修士論文

極低温X線検出器用ガスギャップ式ヒートスイッチの開発と性 能評価

首都大学東京 理工学研究科 物理学専攻 修士課程 宇宙物理実験研究室

指導教員 石崎 欣尚

辺見 香理

2008年3月

私たちは、銀河団やブラックホール、中性子星といったX線放射源の重元素量やガスの運動を知るこ とでX線天体の進化のメカニズムや、さらには宇宙の進化の謎を解明することを目的に輝線の精密な 観測を行なうことを目指している。そのために開発を行なっているのがTES型X線マイクロカロリ メータと呼ばれる検出器である。これは、X線入射による素子の温度上昇が、超伝導遷移端(約100 mK)で急激な抵抗増加をもたらすことを利用して入射エネルギーを精度よく測るものである。TES 型カロリメータを極低温で動作させるためには、宇宙でも動作可能な極低温冷凍機の開発が必要で ある。無重力でも使用できる冷凍機として、私たちは断熱消磁冷凍機(Adiabatic Demagnetization Refrigerator: ADR)を開発している。ADR は、常磁性体を冷媒とし、磁場を用いて温度とエントロ ピーのカルノーサイクルを生み出し、TES カロリメータを冷却する。主要コンポーネントは、常磁 性体を用いた冷媒、磁性体冷媒に磁場をかけるための超伝導マグネット、そして、冷媒と熱浴間の熱 的な接続、切断の切り換えを行なう熱スイッチ(HS)である。ADR のサイクルを回す際の磁場印可時 に発生する磁化熱を捨てるため、熱浴と等温状態に(HS ON)、消磁時には断熱にする(HS OFF)必 要がある。つまり、ON 時には高い熱伝導度を持ち、OFF 時にはほぼゼロに近い熱伝導度を持つ HS が理想的である。本研究では独自設計による HS の詳細な性能評価を行い、改良を加えることで更な る高性能 HS の製作を目的としている。

本研究で開発を行なったのはガスギャップ式 HS である。これは、吸着剤が温度に対してガスの 吸着能力の大きな変化を持つ性質を利用して作られた HS である。密封性が高く熱伝導率の低い外壁 (外側シェル)を持つカプセルの中にガスを封入し、内部に封入されている吸着剤(活性炭)がガスを 吸着、脱離することによってカプセル上下間の熱伝導度を変化させる。ガスで満たされているときが ON 状態、ガスが吸着され内部が高真空になるときが OFF である。ガスギャップ式にもさまざまなデ ザインがあるが、本研究では Active Gas-gap Heat Switch (AGGHS)を開発した。これは、カプセ ルから吸着剤の入った箱が熱伝導率の低い細いパイプ (NEEDLE と呼ぶ) で接続されており、吸着材 をヒーター抵抗により温度操作し、ガスを吸着、脱離させるものである。私たちはこのタイプのHS を独自に設計し開発を行なっている。その特徴は、OFF 性能を決定する外側シェル外径を小さくし、 ON 性能を決定する熱伝導ディスクは別の構造としてそれぞれ独立に決められるようにしたことであ る。また、吸着剤には活性炭を使用し、外側シェルにはSUS304、大きな熱伝導が必要なギャップ500 μm をはさむ熱伝導ディスクには 5Nの高純度銅を使用している。設計値は、いずれも 2 K σ ON 時 5 m mW/K 以上、OFF 時には 3 μ W/K である。まず、動作確認試験としての 4.2 K における首都大 ADR での試験後、宇宙研2段式 ADR (dADR) で 4.2 K 以下の詳細な性能評価試験を行なった。HS には ⁴He ガスが 87 torr (@20) 封入されている。試験方法は、HS の上部 (活性炭とは逆側: Cold side と呼ぶ) に取付けてあるヒーターにより既知の熱量 P を与え、熱浴と常に接触させている下側 (Hot side) と温度差を作り、Cold side の温度上昇がとまり全体が平衡状態に達したところで Cold side の前 後温度差 Δ T を使用して熱伝導度 $G = P/\Delta$ T により測定する。試験結果は、OFF 時熱伝導度 15.0 $\pm 4.0 \ \mu W/K$ (@ 4.2 K)、4.0 $\pm 1.0 \ \mu W/K$ (@ 2.0 K)、ON 時熱伝導度 13.0 $\pm 1.0 \ mW/K$ (@ 4.2 K)、6.0 ± 0.5 mW/K (@ 2.0 K) であった。さらに ON/OFF 温度が約 10K、温度 ON/OFF 時間が 約6分と測定された。しかし、この試験により、活性炭の入った銅箱 (チャコール BOX と呼ぶ) から NEEDLE を通じて HS 本体へ大きな熱流入があり、断熱消磁サイクルにおいて冷媒の温度上昇速度 がはやくなるなどの影響を与えることが分かった。また、封入するガス圧を前回と同じ圧力 (87 torr) と、10 torr に減少させ場合の二通りに対しての ON/OFF 熱伝導度測定試験を首都大 ADR(@ 4.2K) で行なった。試験結果は、OFF 熱伝導度 14.0 ± 4.0 μ W/K (@ 10 torr)、190 ± 10 μ W/K (@ 87 torr) となり、ON 時熱伝導度は 10 ± 1.0 mW/K (@ 87 torr) となった。また、ガス圧を 10 torr に減 少させると ON/OFF 温度が 20 K 以上となり、ON/OFF 時間スケールも約 8 分と長くなった。この 結果から、10 K 近くの ON/OFF 温度にするためには、数 10 torr 以上のガスを詰める必要性がある ことが分かった。ただし、この試験に使用していた HS は適切なギャップ幅を実現できていない可能 性があることがわかったため、今後、熱伝導度測定の再試験を行なう必要がある。また、ガス詰めし た HS 容器を密封するための封じきり方法も、より安全で確実な方法が必要であることがわかったた め、封じきり用の道具を新たに設計するなど製作工程の改善も行った。その後、宇宙研 dADR、首都 大 ADR の試験結果から NEEDLE やチャコール BOX 周りの改善を中心に新たに熱設計、必要な活 性炭量の見積もり、デザインの変更を行なった。今後は、新たに製作された AGGHS の評価試験を行 い、首都大 ADR、その他の多段式 ADR への導入を目指す。

目 次

第1章	はじめに	11
1.1	X 線天文学	11
	1.1.1 X線天文学概観	11
	1.1.2 主なX線天体	11
	1.1.3 高精度分光の必要性	13
1.2	X 線分光検出器に要求される性能	13
	1.2.1 地上のX線分光実験	14
1.3	X 線分光技術	15
	1.3.1 回折格子	15
	1.3.2 X 線マイクロカロリメータ	16
1.4	極低温の冷却システム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	18
	1.4.1 TES 型カロリメータの動作原理	18
	1.4.2 極低温冷凍機	19
1.5	本論文の目的	20
第2章	ADR の冷却原理と構造	21
2.1	冷却原理	21
	2.1.1 理想常磁性体の基本的性質	21
	2.1.2 比熱	24
	2.1.3 エントロピー制御	27
	2.1.4 冷凍サイクル	27
	2.1.5 温度制御	29
2.2	冷凍機の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
	2.2.1 磁性体の選択	30
	2.2.2 鉄ミョウバンとクロムカリウムミョウバンの特性	31
	2.2.3 デュワー	33
2.3	ADR の構造	34
	2.3.1 構造図	34
	2.3.2 熱スイッチ―ヒートスイッチ	35
	2.3.3 ソルトピル	36
	2.3.4 マグネットコイル	37
2.4	デュワー構造	37
	2.4.1 He tank	37

	2.4.2 支持材料
	2.4.3 液体ヘリウム注入口と radiation shield (アルミ合金)
第3章	ヒートスイッチ 39
3.1	ヒートスイッチ
3.2	種々の HS
	3.2.1 機械式 HS
	3.2.2 超伝導式 HS
	3.2.3 ガスギャップ式 HS 43
3.3	ガスの熱伝導
	3.3.1 連続体の場合 44
	3.3.2 分子として扱う場合
3.4	PGGHS
3.5	AGGHS
	3.5.1 独自デザインの AGGHS 49
3.6	ガス封入圧と熱伝導度の関係
0.0	
第4章	活性炭と熱伝導ガス 53
4.1	活性炭
4.2	炭素系材料の種類と特徴
4.3	吸着等温線
4.4	封入するガス圧
第5章	設計 57
5.1	要求性能
	5.1.1 首都大 ADR
	5.1.2 宇宙研二段式 ADR 58
5.2	基本設計
	5.2.1 AGGHS 一号機
	5.2.2 設計性能
	5.2.3 製作
5.3	新設計
	5.3.1 改良点
	5.3.2 各部品の新デザイン案
54	検討 68
0.1	5.4.1 チャコール BOX 活性炭量 60
	5.4.9 チャコール BOX NEEDLE からの執法 A 60
	5.4.2 アドコ アロOA、NEEDLE N·S の $x/m/(1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 +$
	0.4.0 町目コノフソフノス
5.5	
	551 執伝導度 79

	5.5.2 OFF 時 HS 本体の熱流入	8
	5.5.3 各パラメータの決定	8
	5.5.4 必要なヒーターパワー	8
	5.5.5 ON/OFF 時間の見積もり	8
第6章	性能評価試験	8
6.1	試験方法	8
	6.1.1 熱伝導度算出方法	8
	6.1.2 測定手順	84
6.2	TMU-ADR による動作確認試験	8
6.3	dADR による試験	8
	6.3.1 SUS フォイルのコンダクタンス	8
	6.3.2 4.2K 以下における HS1 号機の性能評価-1	8
	6.3.3 4.2K 以下における HS1 号機の性能評価-2	90
	6.3.4 考察	9
6.4	TMU-ADR におけるガス圧変化試験	94
	6.4.1 試験セットアップ	94
	6.4.2 試験結果	9
	6.4.3 考察	90

第7章 まとめと今後の課題

図目次

1.1	個となるエネルギー分解能の検出器で観測したとき得られるスペクトル	15
1.2	X 線分光器の性能比較	16
1.3	TES 型マイクロカロリメータの動作概略	18
1.4	「すざく」に搭載された半導体カロリメータ (XRS) 用 ADR	20
1.5	ADR が導入された固体 Ne デュワー	20
2.1	常磁性塩の、1 K まであげるのに要する熱量	26
2.2	冷却課程でのエントロピーと温度の関係	28
2.3	温度制御の原理	29
2.4	FAA、CPA および代表的な磁性体の比熱。 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
2.5	ADR 中心部。	35
2.6	ADR 中心部の構造断面図。	35
2.7	ADR デュワー。外観。	38
2.8	ADR デュワーの構造図。	38
3.1	S – T 図で見た HS の働き	39
3.2	機械式 HS 模式図	41
3.3	首都大 ADR に導入されている機械式 HS	41
3.4	超伝導式 HS のポンチ絵。模式的に縦方向に磁場がかかるように図示したが、横方向	
	に磁場をかける場合もある。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	42
3.5	Pb の熱伝導率。直線は常伝導状態、破線は超伝導状態。	42
3.6	ON 時 HS の模式図	43
3.7	OFF 時 HS の模式図	43
3.8	様々なガスの低温における熱伝導率。最低温度の点はそれぞれ凝縮開始温度を示して	
	いる。(ガスの平均自由行程 λ が $\Delta/100(\Delta=100\mu{ m m})$ のとき。) $\dots\dots\dots\dots\dots\dots$	44
3.9	圧力に対する平均自由行程。赤 : 4.2 K、緑: 2 K、青: 1 K	45
3.10	ガスを連続体として扱った場合の熱伝導度。面積 $S=3.14[cm^2]$ 、ギャップサイズ $g=$	
	500µmとした。	45
3.11	温度一定にした時のガスを分子としたときの熱伝導度。向かい合う面積 $S=3.14[cm^2]$	
	としている。	46
3.12	圧力一定にした時のガスを分子としたときの熱伝導度。向かい合う面積 $S=3.14[cm^2]$	
	としている。	47

3.13	4.2K におけるガスの熱伝導度。赤と緑がそれぞれ分子流として扱ったとき、連続体	
	として扱ったときの熱伝導度。紫の線より高い圧力が平均自由行程 $\lambda < \Delta/100$ 。青	
	い線より低い圧力が平均自由行程 $\lambda < \Delta 100$ 。ここでは設計のギャップサイズと同じ	
	$\Delta = 500 \mu m \& UTNS$.	47
3.14	代表的な PGGHS のデザイン	48
3.15	代表的な AGGHS のデザイン	50
3.16	独自デザインの AGGHS。片側が大きくせり出させ、ギャップサイズを小さくした構造。	50
3.17	ガス封入圧を変えたときのコンダクタンス変化 (2)	52
4.1	Henry 式	54
4.2	Langmuir \vec{z}	54
4.3	BET 式	54
4.4	LGK-433とWH5C8/32の4.2Kでの等温吸着線。緑:LGK-433、青:WH5C8/32、	
	赤: LGK-433の結果に対して Langmuir 式でフィットした結果	55
4.5	LGK-433 を使用したときに 4.2 K 時の残留ガスによる熱伝導度	56
5.1		57
5.2	宇宙研二段式 ADR(double-ADR:dADR)	58
5.3	dADR デュアー内写真	58
5.4	AGGHS 概略図	60
5.5	製作を終えた AGGHS	60
5.6	はんだが溶けて活性炭 BOX がとれてしまっている	62
5.7	ベイキング中の写真....................................	62
5.8	ベイキング中の温度モニター。設定温度以上になるとホットプレートの電源が切れる	
	ようになっている。	62
5.9	dADR 模式図	63
5.10	新 SUS シリンダー	65
5.11	新 SUS シリンダー	65
5.12	L 字型	66
5.13	スパイラル型	66
5.14	チャコール BOX	67
5.15	上から見た図	67
5.16	温度計	67
5.17	ヒーター抵抗	67
5.18	温度計、ヒーター抵抗治具。横から見た図	68
5.19	温度計ヒーター抵抗治具。正面から見た図	68
5.20		68
5.21	NEEDLE から HS 本体への ON 時熱流入 (首都大 ADR)	70
5.22	NEEDLE から HS 本体への ON 時熱流入 (首都大二段式 ADR)	70

5.23	NEEDLE から HS 本体への OFF 時熱流入	70
5.24	熱収支	71
5.25	Cu皮膜 NbTi 線を 8 本 (7.5cm)、 <i>l</i> =60mm	72
5.26	$G_{anchor} = 500 \mu W/K$ としたとき、 $l = 60 mm$	72
5.27	Cu皮膜 NbTi 線を 8本 (7.5cm)、 <i>l</i> =70mm	72
5.28	G_{anchor} =500 μ W/K としたとき、 l =70mm	72
5.29	Cu皮膜 NbTi 線を 8 本 (7.5cm)、 <i>l</i> =80mm	72
5.30	G_{anchor} =500 μ W/K としたとき、 l =80mm	72
5.31	L=60mm	73
5.32	L=70mm	73
5.33	L=80mm	73
5.34	OFF 時熱流入	73
5.35	クヌーセン数 Kn と圧力の関係。青い線 $(Kn \ >1)$ より大きいとき分子流、紫の線	
	(Kn <0.01)より小さいとき連続体として扱う。その間は中間領域。	74
5.36	NEEDLE の円断面の半径を変化させたときの分子流のコンダクタンス.......	75
5.37	圧力を変化させたときの粘性流のコンダクタンス	76
5.38	圧力を変化させたときの中間領域の式によるコンダクタンス	76
5.39	外径 a=0.90, 内径 b=0.60,l=8cm	77
5.40	a=0.81,b=0.51,l=8cm	77
5.41	a=0.63,b=0.33,l=8cm	77
5.42	a=0.55,b=0.30,l=8cm	77
5.43	外径 a=0.90, 内径 b=0.60,l=7cm	77
5.44	a=0.81,b=0.51,l=7cm	77
5.45	a=0.63,b=0.33,l=7cm	78
5.46	a=0.55,b=0.30,l=7cm	78
5.47	a=0.9,b=0.6,l=6cm	78
5.48	a=0.81[mm], b=0.51[mm], l=6cm	78
5.49	a=0.63,b=0.33	78
5.50	a=0.55,b=0.30,l=6cm	78
5.51	各温度における SUS シリンダーの熱伝導度........................	80
5.52	横軸:チャコール温度、縦軸:必要な熱量	82
6 1		ດາ
0.1 6.0	※広場試験 Setting	83
0.2 6.2	$4.2\mathbf{R}$ にのける OFF コンダンダンス · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	00 06
0.5	百価反にのりるコンタンタンス	80 07
0.4 6 5	ビットアッノ囚 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	01
0.0	ビットノッノの司兵 ····································	01
0.0	0	01
0.7	ビツドブツノ凶 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	88

6.8	セットアップの写真....................................	88
6.9		89
6.10	OFF 時熱伝導度	89
6.11	ON 時熱伝導度	89
6.12	ON/OFF 時間スケール	90
6.13	必要なヒーターパワー	90
6.14		91
6.15	チャコール BOX に与える熱の流れ	92
6.16	チャコール BOX 温度とヒーターパワー、見積もられる熱伝導度	92
6.17	チャコール BOX に与えた執の流れ	02
0.1.		95
6.18		93 93
6.18 6.19	IN DOA RESP. 2000 (1000) 1000 1000 1000 1000 1000 1000	93 93 95
6.186.196.20	デュアーに導入した後の HS	93 93 95 95
6.186.196.206.21	ご ご	93 93 95 95 96
 6.18 6.19 6.20 6.21 6.22 	ブロアーに導入した後の HS	 93 93 95 95 96 96
 6.18 6.19 6.20 6.21 6.22 6.23 	ブロアーに導入した後の HS	 93 93 95 95 95 96 96 97

表目次

2.1	常磁性塩の比熱の山の特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	26
3.1	材料の超伝導転移温度、臨界磁場・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	42
3.2		49
3.3	図 3.16 使用した部品のサイズ	51
3.4	図 3.16 の各素材使用時の ON/OFF 時熱伝導度	51
4.1	よく使用される吸着式	54
4.2	試験に使用した活性炭	54
5.1	NEEDLE からの熱流入	59
5.2	SUS シリンダーのパラメータ	65
5.3	使用温度計とヒーター抵抗.................................	67
5.4	SUS-NEEDLE 候補	69
5.5	ON 時熱伝導度	79
5.6	OFF 時熱伝導度	80
5.7	OFF 時 HS Hot side から Cold Side への熱流入	81
5.8	各温度域での比熱	81
6.1	OFF/ON 時熱伝導度	85
6.2	AGGHS 1 号機性能試験	88
6.3	AGGHS 1 号機性能試験	90
6.4		94
6.5		94
6.6	AGGHS 1 号機性能試験	94
6.7	使用温度計、配置、配線	95

第1章 はじめに

1.1 X 線天文学

1.1.1 X 線天文学概観

X線天文学は観測天文学の一分野で、天体から放射される X線を研究するものであるが、X線は 地球大気に遮られて地上に届かないため、高度 100 km 以上にあがるロケットや衛星を用いた宇宙観 測が必須である。X線天文学のはじまりは 1962 年で、ロッシやジャコーニが行ったロケット観測に より、強い X線源と全天に広がる X線背景放射を発見した。X線源は Sco X-1 という全天でもっと も強い (強度は標準として用いられるかに星雲の約 20 倍)X線源である。ジャコーニはこの発見とそ の後の X線天文学への貢献により 2002 年のノーベル物理学賞を受賞した。日本の小柴昌俊もニュー トリノ天文学を始めたことで同年に共同受賞している。

1970年以降は初のX線天文衛星Uhuru、初のX線望遠鏡衛星Einsteinなど多くの衛星が打ち上 げられた。強いX線を出す天体としては、高密度星の連星系、超新星残骸、活動銀河中心核、銀河 団などがある。小田稔をはじめとする日本の研究者は、硬いX線スペクトルを示すX線星Cyg X-1 (初のブラックホール候補天体)の位置を"すだれ"コリメーターで正確に決定し、その後「はくちょ う」(1979年)から「すざく」(2005年)までの5つのX線天文衛星により、独自の貢献を行ってきた。 特に日本はX線分光天文学を開拓することに力を注いできている。初の蛍光比例計数管を「てんま」 (1983)に搭載し、初のX線CCDを「あすか」(1993)に搭載し、宇宙観測に至らなかったものの初の マイクロカロリメータを「すざく」に搭載する等、各時代で最も分光性能の優れた新しい検出器をX 線天文学に登場させてきたのは日本である。2014年に打ち上げられるASTRO-Hでは、信頼度を向 上させたマイクロカロリメータが、X線観測の新たな歴史を作ると期待されている。

1.1.2 主なX線天体

X線で明るい代表的な天体について、そのX線放射機構を簡単に述べる。

連星 X 線源 連星 X 線源は通常の星と高密度星 (白色矮星、中性子星、ブラックホールの総称)から なる連星系であり、銀河系内に100 個ほどが見つかっている。通常の星から出たガスが高密度星へ落 ち込む際に、深い重力場に落ち込むことでガスが加熱され、ガスの降着円盤や高密度星の磁極領域が X線で輝く。X線は高密度星の自転による周期的な強度変動のほか、様々な時間スケールの変動を示 す。高密度星が磁場の強い (表面磁場が1兆ガウスほど)中性子星の場合、X 線パルサーとなる。一般 にパルス波形や X 線強度は不規則に変動することが多く、これは降着物質の流れが変動するためと 考えられる。 低質量 X 線源 (低質量の星と中性子星の連星)には X 線バーストを放射するものがある。X 線バー ストは1秒程度で立ち上がり、10秒程度で減衰する放射で、エネルギースペクトルは黒体放射によく 合うが、減衰時には X 線スペクトルの軟化 (発生領域の冷却)が見られる。1979 年に打ち上げられた 日本の「はくちょう」衛星はバーストを多く観測し、黒体放射の発生面積がほぼ半径 10 km の球と いう一定値となり、中性子星表面での不安定な核融合反応とする説と合う結果を得た。日本の「てん ま」はバースト中に、赤方偏移した鉄の吸収線と思われる構造を発見したが、これは中性子星の表面 重力を教える貴重な結果である。

