

修士論文

X線マイクロカロリメータのための
低雑音信号処理の研究

東京都立大学大学院
理学研究科物理学専攻
宇宙物理実験研究室
道川 幸男

Contents

1	Introduction	8
1.1	X 線天文学	8
1.1.1	X 線天文学の歴史	8
1.1.2	X 線分光観測の意義	9
1.2	X 線分光器	9
1.2.1	放射線検出器のエネルギー分解能	9
1.2.2	従来の X 線検出器	10
1.2.3	新しい原理の X 線検出器	11
1.3	ASTRO-E 搭載 X 線マイクロカロリメータ:XRS が X 線天文学にもたらすもの	12
1.3.1	運動学	14
1.3.2	プラズマ物理	15
1.4	本修士論文の目的	15
2	カロリメータの原理	16
2.1	カロリメータの原理	16
2.2	カロリメータの動作	18
2.2.1	カロリメータの静特性	18
2.2.2	カロリメータの動特性	19
2.2.3	エネルギー分解能	22
2.3	X 線カロリメータの現状	26
2.3.1	ASTRO-E 搭載 XRS	26
2.4	X 線カロリメータの今後の課題	27
2.4.1	素子の均一化	27
2.4.2	エネルギー分解能	27
2.4.3	大面積化	27
2.4.4	イメージング	28
2.4.5	カウントレート	28
2.5	次世代のカロリメータ	28
3	カロリメータの静特性測定	31
3.1	bilinear カロリメータ	31

3.1.1	カロリメータの抵抗 – 温度特性・ロードカーブ	33
3.1.2	熱伝導度	37
3.1.3	カロリメータの動特性のパラメータの導出	38
4	半導体素子の動作について	43
4.1	JFET、バイポーラトランジスタの動作	43
4.1.1	JFET	43
4.1.2	バイポーラトランジスタ	46
4.2	JFET(2SK371)の雑音特性	49
4.2.1	測定方法	50
4.2.2	JFETの温度 – 雑音特性	51
4.2.3	ドレイン電流 – 雑音特性	52
4.2.4	まとめ	53
5	カロリメータ測定系の開発	54
5.1	冷却系	54
5.1.1	希釈冷凍機の原理	55
5.1.2	センサー	57
5.2	bufferの熱設計	58
5.2.1	設計	58
5.2.2	評価	62
5.2.3	XRSのバッファの熱設計	64
5.3	プリアンプ	65
5.3.1	設計	65
5.3.2	プリアンプの動作・雑音とその評価	67
5.4	カロリメータによるX線検出のための測定回路の製作	72
5.4.1	製作	72
5.4.2	評価	75
6	X線パルス測定	76
6.1	測定条件	76
6.1.1	X線源	76
6.1.2	カロリメータに関する最適設定	76
6.1.3	バッファに関する最適設定	78
6.2	測定	79
6.3	結果と検証	82
7	まとめと課題	85
7.0.1	まとめ	85
7.0.2	今後の課題	86

A	抵抗の熱雑音	87
B	種々の物質の熱伝導率	89
C	XRS FEA-CAP	90
D	OXFORD 社製希釈冷凍機 Kelvinox25 の構造とその操作手順	91
D.1	はじめに	92
D.2	構造	92
D.2.1	希釈冷凍機の原理の概要	92
D.2.2	Kelvinox Gas Handling Systems	96
D.2.3	$^3\text{He}/^4\text{He}$ Circulation System	96
D.2.4	Auxiliary Gas Handling System	96
D.2.5	Dump	97
D.2.6	Sliding Seal	97
D.2.7	Cold Trap	97
D.2.8	Needle Valve	97
D.2.9	IVC sorption pump(sorb)	97
D.2.10	Electric Wire	98
D.2.11	Thermometer	98
D.2.12	Heater	99
D.3	操作手順	103
D.3.1	試料のマウント	103
D.3.2	Kelvinox 25 insert(筒) の取り付け	103
D.3.3	sliding seal tube の挿入	103
D.3.4	初期設定	104
D.3.5	予冷	105
D.3.6	液体ヘリウム注入	107
D.3.7	循環運転	108
D.3.8	実験中	111
D.3.9	Warming up	111
D.3.10	sliding seal tube の引き上げ	112

List of Figures

1.1	エネルギー分解能の定義	10
1.2	Centaurus 銀河団のスペクトルの ASCA GIS(上・データ) と ASTRO-E XRS(下・シミュレーション) の比較。	13
1.3	種々の元素の蛍光 X 線を XRS で検出して得られたスペクトル	14
2.1	カロリメータの基本構造	16
2.2	カロリメータの温度変化	17
2.3	カロリメータの信号系	17
2.4	電氣的、熱的なパラメータ	20
2.5	Transition Edge Sensor(TES) の臨界温度付近での温度 - 抵抗関係	24
2.6	カロリメータ、ロード抵抗、バッファの雑音等価回路	25
2.7	ASTRO-G 搭載に向けた Transition Edge Sensor(TES)	30
3.1	Bilinear カロリメータのレイアウト	32
3.2	Bilinear カロリメータのピクセル	33
3.3	4 端子測定によるカロリメータの抵抗測定	33
3.4	pixel 1 温度 - 抵抗特性	34
3.5	pixel 3 温度 - 抵抗特性	34
3.6	pixel 1 温度 - 抵抗特性	35
3.7	pixel 3 温度 - 抵抗特性	35
3.8	pixel 1(左)、 pixel 3(右) のロードカーブ	36
3.9	pixel 1・3 の温度 - 熱伝導度特性	37
3.10	温度 - 熱容量	38
3.11	p1 の温度 - エネルギー分解能	40
3.12	p3 の温度 - エネルギー分解能	40
4.1	JFET の $V_{GS} - I_D$ 特性測定回路	44
4.2	JFET(2SK371) の液体窒素温度以上での、ドレイン電流 - ゲート・ソース間電圧	44
4.3	FFT アナライザによるゲイン測定	45
4.4	JFET の周波数 - ゲイン特性	46
4.5	バイポーラトランジスタの特性測定回路	46
4.6	2SC1815 の室温での $V_{BE} - I_B$ 特性 (上)、 $I_B - I_C$ 特性 (下)	48

4.7	2SC1815 の液体窒素温度での $V_{BE} - I_B$ 特性 (上)、 $I_B - I_C$ 特性 (下)	49
4.8	6×6 array の信号と各種ノイズの雑音スペクトル	50
4.9	FFT アナライザによる雑音測定	51
4.10	2SK371 の雑音の温度依存性	52
4.11	2SK371 の 96K と 140K での雑音	52
4.12	2SK371 の雑音の室温と液体窒素温度でのドレイン電流依存性	53
5.1	カロリメータの信号処理系	54
5.2	希釈冷凍機模式図	55
5.3	希釈冷凍機ダイアグラム	56
5.4	RuO ₂ 温度計のキャリブレーションカーブ	57
5.5	希釈冷凍機に組み込んだ JFET BOX の写真	58
5.6	希釈冷凍機に組み込んだ JFET BOX の模式図	59
5.7	JFET BOX の内部の模式図	60
5.8	ステンレス線とマンガン線の熱ポテンシャル	61
5.9	JFET BOX の温度:77K で、JFET で発生した各発熱量とそのときの JFET の温度	63
5.10	JFET BOX の温度:1.5K で、JFET で発生した各発熱量とそのときの JFET の温度	63
5.11	XRS:FEA(Front-End Assembly) の熱的な構成 (左) と JFET 周りの熱的な構成 (右)	64
5.12	XRS の JFET ボードで発生した各熱輸送の熱量と温度	65
5.13	プリアンプの初段	66
5.14	プリアンプの後段	66
5.15	差動増幅器の雑音源	67
5.16	OP アンプ増幅器の雑音源	69
5.17	プリアンプの雑音 (上) とゲイン (下)	71
5.18	プリアンプの入力に入れたテストパルス (上) と、出力波形 (下)	72
5.19	X 線検出のために作製した測定回路	73
5.20	JFET- アンプ間の入力 (アンプの input) 換算雑音レベル	75
6.1	カロリメータと ⁵⁵ Fe の X 線源を希釈冷凍機内の experimental plate に設置した様子	77
6.2	厚さ 20 μ m のシリコンの X 線透過率	77
6.3	カロリメータの発熱量と抵抗値	80
6.4	カロリメータの抵抗値と発熱量	80
6.5		83
6.6	⁵⁵ Fe5.9keV の X 線入射による信号のパルスハイト-カウント数 (パルスハイトはアンプの入力換算)	83
6.7	⁵⁵ Fe5.9keV の X 線入射による信号	84

A.1	抵抗の熱雑音計算のための等価回路	87
B.1	種々の物質の熱伝導率	89
C.1	FEA-CAP Single Functional Diagram	90
D.1	希釈冷凍機のデュワー部	91
D.2	希釈冷凍機全体のシステム	93
D.3	希釈冷凍機の俯瞰図	94
D.4	デュワー及び dilution unit	95
D.5	IVC 内部の主要な器官	95
D.6	fischer コネクターのピン番号	98
D.7	RuO ₂ 温度計のキャリブレーションカーブ	99
D.8	Kelvinox front panel	101
D.9	“Gas flow”、 ³ He、 ⁴ He ガスのダイアグラム	101
D.10	“Monitor”	102
D.11	“AVS”	102
D.12	筒を取り付ける順序	103
D.13	インジウムシールの貼り方	103
D.14	熱交換ガスを IVC に導入する時のセットアップ	106
D.15	トランスファーチューブによる液体ヘリウムの転送	108

List of Tables

3.1	bilinear ピクセルの 80mK での熱容量	38
3.2	バイアス電流の最適値と、そのとき Fe5.9keV の X 線に対して予想される p1 のパラメータ	41
3.3	バイアス電流の最適値と、そのとき Fe5.9keV の X 線に対して予想される p3 のパラメータ	41
5.1	dilution unit の各場所に設置された温度センサーと、その温度範囲	57
5.2	アルミニウム、銅の放射率	62
6.1	p1 のバッファロー・ロード抵抗のエネルギー分解能に対する寄与と、それらを含めたカロリメータのエネルギー分解能	78
6.2	X 線を検出するために設定した JFET に関するパラメータ	78
6.3	再設定したパラメータ値。バイアス電流 I_B によってカロリメータは、熱浴の T_B から T_{calo} まで上昇している。	81
D.1	各部の名称	94
D.2	dilution unit の各場所に設置された温度センサーと、その温度範囲	98
D.3	ヒーター	99
D.4	LED の色とその時のバルブの状態	109
D.5	Fill 1K Pot 終了時のバルブの状態	110
D.6	Condence in 終了時のバルブの状態	110
D.7	Circulate 終了時のバルブの状態	111
D.8	Warm 運転時のバルブの状態	112

