

平成14年度 LHePP海外研修 報告書

東京大学物性研究所 低温液化室 鷲山 玲子

1. はじめに

平成14年度 液体ヘリウムポンプ開発プロジェクトの一環として2002年8月11日～21日の10日間、ドイツに渡航した。

今回の研修の目的は、2つあり、その内の1つは当研究所に導入されている液体ヘリウムポンプの開発元であるヴァルター・マイスナー研究所を訪問し、ポンプに関して幅広い議論を行うことにある。

もう1つの目的は海外における液化室がどのようなシステムを持ち、どのように運営されているかを知ることであり、ヴァルター・マイスナー研究所とドレスデン工科大学(ドレスデン)とマックス・プランク固体物理化学研究所(ドレスデン)の液化室を訪問した。

筆者は過去にもこのような海外の液化室の紹介を一度行った事があるが、以前にも増して海外の液化室の情報というのは関心の高い事柄ではないかと考えるので、視察の様子とその時に得た情報を紹介する。但し筆者の英会話能力が低いこともあり、数値等に関して多少の間違いを含んでいる可能性があるが、ご容赦願いたい。また、蛇足ではあるが当初はフランス原子力庁(グルノーブル)も訪問する予定であったが、最初の訪問先であるドレスデンで予想外の洪水の災害に遭い、予定を変更せざるをえず訪問することができなかったことも記しておく。



図1. エルベ川氾濫の為に浸水したドレスデン中央駅

2. マックス・プランク固体物理化学研究所 (ドレスデン)

http://www.cpfs.mpg.de/index_en.html

2.1 マックス・プランク固体物理科学研究所の液化システムの概要



図2. マックス・プランク研究所の液化システム概要

マックス・プランク固体物理化学研究所は研究所自体が新しく5年ほど前に立てられた研究所だそうである。

液化システムはやや小規模の液化システムであり以下のようなシステムを持っている。表1、表2、表3に簡単に概要をまとめる。なお、この液化室では技官の Mr. Schreiber が案内してくださった。また、同研究所 研究員の中西博士も同行してくださった。

液化機は LINDE 社製 TCF-20 を使用しており、タービンの回転数は第一タービンが 4500rpm、第2タービンが 3900rpm と一般的な回転数で液化を行っている。液化用コンプレッサーはケイザーを使用している。運転圧力は 10.8bar。この運転圧力に関しては、ドイツの法令と何か関係があるのか聞いたかったの

だが、技官の方は法令の詳細な話はわからないとのことであった。液化能力は窒素を使用し 60L/h となっているそうである。図3は液化機と液取りに使用する CE からの液体窒素配管の途中にある気液分離器である。なお、CE は 4500L のものを保有している。また、液体ヘリウムの貯槽は 5000L の大型の貯槽を保有しており、その他にガスはカードルに液換算で 6000L 程度の保有ができるようになっている。回収系は図4のように建物ごとに回収メータを設置して回収を行っており、回収率を出しているとのことであった。ちなみに回収率は 85～90%程度とのことであった。