超新星残骸 超新星残骸 (SNR) からの放射には2つの成分、すなわち輝線と熱制動放射からなる熱 的放射、そして輝線を含まないベキ関数型の非熱的放射がある。代表的なSNR は半径数光年から10 光年ほどの球殻状で、爆発的に膨張する星の外層部が星間ガス中に作る、衝撃波によって加熱された 高温ガスからの熱的放射が強くみられる。いっぽう、かに星雲に見られる非熱的放射は、超新星爆発 のあとに残された磁場の強い中性子星が、高エネルギー電子を周囲の空間へ注入するために、シンク ロトロン放射が出しているものである。実際、放射の光度は中性子星の自転の減速によって得られる エネルギーに見合ったものになっている。「あすか」衛星は超新星残骸 SN1006 の中心領域からは熱 的放射を、周縁のリム部から非熱的放射を発見した。これは SNR の衝撃波で電子が加速されること をはっきり示すものであり、SNR が宇宙線の起源の一つであることを証明する結果である。

活動銀河核 活動銀河核 (AGN) は銀河中心が、銀河全体よりも明るいような特殊な銀河である。電 波から 線にいたる非常に広い範囲の電磁波とともに強い輝線を放射し、いずれも激しい強度変化を 示す。中心天体は太陽質量の 100 万倍から 10 億倍といった巨大なブラックホールと考えられ、そこ に降着する物質が放射のエネルギー源になっている。いろいろな方法で推定されるブラックホールの 質量は、銀河のバルジ全体の質量とよく比例することが発見され、巨大ブラックホールが銀河全体を 足並みを揃えて進化することがわかってきた。AGN は赤方偏移が6 を越えるものも見つかっており、 その宇宙論的な進化を調べることは、銀河形成を解明する上でも極めて重要である。一方、ブラック ホール周辺の空間の一般相対論な効果を見る上でも AGN は重要な天体であり、実際「あすか」は降 着円盤からでる鉄の蛍光輝線が、一般相対論的な重力赤方偏移と回転によるドップラーシフトを組み 合わせた複雑な構造になることを、観測的に明らかにした。

銀河団 銀河団は数10~数100の銀河の集まりだが、X線では銀河団全体(数100万光年)に広がる 温度3~5千万度の高温プラズマが強く輝く。この高温ガスの質量は銀河の質量の合計より5倍ほど 重い。さらに高温ガスを束縛するための質量は、さらにその5倍の質量が必要であり、これがダーク マターの重要な証拠である。最も有力とされるコールドダークマターモデルでは、宇宙の構造はボト ムアップ的に成長し、銀河団は小・中規模の銀河団同士の衝突によって合体し成長すると考えられる。 これはビッグバンを除けば宇宙で最大のエネルギーが解放される現象であり、高温ガスは複雑な温度 分布、密度分布、速度場を示すことになる。また、銀河団の高温ガスは酸素からニッケルに至る多く の元素からの輝線スペクトルを示す。銀河が進化の途中でアウトフロー等により銀河間空間に出した 重元素がすべて銀河団のポテンシャル中に蓄積されるためであり、銀河団の観測研究は銀河の形成と 進化を解明する上でも重要な情報を与える。 今日では、彗星、月、惑星、原始星、恒星、星間ガス、通常銀河などすべての階層の天体が X 線を放射することがわかってきた。同時に、観測器の角度分解能は「チャンドラ」では 0.5 秒角に達し、エネルギー分解能は 2014 年打ち上げ予定の「ASTRO-H」の X 線マイクロカロリメータでは $E/\Delta E = 1000$ に達する。 X 線観測から得られる情報は、宇宙や天体を理解する上でなくてはならないものになっている。

1.1.3 高精度分光の必要性

X線は高エネルギー電子によるシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱といった非熱的過程によっ ても作られるが、一方で数100万度から1億度の範囲の高温物質からの熱的放射によっても作られる。 物質密度が高い場合はX線バーストのような黒体放射になるが、SNRや銀河、銀河団など多くの場 合、光学的に薄いプラズマからの熱放射が観測される。熱放射では、エネルギー100 eV から10 keV の間には、炭素、窒素、酸素、ネオン、マグネシウム、シリコン、イオウ、アルゴン、カルシウム、 鉄、ニッケル等、宇宙に存在する主要な元素の輝線スペクトルが見られる。これらはまた、吸収線や 吸収端としても観測される。

重元素の量だけでなく、ガスの物理状態を知る上でも、輝線の精密観測は極めて有効である。同一 元素の出す異なる輝線(たとえばKaとKb)の強度比は、温度を直接的に教える。禁制線の強度はガ スの密度の指標である。輝線の構造や再結合放射を合わせることで、プラズマが光電離されていたり、 電離非平衡にあったり、電荷交換反応が起きているなど、プラズマの状態に制限が与えられる。共鳴 線の空間分布からガスの幾何学的構造を制限することもできる。また吸収端の微細構造は星間ダスト の関与を教える。

一方輝線のエネルギーシフトや形状は、これらの元素を含むガスの運動状態を知る上で有効であ る。数 eV の分解能が有れば鉄輝線のドップラーシフトから 100 km s⁻¹ の運動を分解することができ る。これは銀河団の合体や SNR の広がりを検知する上で十分な精度である。この他、ブラックホー ルや中性子星のまわりの降着円盤や宇宙ジェット、スターバースト銀河からのアウトフロー、銀河団 ガスの乱流など、X線放射源ではガスの運動が重要な役割を演じている。高精度分光でガスの運動を 検出することは、X線天体の形成と進化、ひいては宇宙の進化を解明する上で、鍵となる新しい情報 をもたらすものと期待されている。

1.2 X線分光検出器に要求される性能

2014年に打ち上げられる ASTRO-H はエネルギー分解能 5 eV、視野 3 分角で高精度の X 線分光学 を開拓することになる。ここでは ASTRO-H に続く将来の X 線分光検出器に必要なエネルギー分解 能と撮像能力を考える。エネルギー分解能としては、銀河団合体や SNR で見られるような、数 100 km s⁻¹のガスの運動によって起きるドップラーシフトや、各輝線の微細構造を十分に分離できる分 解能が必要である。微細構造が分離できない場合、例えばプラズマの密度や温度などによって輝線コ ンプレックスを作る共鳴線や禁制線の強度比が変わるため、輝線コンプレックスの中心エネルギーが 変わってしまう。このため、たとえ統計が良くとも、たとえば温度だけをユニークに決めることはで きない。したがって微細コンプレックスの分離は不可欠である。 宇宙にもっとも多く存在する元素の1つで、X線分光でもっとも興味のある鉄のKa線について考えてみる。ヘリウム様に電離された鉄のKa線のエネルギーは平均的には6.7 keVであるが、この鉄イオンが一階励起された状態はLSカップリングによって、1s2s¹S₀、1s2s³S₁、1s2p¹P₁、1s2p³Pの4つの状態に分裂する。このうち1s2p¹P₁ → 1s²¹S₀(基底状態)は双極子遷移によって6698 eVの共鳴 X線を放射する (例えば Mewe, Gronenschild & Oord 1985)。一方、1s2s³S₁ → 1s²¹S₀ と1s2p³P → 1s²¹S₀は双極子遷移で移ることができず、プラズマの物理状態によって6637 eVの禁制線 (³S₁から) と 6673 eV の intercombination 線 (³P から) として観測される。さらに、これらの輝線の近くには、dielectronic recombination という過程を通して、リチウム様イオンやベリリウム様イオンから出る衛星線が現れる。これらの微細構造を分離するためには、 $\Delta E < 10 \text{ eV}$ のエネルギー分解能が必要である。

X線 CCD カメラなどの半導体検出器のエネルギー分解能は、Siの価電子を伝導電子へ上げる gap エネルギー (3.6 eV) で決まり、 ΔE はよくても 120 eV ほどであり、上の条件を満たせない。図 1.1 は、温度 kT = 2 keV の光学的に薄いプラズマから放射される 6.7 keV の鉄輝線を、エネルギー分解 能が 120 eV、10 eV、2 eV の検出器で観測した場合に得られるスペクトル (シミュレーション) であ る。エネルギー分解能が 120 eV の検出器 (X線 CCD) では、微細構造を分離できていない。それに 対して、分解能 10 eV の検出器では共鳴線を分離でき、さらに 2 eV の検出器では複雑な微細構造を しっかり分離できていることがわかる。

100 km s⁻¹の運動によって起こるドップラーシフトは、6.7 keV の鉄輝線に対して 2.2 eV である。 ガス全体がある方向へ運動していれば (バルク運動) エネルギーのシフトとして、ガスが乱流状態に あれば輝線の広がりとして検出される。したがって、天体の運動を正確に知るためには、エネルギー 分解能数 eV が必要である。

ガスが 5000 万度にあるときの鉄イオンの熱運動速度は 150 km s⁻¹ で、イオンの質量 *m* に対して $v \propto m^{-1/2}$ である。一方 K 輝線のエネルギーは元素の質量に対して m^2 に従って変化する。両方を合 わせると、イオン温度による輝線幅を分離する能力は、 $m^{1.5}$ に従って、重いイオンの方が有利である と言える。エネルギー分解能数 eV であれば、これまで測定されていなかったいろいろな元素のイオ ン温度に、かなり精度のよい制限がつけられると期待される。

撮像能力としては、角度分解能 30 秒程度は欲しい。そこで1ピクセルの大きさを 20"×20"とし、 受光面積を 10'×10'とすると、ピクセル数は 30×30 になる。望遠鏡の焦点距離を 8 m とすると、1 ピクセルの大きさは 0.78 mm×0.78 mm、全体では 23 mm×23 mm になり、CCD チップ1 枚分に 相当する。角度分解能としては X 線 CCD カメラより 1/30 程度悪いが、撮像検出器として CCD カ メラを併用することを考えれば妥当な大きさである。

まとめると、ASTRO-H 以後の次世代 X 線検出器に求められる性能は、6 keV の X 線に対して 1-2 eV (FWHM) のエネルギー分解能 ($E/\Delta E \sim 3000 - 6000$) を有し、 30×30 ピクセルで 2 cm × 2 cm 程度の面積をカバーすることである。

1.2.1 地上の X 線分光実験

以上のような高精度 X 線分光が実現すると、観測した X 線スペクトルの解釈をするために、原子物理学的データを reference として適切に用いる必要が生じる。輝線強度比から宇宙プラズマの温度、



図 1.1: 温度 kT = 2 keV の光学的に薄いプラズマ から放射される 6.7 keV の鉄輝線を、エネルギー 分解能が 120 eV、10 eV、2 eV の検出器で観測し た場合に得られるスペクトル (シミュレーション)

密度、構造など知ることができる。また、電離と再結合に関するデータは X 線放射物質の電離や冷 却の状態を決める上で重要である。

こうした原子物理データの理論計算はこれまでに数多く行われてきた。しかしながら、理論計算の 最大の問題点は常にいくつかの物理過程を省略しているという点であり、観測の精度が上がるとしば しば理論との矛盾が指摘されてきた。また、最も新しい計算結果が常に最善であるとは限らない。

これに対して、地上プラズマの高精度分光観測を行うことで実験室観測を直接の reference として 利用できる。こうした試みとして EBIT (Electron Beam Ion Trap)を用いた高エネルギーでの二電 子再結合線の観測や、Merged and crossed beam facilitiesを用いた Fe の全荷電状態での電離断面積 の測定 (2keV 以下と 5keV の一部)、Ion strage ring facilities における低エネルギーでの再結合率の 計測などがあげられる。首都大でも、TES カロリメータを用いた電荷交換反応X線の測定へ向けた 準備が進められている。

1.3 X 線分光技術

これまでに用いられてきた高精度分光技術は、回折格子とマイクロカロリメータに代表される。これらについて簡単に紹介する。

1.3.1 回折格子

回折格子 (grating) は、軟X線領域で数 eV の分解能を達成する方法としてもっとも一般的である。 例えば、Chandra 衛星には transmission grating (LETG、METG、HETG) が、XMM-Newton 衛星 には reflection grating (RGS) が搭載されている。しかし、波長分散型の素子は基本的に平行光の入 射が前提であるため、広がった天体への観測には向かない。XMM の RGS では銀河団中心部を分光 しているが、これが可能な範囲は約1分角であり、対象が広がっているために波長分解能も悪くな る。また grating の分散角は入射 X 線の波長に比例するため、波長の短い、すなわちエネルギーの高 い X 線に対してはエネルギー分解能が悪い。図 1.2 左に、エネルギーに対するエネルギー分解能を示 した。Chandra と XMM-Newton に搭載されている grating 分光器は、1 keV 以下では非常に高いエ ネルギー分解能を持つが、2 keV 以上では急激に分解能が悪くなっていることがわかる。6 keV 付近 の鉄の K α 線に対しては十分なエネルギー分解能が得られない。さらなる欠点としては、回折格子で は一般に検出効率が低いことである。grating 分光器では分散された光 (grating 面である特定の角度 へ散乱された光) だけがエネルギー情報を持つため、非分散型分光器に比べて 1/10 またはそれ以下 に検出効率が低くなる。図 1.2 右は、Chandra と XMM-Newton の grating 分光器の有効面積をエネ ルギーに対してプロットしたものである。XMM-Newton は大面積の光学系を搭載しているが、望遠 鏡と grating 分光器とを合わせた有効面積は 100 cm² 程度しかない。高いエネルギーに対してはさら に有効面積が小さくなってしまう。

なお、将来衛星 IXO を目指して、全反射を利用した grating spectrometer (CAT: Critical Angle Transimission)が米国で開発されつつある。微細加工技術を応用し、内面で全反射した X 線が回折光 となるものであり、従来より数倍高い効率をもつことが特徴である。

以上のことから grating 分光器で観測できる天体は、軟 X 線で明るく、さらにほぼ点源に限られ、 広がった天体や硬 X 線の分光には適していない。



図 1.2: X 線分光器の性能比較。 左: エネルギー分解能のエネルギー依存性 右: 有効面積のエネルギー 依存性

1.3.2 X線マイクロカロリメータ

半導体検出器はエネルギー分解能の点で性能不足であり、分散型分光器は広がった天体の観測には 向かず、また低いエネルギー領域でしか十分なエネルギー分解能を達成できない。現時点では、鉄の Ka線領域に対して 10 eV を凌ぐエネルギー分解能を持つ非分散型検出器は、X 線マイクロカロリ メータ以外に存在しない。X 線マイクロカロリメータは、入射エネルギーを素子の温度上昇として測 る検出器であり、極低温 (~ 100 mK)で動作させることで高いエネルギー分解能を達成できる。超伝 導トンネル接合 (STJ) 検出器も低温で動作する検出器として開発が進められているが、1-2 keV 以上の X 線に対するエネルギー分解能と検出効率の点で問題があり、X 線マイクロカロリメータの方が 優れている。

2000 年 2 月に打ち上げられた ASTRO-E 衛星 1 号機に搭載されていた XRS は、初めて軌道上に投 入される X 線マイクロカロリメータとして大きく期待されていた (例えば Mitsuda & Kelley 1999; Kelley et al. 1999, Kelley et al. 2007)。XRS は 2 × 16 ピクセルからなり、2.5 mm × 5.3 mm (視野 $1.9' \times 4.1'$)の面積を持ち、個々のピクセルの大きさは $1.2 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ 、エネルギー分解能は地上 試験で平均 12 eV (FWHM)を達成していた。図 1.2 には、ASTRO-E に搭載されていた XRS と X 線 CCD カメラ XIS のエネルギー分解能と有効面積も示してある。1-2 keV 以上のエネルギー帯で、 XRS はエネルギー分解能と有効面積のどちらも他の検出器と比べて高い性能を持っていることがわか る。さらに、XRSは32ピクセルながら空間分解したエネルギースペクトルを取得することもできる。 このように、XRS は X 線天文学において新たな時代を切り開くことが期待されていた。2000 年 2 月 に打ち上げを試みた ASTRO-E は、1 段目のロケットの異常燃焼のため、残念ながら軌道にのせるこ とができなかった。その再挑戦として、2005 年 7 月 10 日に「すざく」衛星が打ち上げられ、6×6 ピ クセルからなるマイクロカロリメータ XRS が搭載された。しかしヘリウムをデュワーから排気する 部分の設計に問題があったため、デュワー内が必要な真空度に達しなかった。その結果、液体ヘリウ ムがより高温の部分と熱的につながり、打ち上げ後 29 日で液体ヘリウムが突発的に蒸発し、XRS は 観測に使用できなくなってしまった。こうしたトラブルの直接・間接的な原因が徹底的に調査され、 その反省に立った上で、XRS チームは 2014 年の ASTRO-H で、確実に動作するマイクロカロリメー タの実現を目指している。

TES型X線マイクロカロリメータ XRSでは半導体温度計を用いていたが、エネルギー分解能は4 eV ほどが限界である他、パルスの減衰時間が5 msec ほどと長いため、計数率がピクセルあたり5 c s⁻¹を越えると、パルス波形を完全に取得することができなくなり、エネルギー分解能が劣化する。分 解能と計数率の改善のために、超伝導遷移端を利用した温度計 (TES: Transition Edge Sensor)を用 いた新しいマイクロカロリメータが開発されている (例えば Irwin 1995a; 1995b; Irwin et al. 1995)。 TES マイクロカロリメータは、半導体型と逆に高温で抵抗が大きくなる (常伝導に転移)ため、定電 圧駆動することで、電熱フィードバックという技術を用いる。TES を流れる微弱な電流を読み出す ために、超伝導量子干渉素子 (SQUID)という極低温動作のアンプを用いて読み出し系のノイズを抑 える。すでに、5.9 keVのX線に対して約2 eV (FWHM)のエネルギー分解能が報告されており、首 都大グループも 2.8 eV を実現している (Akamatsu et al. 2009)。一方、1000 ピクセルの読み出し系 はまだ開発段階である。XRSでは 32 ピクセルを独立に読み出していたが、1000 ピクセルを独立に読 み出すのは、配線による熱流入の影響などを考えると現実的でない。何らかのマルチプレクスを行う ことによって、配線数を減らすことが必須である。時分割読み出し、周波数分割読み出しなどの方法 が提案されているが (例えば Chervenak et al. 1999, 2000; Mitsuda et al. 1999)、現在は時分割読み 出しが一歩先に実用化されつつある。

1.4 極低温の冷却システム

1.4.1 TES 型カロリメータの動作原理

マイクロカロリメータは X 線光子が入射した際のわずかな温度上昇を精度よく捕えることで高い エネルギー分解能を実現する検出器である。半導体検出器は Si のエネルギーギャップ 3.6 eV によっ て、伝導電子の個数とゆらぎが決まっていたが、マイクロカロリメータはフォノン (粒子あたり約1 meV) という膨大な数の粒子のゆらぎが分解能を決めるため、はるかに高い精度が期待できる。温度 変化を捕える方法は抵抗変化を捕えたり、または磁化の変化を捕えるなどの方法が取られている。こ のうち TES(Transition Edge Sensor)型マイクロカロリメータは、温度計として超伝導体を使用し、 超伝導遷移端という温度に対して敏感な抵抗変化を利用する検出器である。



図 1.3: TES 型マイクロカロリメータの動作概略。吸収体に X 線が入射するとそのエネルギーに伴って温度上昇する。これを TES が捕え、TES の抵抗が増す。 温度変化に対して抵抗変化の大きい物の方がエネルギー分解能がよい。

図 1.3 にマイクロカロリメータの動作原理を簡単に示す。検出したい X 線のエネルギー範囲は 0.1 ~ 10 keV 程度だが、仮に 100 keV としても X 線光子のエネルギー E は 1.6×10^{-14} J にすぎな いので、通常の方法ではこの熱を感知することはできない。しかし X 線を吸収する吸収体の熱容量 が C のとき、微小な温度変化は $\Delta T = E/C$ なので、熱容量を非常に小さくすることで、 ΔT を検出 可能なレベルに上げることが可能である。従って、 X 線吸収体の熱容量を下げるために、体積を小さ くし、かつ極低温にする必要がある。ガスカウンターや半導体検出器では電子 (ホール) 数のゆらぎ がエネルギー分解能を制限していたが、マイクロカロリメータの場合は、温度を測定する際の熱的な ゆらぎが分解能への主な寄与である。温度 T におけるフォノンの数は $CT/(k_BT)$ で与えられるので、 FWHM(半値幅) エネルギー分解能は、

$$\Delta E_{\rm FWHM} = 2.35\xi k_B T \sqrt{\frac{CT}{k_B T}} = 2.35\xi \sqrt{k_B T^2 C(T)} \tag{1.1}$$

となる。ここで ξ は α で決まるパラメータ¹で、 α の大きい方が ξ が小さい。 k_B はボルツマン定数で

 $^{^{-1}\}alpha$ はカロリメータの温度と抵抗から見積られるパラメータで、通常はカロリメータの動作温度における温度変化と抵抗変化の関係から $\frac{d\log R}{d\log T}$ で表す。すなわち温度計の感度である。

ある。

上式より、α が大きくなればエネルギー分解能は基本的に良くなる。よってこの α を大きくしよう というのが TES カロリメータである。TES カロリメータは温度計として超伝導体を使い、これの超 伝導遷移端を動作点として使用することで、温度に対する急激な抵抗変化を利用している。超伝導体 には通常は厚さ数 10 nm の 2 層の金属薄膜を使用する。これは超伝導体と常伝導体を 2 層薄膜にし たときに生じる近接効果を利用して、適切な温度 (たとえば 100 mK) に超伝導遷移端すなわち動作 温度を設定できるようにするためである。温度が低ければ低いほど素子のエネルギー分解能は良くな るのだが、読み出し系のノイズなどを考慮すると、100 mK より極端に低い温度にしても大きな性能 アップにはつながらない。

1.4.2 極低温冷凍機

このように高いエネルギー分解能が期待できる TES カロリメータは、100 mK 以下という極低温 で動作させる必要がある。現在実験室でこの温度を作り出せる冷凍機は、希釈冷凍機と断熱消磁冷凍 機の二つである。

