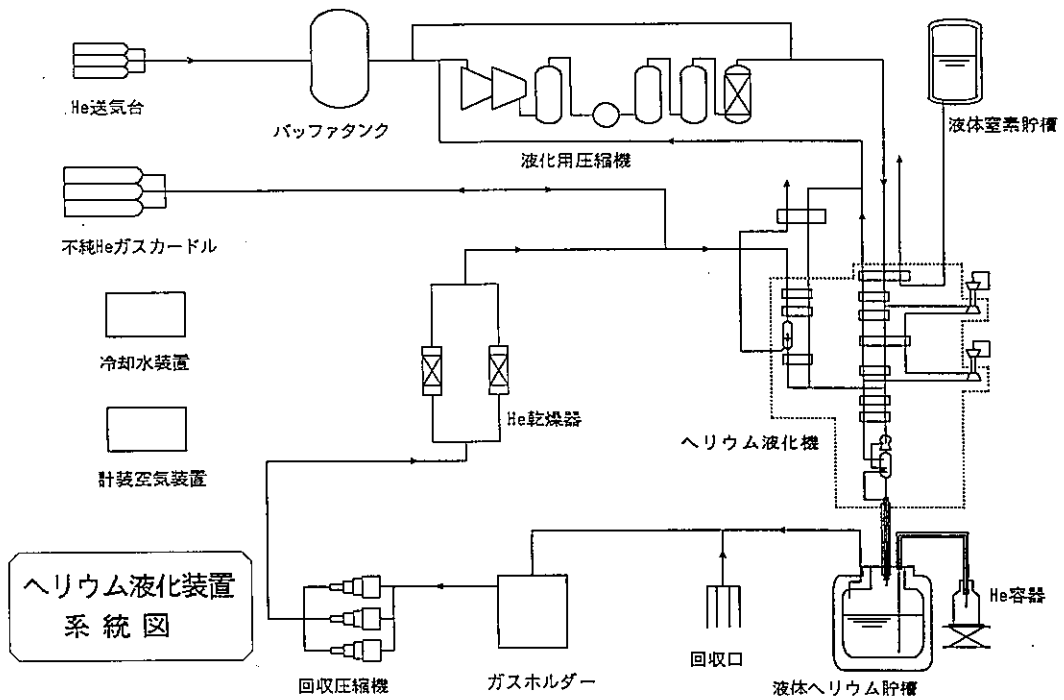


低温センターだより

第 17 号

1993 年 9 月



東 京 大 学

低 温 セ ン タ ー

目 次

低温センターのraison d'être	工学部物理工学科 国府田 隆 夫	1
紹介：大阪市立大学理学部低温物理研究室	大阪市立大学理学部 児 玉 隆 夫	6
銅酸化物CuGeO ₃ のスピン・パイエルズ転移	工学部物理工学科 内野倉 國 光	10
新しいヘリウム液化システムについて	低温センター	17

低温センターのraison d'être

工学部物理工学科 国府田 隆夫
(現在：日本女子大・理・数物科学科)

低温センターには、これまで20年以上にわたってお世話になった。標記の私の所属は今日(1993年3月31日)までで、明日から新しい職場に移る。その機会に、これまでの感謝の意をこめて寄稿の求めに応じたいと思う。そこで、低温センターの役割と存在意義に関して、これまで折りに触れて考えたり感じたりしたことを、随想風に書き綴ってみることとした。堅苦しい感じを避けるため、少々気取った言い方が半可なフランス語で“raison d'être・レゾンデートル(存在理由)”とした。纏まらない点は、停年退官という不安定な時期の臨界揺らぎによるものと、ご寛恕をお願いしたい。

1. 液体ヘリウムが希望の星だった頃

液体ヘリウムという物質を私が初めて現実のものとして意識したのは、1954年(昭和29年；以下、西暦年号のみを記す)の晩夏のことだった。学部3年生の夏休みに、東北大工学部の友人を頼って仙台に行った。そのとき、東北大構内の赤煉瓦の建物(金研)に連れていかれ、その一室で(たしか当時は国内で唯一の)ヘリウム液化機を目のあたりにした。夏休み中のため運転はしていなかったと記憶しているが、神棚のご本尊を拝むような敬虔な気持で液化機を眺めた。その建物を出て、蟬の鳴きしきる人気のない構内を歩きながら、そのうちに何時か液体Heを使って実験が出来るような時が実際にくるのだろうか、考えた記憶がある。しかし、当時の世相は厳しく、東京も仙台もまだ戦災の焼跡だらけだったから、そのような可能性はとても現実のものとは思われなかった。青函連絡船の洞爺丸が台風に遭って転覆沈没して、約1,200名もの人命が失われたというニュースを聞いたのも、この時、仙台から東京に帰った直後のことだった。液体ヘリウムどころか、一部の分野を除いては、まともな物性物理の研究がまだ許されない状況だったのである。

まもなく、大学院の学生になった。当時は寒材といえばドライアイスと液体空気だけだった。空の液体空気の容器を載んだジープに同乗して、川崎(鶴見だったか)の昭和電工に液体空気を取りに行く仕事が、大学院生に当番として回ってきた。そんな苦労があったから、液体空気も貴重な実験資材で、手持ちが足りなくなると互いに分け合って大切に使っていた。しかし、当時でも新着のPhysical Reviewなどを見ると、極低温での半導体のサイクロトロン共鳴や電気伝導の実験が液体ヘリウムをふんだんに使ってなされている。そんな論文を読んで海外の研究の水準の高さに圧倒された。当時は、液体ヘリウムなど、とても手の届きそうもない高嶺の花のように思われたのである。

しかし、まもなく、この国の物性研究にも、半導体物理を中心にした新しい発展の機運が起きた。川崎駅の裏手にあった東芝マツダ研や田無の電気試験所で、He液化機が稼働

し初めた。東大では、駒場の理工研に同居する形で物性研が設立された(1957年)。その翌年に極低温部門が設置されて、助教授として大島恵一先生(第三代低温センター長)が着任された。夏のある日、液体ヘリウムを使った実験の説明会があるから出席するようにと指導教官の神山雅英先生から言われて、駒場の理工研に出掛けた。説明役は理工研の助教授だった早川宗八郎先生で、お茶菓子がわりに配られたアイスクリームを舐めながら、液化機やデュワーの図が描かれているプリントを眺めたことを覚えている。1958年8月のことだった。その頃の液体ヘリウムは、やがて来るべき時代への夢を象徴する、希望の星のような物質であった。

2. 液体ヘリウムのない物性研究なんて

1961年に、現在の六本木に移ったばかりの物性研に助手として赴任した。当時の物性研は、全国の物性物理研究者の期待を集めて出来たばかりで、名実ともにわが国の物性研究の中心であり、研究所全体が高揚した雰囲気であった。そこで初めて、それまで夢の象徴だった液体ヘリウムを使った実験をする機会に恵まれたのである。その当時の新鮮な感覚はいまだに忘れられない。実験の日には朝からデュワー瓶に試料を入れて、予冷をしながら液化室からの呼び出し電話をいまやおそしと待ち受ける。やがて呼び出しを受けて、空港で離陸の順番を待つ航空機のパイロットのような期待をもって、液化機の前に行列に加わる。自分たちの番になると、液化機の前昇降台にデュワーを乗せて、トランスファー・チューブから液体ヘリウムが勢いよく送り出てくるのを懐中電灯の光に透かして見守る。底に溜まった液面が勢いよく上昇してくるのは、いつ見ても快いものだった。手の届かない天上の星と思われていた液体ヘリウムが、かくて、いまや現実のものとなったのである。

しかし当時(1960年代)でも、全国の大学で液体ヘリウムが使えるのは(先輩の金研を除けば)物性研だけだったから、所内の研究者は特権的な立場にあった。(実際、液体ヘリウムを扱った実験の経験があるという点でも、当時の物性研の助手は優位にあったようで、物理関係の学科や講座の増設が盛んだった各地の大学に望まれて転出する機会が少なくなかったように思う。)同じ東大でも、本郷の研究グループは、自家用車にデュワーを乗せてはるばる六本木までやってきた。東京オリンピック以前の都内の道路は現在とは比較にならないほど空いていた。しかし、それでもデュワーに溜めて本郷に持ち帰ったら、折角の液体ヘリウムが蒸発して無くなっていたという苦労談を、当時の若手だった三浦登さん(現在、物性研)や内野倉国光さん(工学部物工)に聞いた。