Chapter 1

Introduction

この章では X 線天文学の歴史とその意義、従来の X 線検出器及び新しい原理の検出器のエネルギー分解能について簡単に説明する。また、高エネルギー分解能、高検出効率を持つ X 線カロリメータによって新たに X 線天文学にもたらすと期待されていることについて説明する。

1.1 X 線天文学

1.1.1 X 線天文学の歴史

X 線で宇宙を観測すると、可視光では見ることでできない宇宙の姿を見ることができる。数百万度から数億度の光温ガス、強い磁場、相対論的な速度で運動する粒子、強い重力の存在する天体などがその観測対象となる。例えば、中性子星やブラックホールといった星の進化の最後に作られる高密度星は、可視光では暗いが X 線で見ると降着物質が非常に明るく輝いている。星の最期の超新星爆発は星間空間に X 線で輝く高温プラズマの泡を作り出す。誕生直後の原始星も温度が高いため X 線を放出している。また、銀河から流れ出した高温プラズマの様子や、銀河団におけるダークマターの分布を、X 線を放出する高温プラズマの観測から解明することができる。

宇宙からの X 線は地球大気に吸収されてしまうため、X 線天文学は大気外での観測技術の成熟を待たなければならなかった。すなわち飛翔体 - 人工衛星の登場によりその幕を開けたのである。

X 線天文学は、1962 年、Giacconi らがロケット実験によりさそり座の方向に異常に明るい X 線天体 (Sco X-1) を発見したことから始まる。これをきっかけに、気球、ロケットなどの観測で新しい X 線源が続々と発見され、1970 年にはアメリカが最初の X 線天文衛星 Uhuru を打ち上げることとなる。その後、Einstein(アメリカ、1978 年打ち上げ)、ROSAT(ドイツ、1990 年打ち上げ)などを代表とする数々の X 線天文衛星の活躍により、宇宙におけるさまざまな高エネルギー現象についての解明がなされてきた。

日本においては、1979 年に最初の X 線天文衛星「はくちょう」が打ち上げられた。その後、「てんま」、「ぎんが」、そして 1993 年に打ち上げられ現在活躍中の「あすか」と 4 つの衛星

の打ち上げに成功し、さまざまな成果をあげてきた。「あすか」は2種類の検出器、撮像型のガス蛍光比例計数管 (Gas Imaging Spectrometer : GIS) と世界で始めて衛星に搭載された X 線 CCD カメラ (Solid-state Imaging Spectrometer : SIS) を持ち、0.4keV~10keV のイメージング、および分光観測を行う。そして、10keV まで撮像能力を持つこと、撮像能力とエネルギー分解能を兼ね備えた X 線 CCD カメラを搭載しているなど、これまでの X 線衛星にはない特徴を持つ。さらに、本格的な X 線反射望遠鏡を搭載することにより高感度ですぐれた分光撮像観測を行い、X 線天文学における新たな可能性を切り開いたと言える。現在は「あすか」による観測と並行して、2000年に打ち上げが予定されている ASTRO-E 衛星の開発が進められている。

1.1.2 X 線分光観測の意義

エネルギースペクトルは X 線観測において得られる主要な情報源である。エネルギー分解能は「あすか」の CCD 検出器で約 100eV であるが、さらに精度のよい検出器がどのような成果をもたらすかについて述べる。ここでは銀河団内の高温プラズマの解明を例にとって話を進める。

銀河団内に存在する $10^7 \sim 10^8$ K の高温プラズマは X 線で明るく輝いており、その中心領域でイオンと電子の温度は異なり非平衡状態にあると考えられる。電子温度は連続エネルギースペクトルを用いて決定できる。イオン温度はこれまで直接的に検出できなかったが、ランダム運動によるエネルギーのドップラー幅の測定から求めることができる。例えば温度 10keV の鉄イオンのエネルギー幅は $3.4\text{eV}(1\sigma)$ となり、 $5.1\text{eV}(1\sigma)$ 以下のエネルギー分解能の検出器によってイオン温度が決まる。

また、銀河団内でのガスの集団運動の速度が $\sim 150\text{km/s}$ であった場合、鉄ラインのドップラーシフトとして、速度の観測が可能となる。さらに、これまでの分解能では1つの輝線として見えていたスペクトルを原子の微細構造 (主量子数) による輝線のエネルギー差 ($10 \sim 20\text{eV}$) まで細かく分離することができ、その強度比からプラズマの密度や温度、元素組成、磁場などの物理量を直接的に求めることができる。この様に高エネルギー分解能の検出器の分光観測は様々な新しい物理量を与え、X 線天文学の新たな地平を切り開いて行くものと期待される。

1.2 X 線分光器

X 線天文学の進歩は、観測装置である X 線検出器の進歩なくしてはありえない。これまで宇宙 X 線観測に使われてきた主な X 線検出器を取り上げその検出器の、X 線分光における検出器の性能を評価する上で最も重要なファクターであるエネルギー分解能について述べる。

1.2.1 放射線検出器のエネルギー分解能

Fig.1.1はエネルギー E_0 の単色の X 線が入射したときに検出器に現われるであろう、パルスの波高分布を示している。ここで、横軸はエネルギーに換算している。半値幅 (FWHM) はピークの半分の高さにおける分布の幅で定義される。一般に検出器のエネルギー分解能 R は

$$R \equiv \frac{FWHM}{E_0} \quad (1.1)$$

のように定義される¹。

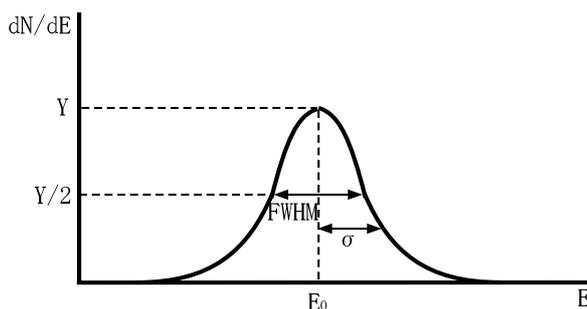


Figure 1.1: エネルギー分解能の定義

キャリアを用いた検出器では1個のX線光子によって生成したキャリアが N 個であるとき、キャリアの形成がポアソン過程であるとして N が大きい場合を考えるとFig.1.1の応答関数はガウス分布に従い、標準偏差は $\sigma = \sqrt{N}$ 、半値幅は $FWHM = 2.35\sqrt{N}$ となる。これによりキャリア数の統計的な揺らぎによるエネルギー分解能の限界値は

$$R_{poisson} \equiv \frac{FWHM}{E_0} = \frac{2.35}{\sqrt{N}} \quad (1.2)$$

になる。しかし、実際にはキャリアの生成過程がポアソン統計で表せないため、エネルギー分解能の限界値は

$$R_{統計} = 2.35\sqrt{\frac{F}{N}} \quad (1.3)$$

で表される。この F のことをファノ因子と呼び、一般に $F \leq 1$ である。

1.2.2 従来のX線検出器

[比例計数管]

これまで最もX線天文衛星に搭載された検出器はガス検出器の一種である比例計数管(PC)である。これは放射線がガス中を通過する際にその経路に沿ってガスを電離し、陽イオンと自由電子のイオン対をつくることを利用したもので、生成されたイオン対をガス増幅を用いて増やした後で電気信号として検出する。

放射線の通過によって作られた電子、イオンはガス中の電場によって電極に移動する。ガス中の電場が十分強く、電場によって加速された一次電子がガスのイオン化ポテンシャルを超えるエネルギーを得ると中性分子を電離する(二次電離)。二次電離によって生じた自由電子も中性分子を電離し、最終的には電子なだれが生じて大きな電気信号を取り出すことができる。比例計数管は数十keVまでのX線に対して高い検出効率を持ち、大面積の検出器を作ることも容易であ

¹本論文では式(1.1)で定義される R の他にエネルギー分解能としてFWHMも用いる。

る。さらに応答が速く (\sim 数 μsec)、時間分解能が優れていることもあって X 線天文学の初期から現在に至るまで、数機の衛星に搭載されている。

比例計数管では二次電子の揺らぎが大きいため、一般にエネルギー分解能は悪い。二次電子の揺らぎを取り込んで、入射放射線のエネルギーを E 、イオン対一個を作るのに必要なエネルギーを W 、ファノ因子を F として式 (1.3) を書き直すと

$$R_{\text{統計}} = 2.35 \sqrt{\frac{W(F+b)}{N}} \quad (1.4)$$

と表すことができる。この b が電子なだれの理論的予測から導かれる定数で、0.4 ないし 0.7 という値をとる。比例計数管で典型的な値 $W=35\text{eV}$ 、 $F=0.2$ 、 $b=0.6$ を用いると 6keV でのエネルギー分解能の限界値は 16% と求まる。これはエネルギーでいうとおよそ 1keV にあたる。これは代表的な比例計数管の一つである日本で 3 番目の X 線天文衛星:Ginga の LAC(Large Area Counter) のエネルギー分解能の 20%(6keV) を良く説明している。

[ガス蛍光比例計数管]

比例計数管はガス増幅を用いるため、良いエネルギー分解能が得られない。そこで、ガスにかける電界を弱くして、ガス増幅を起こさない状態で動作させる検出器がガス蛍光比例計数管(GSPC)である。これはガス原子 / 分子は入射 X 線によって生じた一次電子で励起され、基底状態に戻る際に光子を放出することを利用するものである。一個の一次電子が繰り返しガス原子を励起するので最終的に数百個の光子が生成される(光子増幅)。光子増幅によって生じた光子は光電子倍增管に入射し、もう一度電子に変換・増幅される。

この検出器のエネルギー分解能の限界値は式 (1.3) で与えられる。 $W=35\text{eV}$ 、 $F=0.2$ とすると 6keV でのエネルギー分解能は 8% になる。これは 480eV に相当し、現在活躍中の ASCA のガス蛍光比例計数管 GIS のエネルギー分解能とほぼ一致する。

[半導体検出器]

ガス検出器では一つのキャリアを生成するのに $20\sim 30\text{eV}$ のエネルギーを必要としたため、入射放射線に対して生成されるキャリア数が限られ、エネルギー分解能は 6keV で 10% 程度である。半導体検出器は pn 接合に逆バイアスをかけた際に生じる空乏層を放射線が通過したときに生成されるホール・電子対を用いてそのエネルギーを測定する。一個のホール・電子対を生成するのに必要なエネルギーは Si で 3.65eV 、Ge で 2.96eV と、ガスに比べると一桁小さい。したがって非常にエネルギー分解能の高い検出器を作ることができる。Si を用いた半導体検出器の場合、ファノ因子は 0.1 程度であるから、エネルギー分解能は 6keV で 1.8%、 110eV が期待される。実際にはこれに検出器自体の持つ容量、リーク電流による読み出し回路系の雑音が加わり、X 線 CCD を用いた ASCA SIS では 6keV で 2% というこれまでにない優れたエネルギー分解能を有する。