希釈冷凍機

希釈冷凍機は液体 3 ヘリウム (³He) と液体 4 ヘリウム (⁴He) を分留、混合することで冷却する冷凍 機である。³He と⁴He の混合液は、臨界温度 0.76 K 以下で ³He-濃厚層 (concentrated phase) と ³He-希薄層 (dilution phase) の 2 つの層に分離する。³He は ⁴He に比べ軽いため、concentrated phase は dilution phase の上に浮かぶことになる。³He のエンタルピーは 2 つの層で異なり、³He を concentrated phase から dilution phase へ希釈混合させるには外部から吸熱する必要があり、結果として冷却が起 こる。希釈冷凍機は ³He を外から導入し、ポンプで循環させる運転をしており、循環速度を上げるこ とで大きな冷凍能力が得られる。首都大の希釈冷凍機は 100 mK で 20 μ W 程度の冷却能力を持つ。 冷凍サイクルが磁場を使用しないこともあり、現在の地上の実験室で使用されている冷凍機はほとん どが ³He-⁴He 希釈冷凍機である。しかし希釈冷凍機は ³He と ⁴He 混合液の 2 層分離を利用しており、 一般に無重力状態の宇宙空間では使用できない。宇宙空間で 100 mK 以下の極低温を作り出すには、 もうひとつの断熱消磁冷凍機—ADR ²が必要となる。

断熱消磁冷凍機

断熱消磁冷凍 (ADR) は第2章に示すように、常磁性体を冷媒として、磁場を用いて温度とエント ロピーのカルノーサイクルを作り出して冷却する磁気冷凍システムである。常磁性体は低温で強磁 性となり、磁気比熱が電子比熱や格子比熱を大きく上回る。こうしたスピン相互作用を利用すること で、極低温で効率的な冷媒として使用することができる。断熱消磁冷凍は希釈冷凍と違って固体冷媒 を容器内にあらかじめ封入させる必要があるため、一般に冷凍能力は希釈冷凍より劣る (100 mK で 1 µW 程度)。しかし断熱消磁冷凍では冷凍サイクルに重力を必要としないため、宇宙空間でも使用

 $^{^{2}}$ ADR : Adiabatic Demagnetization Refrigerator \mathfrak{O} 略

可能である。また冷媒に固体を使用しているため、ヒーターを用いて温度制御する希釈冷凍機よりも 高い温度安定性 (1 µK 以下)を実現できる。



図 1.4: 「すざく」に搭載された半導体カロリ メータ (XRS) 用 ADR。中央の He insert の中 に ADR の中心部となる saltpill がある。



図 1.5: ADR が導入された固体 Ne デュワー

図 1.4 および図 1.5 は、「すざく」に搭載された半導体型マイクロカロリメータ (XRS) 用の ADR のデュワーである。固体ネオンと液体ヘリウムを予冷用冷媒に使用しており、宇宙空間では一回の断 熱消磁冷凍で動作温度 60 mK を 38 時間保持できることが示された。このように、衛星搭載用 X 線 検出器を開発するにあたって、宇宙空間にて極低温動作環境を作り出すのに今のところ ADR は不可 欠である。

検出器の地上試験では希釈冷凍機が多く使用されているが、温度安定性と冷却の手軽さで ADR が 勝る。また ASTRO-E、「すざく」に搭載されていた半導体マイクロカロリメータはほとんど磁場に 影響されずに動作するが、TES カロリメータは超伝導体と SQUID を使用しており、いずれも ADR にかける磁場の影響が懸念される。地磁気の数 10 分の 1 程度には減らす必要があり、極低温用の磁 気シールドも重要な開発項目である。

1.5本論文の目的

本論文では、小型で性能の良い熱スイッチを開発することによって、ADRの性能向上を目指し、更 に多段式 ADR や³He 冷凍機などでも使用できることを目標としている。第2章で詳述するが、ADR には主要なコンポーネントが三つ存在し、それらは磁性体、超伝導コイル、そして熱スイッチであ る。本研究では、熱スイッチを改良することで、極低温部の断熱性を高めるとともに、冷却時間を短 縮し、最低到達温度と保持時間の改善を目指す。

第2章 ADRの冷却原理と構造

冷凍機一般は基本的に、冷媒のエントロピーを操作して低温を作り出すが、必要とする冷凍能力と 到達温度によって使用するデバイスは異なる。ADR も例外ではなく、必要とする実験環境を得るた めに冷媒や求める構造は大きく違ってくる。ここではまず ADR 全般に共通する極低温生成のための 基本原理を示す。また冷凍機の中枢となる ADR 中心部の構造を第 2.3 節に、ADR 中心部を導入する デュワーの構造を第 2.4 節に簡単に示す。

2.1 冷却原理

断熱消磁冷凍は冷媒として常磁性塩を用いて、磁場を与えることでエントロピーを下げ、断熱状態 にした後に磁場を取り去ることで冷却する冷却方法である。主に使用されている磁性体では100 mK、 ものによっては数 mK を作りだすことも可能で、1 mK 以下の生成には今のところ磁気冷凍に頼るし かない。断熱消磁冷凍では希釈冷凍などのような循環運転がなく、冷媒はある量を極低温部のカプセ ルに封入したかたちになるため、冷凍能力は希釈冷凍より劣る。しかし冷媒の温度制御は安定せず、 ヒーターを使用した温度制御となる希釈冷凍に対し、断熱消磁冷凍の場合は冷媒(固体)自身の温度 を制御することが可能なので、これを確立させれば他の冷凍機よりも格段に正確な温度制御が可能と なる。

2.1.1 理想常磁性体の基本的性質

まずは冷媒に使用される磁性物質、とりわけ常磁性体の基本的性質を整理してみる。

磁性体の基礎

ここでは特殊なバンド模型を考える強磁性体は除き、局在スピンをもつ金属や化合物に限定して議論してみる。これは 3d 殻が不完全殻となり、不対電子をもつ 3d 族遷移金属元素、さらに 4f 殻に不対電子をもつ希土類元素が代表的である。このような原子は、局在スピンによるスピン角運動量 S と軌道角運動量 L をもっている。よって全角運動量 J は単純に J = S + L で表したいところだが、実磁性原子は多数個の不対電子をもっているため、電子同士の相互作用によって J は異なってくる。この場合、各電子の軌道角運動量及びスピン角運動量がそれぞれ別々に静電的に結合し、その上で磁気的相互作用を通して結合し J をつくる (LS 結合)。このような J をもつ原子の磁気モーメント μ は、ランデの g-factor を用いて、

$$\boldsymbol{\mu} = -g\mu_B \boldsymbol{J} \tag{2.1}$$

で与えられる。ここで μ_B はボーア磁子 (9.27 × 10⁻²⁴ J/T) である。これは希土類ではよく一致する ものの 3d 族ではあわないものもある。ここの局在スピンの磁気モーメント μ は磁場とのみ相互作用 する (ゼーマン相互作用)。B = 0 の場合は量子化の軸がないので (2J+1) の状態は縮退しているが、 B を加えることによって磁気量子数 m_j で想定される (2J+1) 個の準位に分裂する。スピン系はそれ が局在している原子の格子系と熱交換を行なっており、その結果スピン系は ~ $k_{\rm B}T$ の熱エネルギー を持っている。ここで $k_{\rm B}$ はボルツマン定数である。低温になるとこれが小さくなり、 $g\mu_{\rm B}B \gg k_{\rm B}T$ を満たすときには、スピンは全てが基底状態を示すようになる。

常磁性体の磁気モーメント

熱平衡状態にあるスピン系の磁気モーメント M(T,B) は、個々の原子の磁気モーメント μ の熱的 な平均量を $\langle \mu \rangle$ とすると、

$$M = N\langle \mu \rangle = Ng\mu_{\rm B}\langle J \rangle \tag{2.2}$$

である。ここで N は原子数。理想常磁性体では外磁場がない場合 M = 0 だが、外磁場が加えられると誘起される磁気モーメントは、

$$M(T,B) = \frac{N \sum_{m_j=-J}^{J} \left[-g\mu_{\rm B}m_j \exp(-g\mu_{\rm B}m_j B/k_{\rm B}T)\right]}{\sum_{m_j=-J}^{J} \left[\exp\left(-g\mu_{\rm B}m_j B/k_{\rm B}T\right)\right]}$$
(2.3)

この式 2.3 は、

$$M(T,B) = Ng\mu_{\rm B}J \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \ln \sum_{m_j = -J}^{J} \left[\exp\left(x \frac{-m_j}{J}\right) \right] \right\}$$
(2.4)

と書き改めることができ、ここでxは $x = g\mu_{\rm B}JB/k_{\rm B}T$ 。式 2.4 は対数内の関数がさらに

$$\sum_{n_j=-J}^{J} \left[\exp\left(x \frac{-m_j}{J}\right) \right] = \sinh\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) / \sinh\left(\frac{x}{2J}\right)$$
(2.5)

と改められる。よって磁気モーメント(磁化)の方程式は式 2.3 から式 2.5 より

$$M(T,B) = Ng\mu_{\rm B}J\left[\frac{2J+1}{2J}\coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \frac{1}{2J}\coth\left(\frac{x}{2J}\right)\right]$$
(2.6)

磁気モーメントと相互作用を行なうのは、先に示したように磁場であるが、これは注目するある 局在スピンとその周囲のスピンがそこに作り出す内部磁場bとの相互作用と考える事もできる。そし て各スピンにかかる内部磁場が外部磁場と同様に同一方向を向き、これによるゼーマンエネルギー $g\mu_{\rm B}b \gg k_{\rm B}T$ となる場合、例え外部磁場が存在しなくてもスピンが同一方向を向くようになる(強磁 性配列)。よって常磁性体は十分低温になると強磁性物質となる。

磁気エントロピー

次にスピン系の磁気エントロピーを導いてみる。磁化された状態はより高い秩序にあるのでエント ロピーは減少する。基底状態の全角運動量がJであるイオンひとつにおいて、エントロピーSは統計 力学より、

$$S = Nk_{\rm B}\ln(2J+1) \tag{2.7}$$

実際の結晶では完全に縮退するわけではなく、双極子と格子との相互作用や双極子間との相互作用のために、内部で準位の分裂が起こり、この分裂の平均幅をEとすると、上式は $k_{\rm B}T \gg E$ において正しい。

一方、スピンが完全にそろった状態では、スピンは全て基底状態のみしかとれないので、 $S = Nk_{\rm B} \ln W$ において W = 1より、S=0となる。これは式 2.7 が高温、S = 0は低温での極限を表す。中間の領域では、熱力学的マックスウェル方程式より、磁気モーメントを用いて

$$S(T,B) = S_0 + \int_0^B \frac{\partial M}{\partial T} \, dB \tag{2.8}$$

ここで、式 2.6 で求めた M(T, B) のカッコ内は

$$-\left(\frac{2J+1}{2J}\right)^2 \frac{x}{\sinh^2\left(\frac{2J+1}{2J}x\right)} \frac{1}{T} + \left(\frac{1}{2J}\right)^2 \frac{x}{\sinh^2\left(\frac{1}{2J}x\right)} \frac{1}{T}$$
(2.9)

だから

$$S(T,B) = \int_0^B \frac{\partial M}{\partial T} dB = Nk_B \left[-\frac{2J+1}{2J} x \coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) + \frac{1}{2J} x \coth\left(\frac{1}{2J}x\right) + \ln\left(\frac{\sinh\left(\frac{2J+1}{2J}x\right)}{\sinh\left(\frac{1}{2J}x\right)}\right) \right]$$
(2.10)

これを高温、すなわち $x \ll 1$ に近似すると式 2.7 になる。

しかし実際の磁性体の磁化およびエントロピーの値は、正確にはこれらの式にはあてはまらない。 これは一つの局在スピンには外部磁場と同時に、磁化に伴い周囲のスピンが作り出す内部磁場bがか かるからである。この内部磁気スピンが作り出す磁場が同一方向で平均値bという値をもっていたと き、一つのスピンにかかる磁場の大きさは B+b。この磁場bを、磁化 M に対して比例関係にある と考えれば、

M = M(T, B + AM) (A は b に対する M の比例係数) (2.11)

実際の磁気モーメントと平均内部磁場の関係は

$$b = AM = \frac{2K}{N_A g^2 \mu_B^2} M \tag{2.12}$$

ここで K はある局在スピンに注目した時の、近接スピンとの相互作用パラメータである。

よって右辺にも磁化 M のある方程式を解き直す必要がでてくる。これを分子場近似といい、A は 分子場係数と呼ばれる。これは近似計算を行なわない限り解析的には解く事はできず、数値計算に頼 らざるを得なくなる。これが常磁性体の磁化の理論値と実験値との間に数%の誤差を作り出す最大の 要因となっている。本来はこの分子場近似を用いた比熱計算がより正確だが、本論文の目的以上のも のになってしまうのでこれはふれず、近似計算で比熱の値をだすことにする。

2.1.2 比熱

磁気比熱

 $x = g\mu_B JB/k_B T$ 、 $x \ll 1$ の場合、式 2.6 を x で展開して 1 次の項だけをとると、

$$M(T,B) = \frac{CB}{\mu_0 T} \qquad C = \frac{N\mu_0 g^2 \mu_{\rm B}^2 J(J+1)}{3k_{\rm B}}$$
(2.13)

ここで $M/B \propto 1/T$ はキュリーの法則を差し、C はキュリー定数である。同様に磁気エントロピーは $x \ll 1$ の極限で、 $T \sim \infty$ のときに式 2.7 と等しくなるので、

$$S(T,B) = Nk_{\rm B}\ln\left(2J+1\right) - \frac{CB^2}{2\mu_0 T^2}$$
(2.14)

これより、断熱的な変化に対する磁性体の磁気比熱は、

$$\Delta S(B,T_i) = \int_{T_i}^{T_f} \frac{C_{\rm M}}{T} dT$$
(2.15)

なので、

$$C_{\rm M} = T\delta S = \frac{CB^2}{T^2} \propto \frac{1}{T^2}$$

$$\tag{2.16}$$

低温の強磁性領域では、磁性体は熱容量が大きくなることがこれからわかる。この値はもちろん $x \ll 1$ の場合で、常磁性領域ではほぼ0である。

格子系および電子系の比熱

磁性体が低温でどれだけ大きな熱容量を持ち得るかを示すために、物質中の格子系、電子系の比熱 について考えてみる。

まず格子系について着目する、固体を構成する原子が格子を形成している場合には、原子はこれを 平衡点として熱振動—格子振動をおこなっている。単純にはこの格子振動より格子のエネルギーを割 りだし T で微分すればよいが、低温ではこれはあわず、アインシュタイン模型をまず導入する。これ によると格子一つにおける調和振動子のエネルギーは

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)h\nu$$
 $n = 1, 2, 3, \cdots$ (整数) (2.17)

 $\frac{1}{2}h\nu$ は振動子が絶対零度で持つ零点エネルギーで熱的には関係ない。温度 T における振動子の励起状態占有確率はボルツマン分布則に従い、よって n 番目状態のエネルギー $nh\nu$ のもつ存在確率は $\exp(-nh\nu/k_{\rm B}T)$ となり、1 粒子あたりの平均エネルギーは

$$\langle E \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_{\rm B}T} - 1} \tag{2.18}$$

これが N 個の系の場合、3N 倍すればよいので、格子比熱は

$$C_{\rm L} = \left(\frac{3N\partial\langle E\rangle}{\partial T}\right) = Nk_{\rm B}(h\nu/k_{\rm B}T)^2 \frac{e^{h\nu/k_{\rm B}T}}{(e^{h\nu/k_{\rm B}T} - 1)^2}$$
(2.19)

しかしこれでは完璧ではない。これは原子は種々の振動数、形態で振動をおこなっているからで、 振動数が $\nu \sim \nu + d\nu$ のものの数を $C(\nu)d\nu$ とおくと、系のエネルギーは

$$E_{\rm L} = \int \frac{h\nu C(\nu)d\nu}{e^{h\nu/k_{\rm B}T} - 1} \tag{2.20}$$

となる。これを解くには C(v)dv を解く必要があり、ここで Debye の比熱式がでてくる。Debye は格 子振動を有限な連続体として、その波数について近似計算を行なうことでこの方程式を扱った。計算 は省略するとしてこれによると物質の格子エネルギーは

$$E_{\rm L}(T) = 9Nk_{\rm B}T\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \tag{2.21}$$

ここで $\theta_D = h\nu_D/k_{\rm B}$ はデバイ温度と呼ばれる物質に固有な定数である。低温、すなわち $\theta_D/T \gg 1$ では、上の積分は

$$\int_{0}^{\theta_D/T} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \sim \frac{\pi^4}{15}$$
(2.22)

よって

$$C_{\rm L}(T) = 234Nk_{\rm B} \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \propto T^3 \tag{2.23}$$

これは低温において、比熱が~T³という実験事実とよく一致する。

次に電子系の比熱に着目する。電子の比熱を考えるには電子のもつエネルギーとその分布について 考える必要があるが、電子のエネルギー状態密度はパウリの排他原理からくるフェルミーディラック 統計に従う。よってフェルミ分布関数を用いて電子比熱を計算すると

$$C_{\rm e}(T) = \frac{\pi^2 N}{2N_A} k_{\rm B} \frac{T}{T_F} = \gamma T \propto T \tag{2.24}$$

 N_A はアボガドロ数、 T_F はフェルミ温度である。電子比熱はTに比例することを示している。

比熱の比較

ー般の物質のデバイ温度 θ_D は 200~300 K 程度で、これより

$$C_{\rm L}(T) \sim 10^{-5} T^3 \,\,\mathrm{J/mol}$$
 (2.25)

次に電子比熱は $\gamma \sim 10^{-3}$ J/K²·mol 程度。これに対して磁気比熱は、キュリー定数 C が

$$C = 1.25g^2 J(J+1) \tag{2.26}$$

なので、キュリー定数に磁場の 2 乗を掛けると、 CB^2 は大体 0.1 J·K/mol となる。よって g = 2、J = 5/2の物質を 0.1 K 近傍の極低温にした場合、磁気比熱 $C_{\rm M} \sim 10$ J/K·mol を持ちうるのに対し、格子比熱 $C_{\rm L} \sim 10^{-8}$ J/K·mol、電子比熱 $C_{\rm e} \sim 10^{-4}$ J/K·mol なので、極低温では磁気比熱が圧倒的に大きいことがわかる。

図 2.1 には、代表的な冷媒・常磁性塩を1Kまであげるのに要する熱量が示されている。

また表 2.1 に代表的な冷媒の比熱の山を示す。Shottky とは、結晶場分裂のためにおきる比熱の山である。



図 2.1: 常磁性塩の、1 K まであげるのに要する熱量 (erg/g)((?) より)。a: CrK ミョウバン b: Fe(NH₄) ミョウバン c: Mn(NH₄)Tutton 塩

	Shottky	磁気変態	b	β	Mol
	比熱の山 (K)	比熱の山 (K)	$(J/mol \cdot K)$	$(J/mol \cdot K)$	wgt(g)
CrK ミョウバン	~0.08	~ 0.02	0.135	4.11×10^{-3}	499.4
$Fe(NH_4)_2$ ミョウバン	~ 0.08	~ 0.04	0.112	3.52×10^{-3}	482.2
$\mathrm{Mn}(\mathrm{SO}_4)2(\mathrm{NH}_4)_{26}\mathrm{H}_2\mathrm{O}$		0.12	0.128		391
$Ce_2 Mg_3(NO_3)_2 24H_2O$		~ 0.006	6.24×10^{-5}		714.8

表 2.1: 常磁性塩の比熱の山の特徴((?)より)

b: 磁気比熱係数、β: 格子比熱係数

2.1.3 エントロピー制御

次に外磁場によって、磁性体のどの位のエントロピー制御が可能かを見積もってみる。磁性体に 十分なエントロピー変化を起こさせるための条件は、外磁場によって磁気スピンが得たエネルギー $g\mu_{\rm B}B$ が熱エネルギー $k_{\rm B}T$ よりも十分に大きい必要がある。これは例えば g = 2の物質を使用した 場合、

$$g\mu_B B/k_{\rm B}T \sim 1.3 \left(\frac{B}{T}\right)$$
 (2.27)

を最低でも満たす必要があり、温度1Kでは1.3T程度の磁場が必要な計算になる。実際に1K程度の温度領域に1.3Tの磁場の生成は通常難しい。これは強磁場を作り出すのに通常ソレノイドコイルを使用するが、必要な電流が大きく配線も長くなり、発生するジュール熱はとても極低温を保てる量にはならない。よって最近では超伝導マグネットコイルを使用する。

断熱消磁冷却

TKという状態で、等温で磁性体に磁化を行なうと、式 2.13より、

$$\delta S(T, B_1) = S(T, 0) - S(T, B_1) = \frac{CB_1^2}{2\mu_0 T^2}$$
(2.28)

だけエントロピーが変化する。この時エントロピー変化に伴い、磁性体は $T\delta S$ の磁化熱を発生する。 これは外磁場のおこなった仕事と考えられる。ここで次に磁場を $B_2(B_2 < B_1)$ へ断熱的に低下する と、エントロピーは変化しないので、

$$\frac{CB_1^2}{2\mu_0 T_1^2} = \frac{CB_2^2}{2\mu_0 T_2^2} \tag{2.29}$$

となり、 $T_2(T_2 < T_1)$ に変化、すなわち磁性体の温度が低下したことになる。

これが断熱消磁冷却という方法であり、磁性体の性質を考慮することで最低温度と冷凍能力を選択 できる。現在、100 mK 以下の極低温を作り出せるのは希釈冷凍とこの断熱消磁冷却の2方法のみで あり、また核断熱消磁は1 mK 以下の温度を作り出せる唯一の冷凍手段となっている。

磁性体の常磁性—強磁性領域への変化を利用しているので、常磁性領域である数Kまでは熱容量 は小さい。よって予冷までは比較的簡単に温度を下げることができる。これも冷媒として磁性体を取 り扱うにはとても有利な点といえる。

2.1.4 冷凍サイクル

ここでは実際に磁性体を冷媒として扱った時の、極低温生成のための熱サイクルを述べる。図 2.2 に冷却過程でのエントロピーと温度の関係を示す。

図中の曲線は0~Tの場合のそれぞれの等磁場におけるエントロピーと温度の関係曲線で、赤の 囲いがカルノーサイクルとなる。

まず初期温度 T_H における低温状態を考える (状態 1)。このとき磁性体には磁場がなく、スピンは バラバラの方向を向いている。ここで熱浴と熱平衡状態にして磁場を徐々にかけると、磁性体中の局 在スピンが揃い、エントロピーが減少する (状態 2)。また磁場をかけるため、0 T から磁場のかけられ



