

卒業論文

^{24}O 非弾性散乱実験のための液体水素標的の開発

05B15307 田中直樹

指導教官 中村隆司

東京工業大学 理学部 物理学科

平成21年4月6日

概要

中性子数過剰な不安定核では、殻構造の変化に伴う新魔法数の出現などの安定核には見られない特異な現象が多くの実験で報告されている。不安定核の殻構造を知る上で、その励起状態を知ることは重要な手がかりとなる。不安定核の励起状態を知る有効な手段の一つとして、陽子非弾性散乱が挙げられる。我々は、中性子過剰領域で現れる新魔法数 $N = 16$ のシェルギャップを決定すべく、陽子非弾性散乱を用いて酸素同位体の中性子束縛限界核 ^{24}O の第一 2^+ 励起準位の探索実験を行う。酸素の中性子束縛のみでなく、近傍核の中性子束縛のメカニズムを理解する上で $N = 16$ のシェルギャップを特定することは重要である。 ^{24}O の第一 2^+ 励起準位は未だ正確に決定されていなく、このような実験が待たれている。

本研究では、上記実験で用いる液体水素標的システムの開発・改善を行う。従来、陽子非弾性散乱の標的としては室温で安定物質であるポリエチレン CH_2 標的が用いられてきたが、標的起源のバックグラウンドの量を減らし、非弾性散乱のイベント数を増やすという特徴のある液体水素標的が本実験では採用される。液体水素標的は低温での安定したオペレーションが不可欠であり、そのための冷却・真空技術等の実験技術が必要となる。

本論文では、液体水素標的の仕組みや原理を述べ、液体水素のセルの開発やセルに用いる膜の材質、厚さの最適化を行う。また、冷却テストの結果と考察、およびレーザーを用いての膜の膨らみの測定と計算結果の比較などについて詳述する。

目次

第1章	序	1
1.1	新魔法数 $N=16$	1
1.2	^{24}O の第一 2^+ 励起準位	3
第2章	^{24}O の非弾性散乱実験	6
2.1	実験概要	6
2.1.1	二次ビーム測定系	7
2.1.2	二次標的液体水素標的における反応	7
2.1.3	反応後測定系	8
2.2	不変質量法	10
2.3	粒子識別の原理	11
第3章	液体水素標的システム	12
3.1	液体水素標的を用いる意義	12
3.2	液体水素標的システムの仕組み	14
3.2.1	冷凍器-コンプレッサー系	14
3.2.2	第2段ステージ-セル間の伝熱棒	17
3.2.3	放射線シールド	18
3.2.4	温度モニターとヒーター	19
3.2.5	ターゲットセル	20
3.3	液体水素	24
第4章	膜によるクーロン多重散乱と膜の膨らみ測定、および銅管伸縮の見積り	25
4.1	液体水素標的におけるクーロン多重散乱	25
4.2	膜の膨らみ測定	26
4.3	最適な膜の考察と Be 実験との比較	28
4.4	銅管の伸縮の見積り	29
第5章	冷却テストの結果および考察	30
5.1	液化時のバッファの圧力低下	30
5.2	テストセルでの液化テスト	32
5.3	実験用セルでの液化テスト	34
5.4	液化テストの考察	35
5.5	冷却テストのまとめ	35
第6章	まとめと今後の展望	36

第7章	付録	37
7.1	作業上の注意	37
7.2	2号機液体水素作成手順	37
7.2.1	セルへ水素ガス送る手順	38
7.2.2	冷却の手順	39
7.3	液化テスト終了の仕方	40
7.4	レーザー測定	40
7.5	LabVIEW	41
7.6	真空漏れテストの方法	41
7.6.1	ガスハンドラー	41
7.6.2	セル	42
7.6.3	チェンバー	42
7.6.4	その他	42
7.7	ウィンドウへの膜の貼りかた	42
7.8	真空の周辺機器や道具	43
7.8.1	真空シール	43
7.8.2	ガスボンベの扱いかた	44
7.9	液化テスト結果	45
7.9.1	2009.01.10 のテスト	45
7.9.2	2009.01.30 のテスト	46
7.9.3	2009.02.01 のテスト	47
7.9.4	2009.02.04 のテスト	48
7.9.5	2009.02.09 のテスト	49

目次

1.1	Z \leq 13における横軸中性子数、縦軸陽子数の核図表	1
1.2	酸素とフッ素でのテンソル力による軌道の変化の様子	2
1.3	^{24}O の第一 2^+ 励起準位の理論予想値	3
1.4	中性子過剰領域の酸素偶-偶核の第一 2^+ 励起準位の比較	5
1.5	C.R.Hoffmanらの実験での結果	5
2.1	RIPSの磁石、検出器の配置	6
2.2	実験セットアップ概念図	8
2.3	実験のセットアップ図面	9
3.1	クーロン多重散乱の様子	13
3.2	液体水素システムの概図	14
3.3	GMサイクル概要図	16
3.4	GMサイクル 膨張室 P-V 図	16
3.5	銅の熱伝導率 α	17
3.6	銅管の伸び率 $\frac{L(293)-L(T)}{L(293)}$	17
3.7	ターゲットセル本体 (図面)	20
3.8	ターゲットセルウィンドウ (図面)	21
3.9	ターゲットセル本体 (写真)	21
3.10	ターゲットセルウィンドウ (写真)	21
3.11	低温でのアルミと銅の熱伝導率	22
3.12	Be 実験での二次標的でのビームサイズ	23
3.13	水素の蒸気圧曲線	24
4.1	レーザー測定概念図	26
4.2	レーザー測定写真	26
4.3	レーザー測定結果 上図：測定結果、中図：ウィンドウ淵で校正、下図：校正後	27
4.4	圧力に対する膜の膨らみ測定値と計算値	28
4.5	レーザーの位置による銅管の伸びの確認	29
5.1	密度変化	31
5.2	上:時間 vs 温度 (上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大	32
5.3	上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力	32
5.4	温度に対しての圧力変化	33
5.5	上:時間 vs 温度 (上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大	34
5.6	上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力	34

5.7	温度に対しての圧力変化	34
7.1	液体水素標的概図	39
7.2	上:時間 vs 温度(上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大	45
7.3	上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力	45
7.4	上:時間 vs 温度(上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大	46
7.5	上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力	46
7.6	蒸気圧曲線	46
7.7	上:時間 vs 温度(上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大	47
7.8	上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力	47
7.9	液体水素標的概図	47
7.10	上:時間 vs 温度(上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大	48
7.11	上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力	48
7.12	蒸気圧曲線	48
7.13	上:時間 vs 温度(上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大	49
7.14	上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力	49
7.15	蒸気圧曲線	49
7.16	液体水素標的概図	50

表目次

3.1	冷凍器の仕様	15
3.2	コンプレッサーの仕様	15
3.3	冷凍器使用環境の仕様	15
3.4	アルミニウム合金 A1050,A5052 の物理特性	22
4.1	クーロン多重散乱のスケールファクター L, θ_0 の値	26
4.2	Be 実験と本実験の膜の比較	29
5.1	温度に対しての比例係数 k の値	30
7.1	温度に対しての比例係数 k の値	39

第1章 序

1.1 新魔法数 $N=16$

重イオン加速器が発達するとともに、大量の不安定核ビームの生成が可能になり安定核のみでなく不安定核の研究が盛んに行われるようになった。原子核物理学において、不安定核の振る舞いを解明することは重要な課題の一つである。図1.1は核図表と呼ばれ、横軸に中性子数 N 、縦軸に陽子数 Z を $Z \leq 13$ の領域で描いたものである。

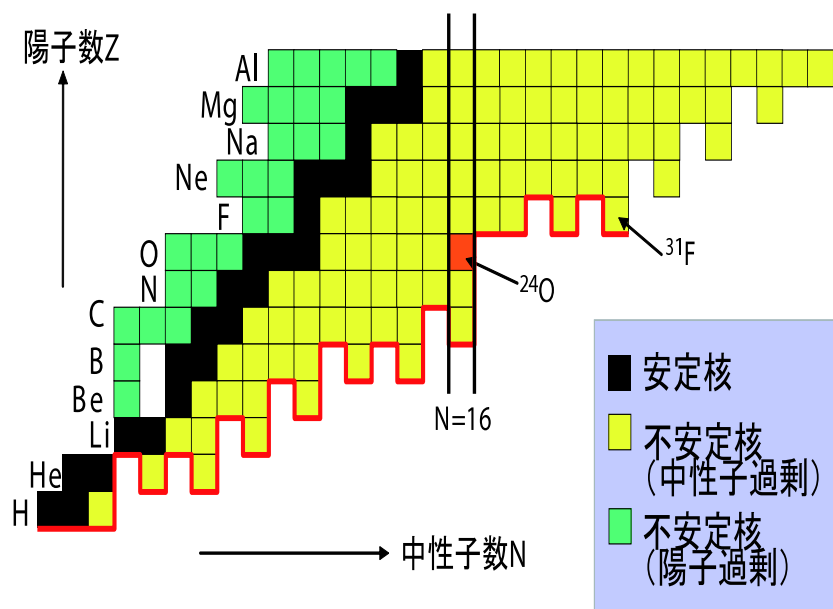


図 1.1: $Z \leq 13$ における横軸中性子数、縦軸陽子数の核図表

地球上の大半の物質の原子核は安定核と呼ばれ、図1.1では黒い四角で表される。Ca 同位体まではほぼ $Z \approx N$ の線上にあり、この線は β 安定線と呼ばれる。安定核以外の原子核は不安定核(もしくはエキゾチック核)と呼ばれる。図1.1で赤い線で表されているのは「中性子ドリップライン」である。中性子ドリップラインとは、各元素の中性子束縛限界の同位体を線で結んだものである。図1.1で赤線が途切れているのは現在までに、ドリップラインが酸素同位体までしか確定していないためである。近年では、不安定核の中でも中性子ドリップライン近傍の原子核についての研究が注目されるようになってきた。

原子核の中性子束縛メカニズムを知る上で重要な要素の一つとして「魔法数」が挙げられる。魔法数は原子核の構造を決定する「基礎的な量」である。粒子の軌道エネルギーの差が大きい準位間のことを指し、魔法数の陽子、中性子を持つ原子核は特に安定となる。

安定核では魔法数は 2,8,20,28,50 であることはよく知られている。これらの魔法数は安定核、不安定核で共に不変な量であると考えられていた。しかし、中性子過剰領域において上述の魔法数の消滅、または新魔法数の出現という特異な現象が現れることが様々な実験で確認されている。ここでは、新魔法数の一つ $N=16$ について注目する。酸素同位体において $N=16$ のシェルギャップが大きく、新魔法であることが、中性子分離エネルギーの観点から確認された [1]。また、 ^{24}O の γ 線ピークが見付からなかったことから、第一励起準位は中性子分離エネルギー (この実験では 3.7[MeV] とした) より高く位置するとし、 $N=16$ のシェルギャップが大きいことを確認した [2]。酸素同位体における中性子ドリフラインが $N=16$ の ^{24}O であることは、この新魔法数 $N=16$ の出現に起因すると考えられる。

酸素同位体においては、 $N=16$ の ^{24}O が中性子束縛限界であるが、陽子数の一つ大きいフッ素では、現在までに $N=22$ の ^{31}F の存在が確認されている [3]。この中性子束縛限界における急激な変化においても酸素同位体における $N=16$ シェルギャップが大きい結果であると考えられる。この新魔法数出現は中性子過剰核に現れる中性子スキン核・ハロー核 [1] や核子間 (主に陽子-中性子間) にはたらくテンソル力 [4] のためであると考えられている。酸素とフッ素のテンソル力による軌道の変化を図1.2に示した。

酸素同位体における $N=16$ シェルギャップを決定することは、酸素だけでなくその近傍核の中性子束縛のメカニズムを知る上で非常に重要である。しかし、酸素同位体における $N=16$ のシェルギャップの大きさは未だ確定しておらず、実験による測定が待たれている。

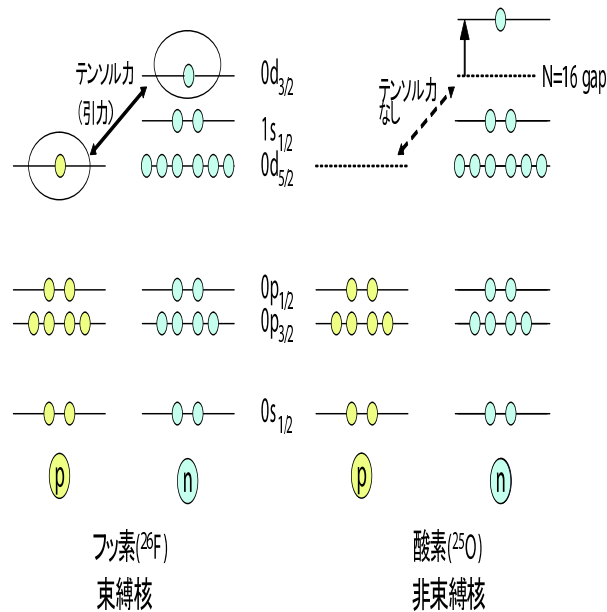


図 1.2: 酸素とフッ素でのテンソル力による軌道の変化の様子

1.2 ^{24}O の第一 2^+ 励起準位

$N=16$ シェルギャップの大きさを決定する手段として、 ^{24}O の第一 2^+ 励起準位の測定がある。 ^{24}O は原子番号が魔法数の $Z=8$ なので、陽子軌道が閉じている。そのため、第一 2^+ 励起状態は中性子の $N=16$ ギャップ間の励起が支配的であると考えられる。よって ^{24}O の第一 2^+ 励起準位を調べることで $N=16$ のシェルギャップを決定することが可能となる。

まず、いくつかのシェルモデル (W model、USDa,USDb model[5]¹、sdpf model) 計算での ^{24}O の低励起準位を算出した結果を図1.3 に示す。図1.3からわかるように、全てのシェルモデル相互作用で中性子分離エネルギーの実測値 $4.09[\text{MeV}]$ (AME²では $3.63[\text{MeV}]$) より高い値を示している。

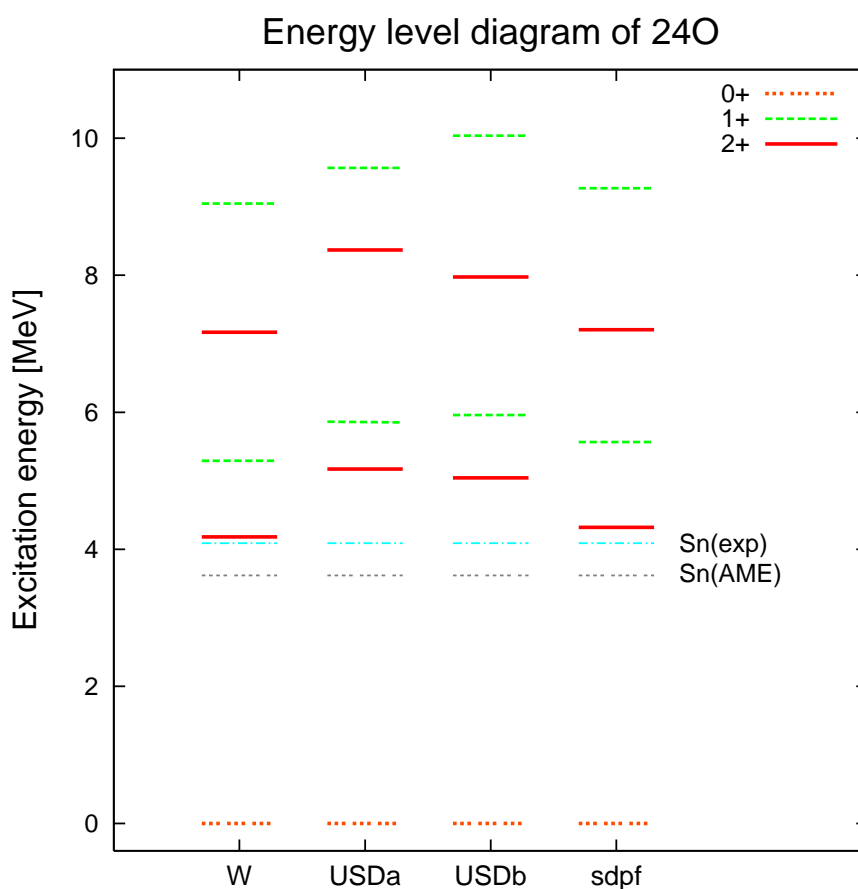


図 1.3: ^{24}O の第一 2^+ 励起準位の理論予想値

¹USD モデルの改良版で、USDa,USDb ではフィット時に採用した実験値の個数が異なる

²2003 年 Atomic Mass Evaluation

次に、 ^{24}O の第一 2^+ 励起準位について中性子数のみが異なる偶-偶核($^{20}\text{O}, ^{22}\text{O}$)の酸素同位体との比較を行う。第一 2^+ 励起準位のエネルギーは ^{20}O で1.67[MeV]、 ^{22}O では3.20[MeV]である [6]。 ^{24}O においては未だ確定していない。しかし C.R.Hoffman らがミシガン州大学 (MSU) の National Superconducting cyclotron Laboratory(NSCL) で、フッ素 ^{26}F の陽子ノックアウト反応を用いて ^{24}O の低励起準位の測定を行った。その結果として ^{24}O の第一 2^+ 励起準位は、中性子崩壊エネルギー 4.09[MeV] から 630[keV] 程度高い 4.72[MeV] 近傍に位置すると測定された。また C.R.Hoffman らは、測定データから第一 1^+ 励起準位は 5.33[MeV] あたりに位置するという可能性を示唆した [7]。図1.4に $^{20}\text{O}, ^{22}\text{O}$ の 2^+ 励起準位 [6] と C.R.Hoffman らの 2^+ 励起準位測定 [7] について示す。