1.2.3 新しい原理の X 線検出器

光子の絶対数が少ない宇宙 X 線観測用の高分解能分光器としては非分散系で、かつ従来の半導体検出器を上回る分解能の検出器が必要である。この様な新しい X 線検出器として主に超電導

トンネル接合素子とカロリメータの開発が進められている。

[超電導トンネル接合検出器 (Superconducting Tunnel Junction: STJ)]

STJは2枚の超電導体で薄い絶縁層を挟んだ構造をしている。金属超電導体のエネルギーギャップ(クーパー対を完全に破壊するのに必要なエネルギーに相当)はmeVのオーダーである。STJにX線フォトンが入射すると光電吸収によって電子が作り出される。生成された電子は約1meVのわずかなエネルギーでクーパー対を完全に破壊できるので多量の準粒子(quasi-particle)が生成される。この準粒子をキャリアとしてエネルギーを測定するのがSTJ検出器である。この検出器ではキャリア数が非常に多いのでエネルギー分解能が高い。理論的には6keVのX線に対して数eVのエネルギー分解能が達成可能で、現在までに29eVのエネルギー分解能を持つ素子が開発されている。またSTJは、大面積化²が可能で位置分解能を持たせることができるといった特長を持つ。また、超電導臨界温度よりも十分低温であれば動作し、0.3Kでも問題なく動作するといった利点も持つ。

[カロリメータ]

X線のエネルギーを温度上昇として測定する検出器である。数mKの温度上昇を測定するために、極低温で動作させなければならない。フォトン入射によって生じるフォノン数の統計的な揺らぎは小さいので、この検出器のエネルギー分解能の限界値は内部エネルギーのフォノン数の揺らぎによって決まり、動作温度 T 、X線を吸収するための吸収体の熱容量 C を用いると

$$\Delta E \sim \sqrt{k_B T^2 C} \quad (1.5)$$

で表すことができる。0.1K程度の動作温度で6KeVのX線に対して10eV程度のエネルギー分解能を達成するものができており、前にも述べたように日本の次期X線天文衛星ASTRO-Eに搭載される。X線の吸収体の材質には特に制限がないため、原子番号の大きな物質を用いれば高エネルギーのX線に対しても検出効率を向上させることが可能となる。カロリメータについては次章で詳述する。

1.3 ASTRO-E搭載X線マイクロカロリメータ:XRSがX線天文学にもたらすもの

ASTRO-E XRSがASCA SISを1桁上回る $\sim 10\text{eV}$ のエネルギー分解能を達成するということは前に述べたが、ここでは、これまでの検出器とXRSの性能を比較するために、Cnetaurus銀河団のASCA GISによって観測されたデータをもとに解析したスペクトルと、XRSで予想されるスペクトルのシュミレーションをFig.1.2³に示す。XRSのエネルギー分解能では、GISのエネルギー分解能の低さのためになまってみえる K_α 輝線が、電子の遷移に応じて共鳴線や禁制線といった細かい輝線に別れて見えるようになる。また、輝線が分離して見えるようになる結

²カロリメータと比較して

³図提供: 古庄多恵氏(東京都立大)

果、観測された輝線のエネルギーと元のエネルギー（静止系でのエネルギー）を比較することにより、観測対象の Doppler Shift を知ることができる。

また、X線発生装置で発生させたX線を様々な元素に当て、出てきた蛍光X線をXRSで検出して得られたスペクトルを Fig.1.3⁴ に示す。このように K_{α} 線、 K_{β} 線はおろか $K_{\alpha 1}$ 線、 $K_{\alpha 2}$ 線が分離して見える元素もあることがわかる。

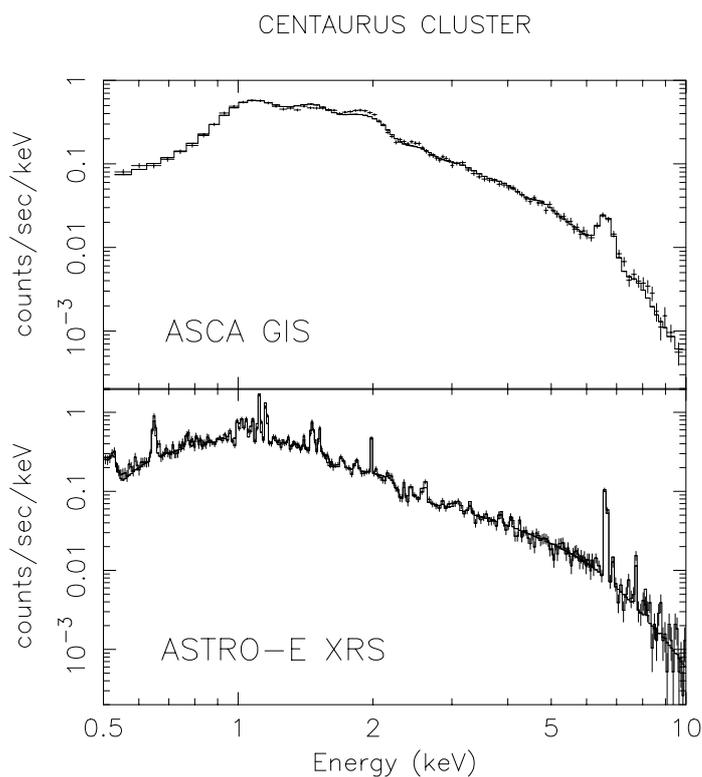


Figure 1.2: Centaurus 銀河団のスペクトルの ASCA GIS(上・データ)と ASTRO-E XRS(下・シュミレーション) の比較。

⁴NASA GSFCにて測定された。図提供: 石崎 欣尚 (東京都立大)

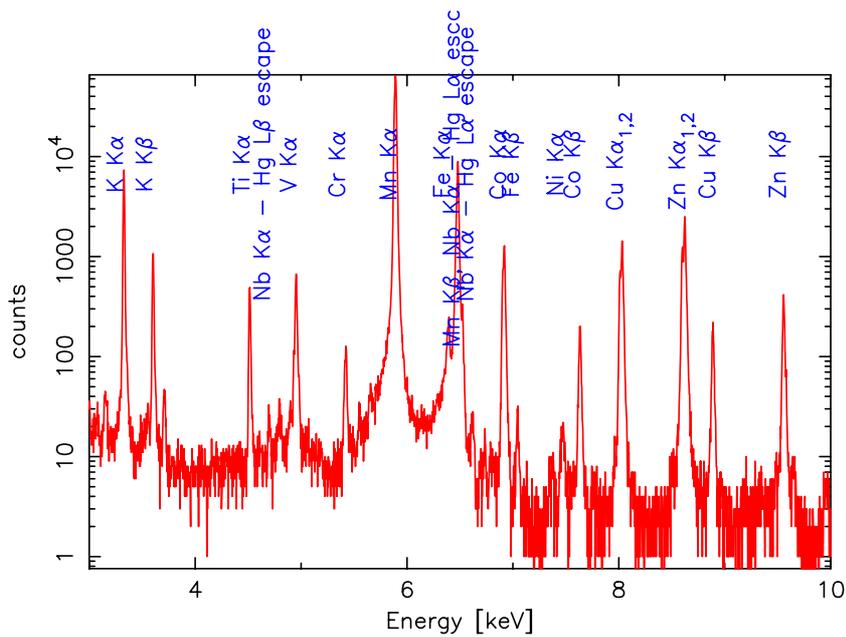


Figure 1.3: 種々の元素の蛍光 X 線を XRS で検出して得られたスペクトル

この高いエネルギー分解能で得られるであろう成果の一例を以下に述べる。

1.3.1 運動学

[距離の測定]

1929年に発見されたハッブルの法則、すなわち

$$cz = H_0 r \quad (1.6)$$

を用いれば、観測した赤方偏移から距離を測定することが可能となる。ここで、式 (1.6) の c 、 z はそれぞれ光速、視線方向の赤方偏移を、 r は距離を表す。また H_0 はハッブル定数で現在の実測値は $50 \leq H_0 \leq 100$ である。

10eV 程度のエネルギー分解能があれば、輝線の数 eV のずれを測定することができ、6keV 付近の鉄の輝線でこのエネルギーシフトを観測することができれば、ハッブルの法則からおよそ 1Mpc の精度で距離を測定することができる。

[固有運動の測定]

輝線のエネルギーを数 eV の精度で観測できれば、約 100km/s の固有運動を観測することができる。これは、ブラックホールなどの連星系での公転速度と同程度である。したがってこのエネルギーシフトを観測することにより高密度天体の質量を X 線だけで直接観測することが可能である。

1.3.2 プラズマ物理

ASCA GIS・SIS のエネルギー分解能では輝線の分離が不十分なため、プラズマからの X 線スペクトルを理論的なモデルと比較して議論している。しかし、XRS のエネルギー分解能では各元素の存在比、電離状態をスペクトルから直接求めることができるようになる。これによって例えば II 型超新星残骸からは、超新星爆発よりもずっと過去の星の中の元素の存在比の情報を得ることができる。このような観測を様々な超新星残骸からについてすることにより確な超新星の分類が行われ、星の進化理論に大きく寄与することが期待される。また、Star Burst 領域には特徴的に 2keV 以下の軟 X 線の輻射が存在し、この輻射を XRS の高いエネルギー分解能で観測すれば超新星残骸からの X 線輻射の寄与を見積もることが可能になり、X 線のみを観測から Star Burst を検出することが可能になるであろう。

1.4 本修士論文の目的

以上見てきたようにカロリメータは従来の検出器と比較して、X 線領域で高い感度とエネルギー分解能を両立する優れた検出器である。しかし、一般にカロリメータの信号は微小で、信号処理系のバッファやアンプ等の雑音がエネルギー分解能に大きく寄与してくるために、回路系全体が低雑音である必要がある。どれだけ優れた素子でもそのための回路系が低雑音でなければ、素子の性能を十分に引き出すことはできない。そこで、これまでにカロリメータの信号検出のための低雑音測定系の研究をしてきた。本論文ではそうして最適化された測定回路系の開発を論じる。

Chapter 2

カロリメータの原理

この章では X 線カロリメータの動作原理、性能について説明する。また、X 線検出器として世界で初めて実際の観測に使用される ASTRO-E のカロリメータ XRS を概観するとともに、その問題点から次世代のカロリメータに必要とされる性能を考える。