だが、そんな恵まれた日々を送っているうちに、最初の頃の新鮮な感動がだんだんと稀薄になってきた。それでも、発光・反射・吸収のような固体分光の実験では、スペクトル構造の分解に極低温の威力が無視できない。特に、その頃から盛んになってきた半導体の励起子分光では、スペクトルの微細構造を細かく分離できるという点でも、超流動状態の液体ヘリウムIIに試料を浸すと液体空気のような泡立ちに邪魔されずに光学測定がで

きるという点でも、液体ヘリウムは重宝だった。しぜん、液体ヘリウムが自由に利用できる物性研での研究は、極低温測定の効果著しいような研究を優先的にやるべきであると考え、姿勢に傾いた。極低温という手段を必ずしも必要としない種類の研究にも、物性物理として多くの重要な課題があったに違いないのだが、当時を顧みると、どこかでその種の研究を軽んじる気持ちがあったように思う。このような意識は、私だけのものではなく、また極低温に限らず他の極限技術に関しても、あったのではなからうか。それが、その後の物性研の進路に少なからぬ影響を及ぼしているのではなからうかと、最近になっても、思うことがある。

3. 1960年代の米国で

上記のような感想（あるいは反省）を持ったのは、特別の意味を持たないほど液体ヘリウムがふんだんに使用できた米国での研究生活の経験を通してだった。1965年に物性研から工学部に戻ってすぐ、米国に1年余の出張をした(1966-1968)。滞在した研究所では、廊下に液体ヘリウムを満たした貯蔵器が常時置いてあった。それを自分で引っ張ってきて、ヘリウムガスで加圧して実験室のデュワー瓶に注ぎ込めばよかった。唯一の問題は調子のよいトランスファー・チューブを確保しておくことで（それがしばしば問題だったが）、それさえ確保してあれば日曜日に一人でも実験ができる。蒸発したガスは、回収せずにそのまま空気中に逃がしてしまう。簡便きわまるだけに、かつての夢の液体ヘリウムがまったく平凡なものとなってしまった、やや味気無い思いを経験したのである。

そのような日々を過ごしていたころ、次のような疑問をもった。いったい、液体ヘリウムというものは、それまで疑いなくそう信じてきたように、高度の物性研究になくてはならないものなのだろうか。暫くして到達した結論は、次のようなものだった。液体ヘリウムは、物性研究にとって決して不可欠のものではない。それをまったく使わなくても、一流の水準の研究を行うことは可能である。欠かせない要件は、液体ヘリウムではなく、まず良質の試料、次にアイデアである。良質の試料がなければ、新しい機軸につながるアイデアも得られないし、たとえアイデアが得られてもそれを実行できない。そのアイデアを実行する上で極低温が必要になる場合ももちろんあるが、それは補助条件（重要ではあるが）のひとつに過ぎない。広い物質界を対象とした物性物理の研究では、柔軟な思考を養うことがまず大切である。その意味で、液体ヘリウムを利用した実験を特別視した今までの考え方には、反省すべき点があったのではなからうか。たしか、クリスマス休暇で人の姿の少なくなった研究所で、窓の外に降り頻る雪を眺め、そのころ米国で流行っていた坂本九のスキヤキ・ソング（「上を向いて歩こう」）のメロディーを耳にしなが、そんなことを考えた記憶がある。

その頃の私の研究テーマは、II-VI化合物半導体の励起子分光の研究だった。日本では限られた種類の物質（CdS, ZnS など）の単結晶を作製している研究グループはあったが、多くの種類の同族結晶にわたって系統的な研究を行う態勢にはなかった。それが、滞在

していた研究所の廊下の試料ケースには、豊富な種類の化合物結晶が取り揃えられてあって、必要とするときにはいつでもそれを利用できた。そこで、同じ構造をもつ3種類の結晶(CdSe, CdS, ZnO)について、ある種の測定を系統的に行ったところ、思わぬ効果が現れたのである(T. Koda and D. Langer : Phys. Rev. Lett. 20, 50 (1968))。その実験でも液体ヘリウムは用いたが、それが不可欠というのではなかった。注意深く測定したら液体窒素でも同じ結果が得られていただろう。ただ、その現象の本質を見抜くには、物質の種類を系統的に振ったということが、極めて有効だったのである(O. Akimoto and H. Hasegawa : Phys. Rev. Lett. 22, 916 (1968))。

少数の典型的物質を対象を限って、その物性だけを綿密・詳細に掘り下げる研究が大切なことは、ゲルマニウム、シリコンの精密物性の研究で実証済みである。そこでは、液体ヘリウムの利用が不可欠だった。しかし、半導体物理の創成期に受けたこのような印象が強烈だったあまりに、その後も、この種の極限主義(極低温、高純度)・精密主義の研究だけを金科玉条視する傾向に赴いていたのではなかろうか。(たとえば、銅鉄主義という言葉があるが、そこには多様な物質世界の豊饒さを不当に蔑視、あるいは軽視した考えが露わである。)新しい物性を掘り起こすには、極限主義・集中主義と同様に、あるいは時によってはそれ以上に、物質の多様性という観点を軽視しない態度で行うことが大切である。それが、滞米中の研究から得たもっとも印象的な経験と教訓だった。

4. そして、現在

それから、速くも30年近い時が経った。その間の日本社会の変貌の激しさは世界史的な規模であったが、それと同様に、極低温を利用した物性研究にも大きな変化が訪れた。本郷キャンパスや各地の大学でも、自由に液体ヘリウムが使えるようになり、ある意味ではかつての液体窒素ほどの有り難みもない通常の寒剤となった。このような時代に、初めて液体ヘリウムの汲み込みを経験する大学院学生諸君は、どんな感想を持つのだろうか。戦後派の私どもが感じたような特別の感慨とは別種の、むしろ純粋な物理現象としての興味で、デュワー瓶の底に溜まってくるこの不思議な液体の様子を見守っているのだろう。液体ヘリウムを使った実験を特別視する気持ちも、われわれの時代よりずっと薄れてきているに違いない。その意味で、いわば極限技術の普及化、大衆化の時代に入ったように思われる。

かって、液体ヘリウムは限られた種類の純粋物質の精密物性をより詳細に調べるのに、なくてはならない物質だった。しかし、その一方で、必ずしも液体ヘリウムを必要としない物性研究も少なくなかったろう。その割合は、多様化時代とか複雑系の物理とかいう言葉が関心を引いている現在、いっそう増しているに違いない。たとえば、磁性体とならんでわが国の伝統的分野のひとつである高分子物理や液晶の基礎研究では、液体ヘリウムが使えなくても、いくらでも意義のある研究を行うことができる。この種の物質の

研究では、先に述べたような物質の多様性と、そこから本質的概念を抽出する優れたアイデアが身上である。もちろん、そのような世界でも従来の測定温度範囲を液体ヘリウム温度まで拡げてみれば、今まで見えなかった様相が見えてくる場合がある。たとえば高分子の誘電緩和現象で、極低温域に現れるプロトンの挙動がその例だろう。また、超伝導マグネットを使ったNMR装置が高分子科学に欠かせない時代ともなった。限られた研究者に利用されていた極低温技術が、現在は多様な物質を研究対象とするあらゆる分野の研究者を潜在的なユーザーとして持つに至ったのである。

このことは極低温技術・超低温技術に限らない。SOR, 中性子、超高圧、可変波長・超短パルス・レーザーなど、あらゆる「極限測定技術」についていえることだろう。これらの技術は、初期の段階では多少とも特殊技術であり、限られた比較的少数のユーザーだけに支えられて市民権を得ていた。しかし、やがて機が熟せば、従来は疎遠に思われていた周辺の領域に次々と新しい利用者、支援者を獲得してゆくようになる。そのような発展の過程を健全に辿れるかどうか、特定の極限技術の発展の鍵を握っているのだろう。東大の低温センターは、歴史的な意味でも、そのような健全な発展をこれまで辿ってきた極限技術利用の典型例といえるのではなからうか。そこにこそ、低温センターならではの *raison d'être* があつたし、それはいまもなお存在している。では、将来のセンターの姿はどうあるべきだろうか。そこでは物性科学の多様化・複雑化・学際化という背景と、軍縮ならぬ熱縮という時代の要請とが、極低温を利用する多くの研究の面でも考慮されなければならない状況となるように思う。現在、議論されている多くの種類の「極限技術」センター構想の手本となるような将来の発展を、伝統のある東大低温センターに期待している。