しかし C.R.Hoffman らの実験ではエネルギー分解能が不十分で、 2^+ 励起準位と 1^+ 励起準位を分けて観測することが出来なかった (図1.5)。理論モデル [5] から、第一 2^+ 、 1^+ 励起状態は近い準位にあると仮定し、実験データをフィットし、上記の励起準位を得た。図1.5では青線が第一 2^+ 準位、赤線が第一 1^+ 準位を示し、黒線はその2つの独立のピークをフィットしたものである。右上の図は ^{24}O のそれぞれの励起準位から ^{23}O の基底状態と中性子に崩壊した様子を示している。このように ^{24}O の 2^+ 励起準位と 1^+ 励起準位は未だ分離して測定されておらず、 2^+ 励起準位エネルギーも確定はしていない。

そこで我々は、2009年度に埼玉県和光市の理化学研究所の RIPS(RIKEN Projectile-fragment Separator の略) で上述の N=16 シェルギャップの大きさの決定を目的とする実験を行う。 ^{24}O の第一 2^+ 励起状態を特定することで、N=16 のシェルギャップの大きさを決定する。実験手法としては、低励起状態の準位を生成するのに効果的な陽子非弾性散乱を用いる。二次ビームのエネルギーが 70[MeV/A] における陽子非弾性散乱ではノックアウト反応とは異なり、断面積の違いから 2^+ 励起状態を 1^+ 励起状態よりも 10 倍程度多く生成するため、 1^+ 励起準位が混合せず、 2^+ 励起準位の測定が可能であると期待される。本実験では、その陽子標的として今回の研究のテーマである「液体水素標的」を採用する。従来、陽子標的としては室温で安定物質であるポリエチレン CH_2 標的が用いられてきた。液体水素標的は長時間低温でオペレートすることが必要であるためシステム上やや複雑になる。しかし、バックグラウンド量の少なさや単位厚さあたりの標的数が多いこと、さらにクーロン多重散乱を抑えられる点においてポリエチレン CH_2 標的よりも優れている。液体水素標的は今までに様々な実験で用いられてきた。その一例として理化学研究所 RIPS で行われた「 ^{13}Be 、 ^{14}Be の低励起準位の測定」がある [8]。この実験でも二次標的として液体水素標的が採用され、その実用性が示された。

本論文では本実験二次標的の液体水素標的の開発・改善について述べる。第2章で ^{24}O の非弾性散乱実験の概要、第3章で液体水素標的の仕組みや特徴を詳しく説明する。第4章では標的によるクーロン多重散乱を見積り、膜の膨らみ測定と結果、さらに銅管の伸びについて、第5章では冷却テストの結果・考察を述べる。最後に6章でまとめと今後の展望について記述する。

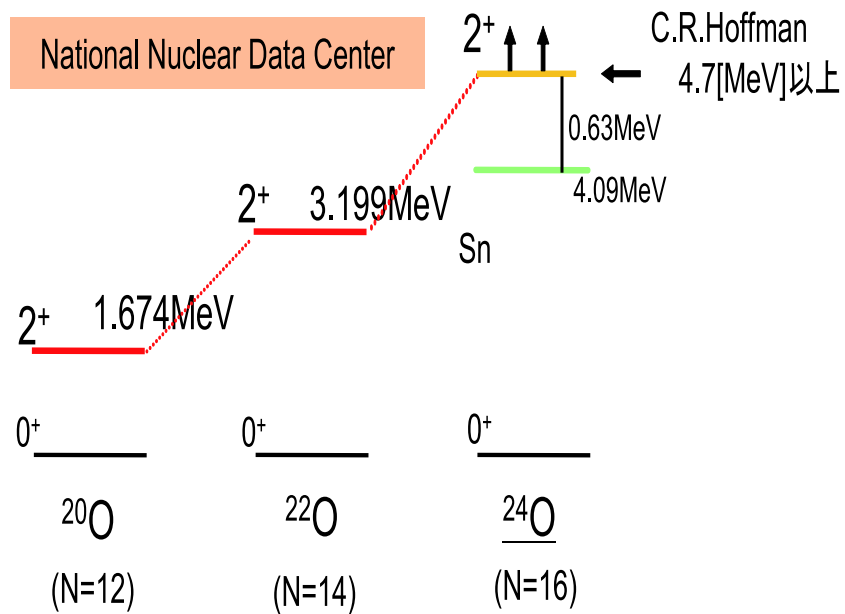


図 1.4: 中性子過剰領域の酸素偶-偶核の第一 2⁺ 励起準位の比較

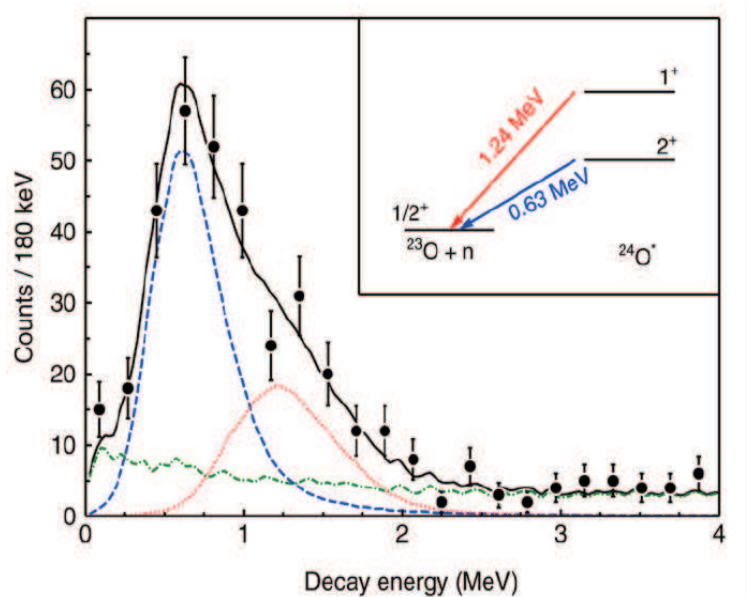


図 1.5: C.R.Hoffman らの実験での結果

第2章 ^{24}O の非弾性散乱実験

第2章では ^{24}O の非弾性散乱実験の概要について述べ、励起準位の特定に用いる不変質量法や RIPS における粒子識別の原理などについて触れる。

2.1 実験概要

実験は、埼玉県和光市にある理化学研究所の粒子加速器研究施設 RARF(RIKEN Accelerator Research Facility) と不安定核ビーム生成ライン RIPS(RIKEN Projectile fragment Separator) において行われる。RARF で加速された 1 次ビーム $95[\text{MeV}/\text{A}]$ の ^{40}Ar を生成標的 Be により核破碎反応を引き起こさせ、 ^{23}O , ^{24}O を作り出し RIPS によりこれらを選別する。図2.1に RIPS の概図を示す。図2.1中の Q は四重極磁石 (Quadrupole Magnet)、D は双極子磁石 (Dipole Magnet)、F は焦点面 (Focal Plane) を示す。以下、各測定系について上流から簡単に説明する。

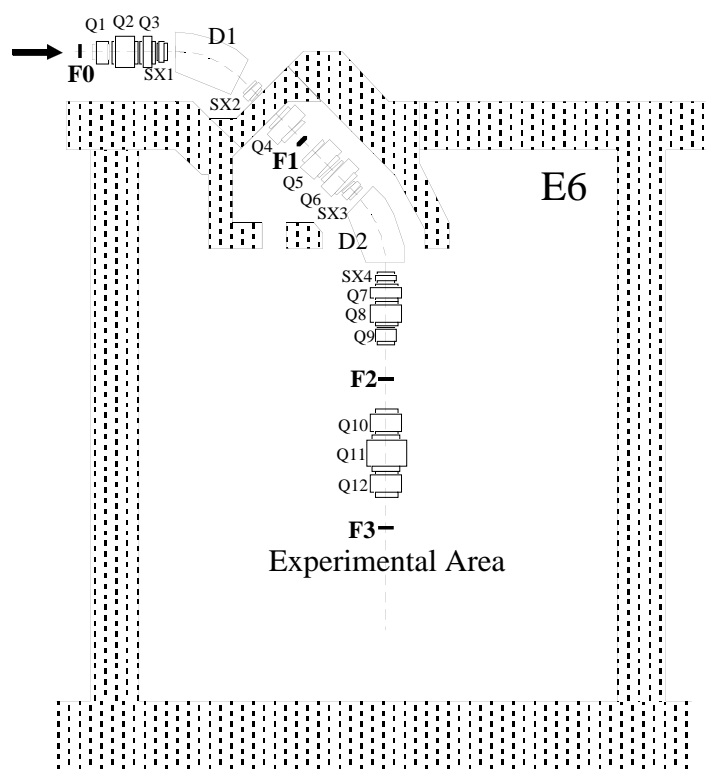


図 2.1: RIPS の磁石、検出器の配置

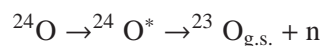
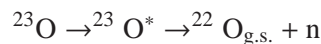
2.1.1 二次ビーム測定系

一次ビーム 95[MeV/A] の ^{40}Ar は F0 で厚さ 231[mg/cm^2] の生成標的 Be によって核破砕反応を起こす。生成された破砕核から二次ビーム $^{23}\text{O}, ^{24}\text{O}$ を入射核破砕片生成分離装置 RIPS によって選別する。純度の高い $^{23}\text{O}, ^{24}\text{O}$ を得るために中間焦点 F1 にくさび型のディグレーダーと呼ばれるアルミニウムの減衰板を設置する。ディグレーダーについては 2.3 節で詳しく述べる。

入射ビーム $^{23}\text{O}, ^{24}\text{O}$ のエネルギーは F0, F2 に置かれたプラスチックシンチレータにより飛行時間 TOF(Time of Flight) を測定することで決定する。TOF から粒子のエネルギーを求める原理は 2.3 節に記す。プラスチックシンチレータは荷電粒子が物質中を通過する際、エネルギー損失をして発するシンチレーション光を利用して粒子の通過タイミングを測定する。また、F1, F2 において PPAC(Parallel Plate Avalanche Counter) により粒子の通過位置が決定される。PPAC はガス中を通過した荷電粒子により、ガス中の分子が電離され電子ができ、その電子がなだれを起こす。左右の電極でその電子なだれを電気信号として取り出し、その時間差から粒子の通過位置を決定する測定器である。二次標的「液体水素標的」への入射位置・角度は 2 台のドリフトチェンバー (NDC) で決定する。ドリフトチェンバー荷電粒子の位置・角度を測定するワイヤーチェンバーである。半値幅 100[μm] 以下という高精度での測定が可能であり、PPAC に比べ位置分解能に優れている。プラスチックシンチレータで測定された TOF から求まる入射粒子 $^{23}\text{O}, ^{24}\text{O}$ のエネルギーと NDC で決定した入射角度から運動量ベクトルを決定する。二次ビームの強度、予想されるカウント数は $^{23}\text{O}, ^{24}\text{O}$ それぞれ 71[MeV/A], 72[MeV/A] と 200[cps], 8[cps] である。

2.1.2 二次標的液体水素標的における反応

二次ビーム $^{23}\text{O}, ^{24}\text{O}$ は F3 を通過後、本研究で扱った液体水素標的内の陽子と非弾性散乱を起こし、励起状態になる。陽子非弾性散乱では 2^+ 励起に比べ 1^+ 励起の断面積が 10 分の 1 程度なので、 2^+ 準位を区別して測定できると予想される。本実験では、 $^{23}\text{O}, ^{24}\text{O}$ 励起状態からの一中性子放出のチャンネルについて注目する。



液体水素標的での反応の後、荷電粒子 $^{23}\text{O}, ^{24}\text{O}$ が放出する脱励起 γ 線を測定するために、NaI(Tl) シンチレーターが標的周辺に配置される。本実験では液体水素標的は厚さ 150[mg/cm^2] に設定する。

2.1.3 反応後測定系

荷電粒子測定系のセットアップの概念図と図面 (次ページ) をそれぞれ図2.2,2.3に示す。

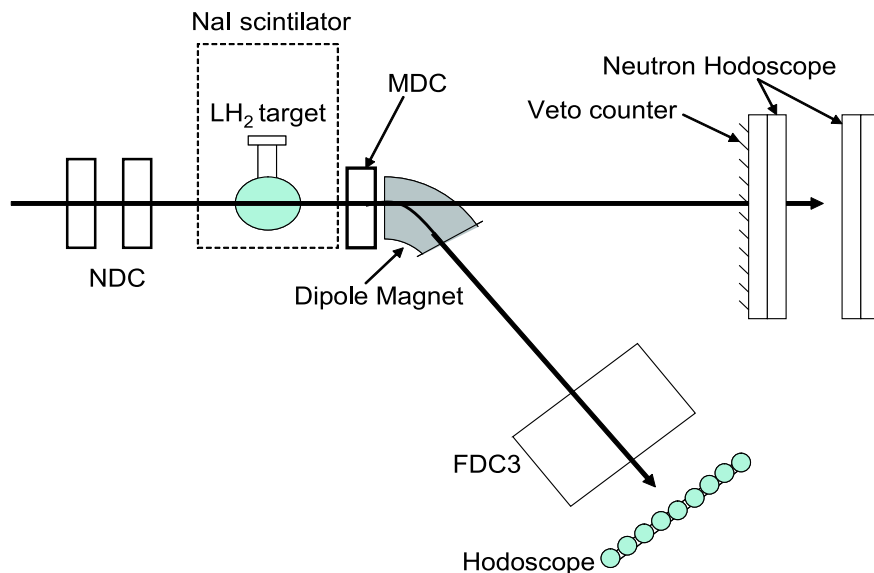


図 2.2: 実験セットアップ概念図

二次ビーム ^{23}O , ^{24}O は標的に励起した後、荷電粒子 ^{22}O , ^{23}O と中性子に崩壊する。それらの崩壊粒子は標的に入射するときとほぼ同じ速度で、前方に集中して散乱され、各々の測定系で運動量ベクトルを決定する。まず、中性子測定系から説明する。中性子はホドスコープという二層の測定器によって TOF を決定し、そのエネルギーを決定する。ホドスコープはプラスチックシンチレータを 7 本を並べて一つの検出器として荷電粒子の時間情報を測定する。時間分解能に優れ、300[psec] 程の精度での測定が期待される。一層目の薄いシンチレータは Veto カウンターと呼ばれ、バックグラウンドの荷電粒子を排除するために用いられる。荷電粒子は薄い Veto カウンターでも光を発するが、中性子は反応せず通り抜ける。この違いから Veto カウンターの信号を得た粒子は荷電粒子とみなし排除する、という方法をとる。中性子の TOF は Veto カウンターの下流にある 2 枚のシンチレータ間の時間差で決定される。

一方、標的を出た荷電粒子はドリフトチェンバー (MDC) により出射粒子の位置・角度を決定され、双極子磁石によって軌道を曲げられる。さらに下流のドリフトチェンバー (FDC3) とホドスコープにより出射粒子の運動量ベクトルが決定される。ホドスコープの有感領域は鉛直方向 450[mm]・水平方向 700[mm] で、厚さ 5[mm] である。

以上のようにそれぞれの測定系で決定された終状態の粒子 (^{22}O or ^{23}O + neutron) の運動量ベクトルから不変質量法を用い崩壊前の粒子 (^{23}O or ^{24}O) の励起準位を求める。不変質量法については 2.2 節でその原理と特徴を記述する。