図3. 液体窒素供給装置上部にある気液分離器



図 4. 系統別に分けられたガスメータ



図 5. 液体ヘリウム容器とカラータグ



図 6. 長尺ポンペ



図 7. 各種ガスボンベ



図 8. 液体窒素自動供給装置

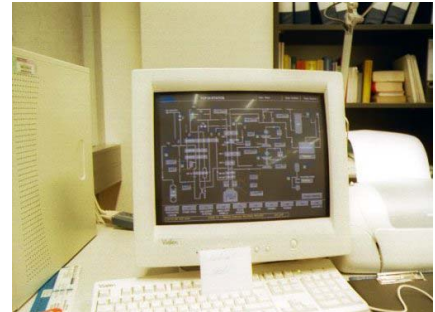


図 9. 液体ヘリウム液化管理システムのモニタ

研究室用のベッセルは基本的には 100L を使用し、26 本程度保有している。また、この容器は最近日本にも入ってきているメッサーグリスマム社製の軽い容器で空重量は 12.6kg だそうである(これは筆者の間聞き間違いのようで実際はカタログでは 45.0kg とある)。ただ、軽量で非常に取扱いがよいが従来の容器に比べ少々衝撃には弱いとのことで、実際に一台ぶつけてしまった為に断熱真空が悪くなり使用不可となっている物があった。供給は差圧式で行っており 100L を一本汲むのに 40 分程度かかるそうである。その他、ベッセルは回収配管にクイックカップラで接続されており、持出、返却が容易になっている。またカラータグを利用して返却容器の液体ヘリウムの残量が容易にわかるようになっている(図 5 参照)。設備は新旧混ざっており中には 40 年間使用している長尺ポンペもあった(図 6 参照)。この長尺ポンペは 300bar で使用しているとのことであった。その他には 200bar で使用している長尺ポンペがあり、12 本×8 基備え付けてあった。場所の関係か規格がない為か理由ははかりかねるが、海外ではこういったサイズの異なった比較的小容量の長尺ポンペをよく見るのではないかと思う。

システムの問題点を聞いてみたところ、取り立てて致命的な問題はないが液体ヘリウム貯槽に設置してある超伝導液面計からの熱入流が非常に大きく、週末(金曜の夜から月曜の朝)にかけて貯槽内の液体ヘリウムが 500L ほど減ってしまうので、これを非常に気にしていた。なにかしらの根本的な改善策を考えているとのことであったが、現状では電源を切り、液面計を抜いて対処しているとのことであった。

他には何種類かのガスボンベをまとめて貯蔵してあった(図 7 参照)。これらは研究所内に供給される物である。液体窒素の供給も行っており、自動供給装置が液化室内に設置してあった。この供給システムもユニークで、室内で供給を行うので酸欠防止の為に窒素ガスを外に放出する為の工夫がしてあるものであった(図 8 参照)。汲み出し管の先には供給効率を上げる為に先端に焼結金属がついていた。その他、安全面には非常に気を配っており、酸素濃度計が全部で 3 カ所に設置されており、それらは隣室のコントロールルームからコンピュータにて一括処理してデータを見ることが可能になっていた(図 9 参照)。ちなみに、一括管理しているシステムで液化機の状態、ガスの純度等も知ることができる。これはリンデ社製のシステムであった。全体的に眺めてみると比較的小容量を持ったシステムではないかと思う。

液化室の勤務体系についても聞いてみたが、専属の職員が一人おり、その方はほとんど一日を液化機の面倒を見て過ごしているとのことであった。また、パートタイムの職員が一人いて、その方は専属の職員が不在の時、また作業が忙しい時などに手伝いに来るとのことであった。その他、この訪問では細々とした日常的な業務に関する議論や液化機の細かい使用について説明を行って頂いた。