(記/1993年 3月31日)

研究室紹介：大阪市立大学理学部低温物理研究室

理学部 物理 児 玉 隆 夫

私達の研究室では、超低温における量子液体・量子固体および核磁性を主要なテーマとしています。実験装置としては1段および2段の核断熱消磁クライオスタットがそれぞれ1台、 ^3He - ^4He 希釈冷凍機が1台、それにヘリウム温度のクライオスタットが数台あります。これらはすべて研究室で自作したものです。測定手段としては pulse および cw NMR、SQ UID 磁束計、Torsional oscillator、第1・第2・第4音波などで、現在は以下のような課題に取り組んでいます。

1. ^3He - ^4He 混合液の超流動探索

超流動 ^4He 中を運動する ^3He 準粒子間には弱いながらも引力的相互作用が存在することがいくつかの実験から確かめられている。したがってBCS理論から、十分に低い温度が実現されれば我々はもう1つ新しい超流動現象を手に入れることができる筈で、東京大学理学部の小林・池畑研究室と協力して数年前からこのテーマに取り組んでいる。この系では純粋な液体 ^3He の場合とは異なり、条件によってs波超流動とp波超流動の両方が見られる可能性がある。2段の核断熱消磁クライオスタットを用い、銅を寒剤としたこれまでの冷却テストで到達温度 $97\ \mu\text{K}$ を得ている。これはこれまでの世界記録である約 $200\ \mu\text{K}$ を大きく破るものではあるが、超流動転移の兆候は見られていない。今後ともさらに工夫を重ねて挑戦して行くつもりである。

2. 第4音波による超流動 ^3He の研究

第4音波は小さな隙間に入れられた超流動ヘリウム中を伝わる音波である。常流動成分は粘性のため動くことができないので、超流動成分のみが圧力波として伝播する。通常 μm オーダーの微粒粉末を詰めたセルの中にヘリウムを満たして実験する。このため液は非常に大きな表面積を持つ。

^3He はクーバー対を形成して超流動になるので、 ^4He と違い healing length は数100 Å程度の値を持ち、壁の表面からこの距離にわたって超流動成分が抑えられる。したがって隙間が十分に小さければ超流動密度の平均値はバルクの場合に比べて小さくなり、サイズ効果がみられる。超流動密度は第4音波の音速から直ちに求められるので、液の入っている pore の大きさとサイズ効果との相関から逆に healing length がわかる。このようにして超流動 ^3He のクーバー対の拡がりの程度を知る目安となる healing length の大きさとその圧力依存性を調べた。

上に述べたように超流動成分が healing length にわたって抑えられるのは、実は ^3He 準粒子が壁の表面で乱反射されるときの話である。多くの場合、これが実現されているがサイズ効果は ^3He 準粒子に対する境界条件と密接に関連しているという側面を持つ。最近、壁の表面を ^4He で覆うことによって境界条件をある程度変えられることがわかった。

^3He 準粒子が壁で反射されるとき、specular であるか diffusive であるかを測る目安として specularity factor S が用いられる。第4音波の音速を定在波の共鳴周波数 f から求めるとき、 f より超流動密度がまた共鳴の Q 値からは S がもとまる。壁の表面を覆う ^4He の層数を変えながら f と Q の同時測定を行えば、壁近傍での超流動密度の振る舞いと ^3He 準粒子に対する境界条件とがどのように関連しているかわかる。このようにして、超流動密度と ^3He 準粒子の振る舞いとが強く関連していることが確かめられた。

^4He は 25 bar 以上の圧力では固体になるので、上記の実験を圧力を変えながら行えば ^4He が液の場合と固体の場合とで比較できる。実験結果は固体の ^4He では境界条件を変えるのにまったく効果のないことがわかった。

3. 超流動 ^3He の相図

超流動 ^3He は有限の角運動量を持つクーパー対のボーズ凝縮によるものである。このことに関連して、磁場のないときでも A 相、B 相と呼ばれる2つの超流動相が存在し、バルクの液では $P-T$ 面の相図における両相の安定領域ははっきりと決まっている。A 相は磁場に強いので磁場の下ではその領域は増大し、さらに強い磁場の下では A₁ 相と呼ばれるもう一つの相が現れる。

この実験の目的は、クーパー対の波動関数が球対称でないことの影響が、液を狭い空間の中に入れてときに相図の上でどのように現れるかを調べることである。実験は $1.2 \mu\text{m}$ の隙間を持つセルで行った。その結果純粋な液体 ^3He では A、B 両相の境界線に大きな変化がみられること、また界面を液体 ^4He で覆うことにより境界線はバルクの相図に近づくことが見いだされた。この結果は部分的には現存の理論で説明できるが、変化の向きが正反対のものもある。

A-B 転移についてはさらに確証を得るために隙間の大きさの異なるセルを作って実験を続けている。

4. 第4音波の音響屈折率

第4音波の実験では常流動成分を固定するために微粉末を詰めた容器に液をいれ、この中を音波が伝播する。これまでの第4音波の実験ではすべてこの方法を採用してきた。そのため音波は微粉末の間を曲がりくねりながら伝わって行き、直線的に伝播するよりも長い距離を走ることになる。この補正のため音響屈折率 n が導入される。 n は微粉末を詰めた容器の porosity を p として $n = 2-p$ が経験則として成り立っている。

そこで我々は極めて細い線の束をまっすぐに張ったセルをつくり、この中を第4音波を伝播させる予備的な実験を行ったが、 n は1にはならず、むしろ上の経験則に近い結果を得た。もしこれが本当であれば音響屈折率について根本から考え直す必要がある。今後さらに詳細な実験を行う予定をしている。

5. ^3He フェルミ液体の粘性

常流動状態の液体 ^3He の性質はランダウのフェルミ液体の理論でよく記述される。しかし、これまでの実験から超流動転移温度近くの非常に低い温度領域では粘性率は理論から予測される T^{-2} 則に載らないことが知られている。このような温度領域では ^3He 準粒子の平均自由行程が長くなるので、もとの局所的な理論を修正して適用しているが、この修正が十分でない為なのか或いは粘性率が本当に T^{-2} 則に従わなくなっているのかはよくわかっていない。

我々は捻れ振子を用いた新しい測定方式により、粘性率と平均自由行程に関連した slip length ξ がそれぞれ独立にもとまるような実験を進めている。

6. 超流動 ^4He 膜上の偏極原子状水素 ($\text{H}\downarrow$) の研究

超流動 ^4He 膜上に吸着された偏極原子状水素 $\text{H}\downarrow$ は、 ^4He 膜上を自由に運動する2次元ボーズ気体と見なすことができる。このような2次元のボーズ気体はこれまで実験的に実現されたことのない系である。この系では ^4He 膜上での $\text{H}\downarrow$ の水素分子への再結合によって徐々にその数が減少し、熱平衡状態での実験は難しい。そこで外部から $\text{H}\downarrow$ を供給することで定常状態の2次元偏極原子状水素を実現し、Kosterlitz-Thouless 転移の観測を目指している。

現在面密度 10^{12} の2次元 $\text{H}\downarrow$ を85 mKまで冷却できている。一連の測定から $\text{H}\downarrow$ 冷却のネックは ^4He 膜の ripplon-phonon 間にあること、冷却の限界を決めている熱の流入源としては ripplon の熱伝導によるらしいことがわかった。 ^4He の膜を ^3He に置き換えるなどの方向で $\text{H}\downarrow$ をさらに冷却できると考えている。

7. 増強核磁性体の相転移点近傍における電気抵抗

核磁性研究分野の中で、我々は増強核磁性体を核-電子結合系という観点から興味を持っている。その第一歩として、 PrCu_6 単結晶の原子核系が秩序状態に入る過程で電子系にどのような影響を及ぼすかを電気抵抗の変化として調べた。その結果

- 1) 核磁気相転移点で電気抵抗に鋭いピークが見られる
- 2) 転移点以下の温度では抵抗値は急速に減少し、さらに低い温度では再び一定となる
- 3) 約40ガウスの磁場で抵抗のピークは完全に消失する

