

卒業論文

断熱消磁冷凍機実験

東京都立大学 理学部 物理学科

宇宙物理実験研究室 学修番号 0041030

新妻周子

目次

1	目的	3
2	ADR の冷却原理と現状	4
3	saltpill の構造と設計	5
3.1	saltpill の条件	5
3.2	今までの問題点と改善点、設計	5
4	結晶の育てる試験	10
4.1	結晶を育てる際の注意点	10
4.2	結晶の育て方	10
4.2.1	FFA(硫酸第二鉄アンモニウム 12 水の再結晶)	10
4.2.2	CrK ミヨウバン	10
4.3	試験	10
4.4	現状と今後	12

図一覧

3.1	今までの saltpill の構造図。(熱伝導性を高めるため金線を張っている)	5
3.2	今回の saltpill の構造図	6
3.3	設計図その 1	7
3.4	設計図その 2	8
3.5	設計図その 3	8
3.6	設計図その 4	9
4.1	写真その 1	11
4.2	写真その 2	11

第 1 章

目的

TES 型マイクロカロリメータは X 線の入射エネルギーを温度上昇として測定する装置であり、極低温において高いエネルギー分解能を示す。

これを動作させるために、本研究室では断熱消磁冷凍機 (ADR) を使用している。

ADR の心臓部である saltpill の作成が今回の大まかな目的である。saltpill の作成において、作業は大きく二つに分けられる。まず一つ目は、saltpill の設計および組み立て、もう一つは、断熱消磁冷凍の冷媒となる常磁性塩の結晶作りである。

saltpill とは冷媒となる磁性体を入れるカプセルであり、ここで極低温が作られる。

第 2 章

ADR の冷却原理と現状

断熱消磁冷凍の冷媒となる常磁性塩は、磁場を与えることによりスピンのそろい、エントロピーが下がる。その状態で断熱し、磁場を取り去る。

T_1K という状態で、等温で磁性体に磁化を行なうと、エントロピーの変化は、

$$\delta S(T_1, B_1) = S(T_1, 0) - S(T_1, B_1) = \frac{CB_1^2}{2\mu_0 T_1} \quad (2.1)$$

となり、今は断熱しているためエントロピーの変化がないので、

$$\frac{CB_1^2}{2\mu_0 T_1^2} = \frac{CB_2^2}{2\mu_0 T_2^2} \quad (2.2)$$

これより、

$$\frac{B_1}{T_1} = \frac{B_2}{T_2} = const \quad (2.3)$$

を満たす。したがって、断熱し、磁場を取り去ると常磁性塩の温度が下がる。

しかし、外部磁場を取り去っても内部磁場があるため、最低温度は冷媒によって異なる。また、低温の状態を保つには、比熱が大きい方がよい。

今までは、冷媒として FAA(硫酸第二鉄アンモニウム 12 水) を使っていた。FAA は比熱は大きい、最低到達温度は約 30mK である。今回はさらに低い最低到達温度を求める場合に備え、CrK ミョウバンの結晶実験を行なっている。CrK ミョウバンは、比熱は FAA より小さいが、最低到達温度は約 10mK になる。この二つを使いわけることにより、今後の実験がより有利になる。

第 3 章

saltpill の構造と設計

3.1 saltpill の条件

まず初めに、saltpill に必要な条件を簡単に説明する。

- 1、saltpill の外側は真空にするため、外圧に対し、大気圧から高真空まで耐えられなければならない。
- 2、saltpill の内部では CrK ミョウバン (または FAA) の結晶を育てるため、saltpill 内部に露出される部分は全て耐強酸性でなければならない。
- 3、saltpill 全体の熱伝導性が優れていなければならない。
- 4、saltpill 内部で結晶を育てられる構造にしなければならない。
- 5、カプセル全体が極低温まで耐えられなければならない。
- 6、saltpill のサイズはできるだけ小さい方がよい。