また、中西博士のご厚意で研究室も案内して頂いたのだが、研究室のユーティリティーで目についた点に関して報告する。



図 10. 液化機用油水分離器



図 11. 回収用コンプレッサー

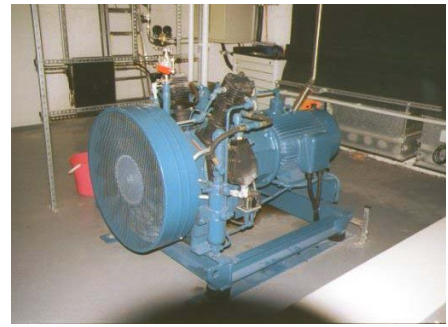


図 12. 回収用コンプレッサー



図 13. ガスハンドリングパネル



図 14. 液体窒素著槽



図 15. 液化機用圧縮機



図 17. クレーン



図 16. 大型装置の実験室



図 18. 簡易シャワー

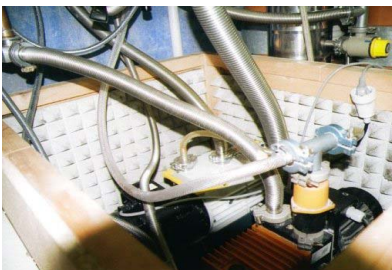


図 19. 防音施工された箱



図 20. 各種ガス配管



図 21. 液体窒素容器

中西博士は高圧科学部門に属しているが、図 16 はその実験室を上部から撮影したものである。比較的大きな装置の為の実験室であり、大型クレーン等が設置されていた(図 17 参照)。また、現在は使用していないが将来性を見越して図 18 のようなシャワーが設置されていた。これはもちろん放射性物質やその他の危険性の高い物質に汚染された時に使用するものである。このような細かい点が研究室の隅々まで行き届いていた。

また、小型のダイリューション等が設置されている小さな研究室には、

各部屋毎に情報コンセント、各種ガス配管(ヘリウム、窒素、アルゴン等)(図)がデフォルトで設置されてあった。図 21 のような国内では見ないようなタイプの液体窒素容器があったので、これも併せて紹介する。この窒素容器は周りにパイプフレームがあり、比較的小さく運搬しやすいものであった。

液体ヘリウム年間供給量	40,000L
従事人数	2名(内1名は非常勤職員)
回収率	85~90%

表1 マックスプランク固体物理科学研究所の液化室の規模等

回収圧縮機 ガスバッグ	20m ³ /h 2台 (5段と4段の物を使用) 容積 20m ³
----------------	---

表2 マックスプランク固体物理科学研究所の回収系機器等

液化機	TCF - 20 60L/h 内部精製器 液体窒素予冷あり
貯槽	5000L
圧縮機	ケイザー DS241 水冷式
中圧タンク	6m ³ , 13bar
その他	液体窒素の配管の途中に気液分離器を設置していた

表3 マックスプランク固体物理科学研究所の液化システム

3. ドレスデン工科大学 (ドレスデン)

<http://www.tu-dresden.de/mw/iem/kkt/lehrstuhle.html>

3.1 ドレスデン工科大学の液化システムの概要

ドレスデン工科大学(ドレスデン)では、部門の役割と液化システムについて Dr.Ch.Haberstroh が説明を行ってくれた。

液化室の設立は古く 1919 年からあるそうである。また建物自体が相当古いのので、新しい機器を配置する際には苦心したそうであるが、古い物を守っていく事は重要であるとおっしゃっていた。Dr.Ch.Haberstroh の所属する部門での役割は主に 3 つあるようで、一つは 3~5 名程度の大学院生の教育、一つは様々なプラントの設計、残りの一つはプロフェッサーシップによる研究である。液化作業は他の作業の合間をみて行っているとの事で専属の人はいない。スーパーバイザーが一人いる他、実際の作業を行うのは 3 人程度で、その 3 人も通常は他の作業を行っており、マシンショップ等に行っていることが多いそうである。

ドレスデン工科大学の液化システムは以下の表 5、表 6、表 7、の各機器により構成されている。この液化システムもやや小規模の液化システムであり以下のようなシステムを持っている。

液化機は TCF - 20 を一台保有しており、液化機は窒素を使わずに運転している。これは、貯槽が小さいので連続運転を行っている貯槽が一杯になってしまうので窒素無しの運転を行っているそうである。また、液化機の液化率は 35L(不純ガス)、40L(純ガス)だそうである。液化機について特筆すべき事は、液化機内に各種装置(熱交換機等)をテストする為にチャンバーがある。これを利用して様々なテストを行っているとのことであった。液体ヘリウム貯槽は 4500L である。液化機は基本的には 4 日間連続運転を行って、2 週間停止するという運転サイクルで稼働している。