ことが見いだされた。これらの振る舞いは系の強磁性への転移とも関連しているので、磁

化と電気抵抗の同時測定を行う方向でさらに実験を進めている。この研究は筑波大学 物質工学系の大貫氏との共同研究によるものである。

8. ^3He - ^4He 混合液とPt粉末とのkapitza抵抗

超低温生成において到達温度を決めるものは寒剤の温度ではなく、現実には Kapitza 抵抗と呼ばれる界面熱抵抗である。我々の ^3He - ^4He 混合液の超流動探索において決定的な役割を果たす白金粉末と混合液との Kapitza 抵抗の測定を行った。測定結果より、熱流は容器の壁と混合液の温度の 3 乗の差に比例することが見いだされた。また、超低温では磁場にも依存するようである。

9. パルス管冷凍機の開発

パルス管冷凍法は内部の気体以外には機械的な可動部を全く持たない冷凍法として1963年に見いだされた。最近熱音響理論の適用によりその動作原理に対する理解が急速に進むとともに到達温度も次々と更新されている。我々は rotary valve を用いた double inlet 方式により現在到達温度 31 Kを得ている。今後も動作原理の解明につとめるとともにヘリウム温度の実現を目指して努力するつもりである。

銅酸化物CuGeO₃のスピンのパイエルス転移

工学部物理工学科 内野倉 國光

(電話 03-3812-2111 内線6845)

私の研究室では、最近では高温超伝導体とその周辺物質の研究を中心にして研究を行って来た。その後者つまり周辺物質の研究から生まれた研究成果の一つについて述べよう。なおこの研究の解説を“固体物理”誌 [1] に書いたので、ここでは少し異なった視点で書こう。

1992年の6月頃、当時博士課程2年であった長谷正司君が高温超伝導体周辺物質として種々の銅酸化物を検索しているうちにCuGeO₃という物質が存在することを見いだした。それがこの研究の発端である。この物質の結晶構造は図1のようである [2]。この図から分かるように、この物質はCuが2つのOをはさんでc軸方向に鎖状に連なり、一方GeはOを間にはさんでやはり鎖状に連なっている。この物質は絶縁体であり、CuはCu²⁺であると考えられ、従ってS = 1/2のスピンがCuの位置に局在していると考えられる。従ってCu-O₂の鎖同士の相互作用はa軸方向にはGe-O鎖により妨げられ、一方b軸方向にはCu-Cu間の距離が4.24 Åでc軸方向の2.94 Åよりもかなり長い事から、Cu-O₂鎖内の反強磁性相互作用が支配的な一次元スピン系あるいは一次元スピン鎖が弱く二次元的に結合したものである。

さてこの物質の磁性の研究は、初めは粉末試料で帯磁率測定が行われたが、11月頃、極めて小さな針状の単結晶を束ねた試料の帯磁率の測定を行った。その結果を示したのが図2である [3]。この図から明らかになったのは、この物質が14 K付近で、おそらく何らかの磁氣的相転移を起こし、(常磁性状態から別の)磁氣的に新しい相に移っていることである。さらに、我々にとって極めて不思議だったのは全ての方向で、帯磁率が0に近づくことである。帯磁率に寄与するのは、第1にCu²⁺の持つS = 1/2のスピンに寄与であるが、勿論その他に軌道角運動量の寄与等があるが、この図の意味することは、多分Cu²⁺のスピンに寄与がT → 0 Kで0になり、残りの分はそれ以外の寄与つまり軌道角運動量の寄与+内殻の電子の反磁性であると想像される。そこで問題になるのは、何故スピン帯磁率がT → 0 Kで0になるというような異常な事態が生ずるのかということである。

スピン帯磁率が0 Kで0になる簡単な例としては例えば、部分磁化の向きに磁場が平行な場合の反強磁性体がある。しかし、部分磁化に垂直に磁場が掛かった場合には磁化は0にはならない。反強磁性体では基底状態が非磁性ではないからこのような事が起こるのである。では如何なる場合に観測されたような現象が起こるのであろうか。

非常にこれに似た現象としてハルデン・ギャップ状態がある。これはスピンS = 1 (より一般的には整数スピンの場合) の反強磁性ハイゼンベルク模型で相互作用が表される一次元スピン鎖の示す磁性であって、基底状態は非磁性であり、磁性を示し得る励起状態は基底状態との間にエネルギーギャップを持っている。従って低温になると、徐々に励起状態の寄与が減少し、T → 0 では基底状態のみが寄与し、スピン帯磁率が0になってしまうのである。

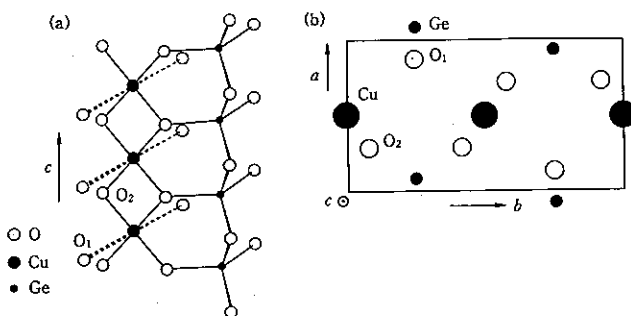


図 1: CuGeO_3 の結晶構造 (文献 [2] より).

(図 3 参照). この現象は一次元スピン系でスピンの整数の場合はスピンの半整数の場合と非常に異なるといういわゆる Haldane conjecture[5] から出発して理論的にも実験的にも最近非常に注目されている問題である. CuGeO_3 ではスピンの $1/2$ であるからハルデン系と対比される方の系に属する訳であり, ハルデンギャップで説明できるはずがない.

それではスピン $1/2$ では, このような現象は決して起こらないのであろうか? 一つの可能性として alternation の起こっている一次元スピン系が考えられる. スピンの距離が $a_1, a_2, a_1, a_2, \dots$ と交互に変わっているとす. その場合には交換相互作用が J_1, J_2 と交互に変化するであろう. 従ってこの系のハミルトニアンは, $J_1 > J_2$ として

$$H = J_1 \sum S_{2i} \cdot S_{2i+1} + J_2 \sum S_{2i+1} \cdot S_{2i+2} \quad (1)$$

と表されることになる. このような系では, 非常に定性的に考えると, $J_1 > J_2 > 0$ の条件のため, $2i$ と $2i+1$ 番目のスピン間の相互作用が $2i+1$ と $2i+2$ 番目のスピン間の相互作用より大きく従ってエネルギーが低くなるためには $2i$ と $2i+1$ 番目のスピンが一重項状態になり, それが互いに J_2 で結合している状態が基底状態になり得るのである. この基底状態と励起状態の間にはエネルギーギャップが生じ, 従ってハルデン系と非常に似た振る舞いをすることが期待される.

実際ハルデン系は (1) のハミルトニアンで J_1 を正のまま (つまり反強磁性交換相互作用のまま) にして $J_2 \rightarrow -\infty$ (つまり強磁性交換相互作用を無限に強くする. 従って Hund の規則が成立して, $2i+1$ と $2i+2$ 番目の 2 つのスピンだけを取り出すと $S=1$ の状態になっている) にした場合に相当している.

この 2 つの状態 ($S=1/2$ の alternation のある系とハルデン系) が J_2 をパラメタとして, $J_2 > 0$ から $J_2 \rightarrow -\infty$ の場合に連続的に変化して同じ物理的状態を表すことは理論的に議論されている [6, 7].

さてそれでは CuGeO_3 は alternation のあるスピン $1/2$ の一次元反強磁性ハイゼンベルク系として理解してよいであろうか. alternation のあるスピン $1/2$ の系あるいはハルデン系も, 温度だけを変化させた (下げた) 時には, 基底状態と励起状態の混ざった状態から, 純粋な基底状態へと連続に変化するものであって, 相転移ではない.