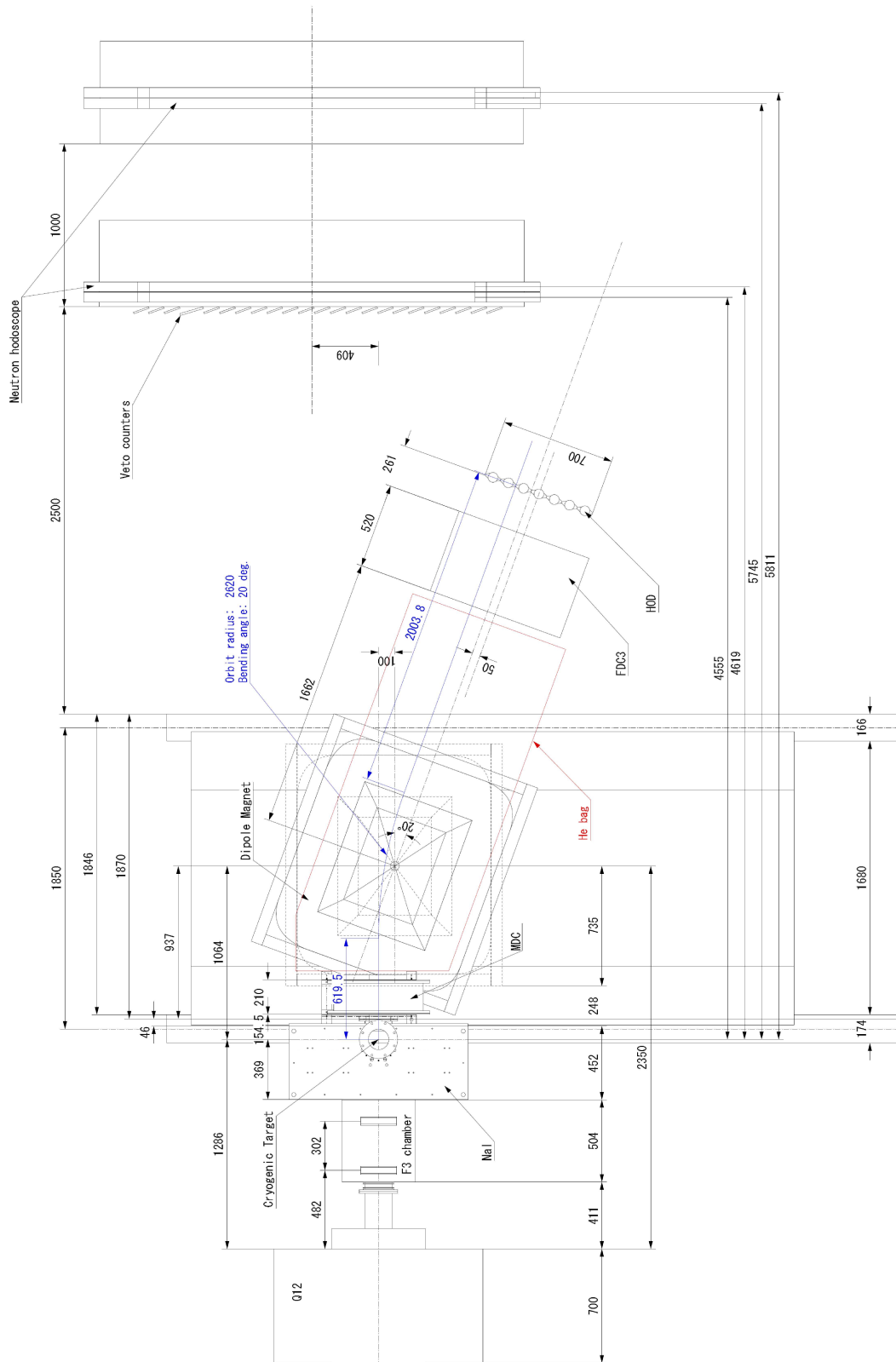


図 2.3: 実験のセットアップ図面

2.2 不変質量法

不変質量法を用いて、 ^{23}O , ^{24}O の励起準位を特定する方法を簡単に説明する。反応の終状態における粒子の全て (exclusive) もしくは一部の粒子 (inclusive) の運動量ベクトル (E_i, P_i) を測定することにより、不変質量 M_{IV} を求める。

$$M_{IV} = \sqrt{(\sum E_i)^2 - |\sum \vec{P}_i|^2}$$

共鳴の準位の励起エネルギー E_{ex} は M_i を終状態の粒子の質量、 E_s を特定のチャンネルへの崩壊の閾値 threshold として以下のように求めることができる。

$$E_{\text{ex}} = M_{IV} - \sum M_i + E_s$$

このように反応の終状態の粒子の情報から不変質量 M_{IV} を求め、励起エネルギーを求める方法を不変質量法という。この方法は非束縛共鳴状態を求める方法としてよく用いられる。その理由をいくつか以下に示す。二次ビームは大きな拡がりを持ち、決定精度がそれほど高くない。しかし、不変質量法は入射粒子の運動量ベクトルが関係しないため、運動量に拡がりをもつ入射粒子に対しても測定の分解能を損なうことなく測定できる。そして、崩壊の際の生成粒子が前方に集中するため、比較的小さな立体角を覆うことのできる検出器を用いれば観測できるという特徴が挙げられる。さらに、相対エネルギー ($E_{\text{rel}} = E_{\text{ex}} - E_s$) が 1[MeV] で rms 値 (root mean square=2 乗平均平方根) で 150[keV] と高いエネルギー分解能が得られる。不変質量法はクーロン反応実験などにも用いられ、その有効性を示している [9]。不変質量法の分解能は主に標的中での飛程差に依存する。飛程差とは標的中のどの位置で反応したかを表す。

2.3 粒子識別の原理

RIPSにおける粒子識別の原理について簡単に説明する。RIPSでは粒子がもつ磁気硬度と呼ばれる $B\rho$ [T·m] の値とエネルギー損失 ΔE によって粒子を識別する。質量数 A 、原子番号 Z (=荷電量 Q [C]) を持った粒子は半径 ρ の双極子磁石 (Dipole Magnet) の磁場 B によりローレンツ力を受け、その軌道は曲げられる。以下、 m [kg]:質量、 p [kg·m/s]:運動量、 v [m/s]:速度 である。

$$m \frac{v^2}{\rho} = QvB$$

上式を変形すると、 $p=mv$ より磁気硬度は運動量 p と荷電量 Q によって以下のように表される。

$$B\rho = \frac{p}{Q}$$

ここで、 p [kg·m/s]= p' [MeV/c]、 Q [C]= Q' [e] として単位換算を行う。

$$\left[\frac{\text{kg} \cdot (\text{m/s})}{C} \right] = \left[\frac{\text{J}/(\text{m/s})}{C} \right] = \left[\frac{2.99792458 \times 10^8 \text{J}/c}{C} \right] \approx \left[\frac{300 \text{MeV}/c}{e} \right]$$

よって、以下の式(2.1)

$$B\rho = \frac{p}{Q} = \frac{1}{300} \frac{p'}{Q'} \approx \frac{1}{300} \frac{A}{Q} v = \frac{1}{300} \frac{A}{Q} \frac{L}{TOF} \quad (2.1)$$

ここで L は粒子の移動距離 (定数) である。 ^{23}O , ^{24}O の $A/Q(=A/Z)$ はそれぞれ、2.875, 3.000 である。実験では Plastic scintilater を用い F0-F2 間の飛行時間 TOF を測ることで粒子の運動量 (エネルギー) を決定する。しかし $B\rho$ [T·m] 値だけでは同じ A/Q を持った粒子を識別することができないため、ディグレーダーを用いる。粒子は双極子磁石 D1(図2.1)にて A/Q の比によって分けられ、F1 運動量スリットで二次ビームを選び出す。その後ディグレーダーと呼ばれるアルミニウムのくさび型の物質をおくことにより、粒子は Bethe-Bloch の式に従い、エネルギー損失をする。以下で、 m_e, e は電子の質量、電荷で、 I はイオン化エネルギー、 Z, v は入射粒子の電荷と速度 N_0 はアボガドロ数、 A', Z' は物質の質量数、原子番号である。Bethe-Bloch の式は以下ようになる。

$$-\frac{dE}{dx} \approx \frac{4\pi N_0 e^2 Z^2 Z'}{m_e v^2 A'} \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] [\text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)] \quad (2.2)$$

式(2.2)より荷電粒子のエネルギー損失は Z^2 に比例することがわかる。よって A/Q の比が同じ粒子でも Z によりエネルギー損失 ΔE が異なるため、再度双極子磁石 D2 を用いて、運動量 (エネルギー) によって粒子を識別すれば純度の高い 2 次ビーム ^{23}O , ^{24}O を選び出すことが可能となる。

第3章 液体水素標的システム

第3章では液体水素標的システムを用いる意義を確認し、システムの各部位について詳しく説明する。さらに、開発したセル本体やセルウィンドウを示す。

3.1 液体水素標的を用いる意義

先に記述したように、未知の低励起状態を作り出すには、陽子非弾性散乱を用いるのが効果的である。液体水素標的が陽子非弾性散乱の標的として採用される利点を挙げ、簡単にポリエチレン CH_2 との比較を行う。

まず、液体水素標的では標的の単位厚さ、単位エネルギーあたりの原子数を多くできることが挙げられる。実験で期待される生成量 Yield は、 I :ビーム量、 N_A :アボガドロ数、 A :質量数、 σ :散乱断面積、 ϵ :検出効率を用いて、以下のように表される。

$$\text{Yield} = I \cdot \frac{N_A}{A} \cdot \sigma \cdot \epsilon \quad (3.1)$$

水素は質量数 $A=1$ なので、非弾性散乱のイベント数の面で大きく期待できる。式 (2.2) の Bethe-Bloch の式より、 $72[\text{MeV}/A]$ の ^{24}O が $150[\text{mg}/\text{cm}^2]$ 厚の液体水素中で失うエネルギーは約 $8.24[\text{MeV}/A]$ である。同エネルギー損失をポリエチレン標的の中で起こすときポリエチレン標的厚は $440[\text{mg}/\text{cm}^2]$ となる。各々の標的中の原子数は液体水素標的が 9.0×10^{22} 個、ポリエチレン標的が 2.2×10^{21} 個となる。同じエネルギー損失で比較すると、水素標的の方が約 4.1 倍多い。一方、原子核の半径は $r=r_0 A^{1/3}$ ($r_0=1.2[\text{fm}]$) と表される。断面積を原子核の半径に比例するとの仮定のもとでは、ポリエチレン標的 ($A=14$) の散乱断面積 σ は水素標的の ($A=1$) の $14^{1/3}=2.41$ 倍なので、式 (3.1) から水素標的の方が生成量が 1.7 倍多いことが分かる。また、液体を用いる理由としては、気体のまま用いると物質量が少なく十分な統計が見込めない上に、温度依存性などにより標的厚の一様性が失われるためである。

そして、液体水素標的では標的起源のバックグラウンドを少なくすることができる。本実験での二次ビーム ^{23}O , ^{24}O のエネルギーは、中間エネルギー領域の $70[\text{MeV}/A]$ 程度なので陽子が励起したりしない。さらに水素は複合粒子でないため、標的起源の γ 線が検出されないので、バックグラウンドを少なくすることが可能となる。よって強度の小さい不安定核ビームでも γ 線ピークを測定し、同定することができる。ポリエチレン CH_2 では炭素による大きなバックグラウンドを生み出してしまう。

さらに液体水素標的では、クーロン多重散乱 (multiple scattering) を小さくできる。荷電粒子は標的中の物質によりクーロン多重散乱を起こす。クーロン多重散乱とは物質中の電子が生成するクーロンポテンシャルによって粒子が物質中で何度も散乱することである。弾性散乱など大きく角度が変化する散乱は無視できるとするとクーロン多重散

乱はほぼガウス分布で与えられ、その標準偏差の値 θ_0 を求める式 (3.2) は以下のように与えられる。

$$\theta_0 = \frac{13.6[\text{MeV}]}{\beta c p} Z \sqrt{\frac{x}{X}} \left(1 + 0.038 \ln \frac{x}{X} \right) \quad (3.2)$$

ここで βc は粒子の速度、 p は運動量、そして Z は粒子の原子番号。また x は通過する物質の厚さで X は物質の放射長 (radiation length) である。同エネルギー損失を起こす標的厚に対し式 (3.2) を用いて概算すると、水素標的では 1.23[mrad] に対し、ポリエチレン標的では 2.67[mrad] である。同エネルギー損失の比較の元では、液体水素標的を用いることでポリエチレン標的に比べクーロン多重散乱を半分程度に抑えられることがわかる。以下、図3.1にクーロン多重散乱の様子を示す。

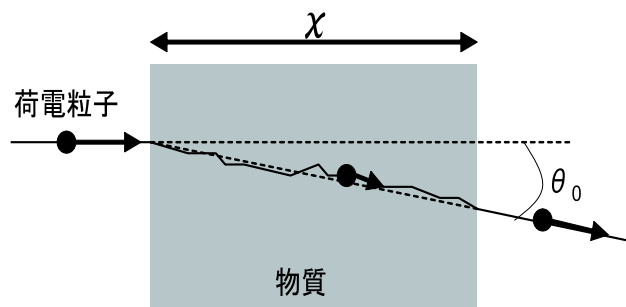


図 3.1: クーロン多重散乱の様子

以上に示したように、液体水素標的は生成量を増やし、標的からのバックグラウンドを少なくする、さらにクーロン多重散乱を小さく抑えられる点においてポリエチレン標的より優れることが確認できた。次節 3.2 では液体水素標的システムの各部位について詳しく説明していく。

3.2 液体水素標的システムの仕組み

液体水素標的システムは九州大学の相良、龍頭らにより開発された。真空チェンバー内に配置するアルミニウムで出来た液体水素を入れる標的のセルと、2段式のCryostatと呼ばれる冷凍器により構成される。セルと冷凍器は熱伝導性のよい銅管でつながっている。また、セルはアルミニウムの放射線シールドにより外部からの熱放射を防いでいる。液体水素標的システムの模式図は以下の図3.2ようになっている。

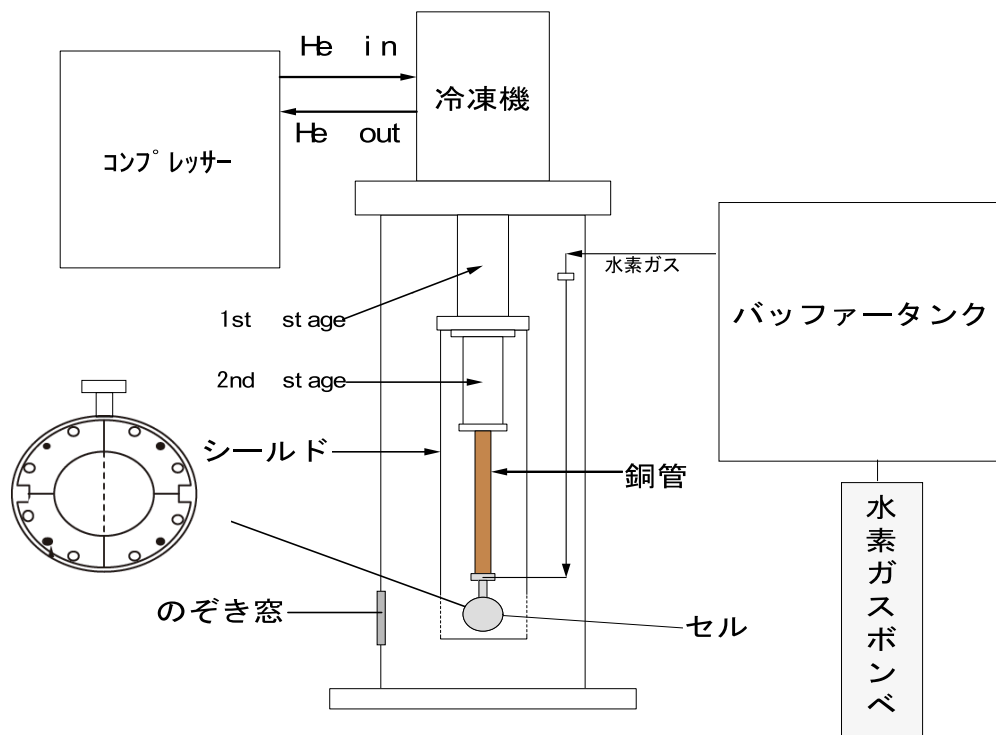


図 3.2: 液体水素システムの概図

以下、各部位について詳しく説明する。

3.2.1 冷凍器-コンプレッサー系

本研究で用いた標的システムの冷凍器は岩谷瓦斯のミニスタット D510 を用いた。この冷凍器は構造簡略化のため、圧力を制御するディスプレイッサー (ピストン) とが一体化して、2段式の閉サイクルヘリウムガス冷凍器である。コンプレッサーは蓄冷器で熱交換をしながら、圧縮した作業ガスの高圧ヘリウムガスを送り、低圧ヘリウムガスを回収する役割を担う。この冷凍器の特徴は、電源と冷却水さえあれば、簡単なボタン操作で任意の温度を精度よく保つことが出来るので、幅広い温度領域においての測定が可能となることである。以下表3.1-3.3に冷凍器、コンプレッサー、冷凍器の使用環境の仕様をまとめる。

型式	D510	
到達温度	1st stage	38K
	2nd stage	10K
冷凍出力	1st stage	9W@77K
	2nd stage	5W@20K
外形寸法	φ 109×493(H)	
重量	6.3 kg	

表 3.1: 冷凍器の仕様

型式	CW303A	
消費電力 (50/60Hz)	1.9/2.3kW	
所要電源	AC190V-220V(50Hz 単相)	
	AC200V-230V(60Hz 単相)	
ブレーカー容量	30A	
外形寸法	313(W)-550(D)-660(H)mm	
重量	75kg	
冷却水	入口温度	10~30 °C
	必要流量	3~4L/min
	水圧	0.07~0.15MPa
	水質	上水相当

表 3.2: コンプレッサーの仕様

周囲温度	5~35 °C
相対湿度	85 %以下
真空度	10Pa 以下 (起動時)

表 3.3: 冷凍器使用環境の仕様

冷凍器とディスプレイッサーはGMサイクル (Gifford-McMahon cycle) という不可逆サイクルにより冷却を行う。このサイクルは、効率がよいため駆動速度が遅くできる。1サイクルは0.5~1秒程度である。駆動速度を遅くすることによって内部に使われている可動部への負荷が少なくできるため、1週間程度続く本実験にも耐えうる高性能で信頼度の高い冷凍サイクルである。GM cycleの1サイクルは以下のようになっている。

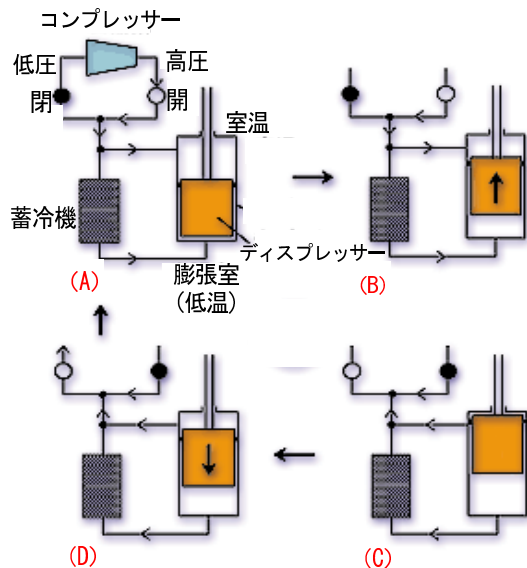


図 3.3: GM サイクル概要図

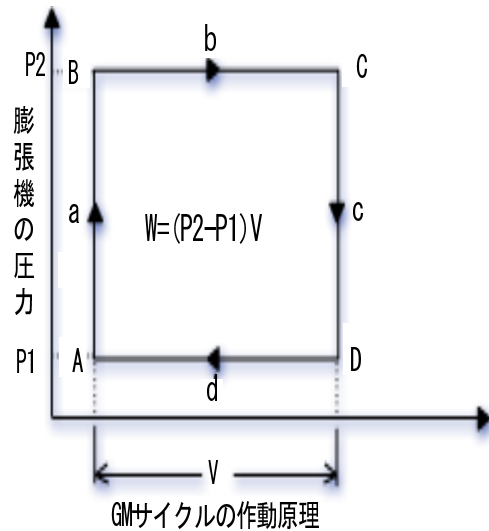


図 3.4: GM サイクル 膨張室 P-V 図

図3.4の状態Aから1サイクルについて説明する。状態Aではディスプレイッサー (ピストン) は最下部にある。このとき低圧バルブが閉じ、高圧バルブが開いてシリンダーの室温、低温部に高圧ガスが充填される (過程 a)。ガスが充填され状態Bにおいて、シリンダー内が高圧になる。低温側の圧力によってディスプレイッサーが引き上げられ、室温のHeは蓄冷器で冷却さながら低温部に充填される (過程 b)。状態Cは低温部が最大容量となったときである。このとき高圧バルブが閉じ、低圧バルブが開き低温部の高圧ガスを蓄冷器を通して放出する。このときサイモン膨張により、ガスの温度が下がり、低温が発生する (過程 c)。いずれ状態Dで低温部が最低圧力になると、ディスプレイッサーは押し下げられ、冷却されたHeは蓄冷器を冷却しながら室温部に移送される (過程 d)。こうしてディスプレイッサーは押し下げられ初期の位置戻り1サイクルが完了する。1サイクルで図3.4の長方形の面積分の仕事をする。このようにGMサイクルは加熱・冷却に伴う体積変化をうまく利用して冷却を行う。似た冷凍サイクルに Modified Solvay cycle (MS cycle) があるが、GMサイクルに比べやや効率が悪い。