液体ヘリウムのトランスファーは差圧で行っており、手動でバルブの開閉操作を行っている。また、満タンは圧力で検知しているそうである。容器の数は 20 個程度だそうである。回収率は 90%程度だそうであり非常に良い。供給は学内の 16 の部門に行っているそうである。非常にベーシックなシステムを持った液化室である。

回収はやはりここも系統立てて行っており(図 26 参照)、ガスバッグに一旦溜めてからコンプレッサで 200bar の圧力で長尺に詰めているそう



図 22. ドレスデン工科大学の液化機



図 23. 回収用ガスバルーン

だが、ガスバックからヘリウムガスが逃げるのが問題だといっていた。

ヘリウムガスの値段は約 8 ユーロ/L で日本よりは少々安い。しかし、TU では回収した不純ガスをガス会社に渡して精製して、また新しいガスを購入するので、非常に安い値段でガスを購入することができるのである。いくなれば精製は外部委託する方式である。これによって液体ヘリウムのコストダウンをはかっているそうである。供給価格は 1.5 ユーロ/L + チャージ で、チャージの額は回収率によるそうである。

液体ヘリウムを供給している部門は 16 部門にわたり、年間 12000L 程度の供給を行っている。他に、液化室内にマグネット等を保有しているので単純生産量で行くと 20000L 程度は液化を行っているそうである。また、液体窒素の供給も行っているが窒素の貯槽は 4500L とやや小さいものであった。だいたい月に 1 回 2500L 程度を入れるとの話であった。



図 24. Mr. Schreiber(左)と筆者(中央)と Dr.Ch.Haberstrohs(右)



図 25. 屋外に設置されている圧縮機



図 26. 回収用ガスメータ



図 27. 液化機上部のテスト用チャンバー

液体ヘリウム年間供給量	20,000L
従事人数	3名(通常は他の作業を行う)
回収率	90%

表 4 ドレスデン工科大学の液化室の規模等

回収圧縮機	45m ³ /h (4 段)
ガスバック	容積 20m ³

表 5 ドレスデン工科大学の回収系機器等

液化機	T C F - 2 0 35 ~ 40L/h
液体ヘリウム貯槽	内部精製器
圧縮機	4500 L
中圧タンク	ケイザー
	5m ³

表 6 ドレスデン工科大学の液化システム

4. ヴァルター・マイスナー研究所 (ガルヒング)

<http://www.wmi.badw.de/>

4.1 ヴァルター・マイスナー研究所訪問序文

ヴァルター・マイスナー研究所はドイツ南部、バイエルン自治州ミュンヘン市の北部に位置するガルヒングという町にある。ミュンヘン市内からでている地下鉄 U6 線の最終駅 Garching-Hochbruck 駅で下車。ミュンヘン中央駅から電車で 30 程の場所であるが、駅の裏側には羊がのんびりと草をはむ牧場があり牧歌的な風景がそこにはあった。291 番ミュンヘン大学ガルヒングキャンパス行きのバスをしばし待つ。Forschungsreaktor で下車。10 分程歩き、小さな川の為の橋を渡ると研究所に到着する。予定よりも 30 分ほど早く到着したので周囲を散策してみると、ミュンヘン大学ガルヒングキャンパスの他、様々な研究所があった。

研究所の建物自体は比較的小さくここで液体ヘリウムポンプが開発されていることは私の予想に反して少々意外であった。なお、研究所自体の規模は職員数ではバイエルン自治州のミュンヘン近郊の学術機関内では 2 番目の大きさであり、ヴァルター・マイスナー研究所の重要な役割のひとつとして、近隣の 3 つ研究所に液体ヘリウムを供給することがある、とガルヒングの web サイト (<http://www.garching.de>)にはあった。