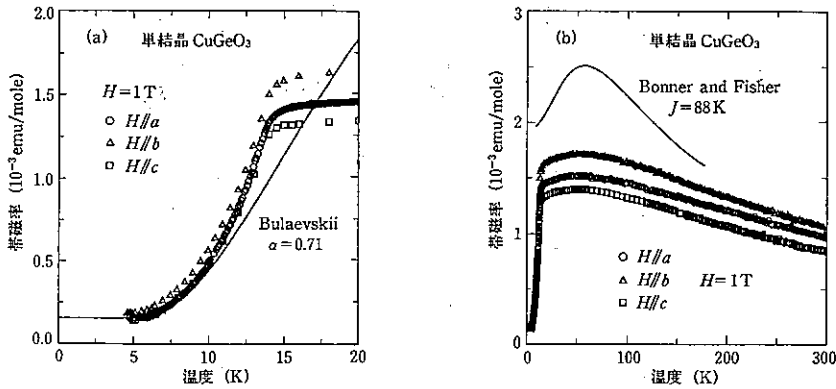


図 2: 単結晶 CuGeO_3 の帯磁率の温度依存性. a) 20K 以下 b) 300K 以下 (文献 [3] より).

一方我々の測定した CuGeO_3 の帯磁率は前に述べたように 14 K 付近で相転移と思われる変化をしている. これはあたかも 14 K 以上では alternation のない一次元スピン系で, 14 K 以下では alternation のある一次元スピン系として振る舞い, 14 K で相転移を起こしているように見えるのである.

このような相転移は可能であろうか. 実はこのような相転移は CuGeO_3 の属する無機化合物では全く見出されていなかったが, 有機物ではスピン・パイエルス転移として知られていた [8]. スピン・パイエルス転移とは如何なる現象であろうか. ハミルトニアン (1) で $J_1 = J_2$ の場合を考える. この系に変換 (Jordan-Wigner 変換といわれる)

$$\begin{cases} c(n) & \equiv e^{i\pi\sum_{j=1}^{n-1} S^+(j)S^-(j)} S^-(n) \\ c^+(n) & \equiv S^+(n)e^{-i\pi\sum_{j=1}^{n-1} S^-(j)S^+(j)} \end{cases} \quad (2)$$

を行うと $S = 1/2$ のスピン系はスピンの自由度のないフェルミ粒子 (spinless fermion) 系 (消滅演算子 $c(n)$, 生成演算子 $c^+(n)$ で表される) に変換され, さらにこれを Fourier 変換すればバンドの半分が満たされた (互いに相互作用をしている) spinless fermion (消滅演算子 $c(k)$, 生成演算子 $c^+(k)$ で表される, k は波数) として理解できる. つまりフェルミ波数 $k_F = \frac{\pi}{2a}$ のフェルミ粒子系となる.

ここまで来れば, 一次元電子系のことを少し知っている人には後の運命は自明かもしれない. スピン系は格子振動と結合している. J は相互作用をしているスピン間距離の関数だから, スピン間の相対位置を変えるような格子振動で J の値は変化する. これがスピン・格子相互作用の起源である. spinless fermion で考えても, 当然この格子振動との相互作用が生き残っている. 一次元電子系が格子振動との相互作用で相転移する現象はパイエルス転移としてよく知られた現象である. 一次元電子系と格子振動との相互作用は, フェルミ波数付近の粒子 ($-k_F$ と k_F に近い波数の粒子) と $2k_F$ 付近の格子振動の間で顕著で, 格子系には $2k_F$ 付近の格子振動の周波数の低下 (Kohn 異常) をもたらす [9].

低温になるとフェルミ分布関係が k_F 付近でよりするどく変化するようになるに従い, Kohn 異常による周波数低下はさらに著しくなり, ついには 0 になってしまうことがある. 周波数

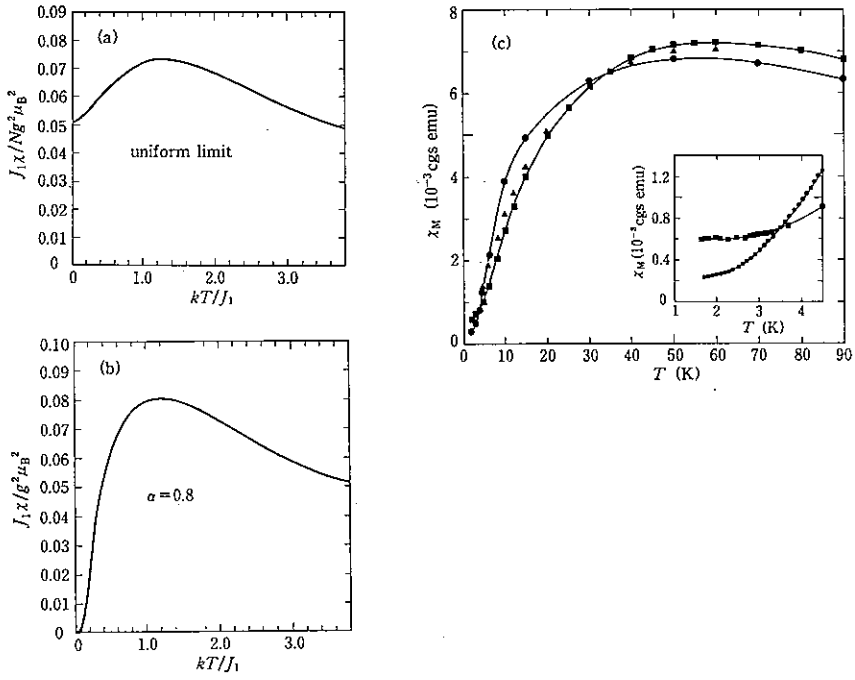


図 3: 一次元スピン系の帯磁率の温度依存性. (a) $S = 1/2$ 一様鎖 (理論). (b) $S = 1/2$ alternating 鎖 (理論). (c) $S = 1$ ハルデン物質 NENP(実験)(文献 [4] より).

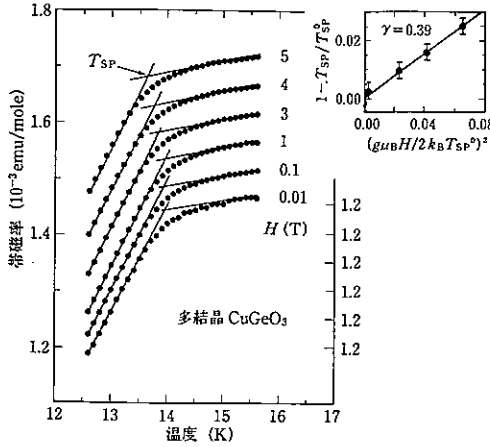


図 4: CuGeO_3 の帯磁率の温度特性の磁場依存性と転移温度の磁場依存性 (文献 [3, 1] より).

が 0 になるということは、その格子振動に相当する変位が静的な変位となることを意味し、更に低温になるとその変位が大きくなるとともに、その静的変位のまわりの振動が新たに生じてその周波数が 0 からだんだんと大きくなる。この変位が生じることは結晶の対称性が変わることを意味し、(構造) 相転移が起こることを意味するのである。このように転移点に向かって高温側から周波数の低下する格子振動、あるいは転移温度以下で周波数 0 から徐々に周波数の増大する格子振動は一般的にソフト・フォノンといわれている。このような $2k_F$ の格子振動が関与する相転移は一次元電子系では前に言ったようにパイエルズ転移と呼ばれ、一次元に限定しない時はもう少し一般的に電荷密度波 (CDW) 相転移といわれる (転移温度以下で静的変位に伴って電荷の密度の波を生じる)。上では格子系の変化を主に見てきたが、電子系は静的変位が出来るとともに、波数 $-k_F$ と k_F の付近にエネルギーギャップを生じる。基底状態はギャップの下の状態が満ちた状態であり、励起状態に電子を励起するには有限のエネルギーを必要とする。即ちこの場合にも基底状態と励起状態の間にエネルギーギャップが生じるのである。不整合 (変調の周期ともとの格子の周期の比が無理数) の電荷密度波状態で外から電場をかけると、この電荷密度波が並進運動を起こし、非線形伝導現象や広帯域雑音あるいは狭帯域雑音の発生その他のいわゆる電荷密度波のダイナミクスの問題が生じるが、その問題は数年以前には固体物理の一つの大きな話題であったことを記憶されている方は多いであろう [9].