3.2.2 第2段階ステージ-セル間の伝熱棒

第2段階ステージからセル間の伝熱棒として約40[cm]の銅管が用いられる。銅は熱伝導率が非常に高い金属であるため伝熱棒として採用される。この冷凍器とセルをつなぐ銅管は液体水素作成時(約15[K])は室温の時の長さから数[mm]縮む。金属なので大きく伸縮することはないが、二次ビームが標的の中心を通るようにするにはその伸縮を考慮しておくべきである。金属の伸縮は線熱膨張係数 $\alpha[1/T]$ により決まり、その値が大きいほど伸縮が大きくなる。線熱膨張係数 α はその物質の長さL、温度Tと以下のような関係がある。

$$\frac{1}{L} \frac{dL}{dT} = \alpha$$

以下に銅の熱膨張係数 α と293[K](約20℃)に対して温度T[K]での伸び率 $\frac{L(293)-L(T)}{L(293)}$ を図3.5,3.2.2の緑線で示す。比較としてアルミニウムを赤線で示す。

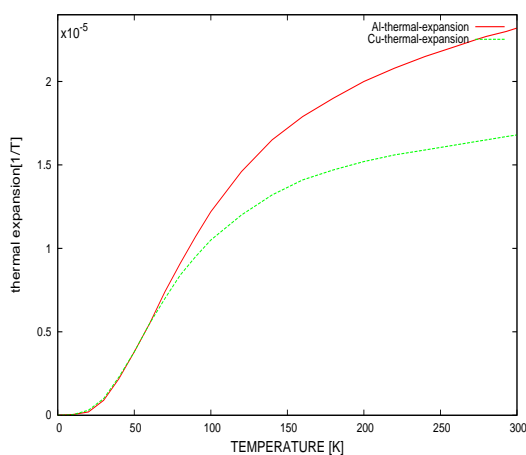


図 3.5: 銅の熱伝導率 α

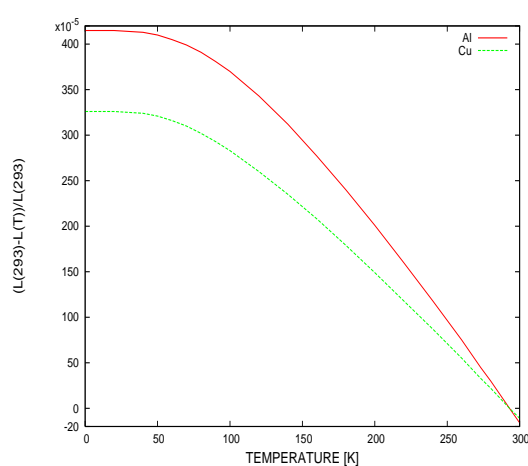


図 3.6: 銅管の伸び率 $\frac{L(293)-L(T)}{L(293)}$

アルミニウムと同様に、銅は低温(15[K]程度)において優れた熱伝導性を持っている。(第3.2.5節図3.11)。しかし銅の熱膨張率 α がアルミに比べ小さい。そのため、熱による伸縮を抑えることのできる銅が伝熱棒として使われる。

3.2.3 放射線シールド

放射線シールドは冷凍器の第1段階ステージにつながっている。シールドはセルを放射線による熱放射から防ぐために設置される。ターゲットセルは約 15[K] と低温で保つ必要があるため、外系からの熱の伝搬は極力抑える必要がある。物質間の熱の伝わりかたとして、「伝導、対流、放射」の3つが挙げられる。以下、3つの熱の伝わりかたを簡単に説明しその影響を評価する。

まず、伝導は熱が固体の中を伝わる物理的接触による熱の伝搬である。ある固体に温度差があると熱伝導方程式にしたがい、熱が時間と共に移動し、最終的に等温になる。液体水素標的システムでは、第1段階ステージ-放射線シールド間、第2段階ステージ-セル間で熱の伝導が行われる。冷却している2段階ステージから銅の伝熱棒を伝わり、セルの温度を冷やしている。前節で熱伝導性の高さから、銅が伝熱棒として用いられていることを確認した。熱の伝導は、物理的接触により起こるので、セルの到達温度を低温に保つためセル-シールドやシールド-チェンバーなどの接触は必ず避けなければならない。

対流とは気体分子が空間を運動し熱を運ぶ媒体である。セルはチェンバー内の分子と対流により熱交換を起こすため、チェンバー内を真空にすることで、分子の絶対数を減らし熱の伝搬を抑えている。よってチェンバーの到達真空度もセルの到達温度の一つの重要な要素の一つである。

放射は物体から等方的に放射される電磁波により熱の伝搬が行われる。この現象は熱放射(または熱輻射)と呼ばれる。熱放射について少し詳しく説明する。物質1と物質2間での黒体平板における熱のやりとり $q_{1 \rightarrow 2}$ は単位面積あたり、単位時間、

$$q_{1 \rightarrow 2} = E_1 - E_2 = \sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

ここで $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4]$ (ステファンの定数) である。

黒体とは、全ての輻射を吸収するという理想的な物体のことである。しかし実際の物質では、他の物体から電磁波という形で物体表面に到達した熱エネルギーは、物体に吸収される部分と物体を反射する部分、さらには物体を透過する部分に分配される。この分配率をそれぞれ、吸収率 α 、反射率 ρ 、透過率 τ と呼ぶ。これらは物体の特性によって決まる。 α 、 ρ 、 τ の間には、次のような関係がある。

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

固体表面のように放射エネルギーを透過しないものとき、次式が成立つ。

$$\alpha + \rho = 1$$

また、熱透過がない物質では、熱的平衡状態のとき、輻射率 $\epsilon =$ 吸収率 α (キルヒホフの法則) が成り立つので、

$$\epsilon + \rho = 1$$

が成り立つ。

以上のことから、実際の放射エネルギーは、両物質の輻射率 ϵ_1, ϵ_2 に依存し、 A を向かい合う面積として単位時間あたり、以下のように表される。

$$Q = \epsilon A q_{1 \rightarrow 2} = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \epsilon_1 \epsilon_2 / (\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2) \quad (3.3)$$

放射による熱の伝搬を抑えるには輻射率 ϵ の小さい物質を選ぶか、物体間の温度差を小さくすることである。放射線のシールドとしてアルミニウムが用いられるのは、アルミは輻射率 ϵ が低い、つまり反射率 ρ が高く ($\rho=0.9\sim0.95$) 放射による熱エネルギーを伝えにくいからである。また、シールドが第一段ステージに取り付けられる理由は標的セルに直接室温からの熱放射を避けるためである。放射率 $\epsilon_1 = \epsilon_2=0.1$ とし、室温 (300[K]) とセル (15[K]) 間の場合の放射エネルギーを式 (3.3) より概算すると $24[\text{W}/\text{cm}^2]$ 程度になる。一方、シールドが1段ステージ (約 90[K]) とセル (15[K]) の場合の放射エネルギーを概算すると、 $0.2[\text{W}/\text{cm}^2]$ と 1/100 以下に抑えられる。

3.2.4 温度モニターとヒーター

現在用いている標的システムでは4箇所温度をモニターしている。温度は熱電対温度計により測定する。この温度計は、常温から低温まで測定が可能で小型であることが特徴である。設定した液体水素の圧力に対して、温度によって液体で保てるかが決まる (3.3節図3.13参照) ため温度のモニターは重要である。温度計の温度モニターの箇所とその意味を述べる。

- セル
セル本体の外側の表面に設置される。セル内の液体水素の温度をモニターしている。
- セル上部 (2段ステージ近く)
セルの上部、つまり2段ステージ付近に設置される。最も温度が下がる箇所で、水素ガスが送られる管もわりと近くにある。水素の固化を防ぐための指標となる。
- シールド
シールドの下部に設置される。シールドの到達温度が悪いとセルの到達温度も悪くなる。シールドは約 90[K] 程度まで冷える。
- シールド上部 (1段ステージ近く)
シールドの上部、つまり1段ステージ付近に設置される。

液体水素標的システムで使用している冷凍器では温度調整が不可能なため、冷凍器は動かしたままヒーターで温度を制御する。ヒーターはセルの付け根 (セルと銅管の間) に設置される。セル温度はヒーター設定温度に対して約 $0.2\sim0.3[\text{K}]$ 低い温度で安定する。

3.2.5 ターゲットセル

冷凍器の第2段階ステージからのびる約40cmの銅管の下にアルミニウム合金で出来た液体水素標的のターゲットセルが取り付けられる。ターゲットセルはセル本体と、ウィンドウ2枚で構成される。実験で液体水素の標的厚150[mg/cm²]で行うことを考慮してセル本体とセルウィンドウを開発した。それらの図面、写真を以下図3.7-3.10に示す。セル本体はの写真(図3.9)はウィンドウがすでについているもので、ウィンドウの写真(図3.10)にはハーバー膜(後述)が貼ってある。

ターゲットセル本体 個数1 材質A1050

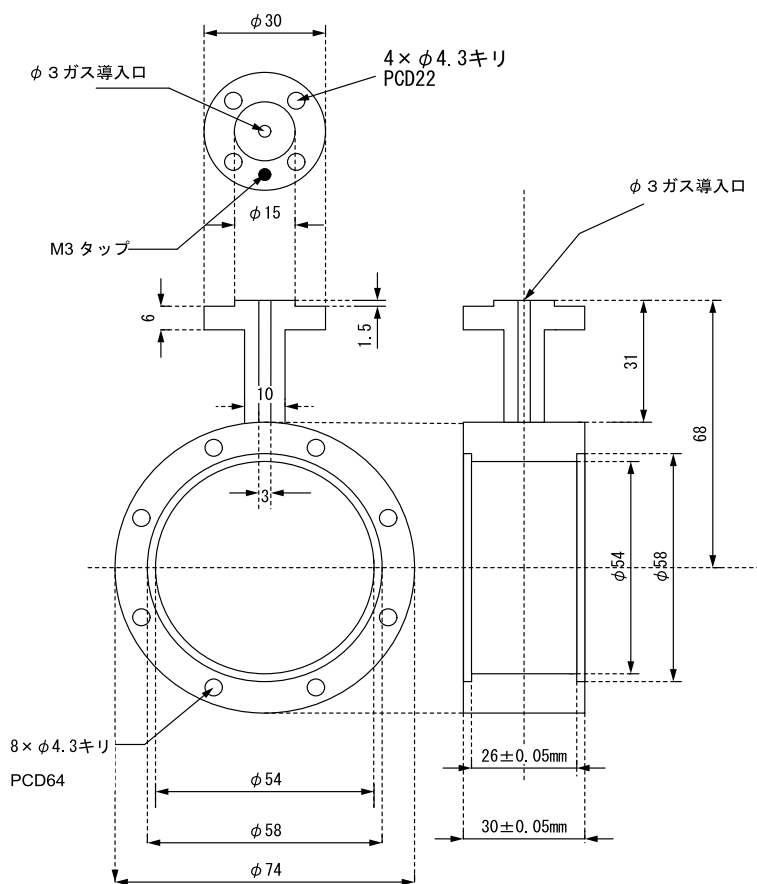


図 3.7: ターゲットセル本体 (図面)

ターゲットセルウィンドウ 個数2
 内径 40mm 材質 A5052

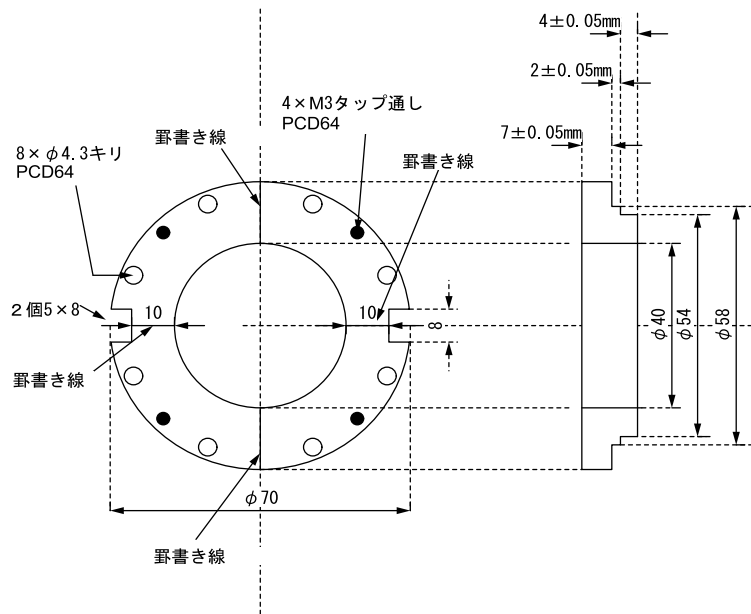


図 3.8: ターゲットセルウィンドウ (図面)



図 3.9: ターゲットセル本体 (写真)



図 3.10: ターゲットセルウィンドウ (写真)

ターゲットセルはアルミニウム合金で作られる。水素が液体である温度領域 (15[K] 程度) ではアルミニウムは熱電導性に優れている。以下、図3.11に銅とアルミの熱伝導率を示す [10]。

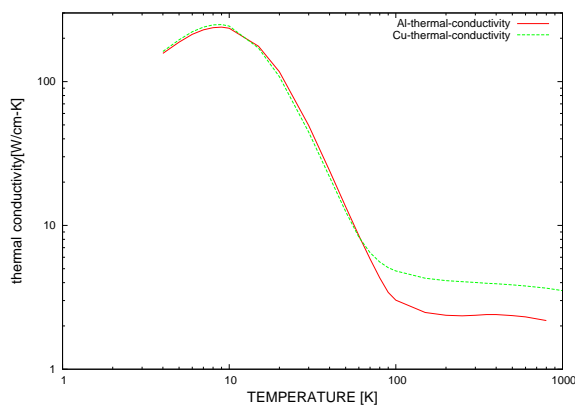


図 3.11: 低温でのアルミと銅の熱伝導率

上図3.11からわかるように、アルミニウムは銅と同様に金属の中でも非常に高い熱伝導性をもつ。低温領域 (15[K] 程度) においても熱伝導性がよいため、低温でオペレートするセルの材質として採用された。また、アルミニウムは低温で脆くならない靱性をもつ。ターゲットセル本体に用いられている A1050 という材質はアルミ 1000 系と呼ばれ、アルミの純度が 99.5 % で強度はあまり高くない。しかしアルミニウム合金の中で成形性や熱伝導性が最も優れている。一方、ウィンドウに用いられる A5052 という材質は 5000 系と呼ばれ、Mg が 1.4~2.1 % 含まれる。1000 系に比べ熱伝導性は若干落ちるが、強度が高くなっているのが特徴である。ネジを通すため脆いとネジによって削られる恐れがあるため、セルウィンドウには 5000 系のアルミを用いた。以下に 1000 系、5000 系の熱伝導性と引張強度¹(Ultimate Tensile Strength) について示す。

	純度 [%]	熱伝導 [W/m·K]	引張強度 [MPa]
A1050	99.5	227	103
A5052	95.7-97.7	138	193

表 3.4: アルミニウム合金 A1050,A5052 の物理特性

図3.9、3.10の写真からもわかるように液体水素を閉じ込めるため、ウィンドウには膜が貼られる。この膜は二次ビームの通る場所であるので、バックグラウンドの生成やエネルギー損失、クーロン多重散乱などを起こすため、膜の材質や厚さを選ぶ際にはこれらのことを考慮すべきである。まず注意すべきは、セル内液体水素の圧力による膜の膨らみである。膜が膨らむと二次ビームが通過する位置により標的厚が変化し、エネルギー損失の値が異なることで実験分解能を落としてしまう。そのため、できるだけ膜の膨らみを抑える

¹引張強度とは、引張荷重を受ける材料の極限強さ。引張試験において材料に生じる最大応力。

ようにすべきである。膜の膨らみ ω_0 [cm] はウィンドウ半径 a [cm]、膜厚 h [cm]、膜のヤング率 E [Pa]、セル内圧 p [Pa] として、以下の式 (3.4) で与えられる [13]。

$$\omega_0 = 0.662 \times a \times \left(\frac{pa}{Eh} \right)^{1/3} \quad (3.4)$$

この式を『膜近似式』と呼ぶ。式 (3.4) の右辺をできるだけ小さくなるような膜の設定が好ましい。膜を選決めれば、その厚さ h とヤング率 E は決まる。また、液体水素の圧力 p については 3.3 節で詳しく述べる。ここでは、ウィンドウ膜の直径を 40[mm] にした理由について触れる。膜の膨らみを考えれば、式 (3.4) からウィンドウの半径はできるだけ小さいほうがよい。しかし、実際は標的に入射する二次ビームは拡がりを持っているため、標的の大きさはビームの拡がりを考慮して決定すべきである。比較として、「Be 実験」での液体水素標的に入射した二次ビームのサイズを示す [8]。