2.1 カロリメータの原理

カロリメータの基本的な構造を Fig.2.1 に示す。

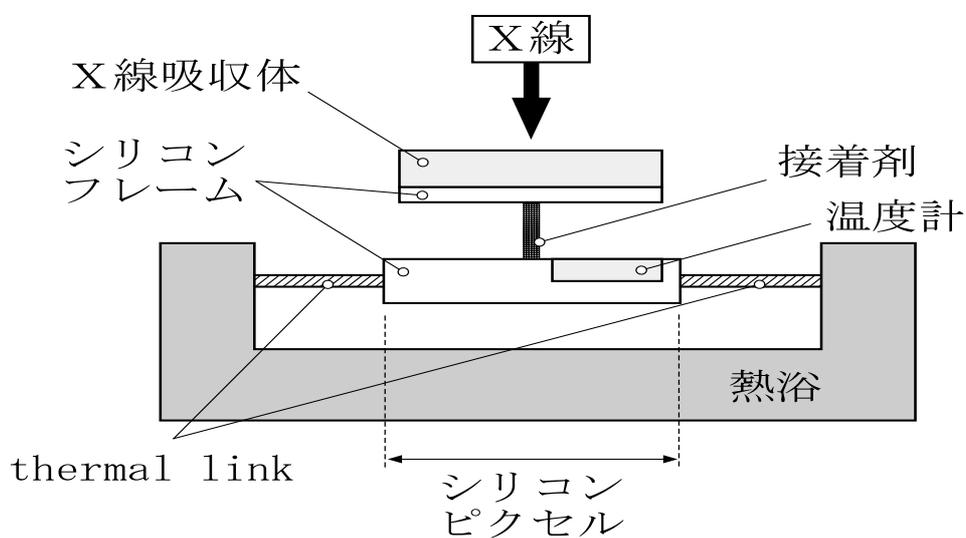


Figure 2.1: カロリメータの基本構造

吸収体に入射した X 線光子は光電効果によって吸収され、そのエネルギーのほとんどが熱に変換される。そのとき生じた温度上昇を温度計で測定する。通常温度計としては Si に B をドーピングしたもの等を用いる。また、吸収体を十分熱化するために、吸収体と温度計の間は適度に

熱伝導度を悪くする必要がある。吸収体で生じた熱は、熱伝導度を適度に調節した thermal link を通して熱浴に逃げていく。この温度計で観測される温度変化は Fig.2.2 のようになる。X 線の入射により steep な温度上昇をし、吸収体の比熱と thermal link の熱伝導度とで決まる時定数で decay することになる。このときの時定数は典型的に 1msec であり、温度上昇 ΔT は入射光子のエネルギーに比例する。

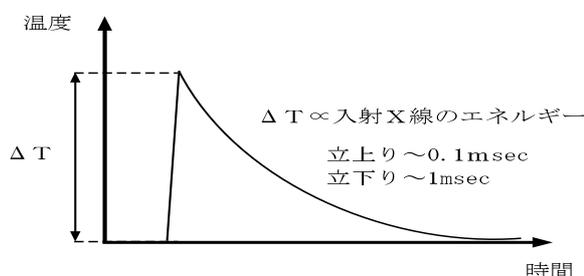


Figure 2.2: カロリメータの温度変化

一般に、半導体を使用した温度計では温度が上昇すると抵抗が小さくなる。この抵抗の変化を測定するための回路を Fig.2.3 に示す。動作温度においてカロリメータ (温度計) の抵抗は数十 M Ω になる。これと直列に数十 ~ 数百 M Ω のロード抵抗を入れて、カロリメータに流れる電流を一定にするようにする。従って、X 線光子の入射により温度計の抵抗が減少し、カロリメータにかかる電圧の変化を信号として測定することができる。このときのカロリメータを流れる電流は典型的に数十 nA 程度である。カロリメータ自体の抵抗が大きいため、信号のインピーダンスは非常に高くなる。従って、電送途中での信号のロスを防ぐためにできるだけ検出器に近い段階にバッファーを入れ、インピーダンス変換をしなければならない。この段階の出力電圧は数十 ~ 数百 μV と小さいのでゲインの大きなアンプで増幅した後信号処理を行う。

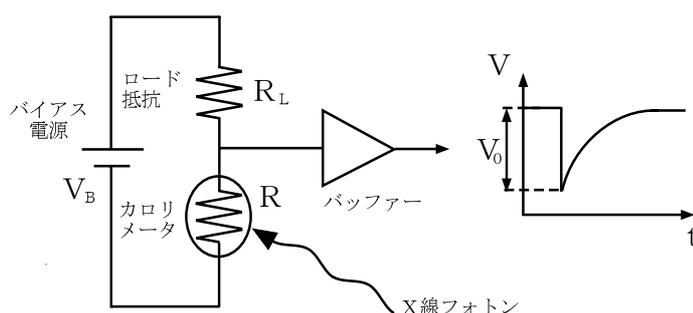


Figure 2.3: カロリメータの信号系

カロリメータのエネルギー分解能は内部エネルギーの揺らぎで決まる。カロリメータの熱容量を C 、ボルツマン定数を k_B とすると、フォノンモード数は $N=CT/k_B T=C/k_B$ と表される。

したがって、定常状態でのフォノンモード数の揺らぎは

$$\sqrt{N} = \sqrt{\frac{C}{k_B}} \quad (2.1)$$

程度になる。一方、エネルギー E の光子がカロリメータに入射した場合に励起されるフォノンモード数は $n=E/k_B T$ で表され、その揺らぎは

$$\sqrt{n} = \sqrt{\frac{E}{k_B T}} \quad (2.2)$$

程度である。典型的なカロリメータでは $T=0.1\text{K}$ のとき、 $C=10^{-13}\text{J/K}$ 程度になるので

$$\sqrt{N} \sim 1 \times 10^5 \text{個} \quad (2.3)$$

$$\sqrt{n} \sim 1 \times 10^4 \text{個} \quad (2.4)$$

となり、 N の揺らぎの方が大きいことがわかる。ここで (2.12) を計算する際、 $E=1\text{keV}$ を仮定した。以上のことと、フォノンモード 1 個当たりの平均エネルギーが $k_B T$ であることを用いるとカロリメータの内部エネルギーの揺らぎが

$$\Delta U \sim \sqrt{N k_B T} = \sqrt{k_B T^2 C} \quad (2.5)$$

程度になることがわかる。エネルギー分解能も (2.5) と同様になり、後に紹介する XRS では、 $T=65\text{mK}$ で 10eV 程度である。以上から明らかなように、通常カロリメータのエネルギー分解能は入射 X 線のエネルギーには依存しない¹。

2.2 カロリメータの動作

この節ではカロリメータの動作を詳述し、X 線を検出するために必要な条件を求める。

2.2.1 カロリメータの静特性

[抵抗の温度依存性]

カロリメータに流れる電流を I 、そのときのカロリメータの両端の電圧を E とするとカロリメータの抵抗 $R(\equiv E / I)$ は温度依存性を持つ。動作点の近傍では

$$R = R_0 T^{-A} \quad (2.6)$$

と近似することが可能である。ここで、 R_0 は温度が 1K のときの抵抗値であり、 A は温度計の感度を表す係数で、 A の値が大きい程良い温度計である。

¹式 (2.12) のようにフォトンの入射によって生じるフォノン数の統計的なゆらぎよりも、フォノンのランダム運動に起因するゆらぎの効果の方が大きいため。

[ロードカーブ]

熱浴の温度を固定した状態で、カロリメータに流す電流 I を変化させながらカロリメータの両端に生じる電圧 E を測定する。この測定により求まるカロリメータの I - E 特性 (ロードカーブ) を用いると、カロリメータの抵抗 R 、dynamic resistance $Z(\equiv dE / dI)$ 、消費電力 $P(\equiv EI)$ を I の関数として表すことができる。これを (2.39) の R の測定値と比較することにより、 I 、 R 、 Z 、 P をカロリメータの温度 T の関数として表すことができる。また

$$H \equiv \frac{d \log P}{d \log R} \quad (2.7)$$

のように slope parameter H を定義すると

$$H = \frac{d \log E + d \log I}{d \log E - d \log I} = \frac{Z + R}{Z - R} \quad (2.8)$$

と表される。一方、熱伝導度 $G(\equiv dP/dT)$ および (2.39) を利用すると

$$H = -\frac{GT}{PA} \quad (2.9)$$

となる。(2.8)、(2.9) を用いることによって、ロードカーブから熱伝導度 G を求めることができる。

2.2.2 カロリメータの動特性

静特性のところでも導入した各変数は、カロリメータに与えられるエネルギーの時間変化に対して周波数依存性を持った応答を示す。それで、以下ではカロリメータのエネルギー変化の角周波数 ω に対する dynamic resistance、slope parameter、熱伝導度応答をそれぞれ $Z(\omega)$ 、 $H(\omega)$ 、 $G(\omega)$ 、と定義する。すると静特性のところでも定義した Z 、 H 、 G はそれぞれ

$$Z \equiv Z(0) \quad (2.10)$$

$$H \equiv H(0) \quad (2.11)$$

$$G \equiv G(0) \quad (2.12)$$

である。ここでは $Z(\omega)$ 、 $H(\omega)$ 、 $G(\omega)$ および responsivity $S(\equiv dE/dQ)$ の ω 依存性を求め、photon が入射したときのカロリメータの応答を求める。しかし、いかでは R が ω 依存性を持たないもの仮定する。

[$Z \cdot H \cdot G$]