3.2 今までの問題点と改善点、設計

今までの saltpill の構造図を載せる。

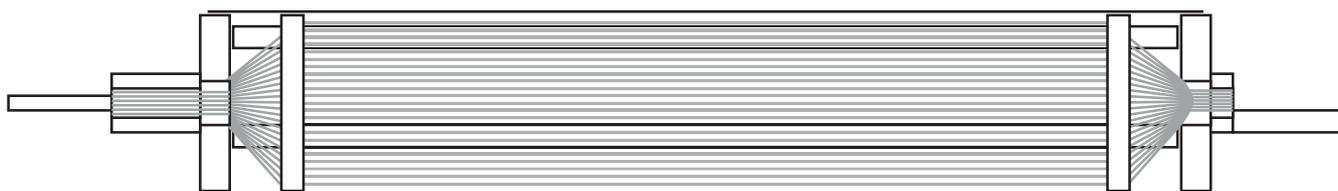


図 3.1: 今までの saltpill の構造図。(熱伝導性を高めるため金線を張っている)

この構造だと、フタと外筒の接着部分が完全に密封できずにもれてしまっていて、条件 1 が不十分である。このとき、接着にはエポキシを使っている。そこで今回は、両側のフタにツバを作り、外筒とフタを溶接することにした。

外筒の大きさを変えずツバを設けるために、フタを内側にずらしてある。

次に、条件 2,5 を考え、内部にはステンレスや金、アクリル材を使う。

- 1、フタ (ステンレス)
- 2、外筒 (ステンレス)
- 3、ツバ (ステンレス)

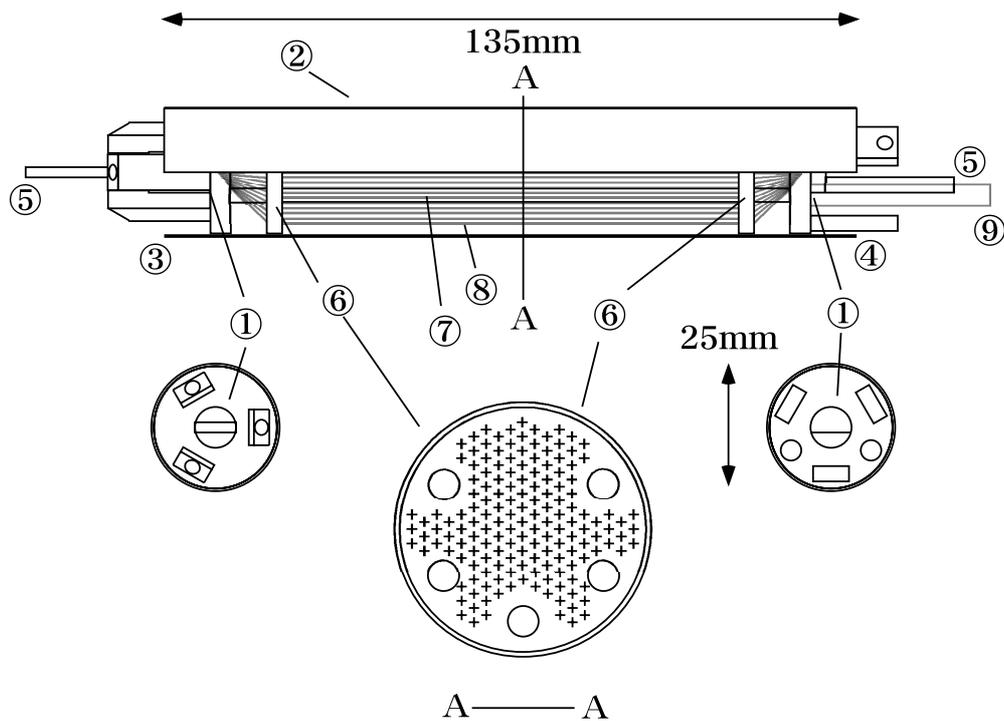


図 3.2: 今回の saltpill の構造図

- 4、ツバ (ステンレス)
- 5、熱リンク頭部 (Cu)
- 6、張り板 (ガラスエポキシ)
- 7、張り用の棒 (アクリル)
- 8、金線 (Au)
- 9、結晶を saltpill 内で育てるための注入用パイプ (ステンレス)