だいたい話が横道にそれたが、話を一次元スピン系に戻そう。spinless fermion は電荷を持っていないから、電荷密度波状態には勿論ならない。格子系に Kohn anomaly が生じ、一次元電子系のパイエルズ転移に相当する相転移が起こり、静的な変位により alternation のある状態になり spinless fermion 系に基底状態と励起状態 (これは磁氣的励起である) の間のギャップが生じるという点は (完全に同じであるとはいえないが) 基本的に同じように論じることが出来る。¹ この現象をパイエルズ転移との類似性から、スピン・パイエルズ転移と

¹ スピン・パイエルズ転移では実は spinless fermion 間の相互作用が重要な役割を演じている。この重要性については例えば文献 [10, 11] に詳しく論じられている。

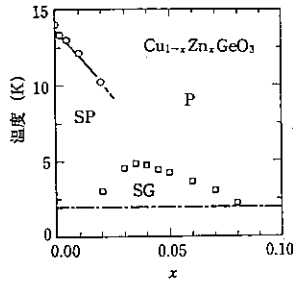


図 5: $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{GeO}_3$ の組成-温度相図 (文献 [14] より). SG, SP, P はスピン・グラス相, スピン・パイエルス相, 常磁性相を表す. 一点鎖線は低温の測定限界を表す.

呼んでいる.

さて, CuGeO_3 の帯磁率の温度依存性はスピン・パイエルス転移によるらしいと考えるとすると, 今度は逆に 14 K の変化は, 本当に相転移, 就中スピン・パイエルス転移によるということ を明瞭に示さなければならぬ. まず確かに, 相転移であるという事は, 比熱の測定で明らかになった [12, 1]. 14 K 付近に明かな比熱の異常が観測されたのである. これではほとんどスピン・パイエルス転移であろうという事になったが, まだ確かにスピン・パイエルス転移であると断言するには, 多少のためらいがある. そこで, 我々は転移温度の磁場依存性を測定した. 図 4 に種々の磁場の値に対する帯磁率 - 温度特性を示す [3]. 磁場の印加により転移温度が下がる事が明らかに分かった. この変化は, 反強磁性秩序の場合等とは明らかに異なっており, しかもその変化は上に述べた spinless fermion 間の相互作用を正しく取り入れた Cross and Fisher [10] の理論を基礎にした Cross [13] の理論と非常によく一致を示していた. これらの事実から, 我々は CuGeO_3 の帯磁率の温度特性が, 間違いなくスピン・パイエルス転移によるものであると結論するにいたった [3]. この様にして, 無機化合物では初めて, 従って当然の事ながら銅酸化物でも初めてのスピン・パイエルス転移が発見されたのである.

今まで知られていたスピン・パイエルス転移を示す物質は前に述べたように有機物に限られていたが, CuGeO_3 は無機化合物であるという違いがあったとしても単にその数を 1 つ増やしたにすぎないのであろうか? 我々は勿論そのようには考えていない. 有機物の場合には TTF や TCNQ といった大きな分子上の不対電子の持つスピンの主役として活躍する. 従って不純物添加によってスピン系の状態を変化させるといった研究には不向きであり, 実際そのような研究は行われていなかった. ところが CuGeO_3 では Cu^{2+} がスピンを担っているのであるから話は簡単である. 例えば Cu を Zn で置換すれば Zn^{2+} は非磁性であるから, スピンの一次元鎖は分断される. これによって, 非磁性の基底状態とエネルギーギャップを持った磁気的な励起状態という描像は徐々に壊れて行くのである. 実際にこの効果を調べてみると, 勿論上に述べた推論に相当する効果が観測されたのではあるが, そのほかに, 予想外の効果を同時に観測した [14]. それはスピン・グラス相の発見である. 図 5 にその相図を示す. まだ, 強磁場中での CuGeO_3 の磁気的な振る舞い [15] など数々の面白い話題があるが, 与えられたページ数も超えたし, 話が専門的になりすぎるので, この辺で切り上げよう.

参考文献

- [1] 長谷 正司, 内野倉 國光: 固体物理 **28** (1993) 543.
- [2] H. Völlenkne, A. Wittmann and H. Nowotny: *Monatsh. Chem.* **98** (1967) 1352.
- [3] M. Hase, I. Terasaki and K. Uchinokura: *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993) 3651.
- [4] J. P. Renard, M. Verdagner, L. P. Regnault, W. A. C. Erkelens, J. Rossat-Mignod and W. G. Stirling: *Europhys. Lett.* **3** (1987) 945.
- [5] F. D. M. Haldane: *Phys. Lett.* **93A** (1983) 464; *Phys. Rev. Lett.* **50** (1983) 1153.
- [6] K. Hida: *Phys. Rev.* **B45** (1992) 2207.
- [7] M. Kohmoto and H. Tasaki: *Phys. Rev.* **B46** (1992) 3486.
- [8] 解説として例えば 稲垣 睿, 福山 秀敏: 固体物理 **20** (1985) 369.
- [9] 解説としては例えば 内野倉 國光, 前田 京剛: 擬一次元物質の物性, 物理学最前線 **28** 大槻 義彦編, 共立出版社 (1991).
- [10] M. C. Cross and D. S. Fisher: *Phys. Rev.* **B19** (1979) 402.
- [11] T. Nakano and H. Fukuyama: *J. Phys. Soc. Jpn.* **49** (1980) 1679; **50** (1981) 2489.
- [12] 黒江 晴彦, 小林 謙二, 関根 智幸, 長谷 正司, 寺崎 一郎, 内野倉 國光: 日本物理学会講演概要集 第 48 回年会第 3 分冊 p. 166 (1a-PS-43).
- [13] M. C. Cross: *Phys. Rev.* **B20** (1979) 4606.
- [14] M. Hase, I. Terasaki, T. Sasago, K. Uchinokura and H. Obara: Submitted to *Phys. Rev. Lett.*
- [15] M. Hase, I. Terasaki, K. Uchinokura, M. Tokunaga, N. Miura and H. Obara: *Phys. Rev. B* (印刷中).

新しいヘリウム液化システムについて

低温センター

御存知のように平成4年度予算で低温センターのヘリウム設備の更新が行なわれ、新しい液化機が稼働を始めています。本稿では液化機更新までの経過や新液化機の特徴等について御紹介します。

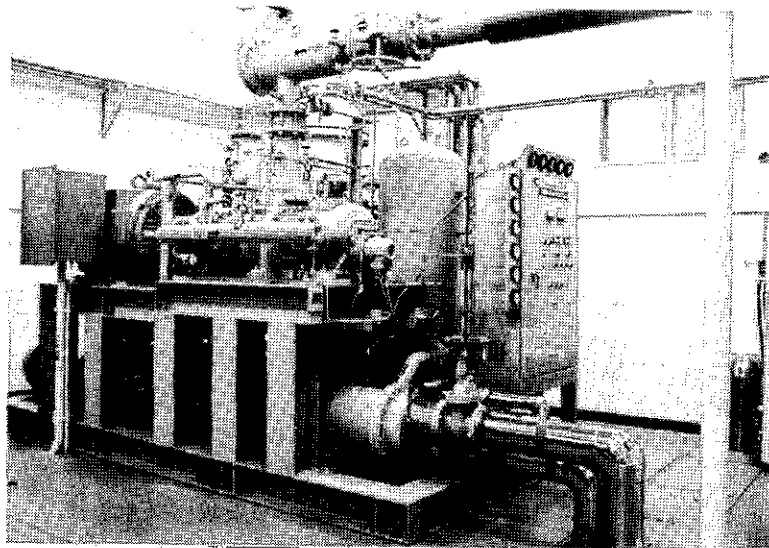
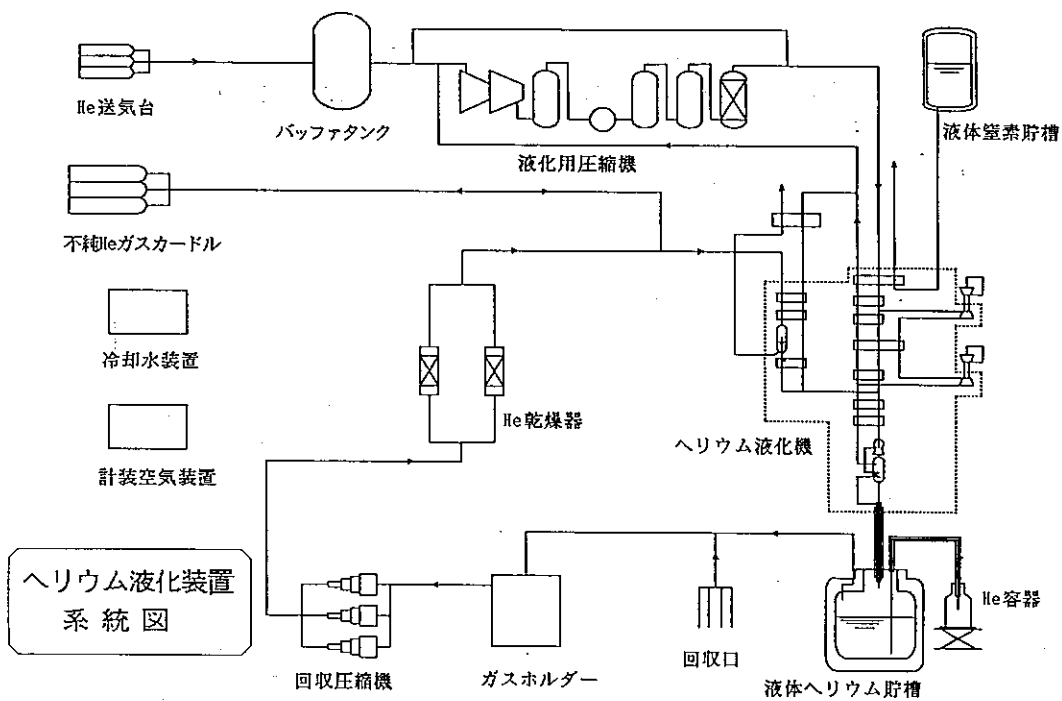
1 経過