図 2.2: 冷却課程でのエントロピーと温度の関係

た時の曲線へと状態が移動する。しかし系は熱浴と接触しているため、磁性体の温度は変化しない。 よってサイクルは1 2と等温変化となる。

定常状態にした後、今度は熱浴と断熱状態にし、少しずつ磁場を最大値 B_H からとりのぞいてい く。すると再び0Tのときの曲線上へと状態が移動していくが、断熱状態にしてあるため、系のエ ントロピーは変化せずに温度のみが変化する。よってサイクルは2 3へ移動していく断熱消磁とな る。0Tにおける等磁場曲線上にのった時の温度 T_L が最低到達温度となる。

最終磁場を0Tではなく B_L などという有限な値にする事で、最低到達温度を T'_L などと調整することができる。

もし磁場がゼロもしくは小磁場 $B_{\rm L}$ においてはじめて系への熱流入があるとすれば、サイクルは 3 1、3′ 1 で完了する。 $T_{\rm L}$ は厳密には双極子系のスピン温度である。

磁気冷却は磁場の断熱的減少に伴うものであり、エントロピーは2と3の間で変化しない。よって 初期温度と最終温度には

$$\frac{B_{\rm H}}{T_{\rm H}} = \frac{B_{\rm L}}{T_{\rm L}} \tag{2.30}$$

が成り立つはずである。もちろん磁場が減少し、 $k_{\rm B}T \sim g\mu_0 B$ となると式 2.30 は成り立たなくなる。外部磁場がゼロでのエントロピーを最終的にゼロにするスピンの秩序化がおこる温度で最終温度が決まる。

低温になると局在スピンにかかる磁場は外部磁場だけでなく、内部の磁気スピンの磁化による平均

2.1. 冷却原理

場 b の寄与もかかってくる。これより、式 2.30 は

$$\frac{(B_{\rm H}^2 + b^2)^{\frac{1}{2}}}{T_{\rm H}} = \frac{(B_{\rm L}^2 + b^2)^{\frac{1}{2}}}{T_{\rm L}}$$
(2.31)

と書き直せる。 $B_{\rm H} \gg b$ より、 $(B_{\rm H}/T_{\rm H})$ を最大にすれば最終温度 $T_{\rm L}$ を最小にできる。もし最終磁場 $B_{\rm L}=0$ であれば、式 2.3 は

$$T_{\rm L} = \frac{b}{B_{\rm H}} T_{\rm H} \tag{2.32}$$

また、最終磁場から温度が上昇していく間に吸収できる熱量は

$$\delta Q = \int T \, dS \tag{2.33}$$

で、これは図のS - T曲線上の $3 \rightarrow 1$ あるいは $3' \rightarrow 1$ とS軸で囲まれた領域の面積になり、最終磁場を有限にとどめておけば、温度上昇の段階でスピン系に大きな熱容量が残り、大きな冷凍能力が得られる。

2.1.5 温度制御

最終温度に達した後のソルトピルは、支持材料や輻射熱などにより徐々にその温度を上昇させ、最 終的には熱浴である液体ヘリウムの温度に達する。この上昇速度はソルトピルの比熱と流入熱との関 係による。

磁性体は後にも延べるが、磁化比熱よりかなりの流入熱に耐えることができる。しかし、実験上温度の安定性を保つことは冷凍機の第一条件であり、最低温度に達してから徐々に温度が変化していくのは多くの場合好ましくない。よって実際に実験を行う時には磁場を残して温度制御を行う。



図 2.3: 温度制御の原理

図 2.3 に温度制御の概念を示す。 T'_L K を設定温度とした場合、断熱消磁後の温度は等磁場曲線上を上昇していく。ここで外部磁場をわずかに下げて元の T'_L K に戻す。温度の上昇に合わせてこれを繰り返す。この時の温度揺らぎは ΔT となる。

温度 T_0 における磁場 B_0 の状態があり、この断熱消磁での最低温度が T_L であったとする。最低温度とは断熱消磁の際に完全に磁場をなくしてしまった場合での、エントロピー変化がない最低到達温度である。この場合、単位温度当りの磁場 ΔB は単純計算で

$$\Delta B = \frac{B_0}{T_0 - T_L} \quad [T/K]$$

になり、 ΔB だけ磁場をあげれば温度が1 mK上昇する計算になる。マイクロカロリメータなどを開発する時の冷凍機の性能としては温度揺らぎが $\text{rms}=10 \ \mu\text{K}$ 以下の安定性が望ましく、仮に最低温度40 mK、持続したい温度が60 mKで、60 mK到達時の磁場が100 mTであった場合、0.5 mT=5 gauss程度の磁場制御が求められる。

2.2 冷凍機の構成

磁性体を利用した磁気冷凍を行なうには単純に、最低でも以下の構造材料を必要とする。これは先 に示した冷凍サイクルを実現させるための条件である。

- 1. 極低温 (~1 K) を作り出すデュワー
- 2. 強磁場生成用マグネットコイル
- 3. 断熱、恒温状態を作るための熱スイッチ(ヒートスイッチ)
- 4. 磁性体を充填したカプセル

2.2.1 磁性体の選択

カロリメータの動作温度は1K以下で、特に最近では熱的ノイズ対策のため、100 mK以下の状態 を作り出す必要がある。「すざく」衛星に搭載された半導体型マイクロカロリメータは動作温度60 mK で、次世代型のTES-ETF型カロリメータも100 mK以下を目標としている。最低でもこの能力が求 められる。

断熱消磁の際、理想的には磁性体は外部との熱のやりとりはないが、現実的には完璧な断熱は不可 能であり、外部磁場を落としている最中にもエントロピーの上昇がある。また最低温度到達後、この 熱流入によって磁性体は0Tのエントロピー曲線に沿って温度変化する(図 2.2 参照)。断熱消磁冷凍 で温度を一定に保つには磁場を有限にとどめ、温度上昇に合わせて磁場を徐々に減少させる手法をと る。よって磁性体の理論的な最低到達温度は、少なくとも動作温度以下にする必要がある。

ここで使用する磁性体の到達温度と冷凍能力—熱容量を見積もってみる。先に述べたように、実際 は分子場近似を用いたエントロピー計算が必要だが、これは誤差が大きく方程式も複雑になり、さら に冷却試験における断熱消磁の際の熱流入も考えられるので、近似式を用いて簡易計算のみとして おく。 断熱消磁の開始温度を2K、最大磁場を3Tとした場合、強磁性領域における自発磁化が作り出す 平均内部磁場を~0.1Tとした時の磁性体の到達温度は式 2.31より、

$$T_{\rm L} \sim 67 \text{ mK} \tag{2.34}$$

またこのときの比熱は式 2.16 より

$$C_{\rm M} \sim 2.81 q^2 J (J+1)$$
 (2.35)

比熱の典型的な値としては、大体 10 J/K·mol である。磁性体を冷媒とした時に注目するべきは、 冷媒として主要な能力をあらわす到達温度と熱容量の関係である。式 2.16 及び式 2.32 を比較してわ かるように、強磁性領域の比熱は平均内部磁場 b の 2 乗に比例するのに対し、最低温度は b が小さい ほど低くできる。これは確かに当然のことで、極低温に到達できるものほど熱容量が小さく温度上昇 が速い。これが最適な磁性体を選択する条件となる。しかし上に示したように、分子場近似で表した 比熱、エントロピーの計算値は複雑で、実測を利用する方が良いと思われる。

2.2.2 鉄ミョウバンとクロムカリウムミョウバンの特性

FAA(鉄ミョウバン)

首都大 ADR では磁性体として鉄ミョウバン (FAA) を採用してきた。鉄ミョウバンは正確には硫酸 アンモニウム鉄 (III)・12 水和物 [Fe2(SO4)3・(NH4)2SO4・24H2O] (1 mol = 482.18 g) で、容易に再 結晶化が可能な物質である。首都大 ADR ではカロリメータ開発用として、動作温度 60 mK、実験時 間 10 時間を設定している。図 2.1 をみる限り、これは鉄ミョウバン (FAA) を使用するのが有利なこ とを示している。この物質の特性について簡単にみてみる。

比熱については、FAAの測定として Vilches,Wheatleyの data(?)があるので、これを図 2.4 に示す。FAA では 26 mK 程度の部分に比熱に山があることがわかる。これは磁気的相転移 (常磁性—強磁性領域)にあたる。これが断熱消磁冷凍の作り出せる最低温度と考えてよいだろう。

比熱から見積もられる温度変化は、例えば 60 mK で 1 μ W の流入熱がある場合、FAA を 1 mol 充 填した冷媒は 1 mK の温度上昇に 4000 s 以上かかる。実際は一定温度を作り出すために、磁場を減 少させながら冷却する。この時の能力は $T \delta S$ になるので、エントロピー変化を計算する必要がある。 簡易計算として式 2.10 を使って、1 μ W の流入熱に対して 60 mK を持続出来る時間は、

time =
$$0.48 \,(\text{J/mol})/10^{-6} \,(\text{W}) = 133 \,\text{hour/mol}$$
 (2.36)

理想的な条件ならば、0.1 mol、48.1 g で十分な性能を持てると思われる。

CPA(クロムカリウムミョウバン)

首都大 ADR では、FAA とともにクロムカリウムミョウバン (CPA) のソルトピルも開発してきた。 CPA は chromic potassium alum の略で、分子式は $[CrK(SO4)_2.12H_2O]$ (1 mol = 499.3836 g) で ある。磁性体として実質重要な役割をするのは 3d 族イオンの一つである Cr^{3+} で、この基底状態は



FIG. 3. The specific heats of CrK alum, FeNH₄ alum and Mn- $(NH_4)_2$ Tutton salt as a function of the absolute temperature.

図 2.4: FAA、CPA および代表的な磁性体の比熱。

 $4F_{3/2}$ だが、結晶になると軌道角運動量が抑制されるため $4S_{3/2}$ になる。Lande factor、いわゆる g-因子は 1.97 の等方で、磁気相転移 (強磁性体になる温度) は約 10 mK である。FAA と比べると若干 比熱が小さくなるが、生成された結晶が多少水和物の抜けたものになっても到達温度が十分低くでき ると予想される。結晶生成上問題となったのは結晶の成長速度が FAA に比べ遅いのと、非常にもろ いため排液除去が難しい点である。

FAA 同様に、1 μ W の流入熱に対して 50 mK を持続できる時間は、

time =
$$0.36 \,(\text{J/mol})/10^{-6} \,(\text{W}) = 100 \,\text{hour/mol}$$
 (2.37)

持続時間を10時間とすると、0.1 mol、50 g が必要となる。

2.2.3 デュワー

首都大 ADR は、Wisconsin 大学の X 線天文学グループでロケット観測実験用に使用されていた冷 凍機を参考に、地上実験用に製作されたものである。よって一般の冷凍機よりも比較的軽量、高強度 でコンパクト性に優れたものになっている。

液体ヘリウムデュワー

最低到達温度や冷凍能力は使用する磁性体の他に、消磁開始温度、すなわち熱浴の温度と生成され る最大磁場にも大きく依存する。式 2.27 にあるように、エントロピー制御を十分行なうためには、こ れを満たした状態へ磁性体をまずもっていく必要がある。

また冷凍能力は磁性体の能力による部分が当然大きいが、極低温部への流入熱もこれに影響する。 通常状態で侵入してくる熱が小さいほど持続時間は有利になる。

1K 近傍を作り出す手段として、現在では機械式冷凍と液体ヘリウム冷凍の2種類が考えられる。 機械式冷凍は冷媒を循環運転することで冷却時間を飛躍的に増やすことができ、冷媒の消費も格段 に少ないのでコストダウンにもなる。最近では機械式冷凍で~1 K の極低温も容易に可能となってい る。しかし、難点として冷却に長時間が必要であることや冷凍機の製作費用が大幅に増加してしまう。 よって首都大 ADR では液体ヘリウム冷凍式を採用している。

液体ヘリウムを熱浴として使用する場合には、これの持続時間も考える必要がある。液体ヘリウムの蒸発潜熱は 2620 J/ℓ より、1 時間に 1 ℓ 蒸発する場合の 300 K からの流入熱は

$$2620/3600 = 0.728 \text{ W}$$
 (2.38)

この値は 4.2 K-300 K への流入熱としてはとても小さい。例として、これだけの流入熱をもたらす 銅線の直径を見積もってみる。通常、熱伝導率 $\kappa_c(T)$ は温度の関数だが、ここでは単純のため全ての 温度領域で 4000 mW/K·cm と一定とする。すると、長さ 1 m の銅線の流入熱が 0.728 W になるとき の断面積を $S \text{ cm}^2$ とすると、

$$Q = \frac{S}{100} \times 4000 \times (300 - 4.2) = 728 \qquad S \sim 6.15 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$$
(2.39)

よって直径 2.8 mm 程度の銅線があれば、この温度間を1mの距離にしても、ヘリウムは1時間で 1ℓなくなってしまう。実際の銅などの金属の熱伝導率は10K近傍にピークをもつ山のような形にな り、上の計算は最低値を求めていると考えてよい。もう一つ、断熱を考える場合の重要な項目として 輻射熱がある。簡易計算として、冷凍機の代表的な表面積の大きさを1m²とした時の、4.2 K-300 K への輻射熱は

$$Q = 1 \,(\mathrm{m}^2) \times \sigma \times (300^4 - 4.2^4) \,(\mathrm{K}^4) \sim 460 \,\,\mathrm{W}$$
(2.40)

ここで σ は Stefan-Boltzmann constant で、 5.67×10^{-8} W/m·K⁴ である。よって全流入熱を 1 W 程 度まで下げるために、少なくとも輻射熱を 0.1%まで抑える必要がある。このように、デュワー 1 K 近傍を作り出す冷凍機には、徹底的なまでの断熱状態を作り出す必要がある。

4.2 K の液体ヘリウムをさらに低温にするには、通常ヘリウムの減圧を試みる。この時の到達温度 は減圧度に忠実に反映される。しかし常にヘリウムの蒸発が起こっているため、絶えずガスの発生し ているタンク内の減圧には限界がある。また減圧によってさらに低温になるまでヘリウムが激しく蒸 発するため、液体ヘリウムの消費量が増加することも考慮する必要がある。

マグネットコイル

式 2.27 に示すように、磁性体のエントロピー制御には極低温での強磁場生成が必要である。磁性体に FAA を使用した場合、熱浴の温度を 2 K まで下げたときの必要な磁場は、FAA は g = 2 より 2.6 T となる。これは仮に bias を 10 A として、1 cm 当り 2000 turn、10 cm で 2 万 turn のコイルを 必要とする。

超伝導コイルは、最近では臨界電流の大きい合金型のものも多く市販され、高額ではあるものの強 磁場生成自体は難しい技術ではない。問題は常温-低温間のコイル用配線で、ここは全ての配線を超伝 導にはできないため、太くて抵抗の小さく臨界電流の大きいリード線を使用する必要がある。これは 電気伝導率の大きいものほどよいことになるが、代わりに熱伝導率も大きいため流入熱が増加する。 そのため配線の中間点にて熱流入をカットする熱リンクが必要である。

2.3 ADRの構造

2.3.1 構造図

ADR の構造図を図 2.5 に示す。

ADR はマグネットコイルとヒートスイッチ、常磁性体を含むカプセル-saltpillの3つの部分からなっている。これに熱浴となる液体ヘリウムのタンクが設けられる。

1. A : ヒートスイッチの稼働部

- 2. B : 磁性体のカプセル—saltpill(中央細長い筒)
- 3. C : saltpill を支えるケブラー wire
- 4. D : 超伝導マグネットコイル



図 2.5: ADR 中心部。

図 2.6: ADR 中心部の構造断面図。

5. E : 補償コイル

6. F : detector table とのコネクタ

2.3.2 熱スイッチ―ヒートスイッチ

熱スイッチ―ヒートスイッチの役割として最も重要な一つは、磁性体を磁化する際に発生する磁化 熱を熱浴である液体ヘリウムへ逃すことである。1 molの FAA を 2 K にて 3 T まで磁化させた時に 発生する磁化熱は、式 2.28 より、

$$Q = T \,\delta S = 2 \,(\mathrm{K}) \times \frac{C \times 3 \,(\mathrm{T})^2}{2\mu_0 \times 2 \,(\mathrm{K})^2} \sim 196.7 \,\,\mathrm{J/mol}$$
(2.41)

よって 0.1 mol で ~20 J は発生する。これは 2 K にて 5000 mW/K·cm という純度の高い銅線を使用 して、1 cm² の断面積で熱接触させれば 0.1 K の温度差でもものの数秒で熱浴へ除去できる。しかし 一般に 1 K 近傍での極低温での熱リンクは固体の熱伝導率よりも境界熱接触抵抗が問題となってく る。これは接触媒体の間に発生する熱抵抗で、物質によって違いはあるものの、~100 mW/cm² 程度 が限界であろう。スイッチに無酸素銅など、高い熱伝導率をもつものを使用するのはもちろんだが、 熱接触抵抗は接触面積に比例するため、これを向上させることがネックの一つである。

ヒートスイッチにはいくつかの異なる方式があり、大きく分けて機械式、ヘリウムガス式、超伝導 体式の3種類がある。これらはヒートスイッチに求められる性能、すなわち極低温における熱平衡、 断熱を作り出す目的においてそれぞれで長所、短所がある。
まず機械式は断熱消磁冷凍技術の研究初期から用いられているもので、外部までつながるハンドル やレバーで極低温部の部品を稼働させ、熱浴と saltpill を固体熱接触させる。極低温においては物質 の熱伝導率は極端に落ちるが、無酸素銅やアルミ、金などの純金属は1Kで1000 mW/K·cm、0.1K でも100 mW/K·cm の熱伝導率を持ち得る。

機械式の場合注意するのは稼働部の接触部分の設計と常温—極低温までの部品設計である。真空極低温になったときは熱収縮などによって若干稼働部の構成がずれる。これが接触面積を低下させるおそれがある。また圧着接続の場合がおおいが、これはヒートスイッチの性能にそのままでるため、常温—極低温部の構成材料はできるだけ強固なものがよい。しかしこれも流入熱に壁があるため限界がある。また機械式の最も大きな弱点として、稼働時の熱発生がある。

ヘリウムガス式はこの稼働部をなくせる方式で、熱浴—磁性体間にヘリウムガスの入ったタンク部 を設けて、断熱にしたい時にはこのタンクをポンピングして真空にする。この場合恒温—断熱とのガ スギャップ比をどれだけ大きくできるかが鍵となる。また超伝導体スイッチは物質の常伝導、超伝導 状態間の大きな熱伝導率の差をスイッチ方式にしたもので、超伝導体の周囲にマグネットコイルをと りつけ、熱浴とつなげたい時にはコイルを作動して超伝導をやぶる。

本 ADR では当初は上の中で機械式—メカニカルを採用した。ヘリウムガス方式だと断熱時にはポ ンピングを常にする必要があり振動の除去が必要と考えられた。機械式は構造が多少複雑ではあるも のの高真空を作り出すのに比較的容易なためこれを用いた。超伝導体方式でもよいが、これにはコイ ルに大電流を必要とするため今のところ使用していない。

300 Kのフタまでスイッチが伸びて、外部からスイッチの入切ができる。スイッチはBと直結して おり、スイッチを引っ張るとBのアルミ合金のハサミが閉じる形になっていて、これがソルトピルか ら飛び出している銅部品を挟み込む形で恒温、断熱状態をつくりだしている。

2.3.3 ソルトピル

ソルトピルはマグネットコイル中央の空洞の中を縦に走らせていて。中に常磁性体の FAA が充填 されている。ソルトピルは C 及び一番下のマグネットアダプタ (ヘリウムタンクと ADR 中枢部との 接続部品) にある上下三つずつの、計六つの wire でつるされた形をしていて、これで熱流入を極力防 いでいる。つるすための wire にはケブラーを採用している。可能なかぎり熱の流入をさげるために、 断面積を ~0.75 mm 4 と細くして使用している。

極低温部のこの wire は断熱性、強度の両方が求められる。前に述べたように、100 mK 以下の実 験温度の持続時間は熱浴—1~2 K から冷媒である磁性体への流入熱にも影響される。さてこのうち 輻射熱はとても小さく、磁性体の表面積を 0.1 m² とした時の 2 K から 100 mK への流入熱は、

$$Q = 0.1 \times \sigma (2^4 - 0.1^4) \sim 0.1 \ \mu W \tag{2.42}$$

のちに示すがこの程度まで支持材料の流入熱をさげるのはとても難しい。

さらにこの wire はソルトピルがずれないようテンションを張る必要がある。振動ノイズは detector の信号検出に支障をきたす他、熱収縮によってソルトピルが高温部にふれると断熱がやぶれてしまう。 これら温度変化によって中心からずれたりゆるんだりしないよう、wire はバネで支える方法をとって いる。またばね定数を変えることで強度を調整できる。

2.4. デュワー構造

2.3.4 マグネットコイル

超伝導マグネットコイルは American Magnetics Inc 社製コイルを使用している。超伝導線は NbTi ($T_c = 9.4$ K、上部臨界磁場 12 T)を使用しており、ソルトピルに磁場を作り出す。常温での抵抗値は 15.050 k Ω で、自己インダクタンス L は 36 H である。単位電流あたりの磁場は 0.513 T/A で、4 T を作り出すのに 7.82 A を必要とする。同時にこれが電流の限界値で、これ以上の電流をながさない ように電源装置にリミッターをとりつける必要がある。

本 ADR には補償コイル (バッキングコイル) を設けている。これは detector を取り付ける部分に 強い磁場がかかるのを防ぐもので、コイルの巻き方向は逆になっている。これによって detector にか かる磁場を 10 分の 1 から 20 分の 1 にすることができる。TES マイクロカロリメータは超伝導体を使 用していて、またその信号読みだし系には低インピーダンスの SQUID が使用される。この場合どち らも磁場の影響を大きく受け、特に断熱消磁に必要なほどの強磁場は悪影響を及ぼす可能性がある。 また ADR の温度制御の時には磁場変化をさせるため、detector 及び SQUID にはこの影響をベース ライン以下にする必要がある。

ADR は希釈冷凍機などと比べて簡単な冷却機構になっており、初期の調整がうまくいけば、冷却 の際に作動させるのはヒートスイッチとマグネットコイルのみであり、この二つの作動がうまくいけ ば目標温度に十分到達できる。到達温度は先に述べた通り断熱消磁開始時の温度と最大磁場に大きく 依存しており、デュワーも冷凍機の性能を決める一つである。次にこのデュワーの構造について述 べる。