電流 I を固定した状態でエネルギー $Q(\ll P)$ の photon がカロリメータに入射したとする。このとき $W \equiv P + Q$ を用いて $H(\omega)$ は

$$H(\omega) \equiv \frac{d \log W}{d \log R} \quad (2.13)$$

のように定義される。ここで $Q \ll P$ であることから $d \log W = d \log P$ とすると

$$H(\omega) \equiv \frac{Z(\omega) + R}{Z(\omega) - R} \quad (2.14)$$

となる。また $G(\omega)$ の定義は

$$G(\omega) \equiv \frac{dW}{dT} \quad (2.15)$$

である。これと Fig. 2.4 のような、カロリメータに関わる電氣的・熱的な種々のパラメータからエネルギーバランスを考えると

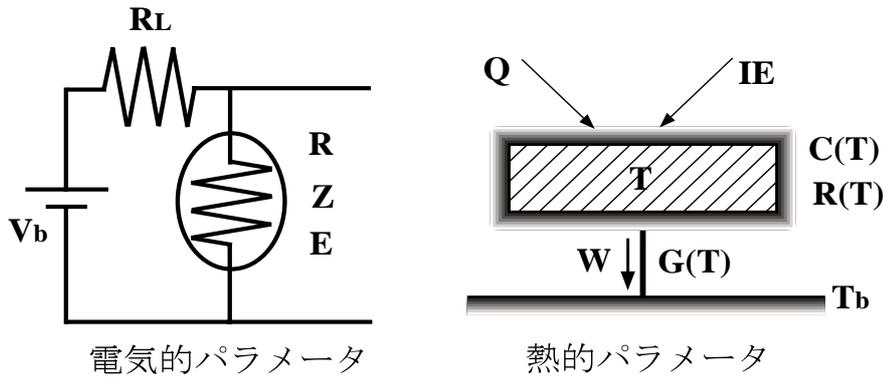


Figure 2.4: 電氣的、熱的なパラメータ

$$C \frac{dT}{dt} + G(T - T_b) = W \quad (2.16)$$

で表されることから (T_b は熱浴の温度)

$$G(\omega) = G(1 + i\omega\tau) \quad (2.17)$$

のように G の ω 依存性が求まる。ここで $\tau \equiv C/G$ は physical time constant と呼ばれる量で、カロリメータの構造と動作温度だけで決まる量である。また (2.13) から

$$H(\omega) = \frac{1}{I^2} \frac{dW}{dR} \quad (2.18)$$

$$= -\frac{T}{PA} G(\omega) \quad (2.19)$$

$$= H(1 + i\omega\tau) \quad (2.20)$$

であることがわかる。一方、(2.14) から

$$Z(\omega) = R \frac{H(\omega) + 1}{H(\omega) - 1} \quad (2.21)$$

が得られ、これと (2.20) の結果を合わせると

$$Z(\omega) = R \frac{1 + i\omega\tau + \frac{1}{H(\omega)}}{1 + i\omega\tau - \frac{1}{H(\omega)}} \quad (2.22)$$

のように $Z(\omega)$ の ω 依存性が求まる。

[Responsivity S]

カロリメータの両端子から見た測定回路の dynamic resistance を

$$Z_L(\omega) \equiv -\frac{dE}{dI} \quad (2.23)$$

のように定義する。このとき (2.13) から

$$H(\omega) = \frac{1}{I^2} \frac{d(EI + Q)}{d\frac{E}{I}} \quad (2.24)$$

$$= \frac{IdE + EdI + dQ}{IdE - EdI} \quad (2.25)$$

$$= \frac{1 + \frac{R}{Z_L} + \frac{1}{IS(\omega)}}{1 + \frac{R}{Z_L}} \quad (2.26)$$

となるのでこれと (2.14) とを合わせて

$$S(\omega) = \frac{1}{2I} \frac{Z_L(\omega)}{R} \frac{Z(\omega) - R}{Z(\omega) + Z_L(\omega)} \quad (2.27)$$

のように responsivity S の ω 依存性が求まる。

[パルス応答]

ここではエネルギー Q の X 線 photon が入射したときの出力電圧の時間変化を求める。しかし以下では簡単のために $Z_L(\omega) = R_L$ (ロード抵抗) とし、 R_L は ω 依存性を持たないものとする。このとき (2.27) から

$$S \equiv S(\omega) = \frac{1}{2I} \frac{R_L}{R} \frac{Z - R}{Z + R_L} \quad (2.28)$$

で定義される S を用いて

$$S(\omega) = S(0) \frac{1}{1 + i\omega\tau_e} \quad (2.29)$$

と表すことができる。ここで τ_e は

$$\tau_e \equiv \frac{H(R_L + R)}{R_L(H - 1) + R(H + 1)} \tau \quad (2.30)$$

$$= \frac{(Z + R)(R + R_L)}{2R(Z + R_L)} \tau \quad (2.31)$$

で表される量で、(2.34)に示されるように実際に測定されるカロリメータの時定数を表す。一般に τ_e は τ 異なるが、これはカロリメータの抵抗 R の温度依存性によって電氣的なフィードバックがかかるためである。したがって τ_e は τ よりも小さくなる。この $S(\omega)$ を用いるとカロリメータの出力電圧 E の微小変化分 V が周波数空間で

$$V(\omega) = S(\omega)Q \quad (2.32)$$

と求まる。これから V が時間空間で

$$V(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega)Qe^{i\omega t} d\omega \quad (2.33)$$

$$= Q \frac{S}{\tau_e} e^{-\frac{t}{\tau_e}} \quad (2.34)$$

のように表される。

2.2.3 エネルギー分解能

次にカロリメータのエネルギー分解能について考える。photonによって生じるフォノン数が非常に大きいので、カロリメータのエネルギー分解能は半導体検出器のようにキャリア数の統計的な揺らぎではなく、フォノンのエネルギーの揺らぎによって決まる。以下ではフォノンエネルギーの揺らぎや熱雑音によって検出器、測定回路で生じた雑音をカロリメータへの入射エネルギーに換算したNEP(Noise Equivalent Power)を用いて評価する。ここで、NEPの直流成分と雑音電圧 $e_n[V/\sqrt{Hz}]$ の間には

$$\text{NEP}(0) = \frac{e_n}{S(0)} \quad (2.35)$$

という関係が成り立っている。

[カロリメータの温度特性]

ここでは雑音を評価するために必要な、カロリメータの温度特性についてのいくつかの仮定を示す。今、温度 T_B の熱浴に熱伝導度 $G(\text{W/K})$ で接しているカロリメータを考える。このカロリメータに電流 I を流して動作させるとき、動作温度 T は常に $T > T_B$ の関係を満たしている。従って $\theta \equiv T/T_B > 1$ である。

また、物質の熱容量は低温では温度の γ 乗に比例する。その γ は物質による定数で、結晶では3、金属では1である。このことから温度 T_B での熱容量を C_0 とすると動作温度での吸収体の熱容量は

$$C = C_0\theta^\gamma \quad (2.36)$$

のようになる。また熱伝導率 k は平均粒子速度 v 、平均自由行程 l を用いて

$$k = \frac{1}{3}Cvl \quad (2.37)$$

と表すことが出来るから、温度変化に対して v 、 l の変化が無視できるほど小さいとすると温度 T では

$$G = G_0 \theta^\beta \quad (2.38)$$

である。ここで G_0 は温度 T_B での thermal link の熱伝導率、 β は thermal link の材質で決まる定数で γ 同様、結晶では 3、金属では 1 である。そして温度 T_B の近傍での温度計の抵抗は、 T_B のときの抵抗値 R_0 を用いて

$$R = R_0 \theta^{-A} \quad (2.39)$$

のように近似される。

[カロリメータ自身の雑音]

理想的なカロリメータで生じる雑音は次のように表される。

$$NEP^2 = NEP_{Johnson}^2 + NEP_{phonon}^2 \quad (2.40)$$

このうち $NEP_{Johnson}^2$ はカロリメータの抵抗によって生じる熱雑音で、 NEP_{phonon}^2 はカロリメータの内でのフォノンのエネルギーの揺らぎによって生じる雑音である。 NEP_{phonon}^2 および $NEP_{Johnson}^2$ は

$$NEP_{phonon}^2 \equiv N_1 = 4k_B G T^2 \frac{\int_{T_C}^T \left(\frac{tk(t)}{Tk(T)} \right)^2 dt}{\int_{T_C}^T \left(\frac{k(t)}{k(T)} \right)^2 dt} \quad (2.41)$$

$$NEP_{Johnson}^2 \equiv N_2 (1 + \omega^2 \tau^2) = 4k_B T P \left| \frac{Z + R}{Z - R} \right|^2 (1 + \omega^2 \tau^2) \quad (2.42)$$

のように表される。ここで、(2.42) の ω の項は Responsitivity $S(\omega)$ のために生じたものである。このときエネルギー分解能は

$$\Delta E = 2.35 \left(\int_0^\infty \frac{4df}{NEP^2(f)} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.43)$$

で表され、 N_1 、 N_2 を用いると

$$\Delta E = 2.35 \tau^{\frac{1}{2}} [N_2 (N_1 + N_2)]^{\frac{1}{4}} \quad (2.44)$$

とすることができる。

次に (2.36)、(2.39)、(2.40)、を用いて (2.41)、(2.42) を変形する。 $G \equiv dP/dT$ と (2.39) とから

$$P = GT \frac{1 - \theta^{-1(1+\beta)}}{1 + \beta} \quad (2.45)$$

という結果が得られる。これと (2.8)、(2.9) とを用いると

$$N_2 = 4k_B T P \left(\frac{GT}{PA} \right)^2 \quad (2.46)$$

$$= 4k_B T_B^2 \theta^2 \frac{G(1+\beta)}{A^2[1-\theta^{-(1+\beta)}]} \quad (2.47)$$

となる。また (2.36)、(2.39)、(2.40) から

$$N_1 = 4k_B T_B^2 \theta^2 \frac{G[1-\theta^{-(3+2\beta)}](1+\beta)}{(3+2\beta)[1-\theta^{-(1+\beta)}]} \quad (2.48)$$

と計算できる。これら 2 式を (2.43) に代入すると

$$\Delta E = 2.35\xi\sqrt{k_B T_B^2 C_0} \quad (2.49)$$

という結果が得られる。ここで

$$\xi = \left[\frac{4(1+\beta)\theta^{2+\gamma}}{A^2(1-\theta^{-(1+\beta)})} \left(1 + \frac{1-\theta^{-(3+2\beta)}A^2}{3+2\beta} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.50)$$

である。この ξ の表式中、 β 、 γ はカロリメータの材質で決まる量であり、 A は温度計に固有な定数であるから $\xi = \xi(\theta)$ である。従って

$$\frac{d\xi}{d\theta} = 0 \quad (2.51)$$

を解いて ξ が最小になる θ を求めれば、カロリメータの動作条件を最適化することができる。一般に $A > 2$ であれば ξ はほとんど A によらず 1 ~ 3 の値をとる。

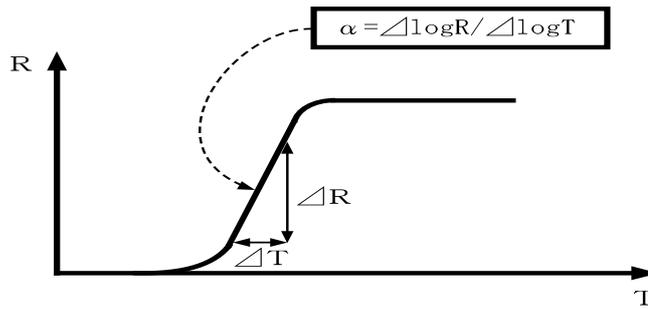


Figure 2.5: Transition Edge Sensor(TES) の臨界温度付近での温度 – 抵抗関係

一方、式 (2.50) は $\xi \propto 1/\sqrt{\alpha}$ と近似できるため、エネルギー分解能は $\Delta E \propto 1/\sqrt{\alpha}$ となり、 α の大きい温度計を使用すればエネルギー分解能は飛躍的に向上する。そこで、この α に注目したのが 2.5 で述べる Transition Edge Sensor(TES) である。この温度計は、超電導から常伝導に遷移する際の急激な抵抗値の温度変化を利用して、その温度上昇を測定するセンサーである。