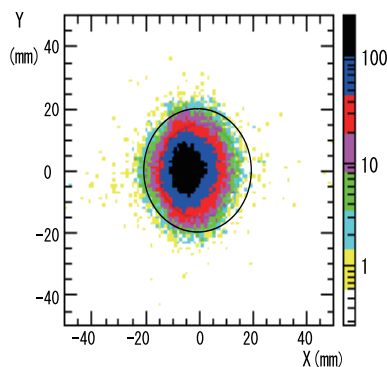


図 3.12: Be 実験での二次標的でのビームサイズ

図3.12の黒線での円は今回開発した標的セルの「的」の大きさを表す。ほとんどの粒子が標的に入射していることがわかる。このためセルウィンドウの直径は 40[mm] を採用した。一方で膜によるクーロン多重散乱 (式 (3.2)) も考慮しなければならない。式 (3.2) からわかるように、膜の厚さ x や原子番号 Z に依存している。膜の膨らみ、クーロン多重散乱を考慮した上で最適な膜の材質・厚さを決定することが必要となる。セルの膜に使われる材質の候補であるカプトンとハーバーの特徴を以下に示す。

カプトン ($C_{22}H_{10}N_2O_5$) は密度は $1.42[\text{g}/\text{cm}^3]$ で、芳香族四塩基酸と芳香族ジアミンとの縮重合によって得られる高分子である。高分子の中で最高レベルの熱的、機械的、化学的性質を持つポリイミドである。膜の厚さは $12.5[\mu\text{m}]$, $25.0[\mu\text{m}]$, $50.0[\mu\text{m}]$ がある。それぞれヤング率は $3.5[\text{GPa}]$, $3.4[\text{GPa}]$, $3.4[\text{GPa}]$ と与えられる [11]。ウィンドウ膜としてのカプトンの利点は、ハーバーには劣るが広い温度領域で優れた機械的特性を持つことである。液体水素標的は低温 ($15[\text{K}]$ 程度) でオペレートするため、低温での機械的特性は重要になる。さらにハーバーに比べ、原子番号 Z が小さい原子で構成されるため、クーロン多重散乱を小さく抑えることが可能になる。また、カプトンは半透明なオレンジ色なのでセル内の様子を伺えるため液体水素が生成され、安定してオペレートされている (気泡などができていない) ことを視覚的に確認できる。そしてハーバーに比べて安価である。

一方、ハーバーはコバルト Co を基本とした合金の一種である。密度 $8.3\text{g}/\text{cm}^3$ で組成は

Co:42.5 %,Cr:20 %,Ni:13 %,Mo,C,Be,Mg,W からなる。厚さは 2.5[μm],6.47[μm],10.0[μm] などがあり、ヤング率は 203.4~208.2[GPa] である [12]。ハーバーの特徴は低温領域でも極めて強い強度、耐久性をもつことである。ヤング率はカプトンのおよそ 60 倍程になる。また、最低 2.5[μm] と非常に薄い膜を採用可能である上、銀白色なのでレーザーによる膜の膨らみの測定が可能である。ヤング率の大きさからカプトンより膨らみを抑えられることが期待されるが、Z が大きいとクーロン多重散乱が大きくなってしまふ。ウィンドウ膜の膨らみの測定、標的でのクーロン多重散乱の見積りは 4 章で詳しく述べる。

3.3 液体水素

液体水素を安定してオペレートするためには、設定した圧力に対して水素を液体に保つことのできる温度領域を知る必要がある。水素の蒸気圧曲線を以下に示す。蒸気圧を求める実験式として以下の式が与えられている。温度範囲 13.956~30[K] で、

$$\ln(p/p_0) = A + B/T + CT + DT^2$$

A=1.73479,B=-44.6237[K],C=0.023187[K⁻¹],D=4.8017×10⁻⁵[K⁻²] p₀=101325[Pa](大気)

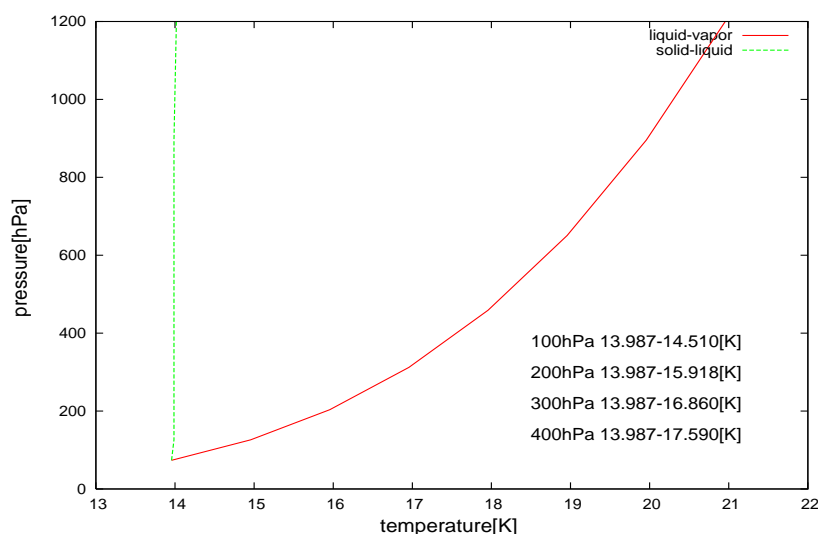


図 3.13: 水素の蒸気圧曲線

図3.13からわかるように、融点は圧力によらずほぼ一定だが、沸点は圧力に大きく依存することが分かる。図3.13の右下に示した値は、各圧力に対しての水素が液体である温度領域である [14]。

前節で述べた膜の膨らみ (式 (3.4)) を考慮すると、液体水素の圧力はなるべく抑えることが望ましい。しかし、圧力を下げていくと水素を液体に保つ温度領域が狭まり、安定したオペレーションが難しくなる。現在は 200[hPa] でオペレートすることを目標に冷却テストを繰り返している段階である。

第4章 膜によるクーロン多重散乱と膜の膨らみ測定、および銅管伸縮の見積り

第4章では、液体水素標的のセル、及び膜におけるクーロン多重散乱の見積りと膜の膨らみのレーザー測定結果と考察について述べる。それぞれ本実験の角度分解能とエネルギー分解能に影響するため、各々の影響を評価する必要がある。また、冷凍器の第2段ステージ-セル間の銅管の伸縮についてレーザーを用いて [mm] オーダーで見積もった。

4.1 液体水素標的におけるクーロン多重散乱

クーロン多重散乱 (multiple scattering) は図3.1のように物質のクーロンポテンシャルによって、粒子が散乱されることである。粒子の散乱はほぼガウス分布に従う。クーロン多重散乱の標準偏差 θ_0 は式 (3.2) に示したとおりである。液体水素標的によるクーロン多重散乱はセル内の液体水素とウィンドウ膜 (ハーバーかカプトン) による散乱である。クーロン多重散乱は物質の厚みとその放射長の比 $\frac{t}{X}(\equiv L)$ でスケールされる。放射長 (radiation length) X とは放射線のエネルギー損失により $1/e$ にエネルギーが減衰する長さで、物質固有の値をもつ。放射長は次のような近似式で表される。A,Z はそれぞれ通過する粒子の質量数と原子番号である。

$$X_0 = \frac{716.4[\text{g}/\text{cm}^2]A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})}$$

ハーバーは質量数 $A=57.1$ 、原子番号 $Z=26.4$ カプトンは質量数 $A=12.7$ 、原子番号 $Z=6.36$ 水素は質量数 $A=1.01$ 、原子番号 $Z=1.00$ である。ハーバーの厚さは $2.50[\mu\text{m}], 6.47[\mu\text{m}], 10.0[\mu\text{m}]$ カプトンの厚さは $12.5[\mu\text{m}], 25.0[\mu\text{m}], 50.0[\mu\text{m}]$ についてそれぞれ式 (3.2) に代入して、各々の L を求め θ_0 を算出した。その結果を表4.1に記した。

物質	L($\equiv x/X$)	θ_0 [mrad]
液体水素 (150[mg/cm ²])	2.351×10^{-3}	1.227
ハーバー (2.50[μm])	1.476×10^{-4}	0.263
ハーバー (6.47[μm])	3.820×10^{-4}	0.447
ハーバー (10.0[μm])	5.904×10^{-4}	0.589
カプトン (12.5[μm])	4.321×10^{-5}	0.133
カプトン (25.0[μm])	8.641×10^{-5}	0.195
カプトン (50.0[μm])	1.728×10^{-4}	0.288

表 4.1: クーロン多重散乱のスケールファクター L, θ_0 の値

標的でのクーロン多重散乱は表4.1の液体水素と選んだ膜で決定する。液体水素部分と膜2枚なので全体のクーロン多重散乱は以下のように計算される。

$$\theta_0 = \sqrt{\theta_{LH2}^2 + 2\theta_{膜}^2}$$

計算結果からハーバーとカプトンの原子番号 Z の大きさの違いにより、散乱の大きさはカプトンの方が小さく抑えられる。ハーバー 10[μm] に対して同じクーロン多重散乱をするカプトンの厚みはおよそ 180[μm] である。これらの結果からカプトン膜の方が極めてクーロン多重散乱を抑えられることが分かった。

4.2 膜の膨らみ測定

ハーバー膜 10[μm] の膨らみを図4.1のセットアップで差圧 0.1[気圧] から 0.1[気圧] 刻みで 10 点測定した。

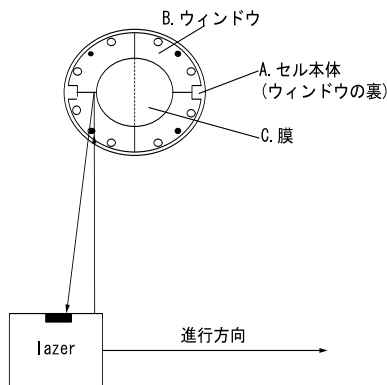


図 4.1: レーザー測定概念図

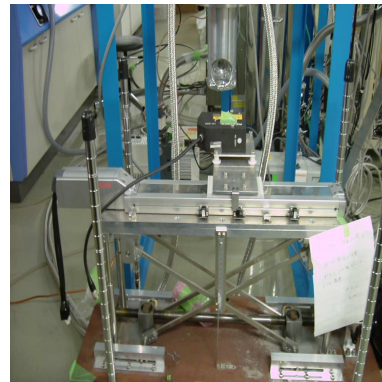


図 4.2: レーザー測定写真

例として、差圧 1.0[atm] の時の図を以下に示す。まず、測定したデータが図4.3 上図である。データからウィンドウの淵の部分 (図4.1の B の部分) のデータを取り出し、レーザーの移動方向とウィンドウが水平になるように補正する。その際用いた直線フィットの式が真ん中の図である。ウィンドウの淵を基準として、測定データを補正したのが下の図である。

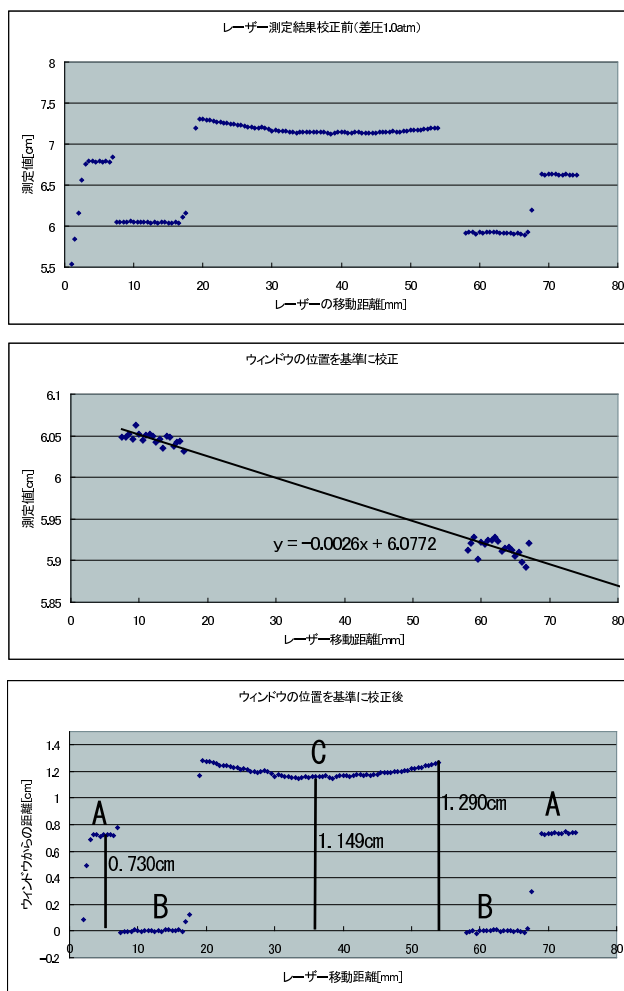


図 4.3: レーザー測定結果 上図：測定結果、中図：ウィンドウ淵で校正、下図：校正後

図中の A,B,C は図4.1の通りである。データ点からウィンドウの両端の位置を読み (ウィンドウの淵 B から 1.290[cm])、その両端の中心の点の値が最も膨らんだ点 (1.149[cm]) であるので、セルの膨らみは $1.290 - 1.149 = 0.141$ [cm] と導出される。図4.3からウィンドウとセル本体の距離 (A-B 間) は 0.73[cm] と求められる。図面上、A-B 間は 0.7[cm] であるが、真空シールのためインジウムをはさんでいるため、0.7[cm] より少し大きな値となった。このようにレーザー測定の結果により実際の標的の厚さを決定する。

上記のような測定を差圧 0.1[気圧] から 0.1[気圧] 刻みで 10 点の測定を行い、それぞれの圧力での膜の膨らみをプロット (緑点) し、フィットした曲線 (赤線) と膜近似式により理論で予想される膜の膨らみ (式 (3.4)) の曲線 (青線) を以下、図4.4に示す。

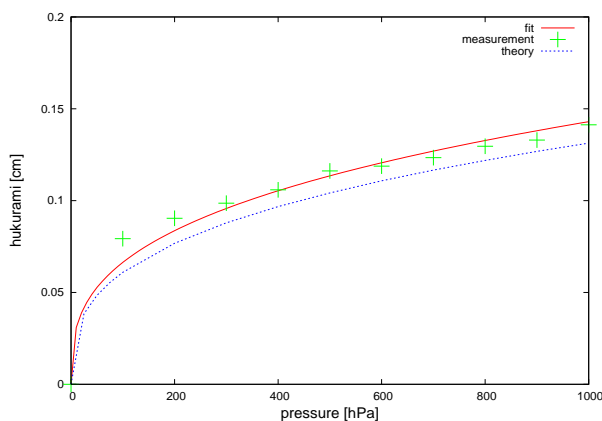


図 4.4: 圧力に対する膜の膨らみ測定値と計算値

測定値により求めたフィット曲線 (赤線) は式 (3.4) の理論式の曲線 (青線) より若干膨らむが、概ね一致していることがわかる。理論曲線とのずれが差圧が大きいときより小さいときに大きくなるのは、ハーバー膜にしわがあり、差圧が出来た時点でそのしわの分だけ膨らんでしまうからだと考えられる。このしわは膜を張るときに出来てしまうもので、完全になくすことは困難である。しかし、低圧でオペレートすることを考えれば丁寧に膜を貼ることでこのしわを最大限抑えるべきである。

今後、異なる厚さでの膜厚測定を行う。また、レーザーの反射による測定なのでカプトン膜についてもアルミが蒸着されたものなどを用いることで測定が可能となると考えられる。また、膜を長時間膨らんだ状態のままにしておいたとき、膜が元に戻るか (伸びきってしまわないか) もレーザーを用いて確かめる予定である。

4.3 最適な膜の考察と Be 実験との比較

エネルギー損失、クーロン多重散乱、膜の膨らみから本実験で用いる最適な膜を決定する。ハーバーとカプトンを比較して考えてみる。先述のとおり、ハーバー 10[μm] とカプトン 180[μm] は同じクーロン多重散乱をする。この膜厚でのエネルギー損失は式 (2.2) よりそれぞれ 0.1396[MeV/A], 0.5973[MeV/A] と求まる。また、膜の膨らみは 0.07698[cm], 0.1138[cm] と計算される。まとめると、同様のクーロン多重散乱をする膜厚でハーバーカプトンを比較すると、膜の膨らみ、エネルギー損失ともにハーバーの方が抑えられることがわかる。

次に、Be 実験 [8] で採用した液体水素のオペレートと今回目指すオペレートを比較し、本実験での改善点について考える。

ウィンドウの直径 ϕ を大きくしたことで生成量を増やすことができ、さらに圧力を低くオペレートすることで膨らみが抑えられることが期待される。ウィンドウの直径 ϕ を小さくすれば、さらに膜の膨らみを抑えられるが生成量を考え、現段階ではウィンドウ直径

	ウィンドウ直径 ϕ	設定圧力	膜の材質・厚さ	膜の膨らみ (片面)
Be 実験	30[mm]	890[hPa]	ハーバー 6.00[μm]	1.4[mm](実測)
本実験	40[mm]	200[hPa]	ハーバー 6.47[μm]	0.89[mm](計算 ¹)

表 4.2: Be 実験と本実験の膜の比較

40[mm]、液化後圧力 200[hPa] の設定で行う予定である。表から、「Be 実験」より生成量を多くできる上、膜の膨らみを抑えることができると考えられる。今後の課題としては、様々な材質の膜をあたり測定を繰り返し、ウィンドウ半径も直径 30[mm] も念頭に置き実験に最適な組合せを探していく。