図 29. 制作中のポンプの部品が入った箱

研究所の建物内で少々迷子になりグランドフロアをうろろろしていたが、その技官の方に不審がられて呼び止められる。ドイツ語でなにか話しかけられているようだがさっぱりわからないので、ひたすら英語で聞き返すと「Dr. Neumaier を訪ねてきたのだ」という事は通じたらしく、研究室は 1 階だと身振り手振りで教えて頂く(海外では一階をグランドフロアと呼び、2 階を 1 階と呼ぶ場合がしばしばあるのをすっかり忘れていたのだ。)

洪水でドレスデンに一日ほど足止めになったこともあり、結局中西博士は日程の都合上同行できなくなったので単独で Dr. Neumaier の居室を訪ねる。するとそこにはもう一人、年配の男性がいた。あとから知ったのだが彼が Dr. Doll、実際にポンプを作った人であった。早速 Dr. Doll が MIT の為に製作しているポンプのパーツが入っている箱を持ってきて、パーツを丁寧に取り出し一つ一つ丁寧にどのような役割をするのかを解説してくれる。私の英会話能力が低い為しばしば説明は中断するが、絵を描いたりして確認をしながら解説は進んでいく。Dr. カール・ノイマイヤー氏も要所所で丁寧に細かくわかるように補足を入れてくれた。

小一時間ほどで解説は終わったがそこには様々な苦労や工夫や沢山のアイデアが見受けられ素晴らしい物を見せて貰った事を実感した。その後、実際にポンプを使用しているヴァルター・マイスナー研究所の液化システムを見せて頂き訪問は終わったが、私にとって貴重な経験ができた訪問であった。

4.2 ヴァルター・マイスナー研究所の液化システムの概要

ヴァルター・マイスナー研究所の液化システムは以下の表 7、表 8、表 9、の各機器により構成されている。比較的古い機器で構成されているがメンテナンスが行き届いており液化機と液化



図 30. 液化用圧縮機のピストン

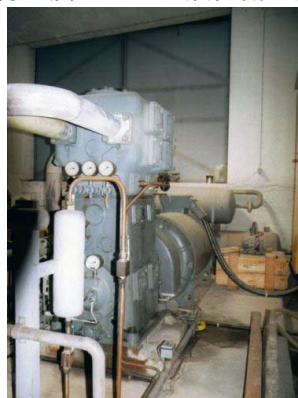


図 31. 液化用圧縮機



図 28. ヴァルター・マイスナー研究所



図 32. ヴァルター・マイスナー研究

の液化システム

用圧縮機は 20 年も使用しているとのことであった。ガスバックにいたっては 30 年使用しているそうである。また、1.5kW/L と比較的少ない消費電力で液化を行っているそうである。物性研のシステムは最大で約 2.0kW/L を要することから考えてもこの消費電力の数値は少ないといえるのではないかと思う。



図 33. 回収用圧縮機



図 34. 液体 He トランスファーチューブ

ヴァルター・マイスナー研究所の液化システムはやや小規模であり、以下のようなシステムを持っている。

液化機はスルザーの TCF-100、液化率は 30L/h で 20 年程前に設置されたものだそうである。液体ヘリウム貯槽は 5000L の貯槽である。ここで、特筆すべき点は当然ながら遠心式液体ヘリウム汲み上げポンプが設置されていることである。このポンプのついているトランスファーチューブはやはり 3 重管になっており、液体ヘリウム、ガスヘリウムが通ることが可能な

ようになっている。冷たいヘリウムガスを貯槽に戻すことによって効率よく液化することができるのである。もちろん、このポンプ付きトランスファーチューブが物性研究所で使用しているトランスファーチューブの雛型であることは疑いの余地がない。このシステムでは 100L の液体ヘリウム容器にトランスファーするのに、5~10 分程度かかるそうである。接続口はクイックカップラになっており、先ほども書いたが 3 重管になっており霜はつかない構造になっている。リフトで容器を上下させ、トランスファーチューブの先端が容器内の適した場所に来るようになっている。なお、リフトの周りは網で囲っており、人が怪我などしないようになっている。なお、このトランスファーチューブは固定式である。図 32 から供給の様子がわかる。