TESの超電導臨界温度付近での抵抗-温度の変化の様子を Fig.2.5に示す。電導臨界温度付近では Fig.2.5のように抵抗値が急激に変化するためこのときの $\alpha(\equiv d\log R/d\log T)$ を用いるのがこのセンサーの特色であり、原理的には $\alpha > 1000 \sim 2000$ でエネルギー分解能 1eV を切ることも可能である。

[バッファ、ロード抵抗の雑音]

カロリメータ、ロード抵抗及びバッファの雑音等価回路を Fig.2.6に示す。ここで、 $Z(\omega)$ はカロリメータの、 Z_L はロード抵抗の dynamic resistance を表し、 i_L 、 i_B はそれぞれロード抵抗、アンプの電流性の雑音を、 e_B はバッファの電圧性の雑音を表す。

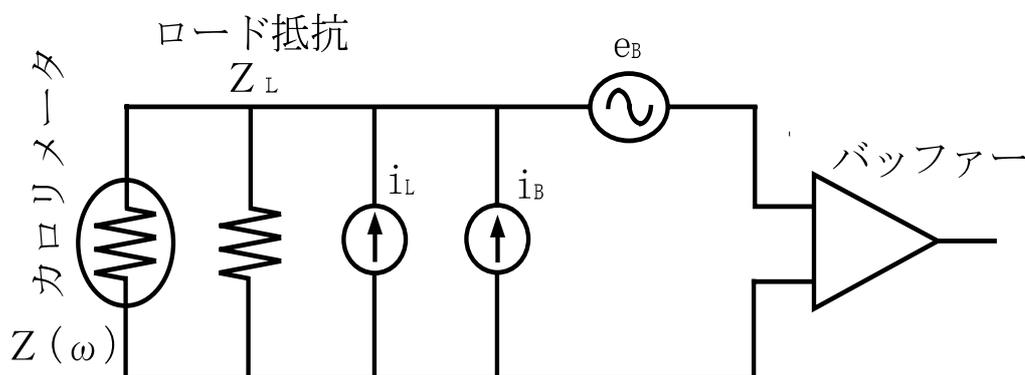


Figure 2.6: カロリメータ、ロード抵抗、バッファの雑音等価回路

このときのロード抵抗の雑音は NEP で

$$NEP_{load}^2 = \frac{4k_B T_L}{Z_L} \left| \frac{2ZI}{\frac{Z}{R} - 1} \right|^2 \left[1 + \omega^2 \tau^2 \left(\frac{Z+R}{2Z} \right)^2 \right] \quad (2.52)$$

$$= \frac{4k_B T_L}{Z_L} R^2 I^2 H^2 \left[\left| 1 + \frac{1}{H} \right|^2 + 2\omega^2 \tau^2 + \omega^4 \tau^4 \right] \quad (2.53)$$

となる。ここで T_L はロード抵抗の温度である。したがって、(2.43) を使うとロード抵抗の、エネルギー分解能に対する寄与を

$$\Delta E_{load} = 2.35 \left[\frac{4k_B T_L \tau R^2 I^2}{Z_L} H^2 \left| 1 + \frac{1}{H} \right| \sqrt{2 \left| 2 + \frac{1}{H} \right|} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.54)$$

と表すことができる。またバッファの雑音は

$$NEP_{buff}^2 = i_B^2 \left| \frac{2ZI}{\frac{Z}{R} - 1} \right|^2 \left[1 + \omega^2 \tau^2 \left(\frac{Z+R}{2Z} \right)^2 \right] + \frac{e_B^2}{|S^2(\omega)|} \quad (2.55)$$

と表すことができ、電流性の雑音を無視できるとするとバッファーのカロリメータのエネルギー分解能に対する寄与は (2.43) を用いて

$$\Delta E_{buff} = 2.35 \frac{e_B \sqrt{\tau_e}}{|S(0)|} \quad (2.56)$$

と表すことができる。

2.3 X線カロリメータの現状

ここでは、2000年打ち上げ予定のASTRO-E衛星に搭載されるX線マイクロカロリメータ(XRS)について説明する。

2.3.1 ASTRO-E搭載XRS

ASTRO-E衛星は2000年2月に打ち上げられる予定の、日本で5番目のX線天文衛星であり、その開発はASCAと同様日米協力で、主に宇宙科学研究所、NASA/GSFC、東大、京大、阪大、名大、都立大によって進められている。それぞれに特徴のある3種類の検出器を用いて、0.5keVから700keVに至る広範囲のエネルギー帯域での観測が可能となる。4台のX線CCDカメラ(XIS)と1台のX線カロリメータ(XRS)が5台のX線反射望遠鏡(XRT)の焦点面に置かれる。XISがその広い視野を生かして撮像及び分光観測をおこなうのに対して、XRSは優れた分光観測をおこなうことを主眼としており、この2種類の検出器を組み合わせた観測により0.5keV–10keVのX線帯域で、優れた撮像・分光を行うと期待されている。また、10keV–700keVではPIN型Si半導体検出器とGSOシンチレータを井戸型フォスウィッチカウンタに組み込んだ硬X線検出器(HXD)で、バックグラウンドが低くS/Nの優れたデータを取得する。

ASTRO-Eより前のX線天文衛星で100eV以下の高エネルギー分解能を達成しているものは、ほとんどが分散系の検出器を用いたものであり、検出効率の悪さから感度に弱点を持っていた。XRSは10keVまで高い検出効率を有し、高エネルギー分解能で分光を行う初めての検出器である。断熱消磁冷凍器と放射冷却により65mKの低温を達成し、X線の吸収体にはX線帯域での吸収効率の高いHgTeを使用する。これにより10keVのX線に対しても70%以上の検出効率を実現できる。また、検出器全体での熱容量は動作温度で 1.8×10^{-13} J/Kになるのでカロリメータのみでのエネルギー分解能は

$$\Delta E = 2.35 \xi \sqrt{k_B T_B^2 C_0} \sim 4eV \quad (2.57)$$

となる。カロリメータの信号は125Kに温められたJFET box内のJFETでインピーダンス変換される。(2.57)とこのバッファーのノイズとでエネルギー分解能は8eV以下になり、信号の電送途中で拾うノイズなどの様々な要素からのエネルギー分解能に対する寄与も考慮すると、全体で12eVの分解能が得られている。以上の熱容量と検出効率を実現するために一つのピクセルの面積は 0.4mm^2 であり、全体で32個のピクセルを搭載する。X線はX線反射望遠鏡によって集光され、有効面積は最大で 400cm^2 に達する。検出器全体を固体ネオンで17Kに冷却し、さらに液体ヘリウムで1.3Kにした上で断熱消磁機を用いて65mKの極低温を実現する。軌道上での寿命は検出器全体の質量である約400kgのうち170kgを占める使い捨ての固体ネオンの量で決まり、約2年と見積もられている。

2.4 X線カロリメータの今後の課題

以上のように ASTRO-E 衛星に搭載される XRS はこれまでにない優れた特徴を持つ X 線検出器であり、その成果は非常に期待されている。しかし、X 線カロリメータは決して完成された検出器ではなく、まだまだ発展の余地が残されている。以下では XRS をたたき台として X 線カロリメータの発展、改良の可能性を検討する。

2.4.1 素子の均一化

XRS のカロリメータは Fig.2.1 のように熱伝導度を適当な値にするために、吸収体とシリコンのピクセルとを接着材を用いて手作業で張り付けている。そのために歩留まりが悪く、一つ一つの素子の性能に大きなばらつきが生じてしまう可能性がある。不純物濃度の高い Si:P、あるいは Si:N の薄膜を用いて選択的なエッチングを行う、シリコンの 3 次元加工技術を応用すれば、シリコンのフレームに立体構造を持たせることが可能となり、適度な熱伝導度を持った thermal link を多量に、しかも均一な性能で製作することが可能になる。

2.4.2 エネルギー分解能

カロリメータの検出効率を高くするためには X 線吸収体に原子番号の大きな物質を使い、十分な厚みを持たせなければならない。しかも有効面積を稼ぐために、面積も大きくとる必要がある。吸収体の体積の下限はこれらの要求で決まり、熱容量ひいてはエネルギー分解能に制限がつく。したがって検出効率を高く保ちながら、高エネルギー分解能を達成するためには原子番号が大きく、しかも比熱の小さい物質を吸収体を使用すればよい。

X 線の検出効率の高い物質のほとんどは金属であるが、金属の比熱は定数 γ 、 α を用いて

$$C(T) = \gamma T + \alpha T^3 \quad (2.58)$$

のように表すことができる。しかし、 T に比例する項は電子比熱を、 T^3 に比例する項は格子比熱を表す。格子比熱に関しては温度の 3 乗に比例するので、低温では電子比熱に比べ無視できる。また、超電導臨界温度より十分低温の状態にある超電導体では電子比熱が非常に小さくなる。このため超電導体を X 線吸収体として使用し、動作温度を低くすれば常伝導体を吸収体として使用した場合に比べて熱容量を小さくすることができ、エネルギー分解能を高くすることが可能になるはずである。

2.4.3 大面積化

X 線吸収体の素材を選び、エネルギー分解能の目標値から熱容量を決め、検出効率から厚さを求めると吸収体の面積は自動的に決まってしまう。XRS の検出器自体の面積は数 mm^2 で、ASCA の SIS(数 cm^2) の百分の一程度にしかならない。現在のカロリメータの信号処理系ではピクセルを増やして大面積化をはかることは難しい。したがって検出器の面積を大きくするためには一つ一つのピクセルの面積を大きくしなければならない。これはエネルギー分解能のところでも述べたように、超電導体を X 線吸収体として使用し、比熱を小さくすることによって実現が可能である。

2.4.4 イメージング

X線 CCD カメラはカロリメータと比較すると、エネルギー分解能は低いイメージングが可能であるという利点を持つ。カロリメータの素子自体は小さいので、加工技術の改良によって多量の検出器を製作し、並べることも不可能ではない。

2.4.5 カウントレート

一般に半導体抵抗温度計を用いたカロリメータは、ディケイタイムが数 msec と長いために、X線入射によって生じた温度上昇が立ち下がりきらないうちに再び X 線が入射し、したがってそのパルスハイトを正確に観測できなくなってしまう。特に X 線で明るい天体では致命的である。そのため、XRS ではカウントレートを約 2[count/sec] 程度に抑えるためにカロリメータの焦点面にフィルター²を設置している。