また、熱リンク頭部と金線をハンダ付けした後、そのうえからエポキシでガードする。

次は条件 3 である。これは saltpill の中に金線を張ればよいのだが、磁場垂直面に対する使用する金線の全断面積が大きいと誘導起電力の発生が大きくなり、全断面積があまりに小さいと熱平衡状態に達する時間が長くなり、冷却や温度制御に支障が出る。そのため全金属の全断面積は saltpill 自身の断面積の 10 % 程度にしたい。

ここで、saltpill 自身の直径は 25mmφ なので、saltpill 自身の断面積は 490.6mm² である。また外筒の厚さは 1mm なので、外筒の断面積は 75.36mm² である。これは全断面積のうちの約 15 % もしめてしまうが、saltpill に必要な強度を考えるとしかたないので、金線の断面積を抑えて 1 % 程度として計算すると (金線の本数を n , 金線の半径を r)

$$\frac{nr^2\pi}{12.5^2\pi} = 0.01 \quad (3.1)$$

今回使用する金線の直径は 0.2mmφ なので、 n はおよそ 160 になる。

金線の間隔 d は近似すると、saltpill 自身の全断面積を n で割り、その平方根と考えられるので、間隔 d は

$$d = \sqrt{\frac{12.5^2 \pi}{n}} \quad (3.2)$$

n = 160 なので d=1.75(mm) になる。

ここで、CrK ミョウバンの熱伝導率を考えると、数 mm 程度の間隔内の結晶は温度が一様とみなしてよいと思われるので、d=1.75(mm) なら大丈夫である。しかし後に載せてある設計図を見てもらえれば分かるように、金線を通す張り板は、saltpill 自身の直径に比べて小さいうえ、張り板には、張り用の棒と結晶を中で育てるための注入用パイプを通すための穴も空けなくてはならないので、d=1.2(mm) にする。

条件 4 については、図 2 にあるように注入用パイプを下まで通し、下の方から少しずつ結晶化させていき、すき間の空かないようにする。詳しくは section4 で書く。

条件 6 の saltpill のサイズのことが、これには様々な理由がある。saltpill はケブラーひもで吊すかたちで固定するため、軽量でなければならない。また、サイズが大きくなると金属が増えるので、誘導起電力が増えてしまう。このため、サイズはできるだけ小さくしている。