2.4 デュワー構造

ADR のデュワーの概要図を図 2.8 に示す。

ADR デュワーは全長約 56 cm の円筒型である。デュワー内部はガラスエポキシやアルミ合金筒、 接続部分であるリング、300 K の真空容器の部分でできていて、基本的に支持材料を上下に走らせた バウムクーヘン型をしている。

2.4.1 He tank

マグネットアダプタで ADR 中枢部を支えている、ドーナツ型のものがヘリウムタンクで、ここに 液体 4 ヘリウム (予冷の場合は液体窒素) が注入される。缶の容積は外径 230 mm, 内径 120 mm で、 全長が 235 mm、7 ℓ 注入できる。ヘリウムタンクの下にはヘリウムタンク延長筒が取り付けられてい る。ここは detector table への配線系および SQUID の組み込み部となる。このヘリウムタンク延長 筒から常温下ふたには中央部に直径 100 mm の円形の穴があり、detector から外部につづいている。 これは X 線入射口のためのもので、IR-UV Blocking filter を介すことで常温部からの X 線入射をさ せることができる。



図 2.7: ADR デュワー。外観。

2.4.2 支持材料

熱伝導率の方程式より、固体の伝導熱を下げるには距離をおくのが効果的な手段のひとつで一般 に冷凍機は細長い形をとるが、本 ADR はコンパクト性を考えて、支持材料を上下に走らせるバウム クーヘン型を採用している。強度とその熱伝導率よりガラスエポキシを使用していて、ring を介して ヘリウムタンクを支えている。

2.4.3 液体ヘリウム注入口と radiation shield(アルミ合金)

本 ADR では、断熱消磁冷凍の冷却原理に重力を使用しないことを生かすため、デュワーを横にし た状態でも冷却が可能になるよう窒素予冷タンクを使わず、VCS— Vapor Cooling System を採用し ている。これは液体ヘリウムの蒸発ガスを予冷に使用するもので、ヘリウムタンクへの流入熱を格段 に下げる能力をもつ。一般にはヘリウムタンクの周囲、または 300 K 間支持材料の途中に窒素タンク を設けて、固体伝導熱および輻射熱をいったん 77 K に落とす構造をとるが、重量とコンパクト性を 考えると蒸気冷却の方がよい。

本 ADR の場合、液体ヘリウム注入口とヘリウムタンクを結ぶタワー部分から 50K ring、150K ring と呼ばれる支持材料 ring ヘアルミ合金の筒型熱リンクをつないで蒸気冷却を行なっている。これで 支持材料であるガラスエポキシの中間を冷却して流入熱をさげる。また 50K、150K ring のアルミ合 金でヘリウムタンク全体を 2 重に覆うことで radiation shield にさせる。

第3章 ヒートスイッチ

ヒートスイッチ (HS) とは、所定の操作によりその熱伝導度を急激に変化させ、熱的な繋がりを切 り替えるものである。熱伝導度が大きいときは ON、小さいときが OFF である。HS にはいろいろな 原理のものが存在するが、使用温度域や要求性能を考慮して種類を選択する必要がある。

3.1 ヒートスイッチ

断熱消磁冷凍機では、HSの切り替えによりソルトピルと熱浴、またはソルトピル同士間の熱的な 繋がりを変化させ、等温/断熱状態を実現する。

HSでは、OFF時の熱流入量が微小でありON時には大であることが要求される。また、切り替えに要する時間やコンポーネントの信頼性なども考慮する必要がある。

ADR において OFF 時熱流入量が変化すると保持時間が変化する。ON 時熱伝導度を大きくすると 励磁時磁化熱の廃熱時間が短縮され、また消磁開始温度がほぼ熱浴温度となる。廃熱時間は HS 切り 替えに要する時間も大きく関係する。当然のことであるが、HS 切り替えが1時間かかるとサイクル 時間が1時間延びることになる。



図 3.1: S – T 図で見た HS の働き

図 3.1 で、ADR のサイクル中での HS の動作について示してある。サイクル開始時、HS は ON 状態である。まず始めに、印加している磁場がなく (B = 0)、磁性冷媒が熱浴温度 T_H にいる。次に、超伝導マグネットに流す電流を徐々に大きくし少しずつ磁性冷媒に磁場を与える。この時、HS の熱伝導度が十分に大きければ、磁化されることにともなう磁性冷媒の磁化熱を効率よく熱浴に捨てることができ、再び T_H となるのに短時間で済む (図 3.1 赤矢印)。また、そもそも、HS の ON 時熱伝導度が小さいと磁化熱を廃熱しきれずに、 T_H が断熱消磁開始温度とならない。

次に、HSをOFFに切り替え、磁性冷媒を等温状態から断熱状態に変化させる。印加している磁場 を徐々に減らし冷凍機として使用する温度 T'_L を目指す。到達後、PID 制御によって超伝導マグネッ トへ流す電流を変化させ磁場をコントロールし、 T_H を保たせる。(ADR のサイクルに関する詳細は 前出 2.1.3)。図 3.1 青矢印中 HS は常に OFF 状態である。HS の OFF 時熱伝導度が小さいことは、つ まり極低温部がしっかりと断熱されていることを示し保持時間の改善を意味することになる。流入熱 が小さい場合、同じ温度に到達するにしてもより大きい磁場を印加した状態で実現でき、一定量のエ ントロピーをより長時間で使用することになる。以上のように、HS の性能 (ON 時熱伝導度、OFF 時熱伝導度、切り替え時間) は ADR のサイクル時間、保持時間、最低到達温度など、その冷凍機を 使用して実験する上で大きな制限となるような基本的な性能に直結する。

3.2 種々のHS

首都大 ADR、宇宙研 double-ADR(以下 dADR)で使用することを考えた場合、その使用温度域は 50 mK~2 K、または、50mK~4K である。ここでは、一般的にこの温度領域付近で使用されている HS についてまとめる。

3.2.1 機械式 HS

現在の首都大 ADR では、機械式 HS を使用している。これは金属部品をスイッチで on、off する ことで、saltpill と直結する金属部と熱接触する機構になっており、初期から使用されていた方法で ある。図 3.2 にヒートスイッチの機構図を示す。He tank と熱接触させてあるハサミ型の部品があり、 これが閉じれば on となって熱接触がおこる。HS の閉じる力のベクトル方向を上に変えることで、上 に引っ張る機構で on、off ができるようになっている。しかし、ON 時の熱伝導度は境界の熱抵抗に よってその大きさが制限される。よく接触しているように見える固体と固体でも、その境界面での熱 抵抗は大きいことがわかっている。Berman は主として金属と金属との境界面での熱伝導を 120kg ま での圧力をかけて測定し、以下のような性質を明らかにした。

- 境界面での熱伝達は圧力の増加とともに直線的に変化する。
- 金属と金属との境界面での熱伝達は電子によらずフォノンによる。したがって熱抵抗はかなり 大きい。
- 4.2K 以下では熱伝達は T² に比例して減少する。

このように境界面でかなり強く押しても熱抵抗が大きいことは微視的にみて完全な接触になっていな いことを示すといえる。機構的に強い接触を生み出す必要があることになるが、低温での熱収縮や、 流入熱を考慮したケブラーワイヤーやその他合成樹脂では限界があり、また安定稼働する機械的な機 構は難しい。

また、Kapitza抵抗だけでなく高温部から低温部にON/OFFを制御する機構が必要となる。この 制御機構が低温部への熱流入源になる。低温部にモーターを配置しそれを用いて HS も切り替えを行





図 3.3: 首都大 ADR に導入されている機械式 HS

図 3.2: 機械式 HS 模式図

うものも存在するが、低温での部品の収縮によって熱伝導板が強い力でしっかりと圧着されづらくなり、必要な熱伝導度が得られなくなることが起こってしまう。

機械式 HS は、理論的に OFF 時熱伝導度が 0 W/K となり保持時間に大しては最も有利であるが、 どういった方法を取るにしろ Kapitza の熱抵抗に制限されてしまう。

3.2.2 超伝導式 HS

超伝導式 HS では、超伝導-常伝導での熱伝導率の急激な変化を利用する。超伝導状態での熱伝導率 は一般的に常伝導状態よりも小さく、非金属程度になる。超伝導状態でしかも低温では主としてフォ ノンが熱伝導の主役となっている。したがって、非金属的な振る舞いを示すのである。

超伝導体に臨界磁場以上の強さの磁場を作用させると常伝導伝導状態となり熱伝導率は大きくなる。したがって、熱浴と冷媒とを超伝導体で接続し、この部分に磁場を加えたり消したりすることによって常伝導状態と超伝導状態を切り替え熱伝導度を変化させ、HSとして使用できる。つまり、使用する温度域がその選択した超伝導体の転移温度より十分に低温である必要がある。

表 (3.1) より Pb の転移温度は 7.193K であるが、図 (3.5) よりその転移温度より大きく低温でなけ れば熱伝導率は大きく低下せず、ON/OFF 比を大きくとれないことが分かる。例えば、ADR の熱 浴温度が 2K である時、常伝導状態では $\kappa = 20W/K/cm$ 、超伝導状態では $\kappa = 0.3W/K/cm$ とな るので ON/OFF 比は 600 となり小さい。首都大 ADR での使用を考えた時、現実的なサイズとして 断面積 $S = 1cm^2$ 、長さ L = 10cm を想定する。この時、OFF 時熱伝導度 (超伝導状態での導出) は $G_{OFF} = 30mW/K@2K$ となり、熱流入は上限値で 58.5 mW (50mK-2K) となる。首都大 ADR のソ





図 3.4: 超伝導式 HS のポンチ絵。模式的に縦方向 に磁場がかかるように図示したが、横方向に磁場 をかける場合もある。

> 図 3.5: Pb の熱伝導率。直線は常伝導状態、破線 は超伝導状態。

材料名	組成	$T_c[\mathbf{K}]$	$H_c[Oe]$ @1.3K	$H_c[Oe]@0K$
ハンダ	Sn 60 Pb 40	7.05	830	
	$\mathrm{Sn}\;50\;\mathrm{Pb}\;50$	7.75	2036	
特殊ハンダ	Sn 50 In 50	7.45	6408	
	Sn 26 Bi 54 Cd 20	3.69	600	
	Cd 82.5 Zn 17.5	0.8		
	Cd 40 Bi 60	$0.54 \ 0.48$		
インジウム	高純度	3.404		293
ガリウム		1.09		59
鉛		7.193		803
スズ		3.722		305
亜鉛		0.875		53
ニオブ		9.26		1980
ニオブ?ジルコン	Nb 75 Zr 25	10.8		80000

表 3.1: 材料の超伝導転移温度、臨界磁場

ルトピルへの流入熱は1µW以下なので、PbではHSとして成立しないことがわかる。

首都大 ADR ではかなり高い温度で転移するような物質を選択しなければならない。また上記のように超伝導物質に磁場を印可し超伝導を破り常伝導状態にするには大きな磁場が必要になる。つまり、大きな超伝導マグネットが必要になることになり、首都大 ADR 内にはスペースが足りない。

首都大 ADR では、減圧した液体ヘリウム温度 ~ 2 K で使用するので、その温度で既に転移していなければならない。使用温度域が $50mK \sim 500mK$ など、首都大 ADR に比べ低温である場合はこの問題点は解消される。

3.2.3 ガスギャップ式 HS

ガスギャップ式 HS はガスの大きな熱伝導を用いた方法である。高温側と低温側をつなぐ密封性の 高いカプセルを用意し、熱伝導ガスとそのガスに対し吸着性を持った吸着剤を用意する。吸着剤の吸 着性能は温度に依存するのでその性質を利用し、吸着剤がある温度以下であるとガスを吸着しカプセ ル内を高真空にし OFF 状態に、また別の温度であるとガスを脱離しカプセル内を必要な圧力へと上 げ ON 状態に切り替える。もちろん、カプセルのシェルを介した熱流入も存在する。そのため吸着剤 が十分に熱伝導ガスを吸着することを前提として、このシェルからの熱流入を必要な OFF 時熱伝導 度以下の大きさに設計する必要がある。ON 状態について考えるには、ガスの熱伝導の物理について 考える必要がある。



図 3.6: ON 時 HS の模式図

図 3.7: OFF 時 HS の模式図

今回使用温度域として考えられている 50 mK から 4.2 K では、一般的によく活性炭やゼオライト が吸着剤として使用される。後に説明するが、今回我々が使用する吸着剤も活性炭である。また、熱 伝導ガスには使用温度域に対して使用可能な⁴ ヘリウムガスを用いる。参考に、図 3.8 にいくつかの ガスの低温における熱伝導率を上げる。

活性炭が十分にヘリウムガスを吸着している状態では外側シェルを伝っての熱流入が支配的となり、これが OFF 時熱伝導度となる。そこから活性炭の温度を徐々に上げていくと、ヘリウムガスの



図 3.8: 様々なガスの低温における熱伝導率。最低温度の点はそれぞれ凝縮開始温度を示している。 (ガスの平均自由行程 λ が $\Delta/100(\Delta = 100 \mu m)$ のとき。)

脱離が始まる。この時ヘリウムガスによる熱伝導が徐々に大きくなり外側シェルの熱伝導度を超す。 十分にヘリウムガスによる熱伝導が大きくなったときの活性炭の温度を ON 温度と呼ぶ。HS は、治 具などを介して熱浴や冷媒と接続されるので、そこでの Kapitza 抵抗で ON 時熱伝導度は制限され る。通常 GGHS では、ON 時の熱伝導度をより大きくするために非常に微小なギャップ (1mm 程度) を作り、そのギャップ間で熱伝導の切り替えを行う。

3.3 ガスの熱伝導

ガスギャップ式 HS ではガスが熱伝導を担うため、その物理について考える必要がある。ガスの熱 伝導を考える場合、平均自由行程を境目として熱伝導の圧力依存性の変化を考慮に入れなければな らない。温度 T [K] において圧力 P_{gas} [Pa] となるようにガスを充填した場合、その平均自由行程 *l* [m] は、

$$l = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2} \frac{k_B T}{P_{gas}} \tag{3.1}$$

となる。ここで k_B [J/K] はボルツマン定数、 σ [m] は分子の衝突半径である。 $\sigma = 140 \times 10^{-12}$ [m] を使った。この平均自由行程と、GGHS の高温部と低温部を分けるギャップのサイズの大小によって連続体の場合、分子として扱う場合に分けて考える。

3.3.1 連続体の場合

平均自由行程がギャップサイズより十分に短い場合、ガスの熱流入は連続体と同様に扱える。

$$P = \frac{S}{L} \int_{T_{hot}}^{T_{cold}} \kappa(T) dT$$
(3.2)



図 3.9: 圧力に対する平均自由行程。赤: 4.2 K、緑: 2 K、青: 1 K



図 3.10: ガスを連続体として扱った場合の熱伝導度。面積 $S = 3.14 [cm^2]$ 、ギャップサイズ $g = 500 \mu m$ とした。

(S: 断面積 cm²、L: 長さ cm))

この時、熱伝導度はガス圧力に依存しないと近似してもよい。一般的に GGHS を製作する際には、 平均自由行程がギャップサイズの 1/100 程度になるようにする場合が多い。ただし、これは一緒に密 閉する活性炭の能力とのトレードオフなのでこの条件だけで決定してはならない。

3.3.2 分子として扱う場合

ガスの圧力が十分小さい場合、つまり平均自由行程がギャップサイズより十分大きい時、熱流入は 圧力に依存し、

$$P = \Lambda P_{gas}(T_{hot} - T_{cold}) \tag{3.3}$$

$$P = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \left(\frac{R}{8\pi MT}\right)^{0.5} \alpha SP_{gas}(T_{hot} - T_{cold})$$
(3.4)

$$\Lambda = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \left(\frac{R}{8\pi MT}\right)^{0.5} \alpha \tag{3.5}$$

この係数 A を自由分子熱伝導率という。ここで $\gamma(=1.66)$ は定圧/定積比熱の比、R(=8.31447) [J/K mol] は気体定数、M(=4.003) [g/mol] は分子量。S は向かい合う面積 [m²]。 α は二つの壁の平均適応 係数であり、気体分子が個体壁に衝突する際に、どれほど個体壁との熱平衡に近づくかを表現する係 数で、最小で 0、最大で 1 をとる。ここでは、0.5 とした。



図 3.11: 温度一定にした時のガスを分子としたときの熱伝導度。向かい合う面積 $S = 3.14[cm^2]$ としている。

HS としてより大きな ON 時熱伝導を得るためには、連続体として扱える領域が有利である。ただ、 封入する活性炭の量に制限が加わる時 (コンポーネントの問題等)、より多くのガスが必要になる連続 体領域は、ガスが吸いきれるかどうかの不安要素は残る。

3.3. ガスの熱伝導



図 3.12: 圧力一定にした時のガスを分子としたときの熱伝導度。向かい合う面積 $S = 3.14[cm^2]$ としている。



図 3.13: 4.2K におけるガスの熱伝導度。赤と緑がそれぞれ分子流として扱ったとき、連続体として扱ったときの熱伝導度。紫の線より高い圧力が平均自由行程 $\lambda < \Delta/100$ 。青い線より低い圧力が平均自由行程 $\lambda < \Delta/100$ 。ここでは設計のギャップサイズと同じ $\Delta = 500 \mu m$ としている。

ガスの熱伝導では平均自由行程より十分にギャップサイズが大きい時、その熱伝導度の圧力依存性 はなくなる。つまり平たくいえば、それ以上いくら圧力を上げても熱伝導度を上げることはできなく なり、活性炭の吸着量は有限であるので逆に吸いきれずに残ったガスによる熱伝導が外側シェルのそ れよりも大きくなってしまう恐れがある。ただ、活性炭の温度で見た、ON/OFF 温度も考慮する必 要があるので注意が必要である。AGGHS では活性炭にヒーターを取り付け自由に温度コントロール することができる。ヒーターによって活性炭の温度は上げられ AGGHS 内の圧力が上がった時に連 続体領域となるようにさえすれば良いことになる。逆に PGGHS では、高温側の温度変化とともに活 性炭の温度も変化するので ON 領域を考えなければいけない圧力範囲に幅ができ、より複雑になる。 AGGHS は設計段階の難易度は低いが使用時に操作が増え (ヒーターの作動)、PGGHS は設計段階の 難易度は高いが使用時はオートマチックに作動してくれるなど、一長一短である。

以上をまとめると、ON時に連続体領域となるような圧力かつ平均自由行程がギャップサイズの 1/100となるような圧力を封入量とし、そのガス量を吸着しきる(ガスによる熱伝導が外側シェルに よる熱伝導の10%程度になるような状態)のに十分な量の活性炭を封入すれば良いことになる。

3.4 PGGHS

HS が動作してほしい温度状態時にあわせ吸着剤の温度も変化するように設計し自動的に ON/OFF の切り替えが行われる設計のものを Passive gas gap 式 heat switch (PGGHS) と呼ぶ。構造は大抵、 シリンダーの上下に円板がついた形で、円板のそれぞれが高温側、低温側となる。円板には垂直に平 行平板が複数設けられ (放電加工で製作)、高温側と低温側が触れないよう、平行平板が向かい合った 形になる。これにより表面積を大きくしてガスの熱伝導度を大きくする。また、平行平板の距離を小 さくすることでガスの熱伝導度は大きくなる。吸着剤には、活性炭や、焼結金属を用いることが多い。 (3)



図 3.14: 代表的な PGGHS のデザイン

4K 付近で使用される PPGHS には、³He ガスが使われることが多い。これは、Cu に対して 3He が 適した吸着開始温度を持つからである。PGGHS を製作する際に大切なのは、熱伝導ガスと吸着剤間 における吸着エネルギーをよく考慮し、使用温度域に適した吸着開始温度を持つ物質同士を選択する ことである。

一般的に、³Heや⁴Heは、異なる吸着剤に薄い層を形成する。この層上のガス圧は飽和蒸気圧にとてもよく似た温度依存性を示す。次の式は、ある温度に関して層上の圧力の関係を示したものである。

$$P = P_{SVP} exp(-\frac{T_s}{T}) \tag{3.6}$$

ここで、Pはガス圧、 P_{SVP} はT [K]における飽和蒸気圧、 T_s は吸着エネルギーである。⁴He は、銅に対して ($T_s \sim 57$ K)4.5 K で 0.4Pa、3.0 K で 2.7 × 10⁻⁴ と急激に変化する。

また、参考までに表??に各物質間の脱理の活性化エネルギーと典型的な ON/OFF 温度を記述した ものを示す。(4)

	表 3.2:	
Gas/Substate	Transration T(K)	$T_0(K)$
³ He/charcoal	13	139
$^{3}\mathrm{He}/\mathrm{Cu}$	4.2	61
$^{4}\mathrm{He}/\mathrm{Cu}$	4.2	59
Ne/Ne	11	191

3.5 AGGHS

ガスギャップ式 HS のうち、抵抗などを用いて強制的に吸着剤の温度をコントロールさせ ON/OFF の 切り替えを行う設計のものを Active gas gap 式 heat switch (AGGHS) と呼ぶ。構造的には、PGGHS と似た作りのものが多いが、大きな違いは吸着剤を HS 本体から別にしていることである。一般的な 構造を図 3.17 に示す。

3.5.1 独自デザインの AGGHS

上記したような一般的な AGGHS は、ON 時熱伝導度は内部の向かい合う平行平板の面積によって 決定され、OFF 時熱流入は外側シリンダーが決定する。従って、OFF 時熱流入を小さくしようとす れば内部のアラインメントが困難になるといったような問題が生じてしまう。そこで、本研究では ON 時熱伝導度、OFF 時熱流入を決定する箇所を独自に決められるような独自デザインの AGGHS の開発を行った。

ON 時熱伝導度は、下側のディスクで決定される。熱伝導度は向かい合っている面積に比例するので、このディスクをより大きくすればよい。また、OFF 時熱伝導度をより小さくしようと外側シェ



図 3.15: 代表的な AGGHS のデザイン



図 3.16: 独自デザインの AGGHS。片側が大きくせり出させ、ギャップサイズを小さくした構造。

ルの外径を小さくしても、内部には熱を伝える金属棒が存在するだけなので、アラインメント難易度 が上がることはない。また、GGHS では微小なギャップ(0.5mm)を実現できるかどうかが設計に大 きな制限をかける。PGGHS では、図縦方向と横方向両方に対し、ギャップサイズ以上のアラインメ ントが要求される。しかし、今回製作した AGGHS では縦方向のみ高精度のアラインメントが要求 されるなので、スペーサーを簡単に使用することなども考えられ、PGGHS に比べその自由度が高い と考えられる。表 3.4 にこの設計から見積もられる ON/OFF 時の熱伝導度を示す。表 3.3 に計算に 使用した部品のサイズを示す。