今年1月まで使われていたヘリウム液化機は低温センターとしては2台目の装置であり、昭和49年度に更新されてから、18年間稼働しました。またヘリウム液化・回収システムを構成する他の設備も設置から15年以上の年月を経たものでありました。とりわけヘリウムガス精製機については、近年続けてステンレス鋼製配管に腐食が原因の洩れが発生し、安全面でも装置が危険な状態にありました。

一方、本学の液体ヘリウムの需要は近年爆発的に増大しています[1]。これは従来からの低温科学の研究に加え、材料開発等の分野でも液体ヘリウム温度での実験が一般的になってきたこと、超伝導電磁石、超伝導NMR、SQUID等液体ヘリウムを利用した実験装置が普及してきたことなどが、その原因であります。特に1986年の高温超伝導の発見以来この傾向に拍車がかかってきています。

需要の増加に対して供給体制には次のような問題がありました。旧液化設備では往復動式の大型圧縮機を使っていましたが、これは運転中に大きな地振動、超低周波音を発生します。そこで圧縮機の基礎にダイナミックバランサーを取り付けるなどの処置を加え、この振動防止に務めてきました。しかし低温センター裏門の門柱が振動するだけでなく、隣接する住民の方々からの苦情を度々受けてきました。このため液体ヘリウム需要の増加に対応するとしても、無条件で液化機を長時間運転することはできませんでした。

一方、設備の性能面でも液体ヘリウム供給の限界が迫っていました。旧来の精製機は低温精製方式であったため、一定量(700m³)の精製を行った後、必ず1日の再生処理が必要であり、システムの液化量はこれによって律速されてしまいます。ここから見積も



写真：ヘリウム液化用圧縮機

表 1：主要機器一覧

ヘリウム液化機（内部精製器付き）	Linde TCF-50
ヘリウム液化用圧縮機	前川 He2016C-51
ヘリウム乾燥器	ジェットク 123m ³ /h × 24h × 2 筒
液体ヘリウム貯槽	東理社 3000ℓ
ヘリウムガス貯蔵用長尺ポンペ	0.5m ³ × 28 本（内 4 本が新規）
ヘリウムガス回収用圧縮機	Bruckhaldt C5N21F 3 台

られる年間最大供給可能量は平成 3 年度の年間供給量（49,534ℓ）をわずかに上回るだけした。

設備の老朽化と増加する液体ヘリウム需要に対応するために、低温センターでは設備更新を要求してきましたが、設備の更新に際しては単に老朽設備を更新するだけではなく、これらの問題点をも解決できるものでなければなりません。このような観点から、以前に策定された長期計画を新たに見直し、以下のようなシステムが実現しました。このほか計画の段階では、分離膜による粗精製を行なうことや、より大型の液化機を導入すること等も検討されましたが、限られた予算であること、また大型装置を設置するのに適しているとは言えない建物上の制約があることなどから今回は見送らざるを得ませんでした。従って、新システムの導入によって全ての問題が解決されたとは言いきることはできませんが、与えられた条件の中では最善の設備であると考えられます。

2 新システムの概要

新しいヘリウムシステムの流れ図を図、構成を表 1 に示します。

各研究室で利用され気化したヘリウムガスは、構内回収配管を経て、低温センターガスホルダーに回収されます。回収ガスにはヘリウムの他に少量の空気や水蒸気などの不純物が含まれます。これらの不純物が液化機に入ると、低温で固化し配管の閉塞やタービンの破壊を引起こすので、液化の前に取除く必要があります。まず回収ガスは乾燥器を通して、高圧ポンペ（長尺カードル、150 気圧）に一旦貯蔵されます。乾燥器にはモレキュラーシーブ（ゼオライト）が充填されており、吸着によって水分が取除かれます。乾燥筒は 2 筒あり、定期的に自動的に切換えて吸着水分の脱着再生が行なわれます。

液化時には、回収ガスはまず液化機に内蔵された内部精製器に導かれます。液化機が作る低温ヘリウムガスの一部を使い、内部精製器の中で回収ガスは冷却され、その中の不純物（空気等）は凝縮（液化）し分離されます。気液分離器で分離されずガス中に残留

する極くわずかな不純物も、さらに低温に冷却することによって固化し取除かれます。

分離された液体空気は間欠的に系外に排出されます。また固化不純物については、これが蓄積した際には、内部精製器を昇温しヘリウムガスとともに系外に排出するという手順がとられます（再生）。従来の低温精製と異なり、精製に吸着現象を利用していないため、再生に必要な時間は20分程と短く、その間も、液化機は平時にバッファタンクに蓄えた原料ガスを使って、液化を継続することができます。このようにして液化機を連続的に運転しながら、必要なレベル（99.995%以上）まで原料ガスのヘリウム純度を高めることができます。

純化されたヘリウムガスは圧縮機で16気圧に圧縮され、液化機に導かれます。圧縮機はスクリー式圧縮機です。これは2つのスクリーを高速で回転させガスの圧縮を行うのですが、サイズも比較的小さく、振動の発生は従来の往復動式圧縮機に比べて格段に少なくなります。そのかわりに可聴音域のかなり高レベルな騒音を発生するので、圧縮機室にその対策を施しました。

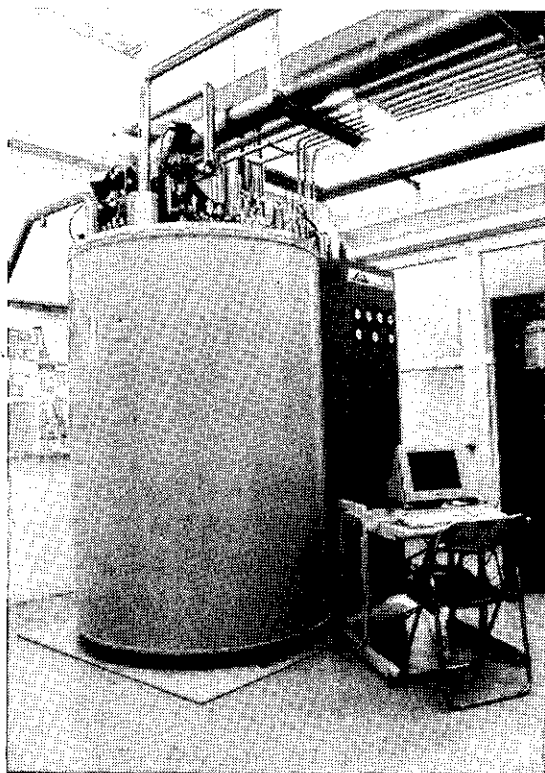
ヘリウム液化は中型機以上で標準的に採用されているクロード方式です。コールドボックスと呼ばれる真空容器の中に、熱交換器、膨張タービン、ジュール・トムソン膨張弁、内部精製器等が納められています。圧縮されたヘリウムガスは、まず液体窒素で予冷された後、その一部は膨張タービンに導かれます。ここでヘリウムガスは断熱膨張し圧力と温度が下がります。2段の膨張過程で圧力はほぼ大気圧まで圧力が下がり、温度もジュール・トムソン逆転温度以下に冷えます。この低温ヘリウムガスを使って残りの高圧ガスが冷却されます。高圧ヘリウムガスの一部は内部精製器に導かれ原料ガスの精製に利用されますが、残りのガスはさらに熱交換器で冷却された後、ジュール・トムソン弁で自由膨張し、ヘリウムの温度は下がり、その一部は液体となります。液体とならなかったヘリウムガスは熱交換器で次のヘリウムガスを冷やした後、圧縮機に戻ります。