念のため、細かい設計図を載せておく。

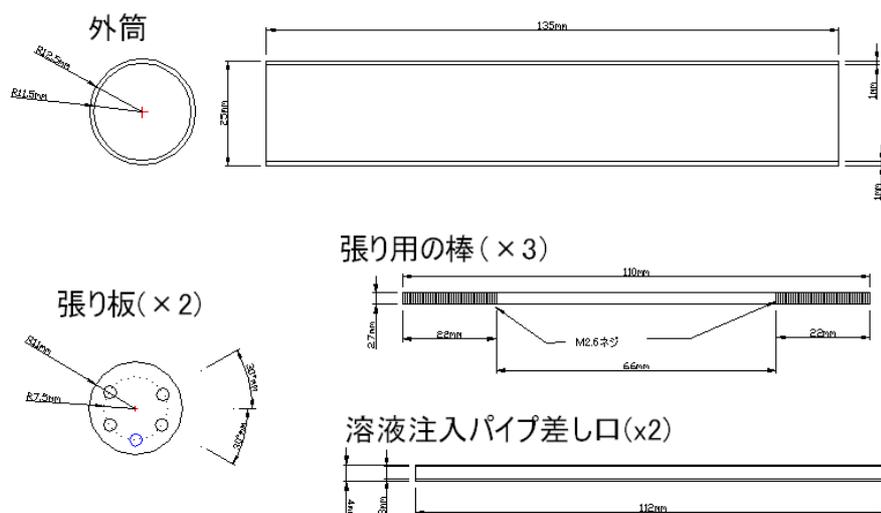


図 3.3: 設計図その 1

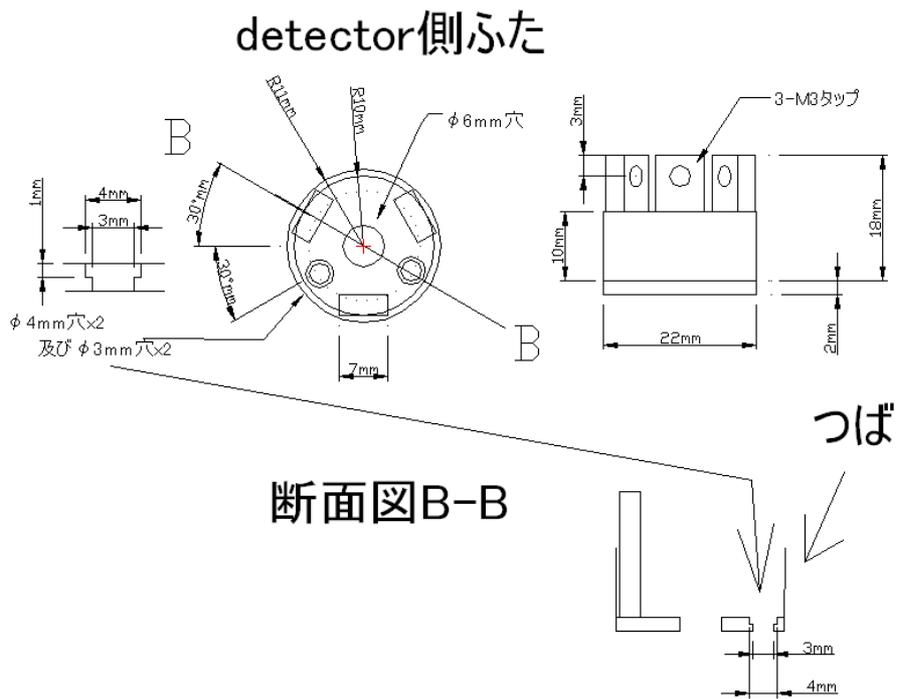


図 3.4: 設計図その 2

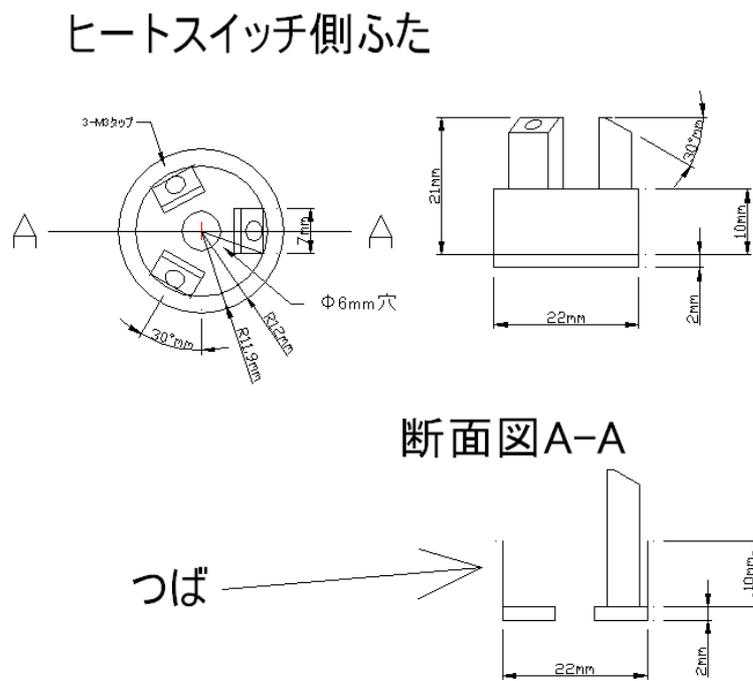
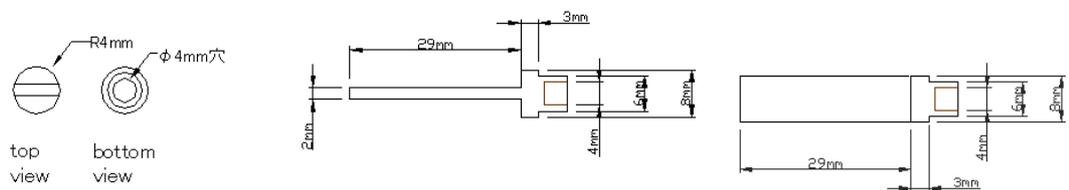