	-					
材料名	長さL	外径	厚さ d	ディスク径	ディスク厚	ギャップ幅
	[cm]	[cm]	$[\mu m]$	[cm]	[cm]	[cm]
SUS304	10	1	80	2	0.3	0.05
Vespel-SP1	10	1	300	2	0.3	0.05
Vespel-SP22	10	1	300	2	0.3	0.05

表 3.3: 図 3.16 使用した部品のサイズ

表 3.4: 図 3.16 の各素材使用時の ON/OFF 時熱伝導度

材料名	ON 時熱伝導度 [mW/K]	OFF 時熱伝導度 [μW/K]
SUS304	5.28	3.70
Vespel-SP1	5.28	0.37
Vespel-SP22	5.28	0.62

さらに、ベスペルを使用した時の OFF 時熱伝導度は非常に小さい。しかし、ベスペルは熱伝導ガ スとして使用するヘリウムに対して透過性を持っている。そのため、ベスペルを使用する場合はその 外側にステンレスやチタンなどの薄いホイルを巻き付ける必要がある(厚さ約 8µm)。このホイルに よる熱伝導についても考慮する必要がある。上記の計算結果から、SUS シリンダーを使った AGGHS では要求性能を満たせず、候補に上がっている素材の中では、ベスペルを使用シリンダーに使用しな ければならないことが分かった。しかし、ベスペルを使用する場合は、ベスペルと HS 本体の接合方 法が非常に難しくなってしまう。SUS シリンダーを使う場合は銀ろうを使用する。銀ろうの融点は 約 800 度なので、銀ろうを用いた接着には、ガスバーナーをあてる必要があり、シリンダーに約 1500 度以上の耐熱性を要求しなくてはならなくなる。SUS にはその耐熱性があるが、ベスペルにはそれ に耐えうるだけの耐性がない。そのため、高温にする必要のない接着材などが候補に考えられるが、 そうなると、今度はヘリウムガスに対して非常に低い透過性を持った接着材を選ぶ必要がある。低温 では、ヘリウムガスのリークも減るが、首都大 ADR や宇宙研 ADR は室温に触れている時間が長い ので、宇宙用の GGHS よりもさらに低いリークレートを持った接着材を選ぶ必要がある。そのため、 今回は SUS シリンダーをできるだけ薄くし再設計を行う。

3.6 ガス封入圧と熱伝導度の関係

室温で GGHS に封入する圧力によって各活性炭温度での熱伝導度が変化することが分かっている。 これは、吸着剤として使用するチャコールの特性によるものである。このことは、この後の6のガス 圧変化試験でも同様の結果が出ている。詰めすぎても残留ガスが残ってしまう危険があり、詰めなす ぎても ON 温度が上がってしまい、たかなくてはならないヒーター量が増えてしまうため封入する圧 力は十分に検討した後に封入する必要がある。



図 3.17: ガス封入圧を変えたときのコンダクタンス変化 (2)

第4章 活性炭と熱伝導ガス

4.1 活性炭

4.2 炭素系材料の種類と特徴

4.3 吸着等温線

吸着分子の脱離速度と吸着速度が同じになると吸着平衡 (adsorption equilibrium) に達する。この ときの吸着量 v_a は、温度 T と圧力 p との関数

$$v_a = f(p, T) \tag{4.1}$$

である。普通、吸着平衡における吸着量(平衡吸着量)を求めるときには、圧力か温度かのどちら か一方を一定に保ち、他方の関数として吸着量を求める。温度を一定にして圧力を変えると、吸着量 は圧力の関数として、

$$v_a = f(p), \ T = const \tag{4.2}$$

となる。この関係は吸着等温線 (adsorption isotherm) とよばれ、最も一般的に使用される。同様に、

$$v_a = f(T), \ p = const \tag{4.3}$$

の関係を吸着等圧線 (adsorption isobar)、

$$p = f(T), \ v_a = const \tag{4.4}$$

の関係を吸着等量線 (adsorption isostere) という。これらの関係は、どれか1つを、パラメターを変 えて実験的に求めれば、他は必要に応じて作ることができる。吸着等温線を表す吸着式は、実験的に、 あるいは理論的に色々導かれているが、高圧(1気圧以上)から超高真空までに広い圧力範囲であては まる式はない。代表的なものを表4.1に示す。

圧 (1 atm 以上) から超高真空までの広い圧力範囲で当てはまる式はない。吸着質表面が吸着に関 して一様な性質をもっており、吸着質分子同士の相互作用を考えなくてよいような、吸着量の極めて 少ない状態では、圧力と吸着量とが比例するはずである。Langmuir 式でも BET 式でも圧力減少に ともなってこの関係に近づく。

吸着媒表面が一様で、吸着質分子同士の相互作用もないが、すでに吸着している分子の上に気相から衝突した分子は吸着しないという条件で導かれたのがLangmuir式である。

2009年に行った活性炭吸着量測定試験結果から、AGGHSに導入された活性炭の吸着等温線を求めている。この試験結果のうちLGK-433の吸着結果に対してLangmuir式でフィットをした。

名称	吸着式	備考
		$v_a: 吸着量$
Henry	$v_a = ap$	p: 圧力
		a:定数
		$v_a: 吸着量$
Langmuir	$v_a = \frac{v_{as}bp}{1+bp}$	$v_{as}:$ 飽和吸着量 (単分子吸着層を形成した時の圧力)
		p: 圧力
		b: 定数
BET	$v_a =$	$v_a: 吸着量$
(Brunaner, Emmett,	$\frac{v_{am}cx}{(1-x)(1-x+cx)}$	$v_{am}:$ 単分子層を形 成する吸着量
Teller)		$x = p/p_0, p$: 圧力, p_0 : 飽和蒸気圧
		c:定数

表 4.1: よく使用される吸着式



図 4.1: Henry 式

図 4.2: Langmuir 式

図 4.3: BET 式

表 4.2: 試験に使用した活性炭				
品名	素性	メーカー	入手先	
LGK433	ヤシガラ	武田薬品 (現 日本エンバイロケミカルズ)	国立天文台	
WH5C8/32	石炭	日本エンバイロケミカルズ	同社	

4.4. 封入するガス圧



図 4.4: LGK-433 と WH5C8/32 の 4.2 K での等温吸着線。緑 : LGK-433、青 : WH5C8/32、赤 : LGK-433 の結果に対して Langmuir 式でフィットした結果

表 4.1 にある Langmuir 式を使用する。 v_{as} は収束した時の吸着量であり、ここでは $v_{as} = 0.66$ l/g とした。結果は、b = 667 となり、

$$v_a(P_{gas}) = 0.66 \times \frac{667 \times P_{gas}}{1 + 667 \times P_{gas}} l/g$$
(4.5)

が求められた。

4.4 封入するガス圧

吸着等温線よりある圧力下 *P_{gas}* での LGK-433 の吸着量 *n*(*P*) mol/g が決定できる。図 4.4 の赤実線がこの結果である。この式 4.5 より室温下で HS 内部に封入する圧力を決定する。

AGGHS内部の体積をV l、ガス詰め時の温度を T_1 K、詰めたガス圧を P_{gas1} Pa、 T_2 K での AGGHS 内部の圧力を P_{gas2} Pa、気体定数をR J/mol K、封入活性炭量をgg とすると、状態方程式より次 式 4.6 が成り立つ。

$$\frac{P_{gas1}V}{RT} = \frac{P_{gas2}V}{R \times T_2} + v_a(P_{gas2}) \times g/22.4$$
(4.6)

最右項を22.4 で割っているのはモル数に直すためである。この式4.6 と式4.5 を連立して解けば P₂(P₁) を得ることが出来る。つまり、室温でのガス封入量を決定すれば、4.2K 冷却時の内部のガス圧力が 決定されることになるので、ガスによる熱伝導度がわかる。

$$\frac{P_{gas1}V}{RT} = \frac{P_{gas2}V}{R \times T_2} + \times 0.66 \times \frac{667 \times P_{gas2}}{1 + 667 \times P_{gas2}} \times g/22.4$$
(4.7)

$$\frac{667V}{RT_2}P_{gas2}^2 + \left(\frac{V}{R \times T_2} - 667 \times \frac{P_{gas1}V}{RT_1} + 0.66 \times \frac{667 \times g}{22.4}\right)P_{gas2} + \frac{V}{RT_1} = 0$$
(4.8)

従って、 P_{gas2} は以下の式 4.9 のように P_{gas1} 、gの関数として書くことができる。

$$P_{gas2}(P_{gas1},g) = \frac{-b + (b^2 - 4ac)^{0.5}}{2a}$$
(4.9)

$$a = \frac{667V}{RT_2} \tag{4.10}$$

$$b = \frac{V}{R \times T_2} - 667 \times \frac{P_{gas1}V}{RT_1} + 0.66 \times \frac{667 \times g}{22.4}$$
(4.11)

$$c = -\frac{V}{RT_1} \tag{4.12}$$

さらに、これをガスが分子流として扱うと、式 3.4 より以下のように熱流入を求めることができる。

$$P = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \left(\frac{R}{8\pi M T_2}\right)^{0.5} \alpha SP_{gas2}(P_{gas1}, g)(T_{hot} - T_{cold})$$
(4.13)

それぞれの値は式 3.4 を求めるときと同じ。単位も同じ。AGGHS の体積は、6.8 cc として計算した。ここではまず、熱流入の前に 4.2 K における OFF 時熱伝導度から算出してみる。



図 4.5: LGK-433 を使用したときに 4.2 K 時の残留ガスによる熱伝導度

56

第5章 設計

Gas gap heat switch(GGHS) は、2008 年より首都大、国立天文台と共に独自のデザインで設計、 製作を続けている。ここでは、まず使用を予定している2つのADRの要求性能を明らかにした後、 現在までのGGHS 設計状況について言及する。

5.1 要求性能

現在開発を継続している GGHS は、すでに宇宙研二段式 ADR に 1 号機が組み込まれ動作してい る。しかし、ON/OFF コンダクタンスや動作時の熱入力などで要求性能を完全に満たしているわけ ではなくまだ開発途上の段階である。ここでは、開発初期から導入を検討している首都大 ADR に組 み込むための AGGHS への要求性能、宇宙研二段式 ADR に組み込むための GGHS への要求性能に 分けてそれぞれの具体的な内容を明らかにする。

5.1.1 首都大 ADR

首都大 ADR に要求される HS の性能は以下の通り。

- 1. 使用温度域 50mK~2K
- 2. ON 時熱伝導 数 mW/K 以上
- 3. OFF 時熱伝導度 $<1\mu W$ 以下
- 4. サイズ 50 m ϕ × 長さ 100 mm 程度





首都大 ADR では、液体⁴Heの減圧によって得られる2Kを熱浴として使用しそこから断熱消磁 を行い磁性冷媒の温度を50mKに下げる。そのため使用温度は50mK-2Kに定める。ON時熱伝導 度は現在使用している機械式ヒートスイッチの値を基準として数mW/K以上とした。OFF時熱伝 導度については、現在のセッティングで0.3μW/K(床井修論2008)と見積もられているので、まず はとりあえずの目標として 1µW/K 以下とした。機械式 HS の OFF 時熱伝導度は理論的に 0 W であ る。対して、ガスギャップ式 HS では、外側シェルからの熱流入が必ず存在する。これをどれだけ小 さく設計できるかが鍵となる。また、現在ソルトピルの支持材料としてケブラワイヤーを使用してい るが、ソルトピルを直接支持できる HS を設計できれば、より小さい OFF 時熱流入量となる。

5.1.2 宇宙研二段式 ADR

宇宙研二段式 ADR では、LHe 温度から断熱消磁サイクルを回す際と、LHe タンクを減圧した状態 でサイクルを回す際とで要求される性能が変わってくる。最終的には、減圧なしでの運転が望ましい。



図 5.2: 宇宙研二段式 ADR(double-ADR:dADR)

HS2(機械式)



図 5.3: dADR デュアー内写真

減圧あり

- 1. 使用温度域 50mK~2K
- 2. ON 時熱伝導度 10mW/K 以上
- 3. OFF 時熱伝導度 <0.8μW 以下 (1-0.05 K)
- 4. ON/OFF 切り換え時間を2分以下
- * NEEDLE から HS 本体 (0.6K と仮定) への熱流入を、
 - 5. ON時 56µ W以下 (15-0.6 K)
 - 6. OFF 時 10μ W 以下 (4.2-0.6 K)

5.2. 基本設計

減圧なし

- 1. 使用温度域 50mK~4K
- 2. ON 時熱伝導度 10mW/K 以上
- 3. OFF 時熱伝導度 <0.8µW 以下
- 4. ON/OFF 切り換え時間を2分以下

* NEEDLE から HS 本体 (0.6K と仮定) への熱流入を、

- 5. ON 時 56 μ W 以下 (15-0.6 K)
- 6. OFF 時 10μ W 以下 (4.2-0.6 K)

宇宙研二段式 ADR は減圧を行わず、4.2K から断熱消磁サイクルを回すことができるよう設計された ADR である。そのため、HS の使用温度域も 50 mK~4K と条件が首都大 ADR と異なる。ON 時熱伝導度は、CPA の励磁を OFF 時熱伝導度は、CPA の吸熱量を現在の宇宙研二段式 ADR の GGG ステージの吸熱量は約 4J 程度である。これを GGG の励磁から CPA の励磁、消磁開始までに約 2 時間かかると想定した場合、NEEDLE から HS 本体への熱流入を GGG ステージ全体の吸熱量 4J の 10%以下の 0.4J にする必要がある。従って、 $0.4[J]/7200[sec]=56[\mu W]$ と要求する。

5.2 基本設計

5.2.1 AGGHS - 号機

まずはじめに、独自デザインの AGGHS の動作確認を目的として製作された実際の AGGHS 第一 案の図面と各部品の素材をまとめる。その後で、簡単に設計方法をまとめる。

5.2.2 設計性能

この設計における ON、OFF 時の熱流入の値は、以下のようになる。

オフコンダクタンス

オンコンダクタンス

また、NEEDLEからの熱流入値は、次のように求めることができる。

<u>表 5.1: NEEDLE からの熱流入</u> 熱流入値 温度域 ON 時 OFF 時



図 5.4: AGGHS 概略図

表 4: AGGHS 各コンポーネントの名称と素材					
		名称	材質		
1	CYLINDER		SUS304		
2	CASE,	, cold upper	3N OFC		
3	CASE	, cold lower	3N OFC		
4	RO	D DISC	5N OFC		
5	FI	LANGE	3N OFC		
6		PIPE	OFC		
7	NI	EEDLE	SUS304		
8	Charcoal box		3N OFC		
	売 5: 1:CYLINDER のパラメータ				
長さ	۲ [mm]	外形 [mm]	厚み [mm]		
	100	10	0.08		
表 6: 7:NEEDLE のパラメータ					
長さ	۲ [mm]	外形 [mm]	内径 [mm]		
	30	0.9	0.6		
表 5: 1:C 長さ [mm] 100 表 6: 7:1 長さ [mm] 30		YLINDER の/ 外形 [mm] 10 NEEDLE のパ: 外形 [mm] 0.9	^ペ ラメータ 厚み [mm] 0.08 ラメータ 内径 [mm] 0.6		



図 5.5: 製作を終えた AGGHS

5.3. 新設計

5.2.3 製作

ここでは AGGHS の製作方法についてまとめる。

製作手順

順を追って製作方法について説明する。詳細な製作方法については横田修論を参照のこと。

- 1. 部品加工
- 2. SUS シリンダーを FLANGE と CASE に、FLANGE に NEEDLE と PIPE を銀ろうでづけで 固定。

3. 酸化部を硫酸洗浄

- 4. Chacoal BOX 内に STYCAST2850 で活性炭を固定。
- 5. chacoal BOX を NEEDLE にハンダ付けで固定
- 6. CASE upper と lower 接触部にインジウムシールを施し、ネジ締め。
- 7. HS内部を真空引き、その後ホットプレートでベイキング
- 8. ガス詰め、チップオフ

ベイキング

製作行程中のベイキングは、ミスが起こりやすい行程のひとつなので特に慎重に行なう必要があ る。これまでの実験で二度ベイキングにより作業に支障をきたしている。ベイキングは前回試験で活 性炭表面に残っているヘリウムガスを追い出すためだけではなく、活性炭や HS 内部の壁が吸着して いるヘリウム以外の分子 (例えば水)の脱離を行なうために必要な行程である。吸着物質に対するガ スの吸着量の変化は普通その圧力での沸点よりも少し上の温度で起こる。つまり、100 度よりも少し HS 全体の温度を上げれば水を含めたガスのベイキングが完了する。しかし HS 内部に使用している インジウムの融点は 156 度、また、はんだの融点も 180~300 度付近であるために温度を上げすぎる と、それらの物質を溶かしてしまう。ベイキングする際には、常に温度をモニターし、120 度以上に は上がらないように注意する。

5.3 新設計

5.3.1 改良点

後の章で述べるが、AGGHS 1号機では、NEEDLE からの熱流入が大きく宇宙研二段式 ADR でこ のままの性能で使用していくのは厳しい試験結果となった。その考察をもとに主に NEEDLE、チャ コール BOX の改善を中心に再設計を行なう。ここではまず、問題点を提示し、それぞれの問題点に 対しての改善方法のまとめ、検討に入る。



図 5.6: はんだが溶けて活性炭 BOX がとれてしまっている



図 5.7: ベイキング中の写真



図 5.8: ベイキング中の温度モニター。設定温度以 上になるとホットプレートの電源が切れるように なっている。

5.3. 新設計

- 1. ON、OFF 時 NEEDLE を介したチャコール BOX からの HS 本体への熱流入を に減らす。
- 2. 残留ガスによる OFF コンダクタンスの増加をなくす。(5-10 μ W/K)
- 3. Radiation shield を設ける

HS 本体への熱流入

宇宙研 dADR は、ソルトピルを二つ直列に繋げた形になっていて、まず He タンク (熱浴) とメカ ニカル HS で繋がれた高温側のソルトピル (GGG) を励消磁した後、高温側ソルトピルと GGHS で繋 がれた低温側のソルトピル (CPA) を励消磁してディテクターステージを 50mK まで冷却する。簡単 な dADR の模式図を図 5.9 に載せる。





この GGHS の候補として AGGHS が今回使われ動作確認ができたが、低温側ピルの励磁の際に (AGGHS が ON) 高温側ピルに対して大きな熱流入の原因となってしまうことが分かった。3章でも 述べたが、ON 時に低温側ピルの熱浴となる高温側ピルの温度上昇が速いと消磁開始(AGGHS が ON から OFF に切り替わる)温度が高くなってしまい、低温側ピルの最低到達温度が高くなってしまい、 高温側ピルの温度上昇も速くなる。この問題を解決するためにいくつかの案を検討する。

- NEDLE の径を小さく、長さを長くする
- 熱伝導率のより小さい素材への変更

• 適した温度で臨界温度を持つ超伝導物質への変更

NEEDLEの熱伝導度は、SUSシリンダーの熱伝導度を求めた時と同様、以下の式で書くことができる。

$$G = \frac{A}{l} \times \kappa(T) \tag{5.1}$$

ここで、A は NEEDLE の断面積、*l* は長さ、κ は熱伝導率である。この式から分かるように NEEDLE の径を小さくすることで断面積を小さくし、*l* を長くとれば熱伝導度は下がる。しかし、この後にも述 べるが、熱伝導度を悪くする方向にばかり NEEDLE 設計を偏らせると今後は NEEDLE 内部の配管 コンダクタンスが悪くなってしまう。というのは、配管を流れるガスのコンダクタンスは熱伝導度を 悪くするのとは逆センスで、径を大きく、長さは短い方がよくなるからである。もちろん NEEDLE 中を流れるヘリウムガスの速度は速い方が HS の ON/OFF 時間が短くなり好ましいので、コンダク タンスはよいほうがよい。また、κ の値の小さな素材を選べば径や長さを変えることなく熱伝導度を 下げることができる。しかし、SUS 自体が非常に熱伝導の低い物質であるためその選定は難しい。

超伝導物質についてだが、これも選定が難しい。常伝導金属の熱伝導は電子、及びフォノンにより 起こる。超伝導電子はフォノンと有効にエネルギーを交換するような相互作用がないので、いかなる 熱も伝導できない。つまり、超伝導状態への移行により熱伝導能力が変わる。温度が減少するにつれ て常伝導電子の割合が減り、それとともに電子熱伝導が減少する。他方、温度低下に伴い、フォノン と常伝導電子の散乱が減るので、格子伝導能力はむしろ増大する。このとき、純粋な金属では電子伝 導の減少のほうが格子伝導の増大より大きいので、超伝導状態の全体としての熱伝導は常伝導状態に おきるそれよりも著しく小さい。しかし、数%の不純物をもつ金属および合金の中では、すでに常 伝導状態において電子熱伝導がかなり抑えられている。したがって、T_c以下では、格子の熱伝導の増 加が効いてきて、常伝導-超伝導遷移によって逆に熱伝導度が上昇してしまう。超伝導物質を使うこ とは、後の熱アンカーでも考えられていたが、十分に議論、検討する必要がある。

従って、今回はSUS304を使ってNEEDLEの径と長さのみを変更して製作を行なう。

残留ガスによる OFF コンダクタンスの増加問題

現在、試験結果から得られている OFF コンダクタンス結果は、若干あらかじめ計算されている理 論値よりも高い。考えられる原因として、残留ガスによる影響が上げられる。しかし、非常に小さい コンダクタンスを見ているため、十分温度計のキャルや、測定上における誤差範囲と考えられなくも ない。

Radiation shield の問題

現在使用されている AGGHS 1号機はチャコール BOX に輻射対策が出来ていない。チャコール BOX は ON 時には、約15 Kまで温度が上がるので、本来ならばしっかりとした輻射対策が必要であ る。具体的な輻射の影響は測定してはいないが、新しく製作する AGGHS では Radiation Shield を 設ける必要性は十分にある。