液化用圧縮機はレシプロ式の 2 段の物を使用していた。この圧縮機も非常に古いメンテナンスが行き届いており、現役で動いていた。また予備の液化用圧縮機のピストンがおいてあり、シーリングの構造をみることができ興味深かった。回収用圧縮機は 3 段レシプロ式の物を使用し、2 機を切り替えて使用していた。

液化機の運転は 2 週間連続して運転を行い、10 日間休止というサイクルで行うそうである。液化作業は 3 人ほどで行っているが液化室専属の職員は一人で、のこりは研究室の人で仕事を手伝うという形になっている。供給は研究所内の他に近くの 3 箇所の研究所にも行っており、一週間に多い時に 3000L 程供給すると言っていた。ちなみに配達には他の研究所に配達することもあり、専門の業者に任せているとのことであった。研究所内への供給は液化室に液体ヘリウム容器をおいてあり持ち出せるようになっていた。回収率は 90% 台だが「理想は 95% 以上 85% では回収率は低すぎるので、85% 以下になったら研究室に警告を出します！」と冗談交じりでおしゃっていた。その他、実験装置にパルス管冷凍機を設置しているので効率よく液体ヘリウムを使用できるとおしゃっていた。

液体ヘリウム週間供給量	3000L
従事人数	3 名(内専属は 1 名)
回収率	90%

表 7 ヴァルター・マイスナー研究所の液化室の規模等

回収圧縮機	45m ³ /h (3 段)
ガスバック	2 機を切り替えて使用 容積 2 × 10m ³

表 8 ヴァルター・マイスナー研究所の回収系機器等

液化機	スルザー TCF100 30L/h
液体ヘリウム貯槽	内部精製器 5000 L
圧縮機	不明 レシプロ式
中圧タンク	10m ³ × 2
貯蔵設備	8000m ³ 程度のガスを貯蔵可能
その他	液化設備は 20 年前に設置 1.5kW/L で液化できるとのこと

表 9 ヴァルター・マイスナー研究所液化システム

5. 遠心式液体ヘリウム汲み上げポンプについて

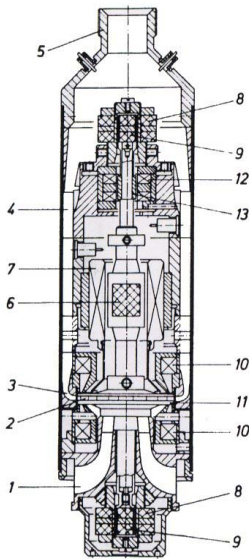


図 35. 遠心式液体ヘリウム汲上げポンプ

このポンプは液体ヘリウムでは、50%以上の汲み上げ効率を持つ遠心式液体ヘリウム汲み上げポンプである。消費電力は 10W と非常に熱量が小さい。大まかに分けて 13 のパーツより成り立っている。それぞれのパーツに創意工夫が凝らされており、機械としても興味深い物であった。ポンプは全て手作業で作られているとのことであった。なお、詳細に関しては参考文献を参照されたい。

早速であるがパーツに関して見聞きしたことに関して報告を行いたい。

まず、シャフト(図 36)について説明をする。シャフトには既にいくつかの部品が取り付けられており、磁石やインペラーの部分の部品が取り付けられていた。シャフトの内部には永久磁石が仕込まれており、これはモーターの一部であり、重要な役割を果たす。ちなみに、永久磁石の入っているところは図 36 の中央部の小さいふくらみの部分(図 35 では 6)である。

次に回転羽(図 38)について説明をする。図 35 では 2、3 に当たる。図 38 の写真を見て頂ければ一目瞭然であるが、この回転羽であるが組み込む時には溶接を行い一体物にする構造になっている。現時点では各々のパーツが離れて存在していた。よって、回転羽がどのような形状であるかつぶさに観察することができた。羽は全くの平面から立ち上がっており、このような羽の形状であれば比較的加工が容易であると思われる。但し、インペラーの構造は少々異なり、羽を加工した後、サンドイッチした構造になっておりこの加工には相当の技術を要することが伺える。