4.4 銅管の伸縮の見積り

銅は熱により伸縮する。室温時 (290[K]~295[K] 程度) と液体水素作成時 (15[K] 程度) の時の銅管の位置の違いを測定した。図 3.6 によれば、15[K]での伸び $((L_{293} - L)/L_{293})$ はおよそ 3.25×10^{-3} と読み取れる。銅管の長さは約 40[cm] であるので実際の液体水素作成時の伸びは 1.3[mm] と算出される。

一方、常温時にけがき線にレーザーのスポットをあてておき、低温時に位置を測定した結果は 2[mm] 程度であった。赤い点がレーザーの点である。図4.5上の黒線がけがき線、つまりウィンドウに水平な中心を通る線である (図3.8参照)。下の線は切りかきの淵である。レーザーの縦方向の移動は目測であるために精度が高くないが [mm] オーダーでは議論が可能となる。

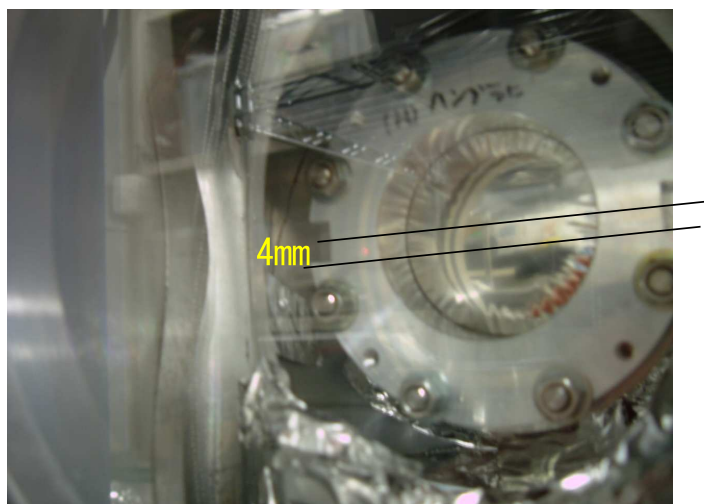


図 4.5: レーザーの位置による銅管の伸びの確認

銅の伸縮率の正確な測定は、現在使っているレーザーシステムでは不可能である。レーザーは横の動きは PC により制御できるため、それを応用して縦にして用いることを今後の課題として検討中である。

第5章 冷却テストの結果および考察

標的を安定してオペレートするために液体水素作成の手順を確立し、温度計・圧力計とともに液体水素の特性を知っておくべきである。そのためには液化テストを繰り返すことが重要である。液化テストは真空もれのないことが確認済の既存のテストセルで行った後、実験用のセルで再現性を確かめるために行った。第5章では、液化の際の圧力の低下の見積り、液化テストの結果と考察を行う。

5.1 液化時のバッファの圧力低下

初期状態ではセル-バッファ間は初期のバッファ圧 P_0 [Pa] で満たされている。セル内に液体水素が出来ると、水素ガスが圧縮されたため圧力がさがる。実験では、オペレートしたい標的圧力 P_{LH2} [Pa] に設定するために液化時の圧力の低下を見積もる必要がある。標的システム系は3.2節の図3.2のようになっている。以下、見積りに必要なパラメータを挙げる。まず、液体水素の出来ている体積 V_{LH2} を知る必要がある。これはセル本体、ウィンドウの形から求まる。構造上、液体水素はセル内に加え、その上の管まで出来ていると考えられる。しかし実際どこまで液体になっているかは確認できないため、 V_{LH2} にはやや不定性が残る。また、膜の膨らみによるセルの体積の増加も考慮すべきである。膜の膨らみは簡単のため、膨らみ部分を三角錐と近似して計算する。次に、セルに水素ガスを送るバッファの体積 V_{buffer} の値も必要である。バッファの体積 V_{buffer} は $\phi 60$ [cm], 高さ 57[cm] の円筒なので $V_{buffer} \approx 1.61 \times 10^5$ [cm³] である。セル-バッファ間をつなぐ銅管 + SUS 管の体積 $V_{管}$ は、管が約 4 [m] 程で、内径 3.5[mm] であり体積のオーダーは数十 [cm³] であると思われるため V_{buffer} に対して十分小さいとみなし無視できると仮定した。さらに液体水素の密度 ρ_{LH2} [g/cm³] が必要である。液体水素の密度 ρ_{LH2} [g/cm³] は温度、圧力の関数で表される(図7.16参照)。また、液体水素作成時の気体部分の密度を ρ とする。最後に設定圧力 P_0 [Pa] の値が必要となる。設定圧力 P_0 は初期条件としてセル-バッファ間に満たす圧力のことである。設定圧力の値からそのときの水素ガスの密度 ρ_0 は求められる。水素の気体部分の密度と圧力は比例関係にあり、その比例係数を k とする。比例係数 k は以下のような値である。これはバッファ内の水素ガスの温度(室温の温度)に依存する。

室温 [K]	290	295	300
比例係数 k [(mg/cm ³)/hPa]	8.36×10^{-5}	8.22×10^{-5}	8.08×10^{-5}

表 5.1: 温度に対しての比例係数 k の値

また、液体水素の密度はほぼ一定だが、温度、圧力の関数である。図??は横軸を圧力 [hPa]、縦軸を密度 [mg/cm³] で、温度 14.5, 15.0, 15.5, 16.0[K] の場合で描いたものである。

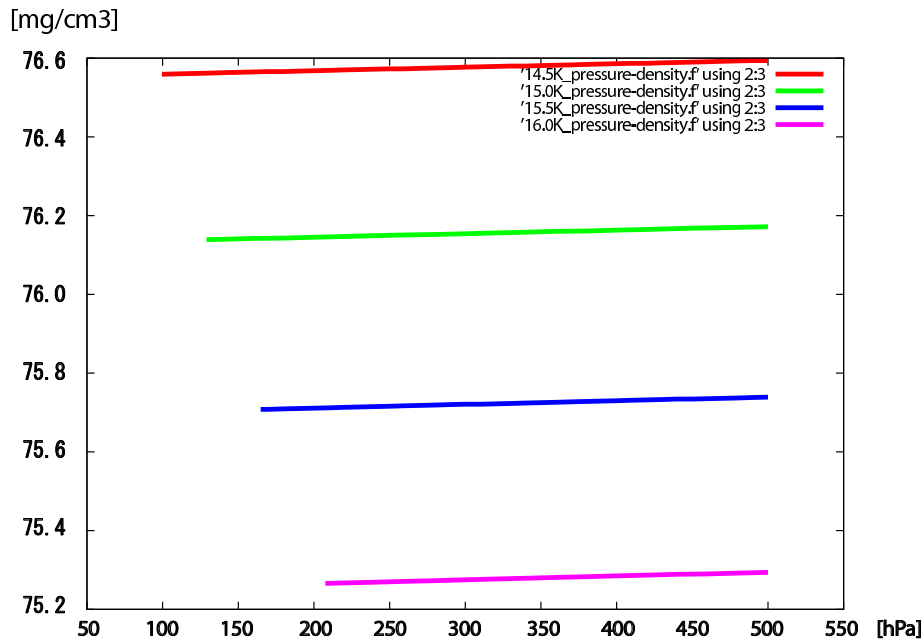


図 5.1: 密度変化

セル-バッファ間での水素の重さ (質量) は不変であるので、左辺を室温時、右辺を液体水素作成時として等式をたてる。

$$V_{\text{all}} \cdot \rho_0 = V_{\text{LH2}} \cdot \rho_{\text{LH2}} + (V_{\text{buffer}} + V_{\text{管}}) \rho$$

ここで、 $V_{\text{buffer}} \gg V_{\text{cell}}, V_{\text{管}}$ より、 $V_{\text{all}} \approx V_{\text{buffer}}$, $V_{\text{buffer}} + V_{\text{管}} \approx V_{\text{buffer}}$ なので、

$$V_{\text{buffer}} \cdot \rho_0 = V_{\text{LH2}} \cdot \rho_{\text{LH2}} + V_{\text{buffer}} \rho$$

室温で、 $P_0 = k\rho_0, P_{\text{LH2}} = k\rho$, であるので、 $\rho \rightarrow P$ として、 P_0 について解けば

$$P_0 = P + \frac{\rho_{\text{LH2}}}{k} \cdot \frac{V_{\text{LH2}}}{V_{\text{buffer}}} \quad (5.1)$$

式 (7.1) を見ると、液体水素の温度、セルの形、室温が分かれば右辺第 2 項は求まるので、オペレートしたい圧力を決めれば初期設定圧力を決定できる。異なる形のセルでもこの式 (7.1) の有効性を実際の液化テストと比較して確かめる。

5.2 テストセルでの液化テスト

既存の真空もれのないことが確認されているテストセルでの液化テストの結果を以下に示す。テストセルはハーバー膜 $10[\mu\text{m}]$ とカプトン膜 $25[\mu\text{m}]$ のウィンドウが取り付けられている。カプトン膜なのでセル内の様子が伺える。初期設定圧力を $600[\text{hPa}]$ 、ヒーター温度 $14.0[\text{K}]$ に設定して、到達圧力が式 (7.1) の計算と一致しているかを確認した。また、シールドが冷えきる前にテストを行った。式 (7.1) を用いる際の情報として、室温は $295[\text{K}]$ 、液体水素の温度は $14.5[\text{K}]$ であるとした。液体水素体積 V_{LH_2} は $57.6[\text{cm}^3]$ である。以下に液化テストの結果を示す。左図は時間に対してのセルとシールドの温度変化の様子である。右上図は左図を $10\text{--}20[\text{K}]$ で拡大したもので、右下図は時間に対してのセル-バッファー間の圧力の変化である。

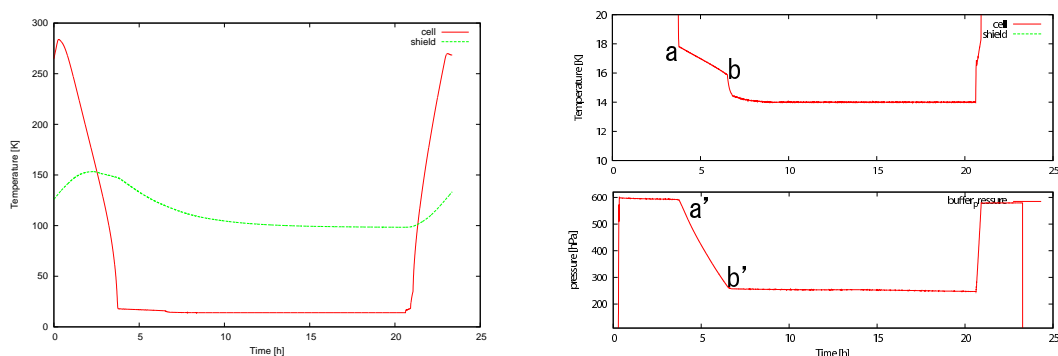


図 5.2: 上:時間 vs 温度(上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大
 図 5.3: 上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力

到達圧力(液体水素の圧力)は $247\sim 253[\text{hPa}]$ となった。右図7.14中の点 a は液化が始まった点で、b が液化終了の点である。それに対応した圧力がそれぞれ a', b' である。液体になっていくにつれ、圧力が下がっていく様子が分かる。また、点 a の前後を見ると、液化が始まると温度の低下の様子が変わることも確認できる。同様に点 b の後の温度の低下の様子の変化している。これは液化完了を表しており、この温度の下がりかたの変化が完全に液化が終わったことを確認する一つの指標である。

到達圧力が $247\sim 253[\text{hPa}]$ のときの設定圧力を式 (7.1) を用いて求めてみる。式 (3.4) から $250[\text{hPa}]$ 時の膜の膨らみを考慮して、実際の液体水素のできる体積は $58.7[\text{cm}^3]$ と補正される。それをふまえて計算すると、計算による設定圧力は $586\sim 592[\text{hPa}]$ と求まった。実際は初期設定圧力 $600[\text{hPa}]$ だったので誤差は 3% 以内で収まり式 (7.1) の妥当性が確かめられた。

蒸気圧曲線は以下ようになった。

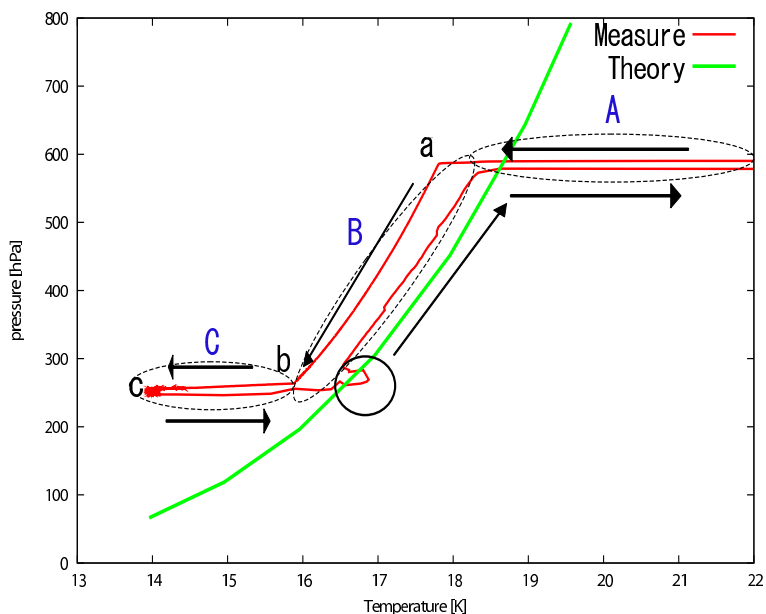


図 5.4: 温度に対しての圧力変化

理論での蒸気圧曲線 (緑線) と測定での蒸気圧曲線 (赤線) を比較して少し詳しく見てみる。時間の経過は図中では矢印で示している。まず A の領域ではセル-バッファ間ともに気体の状態である。系の温度の低下と共に圧力も少しだけ減少傾向にあるがほぼ圧力は一定で温度のみが下がり続ける。そして点 a で温度と共に圧力の低下が始まる。この点が液化開始の時刻である。領域 B は液体水素がセルにたまっていく過程である。各時刻でセル内は液体水素と気体水素の相平衡状態にある。本来ならば理論の蒸気圧曲線に乗るはずだが、 $0.5\sim 0.7$ [K] 程、低温側にずれている。これは 5.4 節で詳しく考える。点 b で液化が終了し、領域 C に入る。この領域ではセル内が液体水素で満たされている状態でセル内の液体水素の温度が低下していく。点 c がセルの到達温度の線である。ヒーターの設定温度の 14 [K] 付近で保てていることが分かる。コンプレッサーを止め冷却をやめると、ほぼ逆の過程をたどりもとの状態に戻る。○で囲んだ箇所はコンプレッサーを止めて温度が上昇しているときに起こるが、一度温度が上昇しすぐに低下して蒸気圧曲線にのり始める。また、全て気体に戻った際、初期の圧力から 10 [hPa] 程下がっている。冷却時の蒸気圧曲線の理論との不一致、冷却前と冷却後のバッファの圧力の変化、○の箇所、式 (7.1) については 5.4 節で詳しく述べる。

5.3 実験用セルでの液化テスト

実験用セルでの液化テストを以下に示す。真空もれがないことを確認し、実験用セルでの再現性を確かめた。今回ヒーターを 15.5[K] に設定して、200[hPa] で安定したオペレートが可能かどうか確かめた。圧力の設定値は式 (7.1) から、424[hPa] だったため 430[hPa] で設定し、液化テストを行った。結果は以下のようになった。

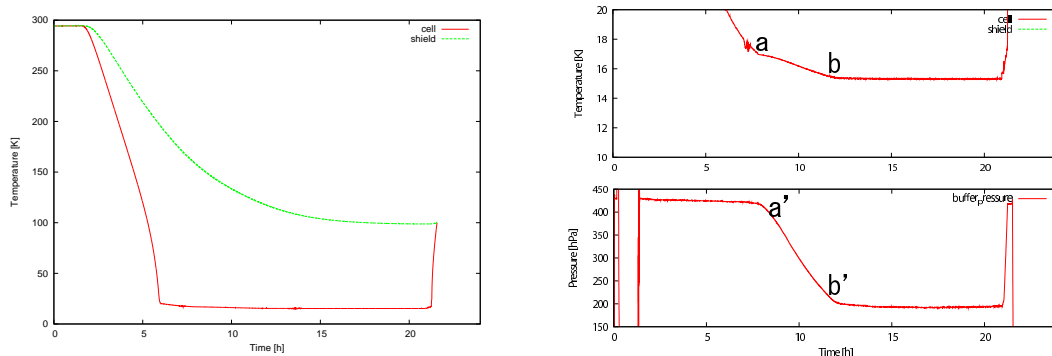


図 5.5: 上:時間 vs 温度(上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大
 図 5.6: 上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力

圧力は 194[hPa] となった。200[hPa] でのオペレートを目指し、計算値より数 [hPa] 高く設定したことから、計算値での圧力と実際の圧力は 5% 程度ずれている。また、ヒーターの温度設定を 15.5[K] でセットした状態で液体水素は気泡が出来たりせず、安定していた。しかし、その後ヒーターの温度を 16.0[K] にセットしたところ気化が始まっていた。200[hPa] でオペレートする際は、ヒーター設定温度を 15.5[K] もしくはそれ以下にセットするのが安全だと考えられる。