5.3. 新設計

5.3.2 各部品の新デザイン案

ここでは、1号機からの変更されるコンポーネントについてまとめる。

SUS シリンダー

OFFF コンダクタンスを下げるために本設計では SUS シリンダーをさらに薄くし、厚みも薄く変更して使用する。以下に比較のため、前回のパラメータと一緒に変更後のシリンダーのパラメータをまとめる。長さが若干長くなり、厚みが半分になったことから、首都大 ADR の OFF 時熱伝導度要求値は満たせないが、宇宙研 dADR の要求値を見たし、熱流入を問題ないレベルまで下げることができる。

表 5.2: SUS シリンターのパラメータ				
	長さ [mm]	外径 [mm]	厚み [mm]	熱伝導率 [W /K /cm]
1号機	100	10.0	0.08	$0.74 \times 10^{-3}T$
新 AGGHS	105	10.9	0.04	



図 5.10: 新 SUS シリンダー

図 5.11: 新 SUS シリンダー

NEEDLE

NEEDLE の長さを長くする際には、HS 本体から直線に伸ばしたのでは ADR に組み込む際にス ペースをとってしまう。それを避けるためにデザインを変える必要がある。以下に 2 つのデザイン案 を図 5.12 と図 5.13 に示す。

L 字型、スパイラル型共に NEEDLE を曲げる必要がある。NEEDLE に使用する SUS304 は、外径、内径ともに小さい。しかし、加工する際に NEEDLE だけで曲げてしまうと中の空洞をつぶしかねない。従って NEEDLE を加工する際には中にピアノ線を入れ曲げることにする。この加工だが、



図 5.12: L 字型

図 5.13: スパイラル型

スパイラル状にすると細い SUS 管では、ピアノ線を取り出すことが困難になってしまう。さらに、内 部の曲げる箇所が多数のために内部のコンダクタンスが下がってしまう可能性もある。一方でL字型 は、折り曲げる箇所は一点のみなので加工自体は比較的容易と言える。今回はこちらのL字型のデザ インで製作を行なう。

チャコール BOX

AGGHS 内部に詰める⁴He ガスの圧力は HS を製作する上で重要なパラメータとなる。第3章、第 5章からも分かるが、詰める圧力が多くても少なくてもいいわけではなく、最適圧力の範囲 (今の活性 炭量であれば 86Torr 以上ということは分かっている)で充填量を決定しなくてはならない。充填量が 少ないと残留ガスの心配はなくなるが、ON/OFF 時間スケールが長くなり、ON/OFF 温度が上がっ てしまう。さらには、ON 温度が上がってしまうために HS 本体に入ってくる熱流入も大きくなって しまう。ガス詰めも非常に難しくなる。また、詰める圧力が多すぎると今度は、活性炭がヘリウムガ スを吸いきれずに残留ガスが残り OFF コンダクタンスを増加させてしまう。

さらに、新しく設計を行なっている AGGHS は、SUS シリンダーの厚みが前回の半分で製作する。その場合、内部充填圧力があまりに低いと大気中でシリンダー自体が外部圧力に耐えられずへこんでしまう可能性が高い。従って、できるだけガスを詰める量は、大気圧と同等であることが望ましい。以上のような理由から、詰められる活性炭量は現在詰めてある量よりは大きいのが好ましい。

チャコール BOX デザイン

ここでチャコール BOX のデザイン案を示す。これまでは銅の円柱の内部をくり抜き、その中に活 性炭を詰める構造を取っていたが、今回は活性炭を詰める表面積を稼ぐために直方体の内部を4箇所 四角でくり抜きその中に活性炭を詰める構造にした。これにより、詰められる活性炭量を現在の HS の3倍ほどにすることができる。また、内部に活性炭を詰める方法だが、まず、チャコール BOX 内 部にスタイキャストを BOX 内表面に塗り、その後で活性炭をスタイキャストの上に接着する方法を とる。スタイキャストを使うと内部に詰められる活性炭量は減るが、スタイキャストが銅表面から熱 を伝える役になり、スタイキャスト無しの時に比べて速く活性炭を暖め、冷やすことができる。





図 5.14: チャコール BOX



また、これまではチャコール BOX 温度をモニターするために Rx-202 温度計を1つと、チャコール BOX を ON 温度まで暖めるために抵抗を1つ、治具を介して取付けていた。しかし、温度計、抵抗 自体の体積が大きいために BOX 全体の熱容量にも影響している可能性がある。再設計した AGGHS では、温度計、ヒーター共にチップタイプにして直接スタイキャストで接着する構造をとる。表 6.5 に使用する温度計とヒーター情報を載せる。

表 5.3: 使用温度計とヒーター抵抗				
温度計		Lake Shore		
ヒーター	F	RS コンポーネンツ	1.5k	



図 5.16: 温度計



図 5.17: ヒーター抵抗



図 5.18: 温度計、ヒーター抵抗治具。横から見た図 図 5.19: 温度計ヒーター抵抗治具。正面から見た図

Radiation sheild

現在使用されている AGGHS 1 号機はチャコール BOX に輻射対策が出来ていない。構造としては、 熱浴に取付けた銅などのシールドで囲うことが最善策だが、現在の AGGHS の構造では直接熱浴に つけることは難しい。さらに、熱浴に直接取付ける場合、首都大 ADR や dADR では、デュアー内部 の構造が異なるので導入する ADR によって AGGHS の NEEDLE からチャコール BOX の形を変え なくてはならない。全ての ADR に導入できることを考えると、もともと備え付けの形にするのがよ い。従って、NEEDLE に一体となった形にする。以下図 5.20 に構造の簡単な模式図を載せる。



図 5.20:

5.4 検討

この章では、それぞれの部品の長さや径と言った細かい設計が必要な部分について検討していく。

5.4.1 チャコール BOX、活性炭量

5.4.2 チャコール BOX、NEEDLE からの熱流入

現在は、NEEDLE に熱アンカーをとりつけ HS Hot side への NEEDLE からの熱流入を抑えてい るが、He タンクから熱アンカーを NEEDLE につないでいるために OFF 時熱流入の原因となってい る。一番の解決策は、熱アンカーをとらずに NEEDLE の熱伝導を悪くし、HS 本体への熱流入を無 視できる程度まで下げることである。NEEDLE の熱伝導度は、式 5.1 熱伝導度の式で求めることが できる。ここで、κの値は表??の SUS の値を用いることにする。HS 本体に入ってくる熱流入は、式 5.1 で求めた値を用いて、以下の式 5.2 で書くことが出来る。

$$P = \frac{A}{l} \int_{T_{hot}}^{T_{cold}} \kappa(T) dT$$
(5.2)

とかくことができる。先にも言ったが、熱伝導度を抑えるためには、径を小さくし、長さを長くす ることである。そこで、候補として簡単に手にいれることができ、かつ、強度的にも使用できそうな 4 種類の SUS 管を候補として上げる。以下の表 5.4 にまとめる。

	10.4. L		
No.	外径 [mm]	内径 [mm]	断面積 [mm ²]
1	0.9	0.6	0.35
2	0.81	0.51	0.31
3	0.63	0.33	0.23
4	0.55	0.30	0.17

表 5.4: SUS-NEEDLE 候補

表に記してある管を使用した場合の熱流入を ON 時、OFF 時に分けて考える。径、材質は今決定 しているので、後は長さの変更のみである。SUS の熱伝導度は、表 5.2 の値を用いている。ON 時は、 首都大 ADR、首都大二段式 ADR の場合ともにチャコール BOX 温度は 15K と仮定する。HS Cold side の温度は、首都大 ADR は熱浴温度の 2K、二段式 ADR は、GGG 温度の 0.6K と仮定して計算し ている。OFF 時は、首都大 ADR は常に熱浴温度と一緒になるので考える必要はない。二段式 ADR に関しては、ヒーターにつないである配線 (Cu 皮膜 NbTi 線) より常にチャコール BOX と熱浴温度 が同じと考えると、OFF 時熱流入は図 5.23 のような値を示す。

図 5.21 から図 5.23 を見る限りでは、NEEDLE の長さを 100mm 以上にし、径をかなり細くしなけ ればならない。これは、設計構造を考えるとかなり厳しい。今回は、dADR からの要求性能を満たさ せるために、熱アンカーを取付ける構造とする。

熱アンカー

熱アンカーをつけるとして、NEEDLEのどの位置でアンカーをとるかで ON 時、OFF 時の熱流入の値が変わってくる。チャコール BOX の温度を $T_{charcoal}$ 、HS の Hot side の温度を T_{HSHot} 、熱アンカーを取る位置をチャコール BOX の位置を始点としてそこから x[mm] とする。SUS304 の熱伝導



図 5.21: NEEDLE から HS 本体への ON 時熱流入 図 5.22: NEEDLE から HS 本体への ON 時熱流入 (首都大 ADR) (首都大二段式 ADR)



図 5.23: NEEDLE から HS 本体への OFF 時熱流入

率を k_{SUS} [W/K m]、、熱アンカーの熱伝導度を G_{anchor} [W/K]、S は NEEDLE の断面積 [mm²]、l は NEEDLE の長さ [mm] とすると、HS のチャコール BOX、NEEDLE、熱アンカー、HS Hot side の熱のやりとりは、以下の式のように書くことができるはずである。

$$P_{charcoal} = P_{HShot} + P_{anchor} \tag{5.3}$$

$$k_{SUS}\frac{S}{x}(T_{chcoarl} - T') = k_{SUS}\frac{S}{(l-x)}(T' - T_{HScold}) + G_{anchor}(T' - T_{\underline{R}})$$
(5.4)

$$T' = \frac{k_{SUS}\frac{S}{x} \times T_{chcoal} + G_{anchor} \times T_{\underline{MA}} + k_{SUS}\frac{S}{(l-x)} \times T_{HScold}}{k_{SUS}\frac{S}{(l-x)} + k_{SUS}\frac{S}{x} + G_{anchor}}$$
(5.5)

この値を HS hot side に入ってくる流入熱

$$P_{anchor} = k_{SUS} \frac{S}{(l-x)} (T' - T_{HScold})$$
(5.6)

の T' に代入すると $P_{HShotsode}$ を求めることが出来る。今、仮に試験で使用した Cu 皮膜 NbTi 線 8本7.5cm(212.15 μ W/K@4.2K)を使用した場合と、仮に熱伝導度が倍以上の 500 μ W/K の物質をア ンカーに使った場合の熱入流を考える。NEEDLE の長さは、設計上可能 60mm、70mm、80mm の 三種類について計算して見る。横軸をx mm、縦軸を $P_{HShotside}$ で表すと、図??のようになる。



図 5.24: 熱収支

また、参考までに、熱アンカーの熱伝導度 500 μ W/K の NEEDLE 上の熱アンカーとの設置点を 変えたときの温度分布についても図を載せておく。

これらの図を見ると分かるように熱アンカーがあるときとないときでは、ON時HS本体への熱流入 がかなり違ってくる。また、OFF時に熱浴から入ってくる熱流入の値は常に熱アンカーとNEEDLE との接点が 4.2 K だと仮定する (つまり、OFF時熱流入の下限値) と以下の図 5.34 のようになる。熱 アンカーがないときと比べるとやはり熱流入は増加してしまうことがわかる。以上のことから、ON


図 5.25: Cu皮膜 NbTi 線を8本 (7.5cm)、l=60mm 図 5.26: Ganchor=500µW/K としたとき、l=60mm



図 5.27: Cu皮膜 NbTi 線を8本 (7.5cm)、l=70mm 図 5.28: G_{anchor}=500µW/K としたとき、l=70mm



図 5.29: Cu皮膜 NbTi 線を 8本 (7.5cm)、l=80mm 図 5.30: Ganchor=500µW/K としたとき、l=80mm



時には、NEEDLEの長さは60mm程でも十分だが、やはり、OFF時のことを考えると出来るだけ長いほうがよいことが分かる。



5.4.3 配管コンダクタンス

熱伝導度と合わせてもう1つNEEDLEの設計で気をつけなくてはならないのが配管コンダクタン スである。配管のコンダクタンスがあまりにも悪いとON/OFF時間に影響を与えてしまう。ここで は、真空技術で用いられるよく使われるコンダクタンスの導出方法でNEEDLEのコンダクタンスを 求める。

導管のコンダクタンス

流量を Q と圧力差 $p_2 - p_1$ は、比例関係にあり、その比例定数は導管の形状、寸法および気体の種類によってきまる。この関係を

$$Q = C(p_2 - p_1) \tag{5.7}$$

と表すとき、定数 C をコンダクタンスと呼ぶ。一般に真空技術では、気体の量を表すのに温度を常 温と考えて (圧力)×(体積) で表すことが多い。この式にしたがえば、式 5.7 の定数 C は、

$$\frac{[[[]]][[]]]}{[[]][[]]]} = [C][[[]]]$$
(5.8)

であるから、「体積 [1]]/「時間 [sec]] で表されることが多い。

クヌーセン数

Knは、クヌーセン数 (Knudsen number) と呼ばれ、流れ場が連続体として扱えるか否かを決定する無次元数である。Kn < 0.01のとき連続体、Kn > 1のとき分子流、その間は中間領域として扱う。

$$K_n = \frac{\lambda}{d} = \frac{3\mu}{Pd} \sqrt{\frac{\pi kT}{8M_{He}}}$$
(5.9)

ここで、d は配管の半径、 λ は平均自由行程、P は圧力、 μ は粘度、k はボルツマン定数、T は温度、 $M_{He} = 6.64 \times 10^{-27}$ kg (He 分子の質量) である。ここで μ の値は、1.1029e-06[Pa*s] を用いた(8)。図 5.35 に今回候補に上げられている SUS 管のそれぞれの Kn の値と圧力の関係をプロットしたものを載せる。



図 5.35: クヌーセン数 *Kn* と圧力の関係。青い線 (*Kn* >1) より大きいとき分子流、紫の線 (*Kn* <0.01) より小さいとき連続体として扱う。その間は中間領域。

分子流

NEEDLE 中を流れる He が分子流だと仮定すると、コンダクタンスは式 5.10 のようにかくことが 出来る。

$$C = \frac{1}{4}\bar{v}S = \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} = 3640(\frac{T}{M})^{1/2}S$$
(5.10)

ここで、 \bar{v} は分子の平均速度、T は絶対温度、M は分子量である。単位は [cc/sec]。半径 a(cm)、長 さ l(cm)の円形導管の場合には、式 5.11 のように書くことができる。

$$C = \frac{2\pi}{3} \frac{a^3}{l} \bar{v} \tag{5.11}$$

ただし、これは十分に長い導管についての場合であって、その入り口の影響が無視できるものであ る。短い導管の場合、入り口の影響がは無視できない。例えば、式 5.11 の *l* を *l* → 0 とした場合、流 量 Q あるいはコンダクタンス C が無限大となり、実際には一致はしないことからもうなずけること である。このように短い導管 (ここでは半径 a の円断面とする)の分子流コンダクタンスを近似的に 求める場合には次のように考える。厚さのない孔 (半径 a)のコンダクタンスは、式 5.12のようにか くことが出来る。

$$C' = \frac{1}{4}\pi a^2 \bar{v} \tag{5.12}$$

これと円形導管のコンダクタンス (式 5.11) とが直列に連結されているものとして総合したコンダ クタンス C を求めると

$$\frac{1}{C''} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C'} \tag{5.13}$$

$$C'' = \frac{2\pi}{3} \frac{a^3}{l + \frac{8}{3}a} \bar{v}$$
(5.14)

という結果を得る。すなわち、導管の長さを $l \rightarrow l + \frac{4}{3}D$ と置き換えればよい。導管の半径による コンダクタンスの変化を示したものを図 5.38 に載せる。



図 5.36: NEEDLE の円断面の半径を変化させたときの分子流のコンダクタンス

連続体(粘性流)

圧力が十分高く、導管の直径 D が分子の平均自由行程 λ よりも十分大きいときは、各分子は周囲 の分子の動きにつられてそれらの平均の速度で押し流される。すなわち、気体分子は集団として流れ を生じることになる。一方、導管の壁に接触する気体は壁の影響を受けて静止している。その結果、 導管内では場所によって流れの早さが異なり、菅の中央部では流速が大きく、管壁では流速は0 であ る。このような流れの様子を決定する因子は、菅の形状、気体の粘性および菅の両端における圧力で ある。

粘性流の場合には、式5.15のように書くことができる。

$$C = \frac{\pi}{8\eta} \frac{a^4}{l} \bar{p} \tag{5.15}$$

ここで、aは導管の半径、lは長さ、 \bar{p} は平均圧力、 η は粘度である。



図 5.37: 圧力を変化させたときの粘性流のコンダクタンス

中間領域

中間領域、すなわち、気体分子同士の衝突と導管の壁との衝突が同程度の頻度で起こるような場合 には、コンダクタンスを求めるのに上で示したような粘性流、分子流のいずれの式も適用することが できない。実際、このような場合について厳密な理論を展開することは困難であり、これまでにいく つかの実験式、あるいは近似式が提示されてきた。以下の式は、1909年,Kneedsen が中間領域に対し て提示した円形導管のコンダクタンスである。

$$C = \frac{\pi}{128} \frac{D^4}{\eta l} \bar{p} + \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{D^3}{l} \frac{1 + \sqrt{\frac{M}{RT}} \frac{D\bar{p}}{\eta}}{1 + 1.24\sqrt{\frac{M}{RT}} \frac{D\bar{p}}{\eta}}$$
(5.16)

ただし、ここでの D,l,\bar{p} はそれぞれ cm, Torr 単位で表すものとする。



図 5.38: 圧力を変化させたときの中間領域の式によるコンダクタンス

各径における NEEDLE のコンダクタンス

これまで示してきた式に対して、実際に使用を考えている SUS パイプ個々におけるコンダクタン スを求めてみる。



図 5.43: 外径 a=0.90, 内径 b=0.60,l=7cm

⊠ 5.44: a=0.81,b=0.51,l=7cm



⊠ 5.49: a=0.63,b=0.33

 \boxtimes 5.50: a=0.55,b=0.30,l=6cm

二段式 ADR からの性能要求は、ON/OFF 時間スケールが2分以内である。 仮に活性炭が He がスを全く吸っていないと考えると、状態方程式より

$$\frac{P_1}{T_{\Xi\Xi}} = \frac{P_2}{4.2K}$$
(5.17)

が成り立つ。室温で1気圧 (760 Torr)詰めたとすると、4.2 K まで冷却されたとき、AGGHS 内部の圧力は、

$$P_2 = \frac{P_1}{T_{\Xi\Xi}} \times 4.2 = 10.64 \tag{5.18}$$

となる。

5.5 設計性能

SUS フォイルの厚みを現在の 80μ m から 40μ m、長さが 105mm の新 SUS フォイルを使用して HS を再制作する。さらに NEEDLE の径、長さを変更すると、HS 全体の熱設計が変化する。まずは、各 部品のパラメータを変えることにより熱設計全体がどのように変化するかをまとめた後、デザイン的 な制限とも合わせて部品のパラメータを決定する。

5.5.1 熱伝導度

ON 時熱伝導度

ON 時の熱伝導度は、3章でも述べた通り十分なガス圧が HS 内部にあればガス圧に依存しないと 近似してよい。式 3.2 よりこのときの熱伝導度は、ギャップ幅と熱伝導ディスクの面積に依存する。 ON 時の熱伝導度は以下の式で書くことが出来る。b はディスクの直径、g はギャップサイズである。

$$G_{ON} = \frac{\pi b^2}{2g} \cdot \kappa_{^4\mathrm{He}} \tag{5.19}$$

このとき、主な温度での熱伝導度は以下の表 5.5 のようにまとめられる。このときの ${}^{4}\text{He}$ ガスの熱伝 導率の値は、 $\kappa=0.8\times10^{-4}$ [W/cm K] を用いて計算している (5)。

表 5.5: ON 時熱伝導度			
ディスク面積 $[m cm^2]$	cm^2] ギャップ幅 [μ m] G [mW/K](@4K) @2K		
3.14	500	10	5

OFF 時熱伝導度

OFF 時の HS Hot side から Cold side への熱入流は、SUS シリンダーからの熱流入が主になる。新 SUS シリンダーに変更した場合の熱伝導度は、以下のように計算できる。

$$G = \frac{A}{l} \times \kappa(T) \tag{5.20}$$

ここで、A は断面積、l は長さ、κ は熱伝導率である。それぞれの値は表 5.2 を参照。すると、主な 温度での熱伝導度の値は以下の表 5.6 のように計算できる。SUS シリンダーの各温度での熱伝導度変 化は図 5.51 のようにプロットされる。しかし、実際には、HS の上下に温度差ができることになるの で、この値はあくまで参考である。



図 5.51: 各温度における SUS シリンダーの熱伝導度

表 5.6: OFF 時熱伝導度		
	@4.2K	@2K
熱伝導度 $G[\mu W/K]$	4.04	1.92

5.5.2 OFF 時 HS 本体の熱流入

HS Hot side から Cold side への熱流入は想定される熱浴温度と冷媒の到達温度による温度差によっ て異なる。首都大 ADR で使用する場合は HS の Hot side は常に熱浴と同じ 2K になるが、dADR で 使用する場合は、GGG ステージと同温度 (0.6K と仮定) となる。その場合の熱流入は、冷媒の最低 到達温度を 50mK と仮定すると、首都大 ADR、dADR で式 3.2 を使用し以下の表 5.7 のようにまと めることが出来る。

表 5.7: OFF 時 HS Hot side から Cold Side への熱流入

	使用温度域	熱流入 $[\mu W]$
首都大 ADR	2 - 0.05K	1.92
二段式 ADR	0.6 - 0.05K	0.17

5.5.3 各パラメータの決定

NEEDLE 長さと Radiation shield 位置の決定

活性炭 BOX

5.5.4 必要なヒーターパワー

5.5.5 ON/OFF 時間の見積もり

見積もり方

まず、チャコール BOX を暖めるのに必要なジュール熱を見積もる際に以下のような式で求めた。

$$P = \int_{T_1}^{T^2} m \times C_{Cu}(T) dT \tag{5.21}$$

ここで、 $C_{Cu}(T)$ は銅の比熱 [mJ/g * K]、m は銅の質量 [g]。それぞれの温度での比熱は、低温の 教科書の値を用いた。以下にそれぞれの温度域での比熱、必要なジュール熱をまとめる。 ただし、15[K] の値は $(C_{Cu}(@10K) + C_{Cu}(@20K))/2$ で出している。また、常に $T_1 = 0.6[K]$ 、チャ コール BOX の質量は、9.835[g](Cu の密度; $8920[kg/m^3]$ 、チャコール BOX の体積;1102.6 $[mm^3]$)。