図 36. コイル

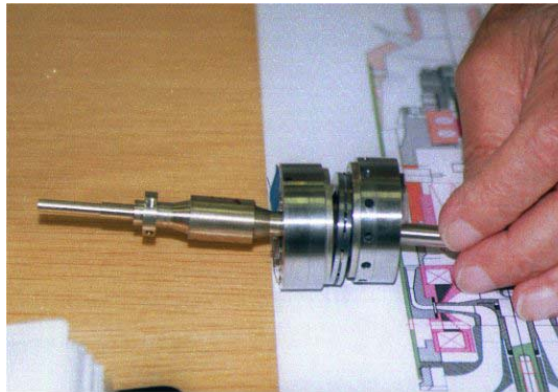


図 37. シャフト

コイル(図 36)について説明する。このコイルは図 35 の 7 の部分に当たる。このコイルについて一番に知りたい点はやはり材質であるかと思うが、超伝導線を使っていると思って聞いてみたところ、ただの銅線を使用しているとの事であった。超伝導線でもこのコイルを作る試みを行って実際にテストも行ったそうであるが、非常にハイパワーであったと

Dr.Doll 氏は言っていた。しかしながら超伝導線であると、室温でテストを行うことができないのであまり好きではないという理由から銅線にしたらしい。Dr.Doll 氏が語るところによると、室温でテストできるということは

開発に特別な環境を用意する必要がなく気軽にテストができるから良いと言う事であった。更にこのポンプを室温で水を汲み上げるテストをしたらしいが、室温下では全くロス無く使用できたそうである。

また、駆動モーターは 8 極からなるブラシレスモーターであると言っていた。

その他、このポンプを作るに当たって非常に苦労した点はシャフトの位置決めにあるとおっしゃっていた。論文でもその点はふれているが、ラジアルベアリングで大まかなセンタリングを行うのであるが最終的には位置検出用のピックアップコイルで位置検出を行い、電気回路で細かな位置決めをする。この調整が非常に精度を要し、難しいと言

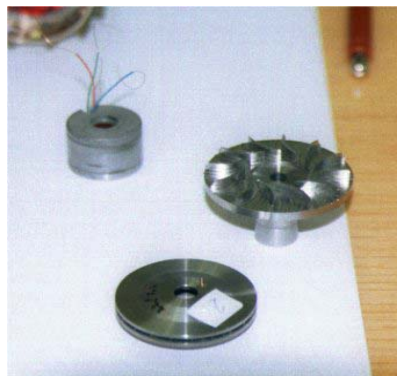


図 38. 回転羽と磁石

っていた。センタリングの為にラジアルベアリングの下部には特殊なスプリングが入っており、また調整の為に軸位置センサー



図 39. 回転羽の一部

の内部にネジが二重に切っておりそのネジの回転数で位置を決められるようになっていた。この調整が、ポンプがきちんと作動するか、しないかのキモではないかと思う。

ポンプのケースには上下 8 箇所計 16 箇所穴が開いているがこれはインペラーの上部と下部に位置し、内圧変化が起こり、位置制御が難しくなるので内圧を一定にする為に穴をあけたとのことであった。

また、私が一番興味を持っていたところでは回転羽の枚数をどのようにして決定したのか?と聞いたところこれは仕様によるとの事であった。図 39 には同じパーツが 2 個あるだが一つは 36 枚用(図 39 左)で、もう一つは 4 枚用(図 39 右)である。これは回転羽の枚数によって違う物を作っているとのことであった。