一方、TES カロリメータは信号の立上りが速いので、半導体型カロリメータに比べて約 1000 倍もの高いカウントレートを処理できる。

2.5 次世代のカロリメータ

現在、宇宙科学研究所、東京都立大学をはじめとする国内の X 線グループにより 2000-8 年の打ち上げを目指している次期 X 線天文衛星 (ASTRO-G) に、撮像能力を持つ高エネルギー分解能 X 線カロリメータを搭載させようとする計画が持ち上がっている。カロリメータとしては、ここ 1~2 年の間の進展が顕著な Transition Edge Sensor (TES) を用いる。TES は、物質の超電導臨界温度において熱の流入による温度上昇にともなう、超電導から常伝導に遷移する際の急激な抵抗値の変化を利用して、その温度上昇を測定するセンサーである。TES を温度計として用いることによって、現在のカロリメータのエネルギー分解能の限界である $\Delta E = \sqrt{k_B T^2 C}$ より優れたエネルギー分解能を持ったカロリメータをつくるのが可能である。昨年、米国 National Institute of Standard and Technology (NIST) の研究グループが 1 素子の TES で 6keV の X 線に対してエネルギー分解能 7eV を達成している [6]。

TES のエネルギー出力信号を読み出すためには、数 pA という微弱な電流が、数 μsec という短時間で立ち上がることを低インピーダンスのアンプでとらえる必要があり、SQUID の使用が不可欠である。

Fig.2.7 に計画中の TES アレイを示す。1 つのピクセルの大きさは $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ でこれを 32×32 個並べて撮像を可能にする。このような多数の TES 素子を持つ TES アレイの信号を同時に検出するために、8-16 の入力コイルが 1 個の SQUID につけられ、さらに後段でも直列に SQUID を並べ電流信号を 50-100 倍に増幅するという多重入力 SQUID アンプを用いる。この方式のアンプは世界的に未開発であるが、技術的に実現性が高く、かつ TES アレイにとって唯一ともいえる可能な信号読みだし方式である。

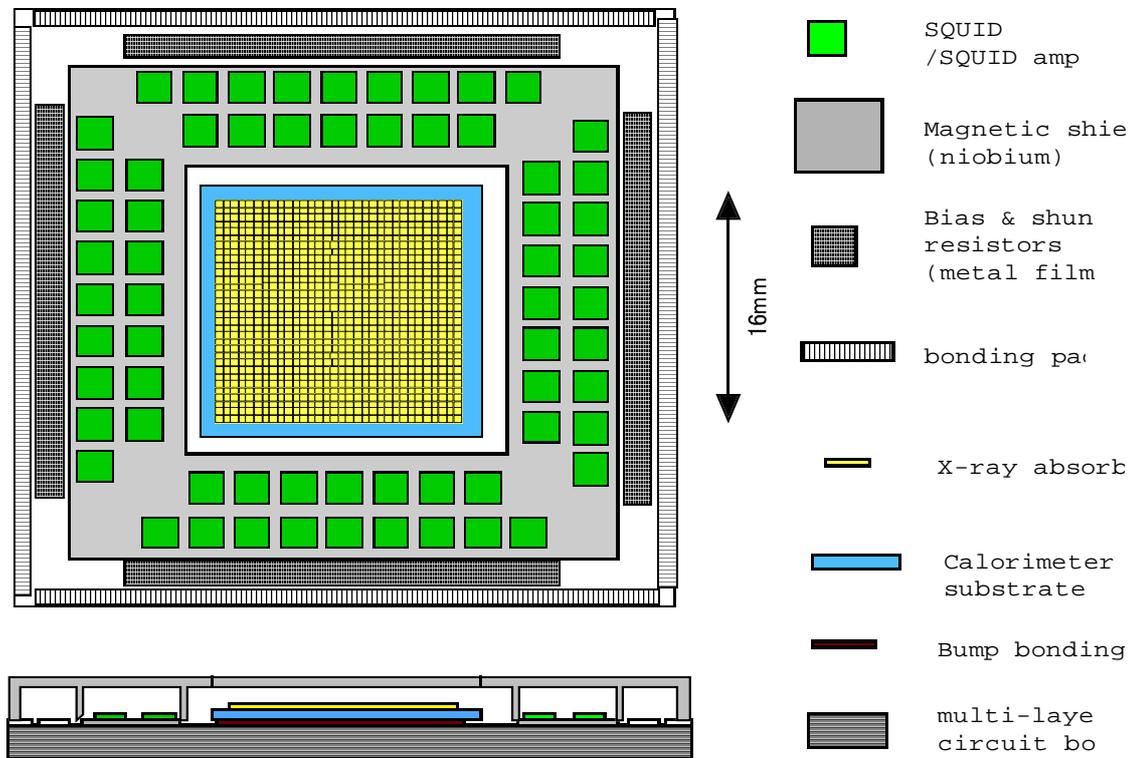
以上のような信号読みだしによってこの撮像型 X 線カロリメータは、エネルギー分解能 5eV 以下、焦点面検出器として 15~20 分角の視野をカバーでき、ASTRO-E と比べて 1 素子あたり 1000 倍もの高いカウントレートの処理が可能な検出器となる。また、Section 2.4 で述べたこれ

²XRS Filter Wheel と呼ばれている。NEC が製作、東京都立大が試験・評価した。参考文献 [20]、[21]

までのカロリメータが抱えていた問題点を解消する検出器でもある。

現在、世界で研究されているカロリメータの温度計は、シリコンにリンやボロンなどをドーピングして製作した半導体的な温度計よりも、上に述べたような TES を利用するのが NIST を中心として主流になりつつある。

Detector hybrid assen



Pixel struct

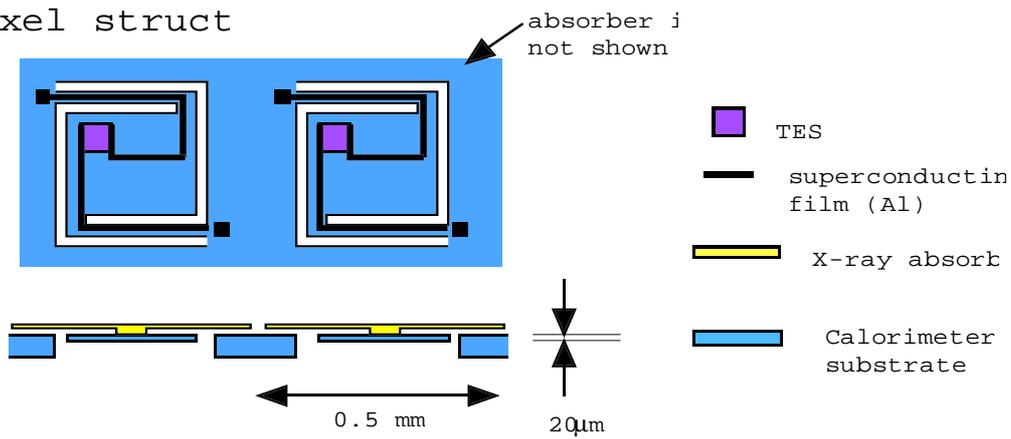


Figure 2.7: ASTRO-G 搭載に向けた Transition Edge Sensor(TES)

Chapter 3

カロリメータの静特性測定

この章では、カロリメータの温度計としての主な特性である抵抗－温度特性、また、熱伝導度－温度特性等を実測し、その結果を用いて X 線を検出するために必要となる種々のパラメータを見出すことを目的とする。ここで測定対象となるカロリメータは ASTRO-E 衛星搭載 XRS とほぼ同様の製作行程・構造で、NASA の Godard Space Flight Center と米国ウィスコンシン大学が共同開発した素子である¹。

3.1 bilinear カロリメータ

静特性測定を行うカロリメータ素子の全体図を Fig. 3.1² に示す。図のように、計 36 個のカロリメータピクセルを 2×18 並べたのがこの素子の特徴である。このようなピクセルの並べ方からこの素子は bilinear と呼ばれている。ピクセルはフレームから伸びた 3 本の thermal link によって支えられ、隣り合ったピクセルとの物理的な接触のない構造になっている。後で述べるように、各ピクセルには抵抗温度計が埋め込まれており、この温度計の配線は 2 本の thermal link の上を通過してフレームへ渡り、そしてボンディングパッドに達する。図のようにきっちりとピクセルを並べることで、X 線の入射したピクセルの信号の読み出しから、入射位置の情報を得ることができるわけである。しかしながら、たった 36 個のピクセル³ では X 線天体の詳細なイメージングを望むことはできない。

ここで測定したピクセルは、右の列の 1 番下と下から 3 番目で、以下ではこれらを p1(pixel 1 の意)、p3 と名付ける。

ピクセルを拡大した図を Fig. 3.2 に示す。X 線吸収体の土台となるピクセルはシリコンでできており、大きさは 0.25mm × 1mm × 20μm である。吸収体は、X 線吸収効率が高く、熱容量が小さく、かつ X 線の入射エネルギーを速やかに完全に熱エネルギー（フォノン）に変換することが要求される。これらの 3 つの条件を全て満たすような物質は現在のところ知られていな

¹array label: Bilinear1 wafer2 0204

²GSFC のホームページで公開されている bilinear カロリメータ素子の図

(<http://heawww.gsfc.nasa.gov/docs/xray/astroe/xrs/cal/bilinear/bilinear.html>) を一部加筆。

³XRS では端の 4 つのピクセルは使わないため実質 32 個

いが、XRS では化合物半導体である HgTe(水銀テルル) を使用している。HgTe は熱容量と熱化で特に優れている。ここで使用する素子にはどのピクセルにも吸収体は取り付けしていない。また、シリコンピクセルの $200\mu \times 200\mu$ の領域に、ボロンで補整したリンを不純物としてイオン打ち込みし、抵抗温度計としている。ピクセルから出ている thermal link はピクセルと同じシリコンであり、適度に熱伝導を悪くするために thermal link の断面積を小さくすることで実現している。