蒸気圧曲線は以下のようにテストセルと同じような結果となり、再現性が確かめられた。

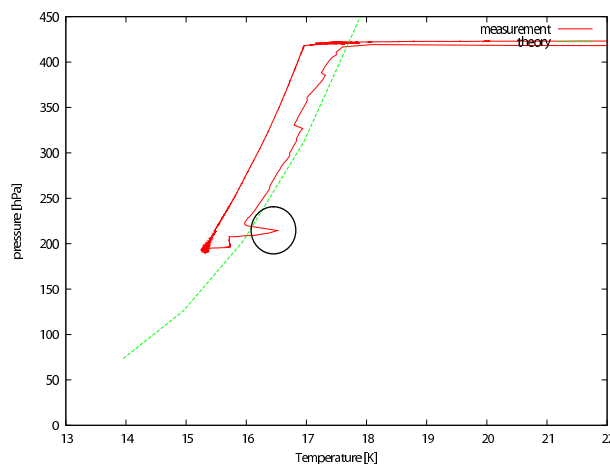


図 5.7: 温度に対しての圧力変化

5.4 液化テストの考察

液化テストでの現象・疑問を考察する。まず冷却時の蒸気圧曲線の不一致について考える。図5.4、図5.7での理論で蒸気圧曲線と測定曲線による不一致は $0.5\sim 0.7[\text{K}]$ 程であった。この原因は冷却時の温度モニター (セルの表面) と実際のセル内の温度差があるためだと考えられる。冷却時、セルの外側が冷えるのが早いため、モニターの温度に対し実際のセル内の温度は $0.5\sim 0.7[\text{K}]$ 程高く温度勾配があると考えられる。次に○で囲んだ箇所について考える。コンプレッサーを止め冷却をやめた後に現れる。圧力があがらず、温度のみが上昇していることから、セル-バッファー間の分子の固化による詰まりが懸念される。しかし、約 20 秒ほどの現象で圧力もすぐに上がり始める (バッファーに水素ガスが送られる) ため、現段階では測定器の特性であると考えている。しかし以後の冷却テストもこの点に注意して行う。そして、冷却前後でのバッファーの圧力の変化については、セル-バッファー間は閉じた系であるため、本来は冷却前後では圧力の変化はないはずである。しかし、どちらの液化テストでも $10[\text{hPa}]$ 程の低下が見られる。考えられることとしては、圧力計の特性が挙げられる。用いている圧力計が大気圧との差圧による測定であるとする、大気圧の変化により $10[\text{hPa}]$ 程度はずれることが考えられる。セル-バッファー間が外気とつながっている可能性も考えられるが、他の液化テストと比較しても現段階ではパターンが見えないため、この原因を探求することは今後の課題の一つである。最後に式 (7.1) の計算式については見積りには十分であると確認できた。式 (7.1) の計算の測定値と計算値のずれは 5% 程に抑えられ、パラメータのいくつかの不定性、もしくは計算時の近似によるものだと考えられる。主な原因と、正確な膜の膨らみ分と管のどこまで液体かの液体水素の体積 V_{LH_2} の不定性が考えられる。

5.5 冷却テストのまとめ

異なるセルで液化テストを行いその再現性を得た。式 (7.1) が 5% 程度の誤差が生じることが分かった。これは液体水素の体積 V_{LH_2} の見積りの違いなどが原因と考えられる。しかし見積りには十分な精度であり、その有効性を示した。この誤差を小さくすることが今後の課題の一つとなる。また、冷却時は理論の蒸気圧曲線に乗らないことから、実際のセル内の温度はモニターより $0.5\sim 0.7[\text{K}]$ 程度高いと予想される。今後も液化テストを繰り返し、確実性をあげ、安定 (安全) にオペレートする実験に最適な圧力・温度を決定する。

第6章 まとめと今後の展望

N=16 シェルギャップを決定するための ^{24}O の非弾性散乱実験の液体水素標的の開発・改善を行った。実験での標的厚 $150[\text{mg}/\text{cm}^2]$ になるよう、実験用の標的セルとウィンドウの開発を行った。さらにウィンドウの膜の膨らみを測定し、エネルギー損失・クーロン多重散乱を見積もった。膜の膨らみ測定においては、実際の膨らみは理論で与えられる膜膨らみ近似式 (3.4) をほぼ再現できていた。しかし低い圧力での理論との大きな不一致と考えられる膜のしわについては今後、細心の注意を払う。今後も様々な種類の膜の材質をあたり、レーザーによる測定を行い、膜の膨らみ、クーロン多重散乱、生成量から膜の材質・厚さ、オペレートする圧力、ウィンドウの直径の最適な組合せを決定する。現段階では、ハーバー $6.47[\mu\text{m}]$ 、 $200[\text{hPa}]$ 、 $\phi 40$ で実験を行う予定である。液化テストによれば、テストセルでの $200[\text{hPa}]$ での安定したオペレートに成功した。その後、実験用のセルでも同様の圧力で再現性を確認できた。また、圧力の低下を見積もるために導きだした式 (7.1) は 5% 程度の誤差は含むが、見積りに使うには十分であると考えられる。今後も液化テストを続け、成功率をあげていく。

今後の目標としては、液化テストの際にかかる時間の短縮を目指すため予冷システムの開発などを検討する。また、ウィンドウの膜の最適化だけでなく、今回前提として設定した液体水素標的の厚さ $150[\text{mg}/\text{cm}^2]$ の妥当性を生成量や分解能の観点から見直し、本実験に最適な標的システムの構築を目指す。一方で ^{24}O について最新の情報を得つつさらに勉強を続けていく。

第7章 付録

液体水素システムを扱う際の注意点や液体水素作成手順などを以下に付す。また、写真も何枚か紹介する。

7.1 作業上の注意

まず作業中に注意すべきことをあげる。液体水素システムの全体の概図は最後のページに添付する。

- もし真空もれが分かったら、水素がつながるバルブを必ず閉める。水素ガスは空気中に常圧で4~75%で爆発の可能性がある。発火点は500℃以上だが、最小着火エネルギーが0.2mJと非常に小さいため、水素ガスボンベやバッファなどの扱いに注意する。
- ターボポンプ使用時のバルブの開閉には気を付ける。急に空気、もしくは他の分子が入らないように。ターボポンプは高速回転しているため壊れやすい。ターボポンプを安全に使うために 10^{-2} torr台から用いる。
- 水素を貯めておくバッファータンクやターゲットセル、その間の配管は純度を保つ。また、99.9999%以上の高純度ヘリウムが満たされたフレキシホースも純度を損なわないように注意する。フレキシホースの取り外しの際は十分に注意する。(経験者で行うのがよい)それぞれ、窒素や酸素分子の固化↑セルの破壊、到達温度の悪化↑液化失敗につながる。
- 冷却の際、コンプレッサーに冷却水を正しく流しているか、高純度ヘリウムをするフレキシホースのsupplyとreturnが適当に配管されているかを確認する。また、コンプレッサー圧なども確認する。
- 真空をひいたり、リークする際はセル圧 \geq チェンバー圧を保つ。膜がへこむ方向には圧力はかけない。また、なるべくセルとチェンバーの差圧は長時間1気圧にはしない。

7.2 2号機液体水素作成手順

以下に液体水素作成の手順を記す。

7.2.1 セルへ水素ガス送る手順

作業を簡単にするため、セルとチェンバーの真空排気系は別系統にする。また、初期状態においてチェンバー&セルは大気圧の状態であるとする。

以下手順を述べる。

1. チェンバー内を Rotary Pump で真空引きする。ある程度 (10^{-1} torr 台) までチェンバー内が真空になったら 2 にうつる。
2. ガスハンドラー内・セル内・バッファー内を Rotary Pump で真空引きする。(*) この際、ガスボンベバルブ管も真空にするために全てのバルブを開ける。
(*) ここでセルとチェンバーの差圧を長時間 1 気圧 (セルの膜が膨らんだ状態のまま) にしない。ある程度チェンバー内が真空になったら、セルの真空引きを始めるのがよい。しかし、セル圧 \ll チェンバー圧は避ける。
3. チェンバー内が 10^{-2} torr 台までひけたら TMP を起動する。TMP 起動後は、チェンバー側は放置する。
4. セルの方は十分に真空になるまで待つ。(バッファー内を真空にするためわりと時間が必要) バッファーの到達圧力の目安は、 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ [torr] 程度である。
5. V3 を閉めて、セル側の Rotary Pump を止める。

6. V2→V4→V5 ラインで適当な圧力*の水素ガスを H₂tank からバッファーへ送る。この際、V3 以外は開いたままでガスハンドラー、セル内も水素ガスで満たす。膜の破裂を防ぐため V9 などを調整し、セルにゆっくり水素ガスを送るとなおよい。

*バッファーの圧力は水素が液体になることで減っていくことを考慮して、適当な圧力をバッファーへ送らなければならない。バッファーの設定圧力の決定は以下の式に従う。

$$P_0 = P + \frac{\rho_{LH_2}}{k} \cdot \frac{V_{LH_2}}{V_{buffer}} \quad (7.1)$$

各々のパラメータは、 P_0 :初期設定圧力、 P :オペレートする圧力(液体水素圧力)、 ρ_{LH_2} :液体水素の密度**、 k :比例定数***、 V_{LH_2} :液体水素の体積(≒セルの体積)、 V_{buffer} :バッファーの体積である。

**液体水素の密度はほぼ一定だが、温度と圧力に依存する。その依存性を以下のグラフに示す。

***比例係数 k は水素の気体での圧力の密度の関係である。温度に依存して以下のようになる。

式(7.1)は3%程の誤差を含むが、設定圧力を見積もるには十分である。

7. バッファーに水素ガスを入れ終わったら V4 を閉じる。これでガスハンドラー内、セル内に設定した圧力の水素ガスがつかまっていることになる。

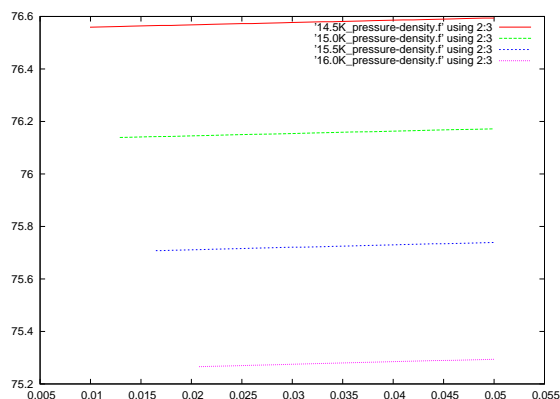


図 7.1: 液体水素標的概図

室温 [K]	290	295	300
比例係数 k [(mg/cm ³)/hPa]	8.36×10^{-5}	8.22×10^{-5}	8.08×10^{-5}

表 7.1: 温度に対する比例係数 k の値

以上で冷却の準備は整った。ここから冷却を始める。冷却の手順は第 2 章で述べる。

7.2.2 冷却の手順

1. LabVIEW を立ち上げ (詳しくは ? 章)、モニタリングしたい温度の端子をつなげる。各ラベルの端子は以下の表のようになっている。

端子	A	B	C	D	E
測定箇所	セル上部	シールド下部	?	セル	シールド上部

2. コンプレッサーのブレーカーをあげる。壁側の一番右にある。
3. 冷却水 (水道水) を流す。in と out を逆にしていないか確認する。
4. コンプレッサー側と冷凍器側でフレキシホースの supply と return が正しく接続されていることを確認する。正しく接続されていないと冷却は始まらない。
5. ヒーターの温度を 14[K] に設定する。水素は 14[K] 以下で固化する (図 ?? 参照) ので、ヒーターを忘れずにつける。
6. コンプレッサーの電源を入れる。
7. 数秒後、冷凍機が音 (シュコシュコ的な?) を出すのを確認。それに伴って温度が下がっていていることを確認する。最初は非常にゆっくりな低下である。

あとはひたすら待つ。2号機は冷えきるまで5時間程度を要する。
2号機の場合、液化終了時のチェンバー圧力は $2\sim 3\times 10^{-8}$ torr である。

7.3 液化テスト終了の仕方

終了の手順を以下に述べる。特にセル、シールドともに冷えた状態なので空気(水分)を入れるようなことはしない。冷却終了時の温度では窒素も液化してしまう。

1. コンプレッサーの電源を off にする。
冷却水はすぐ止めず、しばらく流しておく必要あり。
2. 液体水素が気化するにつれ、LabVIEW での圧力モニターで圧力の上昇を確認する。
圧力が上昇していないと水素ガスがバッファーへ流れていないかもしれないので危険。
3. ヒーターを 270[K](high) 程度にセットする。すぐに温度をあげる必要がない場合はこの過程は省略してよい。
4. TMP を off にする。完全にストップするまで 10 分程度を要する。止まったら電源を切る。
5. RP-TMP 間のバルブを閉めチェンバー内は真空に保ち、Rotary Pump を止め、リークする。
6. しばらくしたら、冷却水を止める。
7. コンプレッサーのブレーカーを落とす。
8. 大気に戻す場合は、空気中の水分による霜などを防ぐため温度が室温に近くなるまで待つ。ヒーターをつけても約 1 時間程度は必要。特に大気に戻す必要がなければセル、チェンバー内は真空のままにしておく。

7.4 レーザー測定

以下にレーザー測定の手順について記す。レーザーは「高精度モード」で使用する。

- レーザーとセルを水平になるように設置する。測定可能距離は 25cm~45cm 程度なので、その範囲に収まるようにする。レーザーのランプが点滅していたら測定不可。
- PC(TOSHIBA) を立ち上げ、デスクトップの LabVIEW を立ち上げる。以下からは LabVIEW 上の手順。
 - データの名前と保存場所を設定する。(default は test.dat?)
 - 画面左上の実行(⇒)をクリックする。
 - 初期設定位置を決める。

- step 幅と step 回数を決定し、測定開始をクリックする。

測定データは距離に比例した電圧値である。ちょうど 1.0[cm/V] である。また、分解能は 10[μ m] でスポットサイズは ϕ 0.7mm である。

7.5 LabVIEW

LabVIEW とは Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench を略したもの。機*-入出力関係、データの流が直感的に理解できる点でテキスト型言語より優れている。また、データのプロセスに応じて自動的に並列処理が実行されることも、大きな違いである。レーザー測定でのモーターの制御、データの取得や冷却の際の温度と圧力の時間的変化の様子を取得する。

- LabVIEW を立ち上げる。
- ネットワークがつながっているかを確認する。
- データを蓄積するテキストファイルの名前を指定する。
- 実行ボタン(↑の記号)を押すだけ。

中のプログラムは省略する。基本的にいじらないで用いればよい。

7.6 真空漏れテストの方法

真空もれチェックの仕方を簡単にまとめる。真空もれは視覚的に確認できるものではないため、真空もれの箇所を特定することが重要である。以下に各部位の真空テストの方法を述べる。

7.6.1 ガスハンドラー

ガスハンドラーの真空もれテストの仕方について示す。以下のバルブの番号は 2 号機のガスハンドラーの番号である。ここではセルはついていないことにする。

1. まず Rotary Pump を用いて、ガスハンドラー内とセル内の真空引き。
2. ある程度ひけたら全てのバルブを閉め、Rotary Pump を止める。
3. 少したってゲージが安定してきたら、ひとつずつバルブを空けていく。バルブを開けていく際、ゲージを見ながら行う。
 - (a) V3 open
 - (b) V4 open
 - (c) V8 open (V6 ↑ V7)

(d) V9 open

(e) V10 open

真空ゲージが急激に変化したら、その付近でもれがある可能性が高い。増し締めなどをして再度、確認する。

真空度がいい (圧力が低い) 状態で行った方が感度よく測定できる。

7.6.2 セル

初期条件としてセル、チェンバー共に大気圧であるとする。セルがついているときは、セルの膜を凹ませないように、状況を確認しながら慎重に作業する。

セルがついている場合でも、セルからのもれを調べるのに上記のガスハンドラーの方法でも可能。V10を開けた時にもれが確認できる。

他の方法として、V10を閉めチェンバーを Rotary Pump である程度真空引きを行った後、Rotary Pump を止める。セルからもれがあると、チェンバー側のゲージに変化が出るはずである。

7.6.3 チェンバー

チェンバーは到達真空度や孤立させた際の圧力の上昇の様子から判断する。

7.6.4 その他

真空もれがありそうなところ (接続部分) にアルコールをかける。するとその気化したガスによりゲージに変化が見られる。しかし、この方法は大きな真空もれの箇所しか特定できない。簡単なチェックに用いられる。

He バック？

7.7 ウィンドウへの膜の貼りかた

ここではウィンドウに膜の貼りかたの手順を述べる。ハーバー膜の付け方を説明する。使い終わった器具はアルコールで洗浄し、元の位置に戻しておく。

1. カプトンリングを作る

アルミとハーバー膜は接着が難しいため、間にカプトンのリングをはさむ。50[μm]のカプトンを規定の大きさ¹に切る。

(a) 規定の紙どおりを円形に切る。これはリングの外枠になる。

(b) カプトンに張り付け、紙の円にそって切る。

¹写真参照

- (c) 円をくりぬく器具²を用いて、内円をくりぬく。
 - (d) ウィンドウにのせて微調整する。
2. ハーバー膜を切る
カプトンリング生成時と同様に規定の紙があるため、それを用いる。ハーバー膜はとて薄いので、封筒などの厚い紙に挟んで切ると切りやすい。
 3. ウィンドウを削る
接着剤をつきやすくするため、ウィンドウの表面(カプトンリングがのるところ)を削る(傷をつける程度)。削りすぎないように注意。
 4. 接着剤を作る
接着剤はシャーレ上で StycastA と StycastB を質量比 100:28 で混ぜる。この際、ムラがなくなるまで念入りに混ぜる。10~15 分程度混ぜれば十分。
 5. 接着する
 - (a) 削ったウィンドウの表面に真ん中が山になるように接着剤をのせる。
 - (b) その上にハーバー膜を載せ、ピンセットで接着剤を外に押し出す。接着剤がウィンドウ上にはみ出すくらいがちょうどいい。なるべくハーバーにしわがでないようにする。しわができると膜の膨らみに大きく影響する。
 - (c) はみ出た接着剤(少なければ足す)の上にカプトンリングを載せる。接着剤がカプトンの表面全体に広がるようになれば OK。
 6. 1 日程放置する