液化したヘリウムは移送管（トランスファーチューブ）によって、液体ヘリウム貯槽に送られます。通常の液化機では、液体ヘリウム貯槽内は大気圧よりかなり高い圧力になってしまいます。これは液体ヘリウム貯槽が、大気圧程度である圧縮機吸気口より流れの上流にあるためですが、新システムで採用された液化機では、圧縮機吸気圧と独立に、動的に液体ヘリウム貯槽内の圧力を下げることができる工夫がジュール・トムソン弁にされており、これは貯槽から小型容器に液体ヘリウムを移送する際の蒸発損失を低減するのに有利です。

新しい液化機の液化性能は純ヘリウムガス使用時に184ℓ/時、98%ヘリウムガス使用時に148ℓ/時、90%ヘリウムガス使用時に133ℓ/時です。液化機は、内部精製器を含め、コンピュータにより制御されており、運転に際しほとんど人手を必要としません。

液体ヘリウム貯槽は3000ℓの内容積をもち、ヘリウム需要の短期的な変動に十分対処できます。また小型容器への移送能率を上げるために2カ所の汲み出し口を設けました。

液体ヘリウム貯槽からトランスファーチューブを経て小型容器（10ℓ～120ℓ）に移し



写真：ヘリウム液化機

かえられた液体ヘリウムは、トラックで学内各研究室に配達され研究に利用されることとなります。

この他、以上の装置の動作を維持するために、冷却水装置、計装空気発生装置等があります。冷却水装置は液化用圧縮機及び液化機の冷却に使われますが、冷却水による装置の腐食を避けるため、循環水は密閉式となっています。

以上の設備の中で、今回更新が行なわれたものは液化機（内部精製機）、液化用圧縮機、バッファタンク、液体ヘリウム貯槽、ヘリウム乾燥器、長尺カードルの一部、冷却水装置、計装空気発生装置等であり、回収用圧縮機、ガスホルダー、長尺カードルの一部、液体窒素貯槽などは従来の装置を使います。また、サブセンターの回収装置、学内回収配管は手を加えていません。

3 問題点の克服

新しいシステムで先に述べた問題点がどのように解決されたのでしょうか。

老朽し危険な設備については、まず低温センター設立以来の設備であり、水分による内部の腐食が心配された不純ヘリウムガスカードルが更新されました。新しいシステムでは回収ガスは乾燥後貯蔵するので腐食の心配はないと考えています。毎年のように故障していた精製機や乾燥器、液化機も全面的に新しくなりました。回収用圧縮機など今後も使用する従来設備については、現在の所老朽化の兆しは現れていません。

再生作業を必要とする低温精製機の短所を補うために、低温センターはこれまで、2基の低温精製機を導入し、交互運転/再生により連続運転を行なうという長期計画をたてていました。しかし、1) 内部精製技術が進歩し、内部精製器を使った液化機が分子研はじめ多くの低温センターで問題なく稼働していること、2) 低温精製方式では自動化が難しく、多くの人手を必要とするであろうこと、3) 更新時の費用、及び運転費用の面で低温精製は高くつくことなどを考え、内部精製方式を採用しました。これによって、精製がシステムのスループットを規定することはなくなります。

近隣に地振動を与えていた大型往復動型圧縮機が、振動の発生が少ないスクルー型圧縮機に代りました。可聴域での騒音を低減するために圧縮機室内の吸音、遮音対策を行なった結果、振動は感知されず、また騒音測定値も46dB(低温センター裏門)であり、暗騒音とほぼ同レベルに抑えることができました。近隣の住民からも「家の中にいれば、運転音は聞えない。」との返事を受けており、懸案であったこの問題をクリアできたと考えています。

新液化機の性能は上記のように純ヘリウムガス使用時で184ℓ/時です。実際の運転条件と考えられる98%ヘリウムガス使用時での値(148ℓ/時)は、旧液化機の値(130ℓ/時)を10%程度上回るに過ぎません。しかし旧システムでスループット決めていた精製の制限はなくなり、また振動問題が解決すること、自動化が行なわれること、液体ヘリウムの貯蔵容量が大幅に増加することなどから、液化機の運転も柔軟に行なうことができます。この結果システムの性能は大きく向上します。仮に液化運転を週当たり3日とすると年間約100,000ℓの供給が可能であることとなります。

4 今後の課題

東京大学低温センターではこれまで負圧方式の回収を行なってきました。これは多少回収純度を低下させても、ヘリウムガスの損失を減らそうという考えに立ってとられた方式であると思われます。このため時には数十%の空気を含むガスが送られてくることすらありました。従来の低温精製機でならば、このように極端に低純度のガスも処理可能でした。しかし今回の更新では外部低温精製をやめ、内部精製方式としました。この

方式では回収純度の低下とともに液化率は減少します。従って回収ガス純度の管理には従来以上に気をつけなければならなくなりました。このため回収ガスの純度を維持するには単に利用者の善意にたよるだけでなく、純度低下が起りにくい方式にする必要があると考え、今夏から正圧回収に切換えました [2]。正圧は物性研、筑波大学など多くの大学で採用されている方式であり、真空ポンプで減圧する実験以外には空気の混入する恐れはありません。しかし逆に、バルブの閉め忘れなどの不注意によって、ヘリウムを大気に逃してしまう可能性は増大します。ヘリウムガスの損失は直接供給価格に反映しますので、利用者各位の理解と協力をお願いします。

予算の制約があったため、今回の更新では必要最小限の装置の更新のみを行ない、後年度に設置できるものについては見送らざるを得ませんでした。例えば、今回の更新で液体ヘリウム貯蔵容量は増えましたが、ガス貯蔵能力はむしろ減ることになりました。不足分のガス長尺ポンプ 20 本については、今後なるべく早い時期に順次増強する必要があります。精製・液化段階でのガス管理に必要な各種モニター装置（露点計、酸素純度計など）なども同様です。

新システムによってヘリウムの液化運転スケジュールは柔軟性を増します。これにもなって供給方法も再検討する余地があります。その一部についてはすでにお知らせしているように使用内規の改訂によって実現しましたが、今後さらに検討を続けたいと考えています。

液体ヘリウムは小型容器に移しかえられて、各研究室に配達されますが、この移しかえに際しての熱流入、圧力変化によるフラッシュロス、移送分の空間補填のロスなどによる蒸発損失があります。この損失量は液化量の 40%程度にも相当し、将来これを少なくする技術の開発が望まれます。

終りにサブセンター設備に関して、特に教養学部について一言付け加えます。教養学部への供給量は近年顕著な増大がみられ、数年後には年間供給量が 1 万 ℓ を超えると見られております。このためこれまで行なってきたトラックによる液体ヘリウムの配達、ポンプづめのガス回収には限界があり、独自の液化機の設置を含め、根本的な解決策を考える時期に来ていると考えます。

参考

- 1 佐藤幸一、坂本優：低温センターだより 16 (1933) p21.
- 2 低温センターニュース 170 号 (1993.7).

低温センターだより編集委員会

(1993.9現在)

編集委員長

長沢信方センター長 理・物理 (4181)

編集委員

池畑 誠一郎 理・物理 (4161)

藤森 淳 理・物理 (4126)

田島 裕之 理・化学 (4333)

為ヶ井 強 工・物工 (6846)

寺崎 一郎 工・物工 (6848)

柴田 浩司 工・金属材料 (7147)

小宮山 進 養・基礎科 (93-453)

佐藤 直樹 養・化学 (93-311)

湯本 昌 医・解剖 (3335)

西沢 直子 農・農芸化学 (5107)

大塚 洋一 低温セ (2860)

島田 宏 低温セ (2861)