表 5.8: 各温度域での比熱			
温度	比熱 $[mJ/g * K]$	$P_{heater}[mJ]$	
2	0.03	0.41	
4	0.11	3.68	
6	0.23	12.22	
10	0.86	79.51	
15	3.42	484.36	
20	7.7	1469.18	

上の方法で求めたチャコールを暖める際に必要なジュール熱をプロットしたものを図 5.52 に載せる。



第6章 性能評価試験

AGGHSの評価試験は、TMU-ADR、TMU-dADRの2台の冷凍機で行なった。まず、2010年1月 にADRでAGGHS1号機の4.2K(LHe温度)における動作試験を行ない、初めて正常な動作の確認を することができた(実験詳細については横田修論参照)。次に、dADRにより4.2K以下における各温 度でのON/OFF コンダクタンス、チャコールBOXのON/OFF温度と切り替わり時間など、断熱 消磁の実際のサイクル温度で試験を行い詳細な性能結果を得た。更に、TMU-ADRを使いAGGHS 内部に封入するガス圧を変えることで、ON/OFF コンダクタンスにどのような影響が見られるかの 試験を行なった。

6.1 試験方法

ここではまずどの試験にも共通する熱伝導度算出法について述べる。試験は、どの冷凍機を使って 試験するかでセッティングが多少なりとも変わるが基本的には図 6.1 のようなセットアップを組む。

6.1.1 熱伝導度算出方法

AGGHSのコンダクタンス測定は、基本的にON時、OFF時同じ熱伝導度算出方法で行なう。熱 伝導度測定試験では、既知の熱を入力し、その結果発生する温度差を計測し、その値を用いて熱伝導 度を求める。今、熱伝導度をG、温度差を ΔT 、入力熱をPとする。熱を入力し十分な時間が経過し たあと、つまり、 ΔT が一定値になった状態について考える(この仮定がない場合、熱伝導だけでな く、熱容量についても考慮が必要になってしまう)。この時近似的に、

$$P = G\Delta T$$
 W (6.1)

$$G = \frac{P}{\Delta T} W/K \tag{6.2}$$



図 6.1: 熱伝導試験 setting

が成り立つ。近似的としたのは、通常物質の熱伝導率は温度に依存しており、厳密には ΔT の温度幅 で G の値が一定とは言えないからである。しかし、十分に小さい $\Delta T(0.1\text{K})$ であるならば、ほぼ G を一定値として見なしても誤差となる。この時の温度を T とすると、「この物の温度 T での熱伝導度 は G である。」という。次に積分形も記しておく。

$$P = \frac{A}{L} \int_{T}^{T+\Delta T} \kappa(T) dT$$
 W (6.3)

 $\kappa(T)$ は均質の熱伝導率、Aは断面積、Lは長さである。この式の場合は、式 (6.2) で必要であった ような仮定がなくとも厳密に成り立つが、 $\kappa(T)$ は直接その測定時に把握できないので、直接的な測 定とはならない。

さらに寄生流入熱が存在した場合--配線、輻射、残留ガスによる熱流入--について考える。この時、

$$P_1 + P_{para} = G \times (T_{12} - T_{11}) \tag{6.4}$$

と記述できる。ここで、 P_{para} は寄生流入熱である。 P_1 を P_2 へと増やすと、

$$P_2 + P_{para} = G \times (T_{22} - T_{21}) \tag{6.5}$$

となり、 $T_{11} = T_{21}$ を仮定し両辺を引くと、

$$P_2 - P_1 = G \times (T_{22} - T_{12}) \tag{6.6}$$

となる。この式に測定結果を代入すれば、Ppara によらず G を測定することができる。

6.1.2 測定手順

実際の測定手順について述べる。ON/OFF 時では、チャコール BOX の扱い方のみ違う。

ON 時熱伝導測定

- 1. チャコール BOX のヒーター 2 に電流を流し、チャコールの温度を目標温度 (例えば 15K) に する。
- 2. HS 全体が熱平衡状態になっていることを確認する。
- 3. HS上部のヒータ1に電流を流し、熱を入力する。電圧、電流、発熱量を記録。
- 4. 温度変化がなくなったのを確認し、 T_1 、 T_2 温度計の値を記録。
- 5. ヒーターパワーを上げ、温度変化がなくなったのを確認して温度計の値を記録。
- 6. 以下、繰り返し。

6.2. TMU-ADR による動作確認試験

OFF 時熱伝導測定

- 1. チャコール BOX のヒーターが OFF になり、HS 全体が熱平衡状態であることを確認する。
- 2. HS上部のヒータ1に電流を流し、熱を入力する。電圧、電流、発熱量を記録。
- 3. 温度変化がなくなったのを確認し、 T_1 、 T_2 温度計の値を記録。
- 4. ヒーターパワーを上げ、温度変化がなくなったのを確認して温度計の値を記録。

5. 以下、繰り返し。

熱伝導度測定は、与えている熱量に対して HS 上部 (キャップ部分)の熱容量が大きく、熱平衡状態 に達するまでの時定数が非常に大きくなる。特に、OFF 時の熱伝導度を測定しようとすると、平衡 状態にするまで何時間もかかってしまうことがある。そこで、実際の測定では、以下のようにあらか じめ計算から推測されている ON/OFF 時の熱伝導度を利用し、与えるヒーターパワーを制御するこ とで効率的に熱伝導度を算出する。

- 1. あらかじめ作りたい温度差を決めておく
- 2. 設定した温度差に必要なヒーター量を予想する
- 3. 予想した熱量よりも大きい(~5倍)ヒーター量をたく
- 4. 設定した温度差に近づいたらたいているヒーター量を下げる
- 5. その後、熱平衡状態に達するようヒーター量を調整する
- 6. 平衡状態になったら、ヒーター量、電流、電圧、T₁、T₂の温度を記録する

6.2 TMU-ADR による動作確認試験

詳細な試験内容については横田修論を参照のこと。(2010年3月) ここでは、ON/OFF コンダクタ ンスや ON/OFF 切り替わり温度など簡単な試験結果のみを載せる。表 6.1 では off コンダクタンス、 ON コンダクタンスをチャコール BOX の各温度で平均をとったものを示す。また、図 6.2、6.3 では 測定値全てをプロットしたものを載せる。

測定結果

表 6.1: OFF/ON 時熱伝導度			
チャコール BOX 温度 [K]	熱伝導度		
4.2K	$12.04[\mu W/K]$		
20	$11.04 \ [mW/K]$		



図 6.2: 4.2K における OFF コンダクタンス

図 6.3: 各温度におけるコンダクタンス

6.3 dADR による試験

首都大 dADR では、AGGHS 導入以前まで SHI 製の PGGHS を導入し冷却を行なっていたが、2 段式のうち低温側ソルトピル (CPA:)の消磁開始後の温度上昇が大きく問題となっていた。原因とし て考えられていたのが、導入されていた PGGHS からの CPA への熱流入である。そのため解決案の ひとつとして、製作した AGGHS を導入し試験を行なった。

6.3.1 SUS フォイルのコンダクタンス

dADR では、まずキャップを閉めない状態で熱伝導度測定を行なった。AGGHS の SUS フォイル自 身のコンダクタンスを調べること、つまり、OFF コンダクタンスの最小値を求めることが目的であ る。セットアップ図は 6.12、6.13 の通りである。温度計は HS の冷媒側に温度計を1つと逆側に1つ つけて、低温側 (COLD side) の温度変化を追うことによってコンダクタンスを求めた。ただし、本測 定で使用した AGGHS は、首都大 ADR の試験の際に用いた HS 1号機とは異なることに注意する。

測定結果

コンダクタンス測定結果を図 6.14 にまとめる。図 6.14 中赤のプロットが試験結果のプロット、緑 は首都大 ADR で試験した OFF コンダクタンスの値を比較のためにプロットしたものである。

6.3.2 4.2K以下における HS1 号機の性能評価-1

本実験では、4.2K 以下における AGGHS の性能評価試験を行なった。キャップ付きで、内部に 86Torr ガス詰めがしてある HS 1号機を使用する。試験内容は、各温度での ON/OFF コンダクタン





図 6.4: セットアップ図

図 6.5: セットアップの写真



図 6.6: SUS フォイル熱伝導試験結果

ス、ON/OFF 温度の測定、ON/OFF 時間スケールの測定である。チャコール BOX の各温度毎にコ ンダクタンスを測定していくと、ある温度付近で急激にコンダクタンスの値が跳ね上がる。これを ON/OFF 温度と呼んでいる。また、チャコール BOX をある温度までヒーターで暖めて ON にした 後、ヒーターを切るとチャコール BOX の温度がどんどんと下がっていき、熱浴温度と一緒になる。 このヒーターを切ってから熱浴温度と一定になるまでの時間スケールを ON/OFF 時間スケール、ま たは ON/OFF 切り替わり時間などと呼んでいる。表 6.2 にこの試験についての簡単な情報をまとめ る。また、今回は首都大 ADR での動作試験の時とは異なり、NEEDLE 部分に熱アンカーとして Cu 皮膜 NbTi 線を取付けている。

表 6.2: AGGHS 1 号機性能試験

試験 No	試験セットアップ	目的	
1	Cu皮膜NbTi線4本(8cm)	HS の 4.2K 以下における性能評価	

また、図 6.12 と図 6.13 に今回の試験のセットアップ図と写真を載せる。





図 6.8: セットアップの写真

図 6.7: セットアップ図

測定結果

本試験での OFF コンダクタンスを図 5.33 に載せる。この図の AGGHS 100406 のプロットが今回 の試験結果である。また、ON コンダクタンスを図 5.33 に載せる。NbTi 4 と書かれる点が今回の測 定結果である。また、同時に記してある 4K、2K、1K はそれぞれ HS HOT side の温度である。また、 ON/OFF 時間スケールを図??にのせる。また、チャコール BOX をある温度まで暖め、その温度に 保つのに必要なヒーター量を測定したものを図??に載せる。

今回の測定結果から、4.2K時のOFFコンダクタンスの値は首都大ADRの試験結果と比べて若干



図 6.9:



図 6.10: OFF 時熱伝導度

図 6.11: ON 時熱伝導度



図 6.13: 必要なヒーターパワー

高いように見えるが、使用している温度計が異なること、測定誤差を考えるとほぼ同じと考えてよい。ON/OFF 温度は約10K でこれは以前の試験と同じ結果である。

6.3.3 4.2K 以下における HS1 号機の性能評価-2

今回の試験では、チャコールBOX に取付けていた熱アンカーの本数と長さのみを変更して、ON/OFF 時間スケールに変化があるかを測定した。また、OFF/ON コンダクタンスの再現性の確認、必要な ヒーター量の測定も行なった。

	表 6.3: AGGHS 1号機性的	能試験
試験 No	試験セットアップ	目的
1	Cu皮膜 NbTi 線 8 本 (7.5cm)	ON/OFF 時間測定

OFF コンダクタンスの測定結果は前回の試験結果の図 5.33 に一緒に載せてある。薄い青の点が今回の測定結果である。また、ON コンダクタンスの結果についても前回の試験結果の図 5.33 に一緒に載せた。4K NbTi 8 という青いプロットが今回の測定結果である。OFF、ON コンダクタンスともに前回の結果と一致していて再現性の確認がとれていることがわかる。また、ON/OFF 時間スケール、チャコール BOX を暖めるのに必要なヒーター量の測定結果を図??と図??に載せる。

この結果から ON/OFF 時間スケールは前回の約5分の結果から2分まで下がっていることがわかる。ここで、2回の試験結果をここでまとめておく。



⊠ 6.14:

6.3.4 考察

今回の試験をするに当たってはセッティングの図のように CPA ステージを断熱消磁して冷却を行 なった。減圧時からの CPA 単体試験で、周囲の輻射、配線など、HS 以外からの熱流入が約 1.3µ W 存在することが分かっている。しかし、今回の測定では、CPA の消磁スタートからの温度上昇速度 が、以前 PGGHS を使用していたときと同等かそれ以上の値を示した。つまり、CPA ステージに入っ てくる HS 由来の熱流入が、非常に大きい可能性がある。ここでは、まずその原因として考えられる NEEDLE、さらに熱アンカーからの熱流入について考察する。

HS Hot side への熱流入

AGGHS ON 時の性能評価の結果から、まず HS Hot side への熱流入を考える。チャコール BOX にある熱量 P_{charcoal} を与えるとその熱は、NEEDLE を伝って HS Hot side へ流れるか、熱アンカー (Cu 皮膜の NbTi 線) を伝って He タンクに流れるかのどちらかである。今、この関係を式と図に表す と図 6.3.4 と式 6.7、6.8 のように書くことが出来る。

ここで、今チャコール BOX に与える熱量 $P_{charcoal}$ と温度 T_{cha} 、 HS Hot side の温度 T_{Hot} 、 さら に G_{NEEDLE} が分かっているので、 G_{anchor} が分かる。

今、ON 時チャコール BOX を常に 15K まで暖めると仮定するとその際に HS Hot side へ入ってく る熱流入は熱浴温度 0.6K を仮定すると、P = $17 \times (15 - 0.6) = 244.8\mu$ W である。(SUS 熱伝導度 17 μ W を仮定) CPA が、励磁されて熱浴温度 (GGG 温度) に達するまでの時間を約 1 時間と仮定する と、その間に NEEDLE を介して AGGHS Hot side に流れ込む熱量は、P=244.8 $\mu \times 3600 = 0.88128$ J となる。これまでの冷却結果から GGG の吸熱量を約 4J とすると、CPA のサイクルを回しているに AGGHS から GGG に流れ込む熱量は、GGG 吸熱量の約 25% に当たる。これでは、2 段断熱消磁サ イクルに大きな影響を与えてしまうことになる。



図 6.15: チャコール BOX に与える 熱の流れ

図 6.16: チャコール BOX 温度とヒーターパワー、見積もられる熱伝導度

T_{cha}	P_{cha}	T_{cold}	G_{NEEDLE}	G_{anchor}
(K)	(μW)	(K)	$(T_{cha}-T_{cold})(\mu \mathbf{W})$	$(\mu W/K)$
15.6	1520	4.105	204.7(119.9)	114.4(119.8)
13.9	1190	4.144	174.4(128.4)	103.7(108.4)
12.9	995	4.141	156.6(115.3)	95.4(100.1)
11.8	818	4.136	137.0(100.8)	88.4(93.2)
10.8	676	4.137	119.3(88.8)	84.0(87.0)

熱アンカー位置の変更

上記した問題の解決方法として、熱アンカーの位置をNEEDLE に直接つける方法をとる。dADR に組み込んである AGGHS の NEEDLE は、そのコンポーネントの問題で NEEDLE のチャコール中 央から HS 側にしか、NEELDE をつけることが出来ない。したがって、今回は、その中央の位置で 熱アンカーを設置し出来るだけ HS Hot side へ熱が流れていかないようにする。その場合の熱の流れ は以下の図 5.33 のように書くことができる。ここで、NEEDLE 中央の位置の温度を T' とおいた。



図 6.17: チャコール BOX に与えた熱の流れ

ここで、上の熱の収支の図を式のように書くと以下のように書くことができる。

$$P_{cha} = P_{needle} + P_{anchor} + P_{HShot} \tag{6.9}$$

$$2G_{needle}(T_{cha} - T') = G_{anchor}(T_{bath} - T') + 2G_{needle}(T' - T_{bath})$$
(6.10)

$$T' = \frac{(G_{anchor} + 2G_{needle})T_{bath} - 2G_{needle} \times T_{cha}}{G_{anchor} + 4G_{needle}}$$
(6.11)

この値を、 $P_{HShot} = 2G_{needle}(T' - T_{bath})$ の T' に代入すれば、HS Hot side への熱流入が求まる。 ここで、使用する熱アンカーは Cu 皮膜の NbTi 線 7.5cm を使用するおと仮定して、それぞれのパラ メータの値を以下のように定める。

- $T_{cha} =$
- $G_{needle} =$
- $G_{anchor} =$

以上から、減圧ありのときと、無しの時では、HS Hot side への熱流入は以下のような値になる。

OFF 時 HS Hot side への熱流入

ON 時の熱流入は、上の方法を解決法としたが、上のような方法をとった場合、今度は OFF 時に 熱浴に繋いでいる熱アンカーを伝って HS Hot side へ熱が入ってきてしまう。この場合の熱流入につ いても検討する。まず、熱アンカーがない場合の熱流入を考える。この場合も減圧ありとなしの場合

表 6.4:			
$T_{bath}[\mathbf{K}]$	$T_{HShot}[\mathbf{K}]$	$T'[\mathbf{K}]$	P_{HShot}
4.2	0.6		
2.0	0.6		

で考察を行う。熱アンカーがないときには、チャコール BOX につないである配線によってチャコー ルの温度が常に熱浴と同じ温度になっていると考えられる。この時のHS Hot side への熱流入は、以 下の式 6.12 で表すことができる。

$$P_{HShot} = G_{needle} \times (T_{cha} - T_{HShot}) \tag{6.12}$$

	表 6.5:		
$T_{bath}[\mathbf{K}]$	$T_{HShot}[\mathbf{K}]$	P_{HShot}	
4.2	0.6		
2.0	0.6		

HS hot side が 0.6K だと仮定すると、

TMU-ADR におけるガス圧変化試験 6.4

HS1 号機に詰めたガス圧 86Torr に対して、詰めるガス圧を変えて別の AGGHS(以後2号機と呼ぶ) で同様の試験を行なった。ガス詰めは前回と同じ86Torr、10Torrの二種類で行い、それぞれ再現性 の確認、OFF コンダクタンスに変化が表れるかを確認することが目的である。

6.4.1 試験セットアップ

まず、表 6.6 に試験別のガス圧量、目的についてそれぞれまとめる。また、使用した温度計と配線 を表 6.7 に、セットアップ図と実際の写真を図 6.4.1、??に載せる。二回の試験ともセットアップは全 く同じ。

	衣 0.0: AGGHS	5 「亏饿性能武鞅
試験 No	ガス封入量	目的
3	ガス圧 10Torr	OFF コンダクタンス測定
4	ガス圧 87Torr	1号機の再現性の確認

までで、 ▲ ○ ○ Ⅱ ○ 1 □ 地址出計時

使用温度計		
抵抗ヒーター	設置場所	使用配線
Rx-202-3	HS 上部 (Cold Side)	コンスタンタン線
Rx-202-5	HS 上部 (Cold Side)	コンスタンタン線
Rx-202-2	HS下部 (Hot Side)	コンスタンタン線
Rx-202-4	チャコール BOX	Cu 皮膜 NbTi 線
Cx-1050-2	He タンク底面	コンスタンタン線
100 k Ω	HS 上部 (Hot Side)	コンスタンタン線
1.5 k Ω	チャコール BOX	Cu 皮膜 NbTi 線

表 6.7: 使用温度計、配置、配線





図 6.20: デュアーに導入した後の HS

図 6.19: 試験セッティング

6.4.2 試験結果

OFF コンダクタンスの結果を図 6.4.2 に、ON コンダクタンスの結果を図 6.4.2 に載せる。試験 3 の OFF コンダクタンスは前回とほぼ同程度の結果に対し、試験 4 の OFF コンダクタンスは、200Torr と 20 倍近く上がってしまっている。この原因については次の考察でまとめる。ON コンダクタンス の結果については、試験 4 では前回とほぼ同程度と確認ができた。しかし、試験 3 の結果は前回と比 ベてチャコール BOX 温度に対しての ON コンダクタンスが上がっているのが分かる。約 20K(チャ コール BOX) で 5mW ぐらいだが、このグラフを見ると ON コンダクタンスは上げ止まっておらず ON/OFF 温度がさらに上であると予想できる。また、それぞれの試験での ON/OFF 時間スケール 結果を図 6.4.2 と 6.4.2 に載せる。ただし、試験 3 の ON/OFF 時間スケールは、ON/OFF 温度が更 に上がると考えられるので、グラフよりもさらに上がる。試験 4 の結果は前回と同程度。また、試験 3 と試験 4 のチャコール BOX の同温度から下げ止まるまでの時間を比べると試験 4 のほうが短い。



6.4.3 考察

まず、OFF コンダクタンスが上がってしまった理由について考えてみる。



図 6.23: ON/OFF 時間スケール

図 6.24: ON/OFF 時間スケール

4.2 K 以下における試験

ガス圧変化試験

Charcoal box、NEEDLE の再設計

今後の課題

今後は、再設計した AGGHS を用いての性能評価試験を行う。それにより宇宙研二段式 ADR の要 求値に一号機より近づくことが確認された場合は ADR への組み込みの検討を行う。さらに、当初よ り目標にしているベスペルを用いた AGGHS の開発だが、課題がいくつか残ったままである。ひとつ として、接着剤の選定を行なう必要がある。現在のところ候補に上がっているのは Scotch Weld2216、 stycast 2850FT である。それぞれの接着材についてどれほどの GHe 透過性を持つのかリークレートを 正確に調べ、数値化する必要がある。さらには、ベスペルに巻く非常に薄いフォイルの検討 (SUS304 や Ti)、接着材 (熱伝導率の低いもの)、接着方法も合わせて検討が必要である。

参考文献

- M. J. DiPirro, P. J. SHirron, J. G. Tuttle, and E. R. Canavan "DESIN AND TEST OF PASSIVELY OPERATED HEAT SWITCHES FOR 0.2TO15 K" "American Institute of Physics" "2004"
- [2] I. Catarino , C. Paine "³He gas gap heat switch" "Cryogenics" "2011"
- [3] 篠崎慶亮"小レポート Passive Gas Gap Heat Switch のガス圧と熱伝導度""2008"
- [4] M.J.DiPirro, P.J.Shirron, J.G.Tuttle, and E.R.Canavan
 " DESIGN AND TEST OF PASSIVELY OPERATED HEAT SWITCHES FOR 0.2 TO 15 K" "2004"
- [5] 信貴 豊一郎・平井 章"低温工学ハンドブック""内田老鶴圃新社"
- [6] 吉田 弘之"多孔質吸着材ハンドブック""フジ・テクノシステム""2005"
- [7] 熊谷 寛夫"真空の物理と応用""裳華房"
- [8] http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/