使用上における問題点がいくつかあるのだが、それらに関しても直接開発者から聞くことができたのは貴重な体験であった。例えば、液体窒素が入り込む可能性がある時にはポンプ内部のワイヤーを切断する可能性があるので使用が難しい事、また他にはバルブを閉めたままリフトを動かしてしまいトランスファーチューブを壊しそうになること等、ポンプが非常に繊細なので使用の際に抱えている問題は同じ種類の問題であり少々安心した。

これらパーツを見ることにより、以前、物性研が保有しているポンプが故障した時には全く構造が理解できていなかったもので、修理報告書を読んでもあまり実感を持って読むことができなかったが、ポンプのパーツを見たことにより、更に内部構造を理解することができたのではないかと思う。

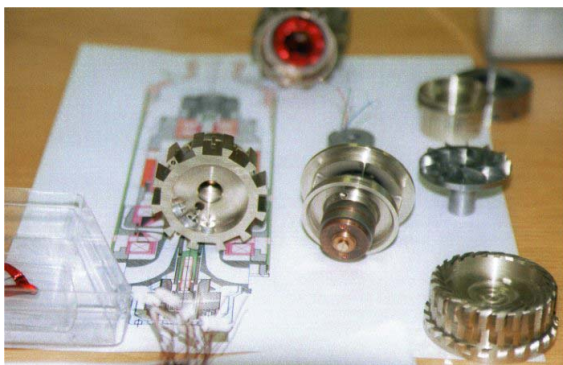


図 40. 様々な部品と図面

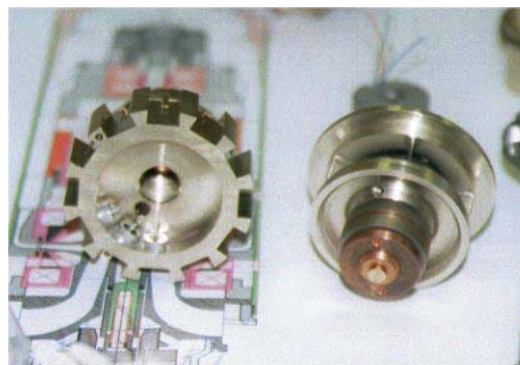


図 41. チャンネルの部分とラジアルベアリング内部

6. まとめ

この海外研修において、海外の低温技術者と幅広い議論をする事ができ、視野が広がり非常に有意義であった。特に各液化システムにはその場所独自の工夫が凝らされており、液化作業に従事している方々の工夫や苦勞をうかがい知ることができた。

また、実際に海外にでて英語を使用し、直接会話を交わすことにより、英会話も多少なり習得できたと思う。しかし、より詳しい議論を交わす為には更なる勉強が必要だと再認識させられた研修であった。

7. 謝辞

この研修において、快く案内を引き受けて下さりかつ幅広い議論と見学の機会を下さった、マックス・ブランク研究所 液化室 Mr. Schreiber、高圧部門 Dr. Guenter Sporn、中西 剛司 博士、ドレスデン工科大学 液化室 Dr.Ch.Haberstroh、ヴァルター・マイスナー研究所 Dr. Kael Neumaier、Dr. Robert Doll、また訪問実現しなかったが様々手配をしてくださった、フランス原子力庁の芳賀 芳範 博士、更にこの様な海外研修に行く機会を下さった LHePP のメンバーの方々、特に教養学部 小田嶋 豊 氏に心よりお礼を申し上げます。

8. 参考文献

[1] H.Berndt, R. Doll U. Jahn, and W. Wiedemann
LOW LOSS LIQUID HELIUM TRANSFER
SYSTEM, USING A HIGH PERFORMANCE
CENTRIFUGAL PUMP AND COLD GAS
EXCHANGE
Advances in Cryogenic Engineering, Vol.33
P.1147

[2] H. Berndt, R. Doll and W. Wiedemann
TWO YEAR'S EXPRIENCE IN LIQUID
HELIUM TRANSFER WITH A MAINTENACE
FREE CENTRIFUGAL PUMP
Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 35
P.1039