図 3.5: 設計図その 3

熱リンク頭部(熱スイッチ側)



熱リンク頭部(detector側)

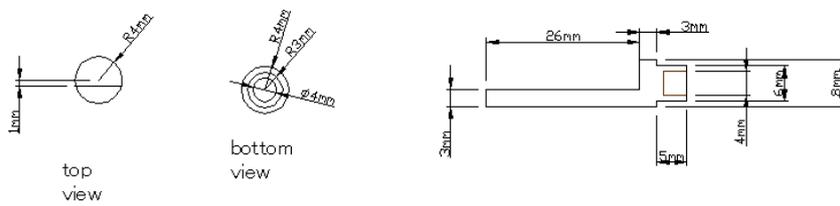


図 3.6: 設計図その 4

第 4 章

結晶の育てる試験

4.1 結晶を育てる際の注意点

現在使用している saltpill は、FAA を使っているのですが、最低到達温度は 30K のはずである。しかし、今のところ 75K までしか下がっていない。おそらく原因は、saltpill が完全に密封されていなかったことや、結晶の育て方に問題があったと思われる。

結晶をむらなく育てるためには、注入用パイプを下まで通し、二つの注入口から交互に注入することがポイントとなる。

4.2 結晶の育て方

4.2.1 FFA(硫酸第二鉄アンモニウム 12 水の再結晶)

1、硫酸アンモニウム鉄(III)・12 水 20g、蒸留水 9.3ml、硫酸 0.7ml を 37 ~ 39 で加熱しながら混ぜる。

2、結晶が全て溶けたら、ガラスフィルターを通して別のビーカー(本番では saltpill)に移す。

3、一晩置くと底に薄く結晶ができるので、残りの廃液は捨てる。

こうして 1 ~ 3 の手順を繰り返すことで結晶を育てる。

4.2.2 CrK ミョウバン

1、CrK ミョウバン 6.980g、蒸留水 20g を 30 で加熱しながら混ぜる。

2、試料が全て溶けたら、ガラスフィルターを通して別のビーカー(本番では saltpill)に移す。

3、数日置くと底に薄く結晶ができるので、残りの廃液は捨てる。

こうして 1 ~ 3 の手順を繰り返すことで結晶を育てる。

4.3 試験

今回は CrK ミョウバンを使って saltpill を作成するので、そちらの方だけ書くことにする。

CrK ミョウバンはとてもマイナーなため、正確な作り方が分からないが、いろいろ調べた結果、上に述べた作り方が見つかった。しかし、上の分量で攪拌しても、溶けきらない CrK ミョウバンの量が多すぎたので、攪拌時の温度を、室温 + 5、室温 + 10 に変えて試した。これ以上温度を上げると結晶の構造が壊れてしまうので、室温 + 10 を最高の温度とする。その結果、試した温度では試

料の残量はほとんど変わらないことがわかった。これでは試料がもったいないので、現在は蒸留水を25g にしている。

今のところ、攪拌時の温度が室温 +10 で、冷蔵庫で2,3日放置するのが最もうまくいっている。

次のページの写真が一週間置いたものである。分かりにくいですが、ビーカーの底に薄く結晶のようなものが見える。



図 4.1: 写真その1



図 4.2: 写真その2

4.4 現状と今後

- ・今までの問題点を改善した設計図をかいた。発注していた部品が届いたので、これから組み立てを行う。

- ・結晶は、密封可能な容器で育て、常温での放置が可能かどうかを試す。これがうまくいったら、組み立てた saltpill の中で育てる。

謝辞

本研究において、先生方、先輩方には大変お世話になりました。この場をかりて、深く感謝の意を述べさせていただきます。ありがとうございました。この一年間を通して、実験のおもしろさを実感することができ、また、多くのことを学ぶことができたと思っております。本当にありがとうございました。