7.8 真空の周辺機器や道具

7.8.1 真空シール

- Oリング

Oリングは、断面がO形(円形)の環型をした密封用(シール用)機械部品のことである。材質にはゴムが使われることがほとんどである。内部の流体が外に漏れないように密封するために用いる。Oリングに傷がついたり、ほこりなどが付着していると性能が低下するため、付け外しの際はOリングとその溝をアルコールでふく方がよい。

- インジウム In

インジウムは銀白色の柔らかい金属である。インジウムは低温になる部分の真空シールに使用される。その他の部分ではOリングを用いるが、低温ではOリングが固化し破壊され真空を保てないおそれがあるため、代わりにインジウムを用いる。セ

²写真参照

ルとウィンドウや、セルの銅管の接続部などに用いられる。付け替える際は、スクリュードライバーで削ぎ落とし捨てずにインジウムの入った袋に入れておく。インジウムは希少金属であるためなるべく無駄には使用しない。

7.8.2 ガスボンベの扱いかた

ガスボンベの扱いかたを簡単に紹介する。ガスボンベは 15[MPa] 程度の高圧ガスが封入されており、危険を伴うので注意して扱う。

・減圧弁

減圧弁とはメイン配管内で部分的に低圧で使用する場合に利用される。減圧弁は押し込むことでバネに力を与え、空気を通す。つまり右(時計)回りに回すこと1次側と2次側をつなげ、左(反時計)回りに回すことで閉じる方向である。減圧弁とガスボンベの接続は逆ねじになっており、接続の際は思いっきり閉める。

以下に1次側(ガスボンベ)から2次側にガスを流す手順を簡単に示す。

1. 減圧弁が閉じている(1次側と2次側がつながっていない)こと、最終バルブが閉じていることを確認する。
2. まずガスボンベの主バルブを開ける。
3. 減圧弁のバルブを少しずつ開け、ブルドン管を見ながら適当な圧力になる所で止める。
4. 最終バルブを開ける。

ガスを流すのを終了する際は上手順の逆を行えばよい。

7.9 液化テスト結果

液化テストの結果を以下に示す。

7.9.1 2009.01.10 のテスト

本テストでは、冷却の際の到達温度を確認した。

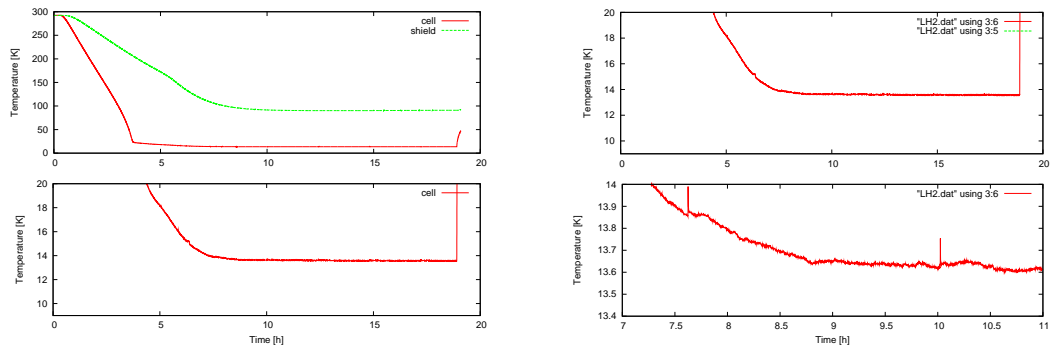


図 7.2: 上:時間 vs 温度(上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大
図 7.3: 上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力

7.9.2 2009.01.30 のテスト

まずバッファの圧力を 300[hPa] に設定した。

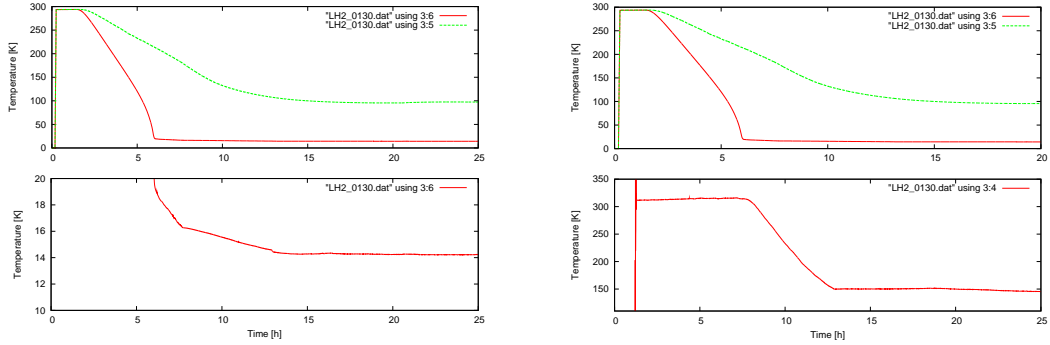


図 7.4: 上:時間 vs 温度(上:赤がセル、緑がシー
ルド) 下:温度拡大
図 7.5: 上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル
圧力

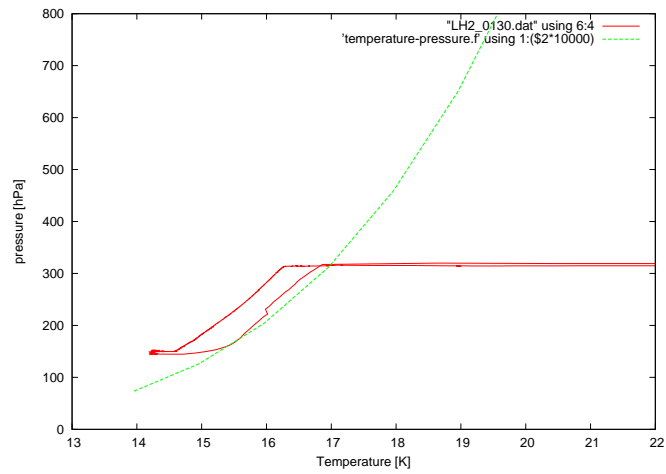


図 7.6: 蒸気圧曲線

7.9.3 2009.02.01 のテスト

まずバッファの圧力を 300[hPa] に設定した。

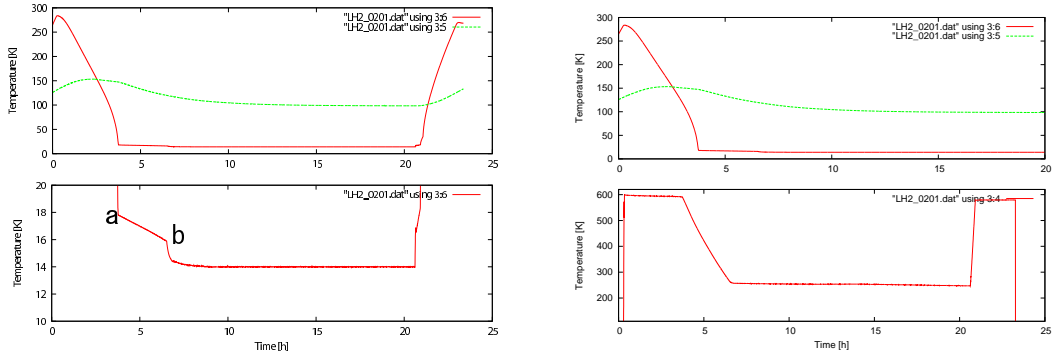


図 7.7: 上:時間 vs 温度(上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大
 図 7.8: 上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力

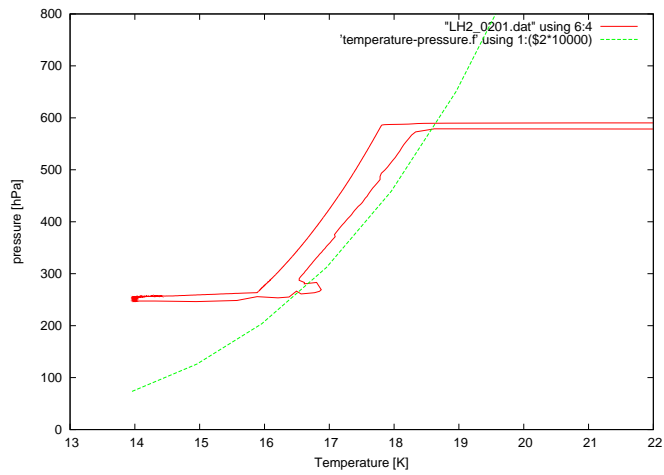


図 7.9: 液体水素標的概図

7.9.4 2009.02.04 のテスト

まずバッファの圧力を 300[hPa] に設定した。

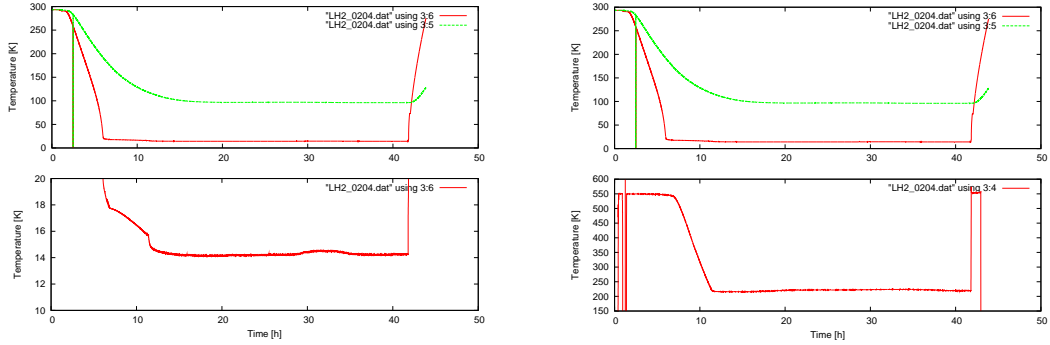


図 7.10: 上:時間 vs 温度 (上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大
 図 7.11: 上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力

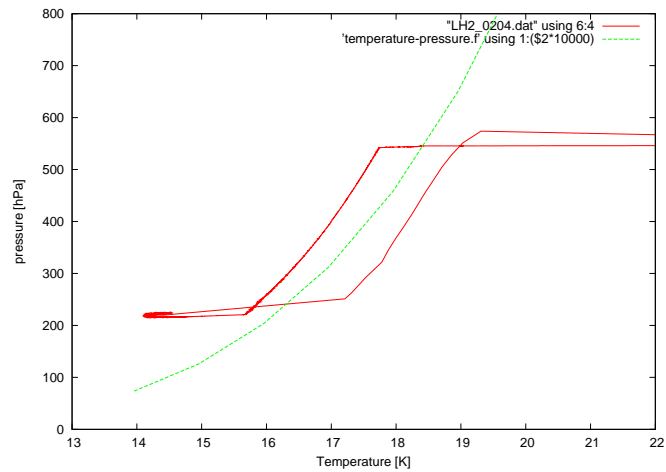


図 7.12: 蒸気圧曲線

7.9.5 2009.02.09 のテスト

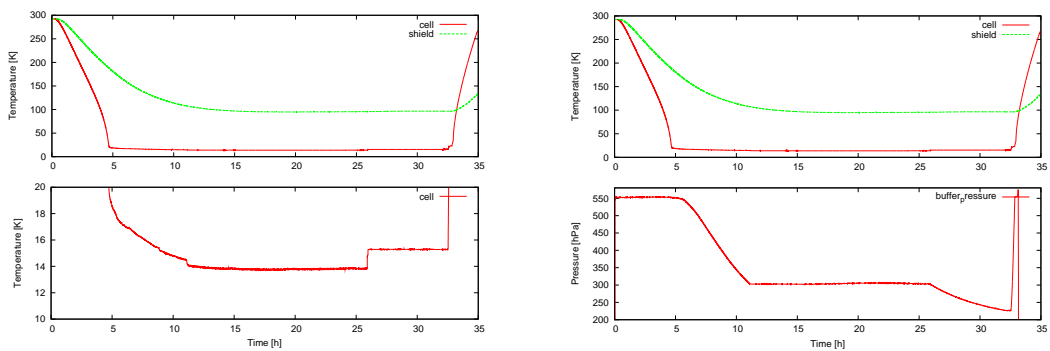


図 7.13: 上:時間 vs 温度 (上:赤がセル、緑がシールド) 下:温度拡大
 図 7.14: 上:時間 vs セル温度 下:時間 vs セル圧力

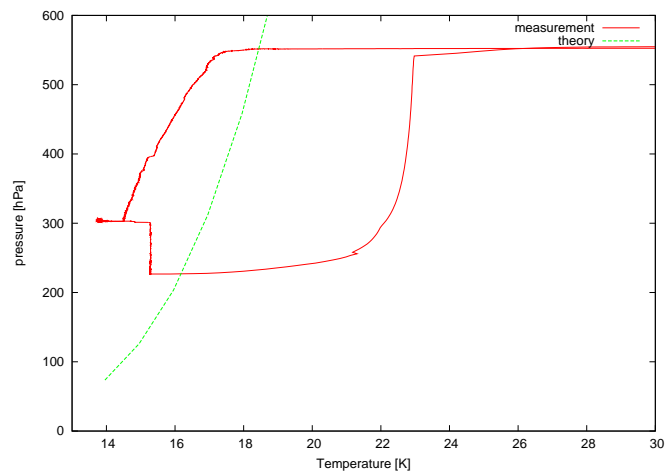


図 7.15: 蒸気圧曲線

最後に標的システムの概図をのせる。

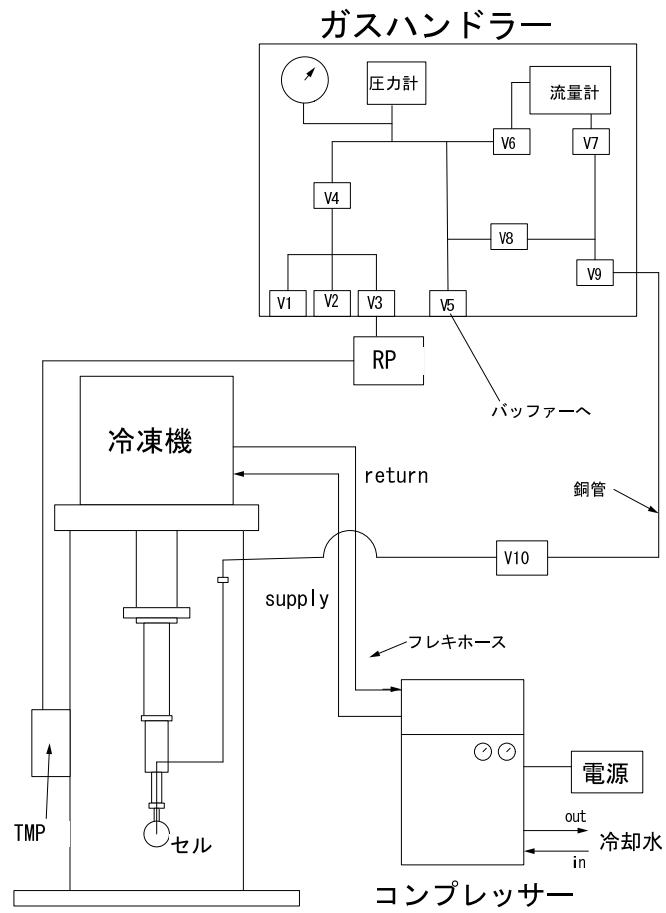


図 7.16: 液体水素標的概図

関連図書

- [1] A.Ozawa et al.、 『New Magic Number, N=16,near the Neutron Drip Line』 (Physical Review Letters 84 5493 2008)
- [2] M.Stainou et al.、 『N=14 and 16 shell gaps in neutron-rich oxygen isotopes』 (Physics Letters C 69 034312 2004)
- [3] H.Sakurai et al、 『Evidence for particle stability of ^{31}F and particle instability of ^{25}N and ^{28}O 』 (Physics Letters B 448 180-184)
- [4] T.Otuka et al.、 『Evolution of Nuclear Shell due to Tensor Force』 (Nuclear Physics A 805,2008)
- [5] B.Alex Brown et al.、 『New 'USD' Hamiltonians for the sd shell』 (Physical Review C 74 034315、 2006)
- [6] www.nndc.bnl.gov 「National Nuclear Data Center」
- [7] C.R.Hoffman et.al.、 『Evidence for a doubly magic ^{24}O 』 (Physics Letters B 25528 2009)
- [8] Y.Kondo、 『Spectroscopy of ^{13}Be and ^{14}Be via the Proton-Induced Breakup Reactions』 (Doctonal Dissertation)
- [9] N.Fukuda et al.、 『Coulomb and nuclear breakup of a halo nucleus ^{11}Be 』 (Physical Review C 70 054606 2004)
- [10] <http://gperinic.web.cern.ch/gperinic/> 「Goran Perini 氏's Homepage」
- [11] <http://www.td-net.co.jp/index.html> 「東レ・デュボン株式会社」
- [12] <http://nilaco.jp/jp/index.php> 「株式会社ニラコ」
- [13] チモシェンコ、 ヴォアノフスキー クリーガー共著 長谷川節 訳、 『板とシェルの理論 下』 (理工学海外名著シリーズ)
- [14] <http://www.nist.gov/index.html> 「National Institute of Standards and Technology」

謝辞

本卒業研究を行うに当たり、多くの方々に御協力頂きました。指導教官である中村隆司教授には、研究の進行に合わせた的確な助言と展望を与えて頂きました。また、佐藤義輝助教授には液体水素標的、実験の概要だけでなく多くの物理に関することを丁寧に御指導を頂きました。そして中村研究室、M1の小林信之氏には液体水素標的の扱いかたや注意点をこと細かに御指導を頂き、多くの実験技術を身につけることができました。また同研究室の河田鷹介氏、出口茂樹氏は普段から物理に関することやコンピュータの技術の話から日常的な会話まで様々な場面で御世話になり、充実した研究室生活を送れました。この方々の御協力無しに、私の研究を進めることは出来ませんでした。この場をお借りして心より感謝致します。

また、旭・中村研究室の皆様御協力により充実した生活を送ることが出来ました。ありがとうございました。