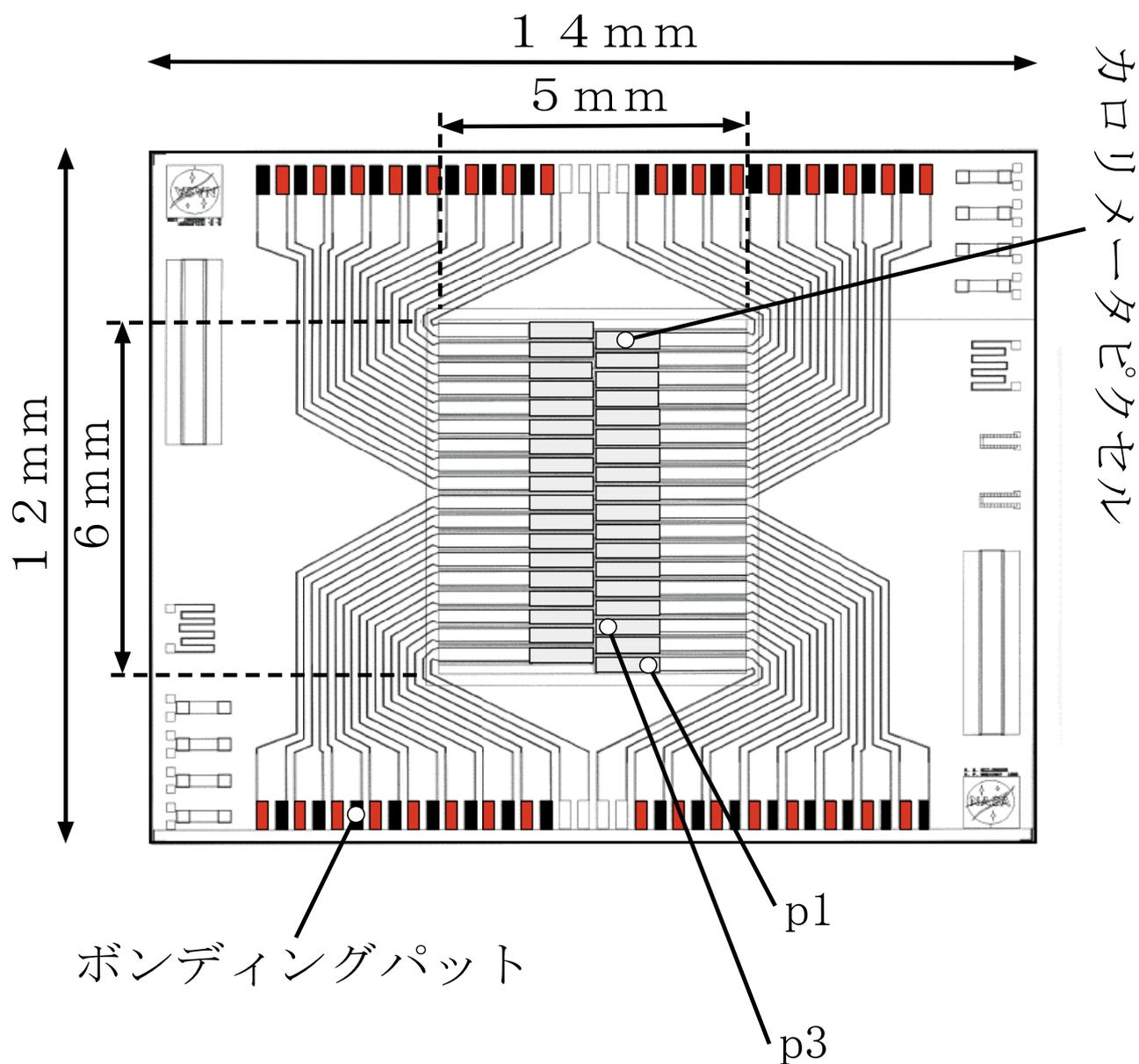


Figure 3.1: Bilinear カロリメータのレイアウト

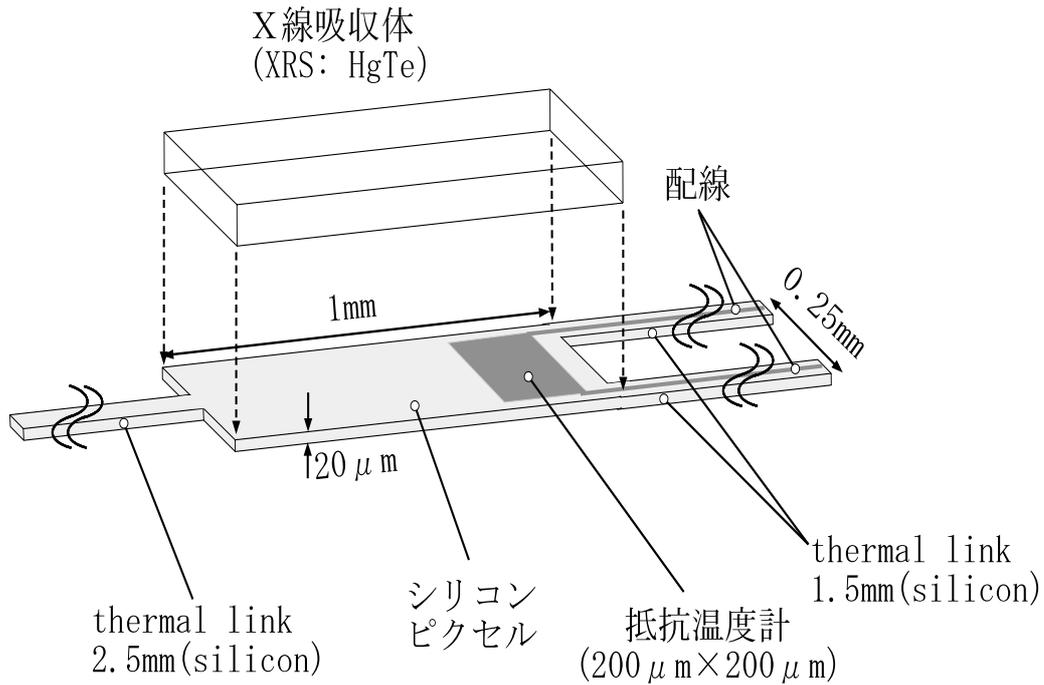


Figure 3.2: Bilinear カロリメータのピクセル

3.1.1 カロリメータの抵抗 – 温度特性・ロードカーブ

ここでは、抵抗温度計としてのカロリメータの重要な特性である抵抗 – 温度特性の測定について述べる。Fig.3.3にその測定回路を示す。

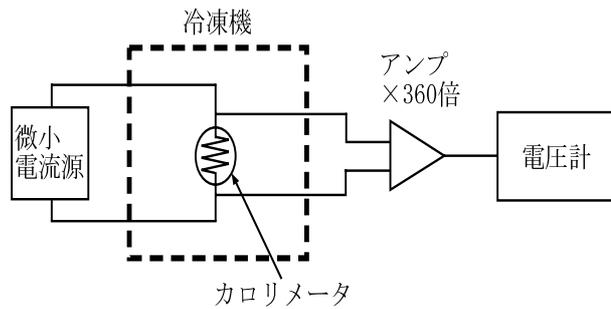


Figure 3.3: 4 端子測定によるカロリメータの抵抗測定

カロリメータは 4 章でその冷却原理を詳しく述べる、希釈冷凍機で冷却する。カロリメータの配線は 4 端子で冷凍機の外に取り出し、うち 2 本に電流を流し残りの 2 本で電圧を測定してカロリメータの抵抗を求めるといわけである。ここで、電流源として Kiethley 社の Source Measure Unit 236 を、電圧計として同じく Kiethley 社の Multimeter 2001 を用いた。カロリメー

タが低温下にある状態では、カロリメータに流す電流による自己発熱でカロリメータの温度が上昇し、したがって抵抗値が下がり抵抗を正しく見積もることができなくなるため、カロリメータに流す電流は微小でなければならない。そうするとカロリメータにかかる電圧も微弱になり正しい測定ができなくなるので、カロリメータの電圧をアンプで増幅した後で読まなければならない。いま、カロリメータに電流 I を順方向、逆方向に流したときの電圧計の読みをそれぞれ V_+ 、 V_- とすると、カロリメータの抵抗値は

$$R = \frac{V_+ - V_-}{2} / \text{アンプのゲイン} / I \quad (3.1)$$

として求まる。ここでアンプは4章で述べるゲイン 360 倍の DC 用差動アンプを用い、電流は 10pA~1nA 程度を流した。希釈冷凍機で室温から数十 mK まで冷却する間に、Fig. 3.1のピクセル:p1 と p3 について測定した結果が Fig. 3.4と Fig. 3.5である。

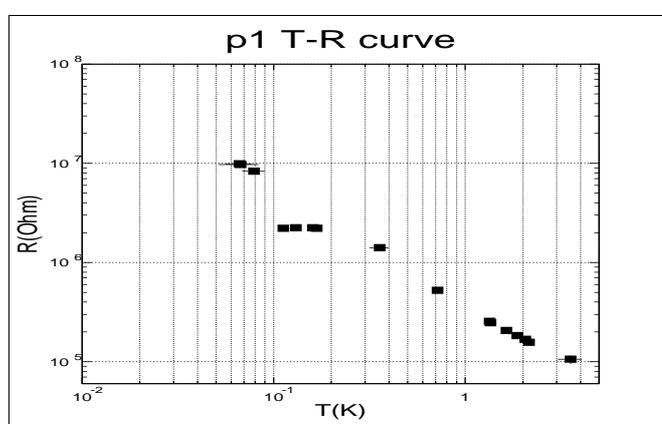


Figure 3.4: pixel 1 温度 – 抵抗特性

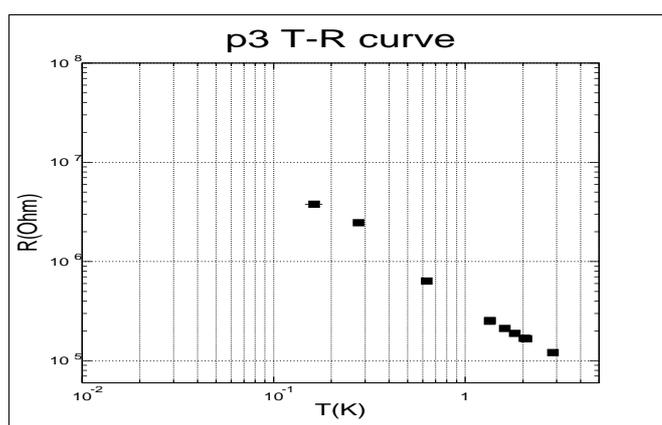


Figure 3.5: pixel 3 温度 – 抵抗特性

bilinear カロリメータはシリコンに不純物としてリンとボロンをドーピングさせていると前に述べたが、この様な抵抗温度計は一般に

$$R = R_0 \exp \left(\sqrt{\frac{T_0}{T}} \right) \quad (3.2)$$

と書けることが知られている⁴。ここで T_0 は不純物濃度に依存するパラメータ、 R_0 は温度計のジオメトリと一部 T_0 に依存するパラメータである。そこで Fig.3.4と Fig.3.5について $\ln R(T) - 1/\sqrt{T}$ 関係に直してプロットしたのがそれぞれ Fig.3.6と Fig.3.7である。

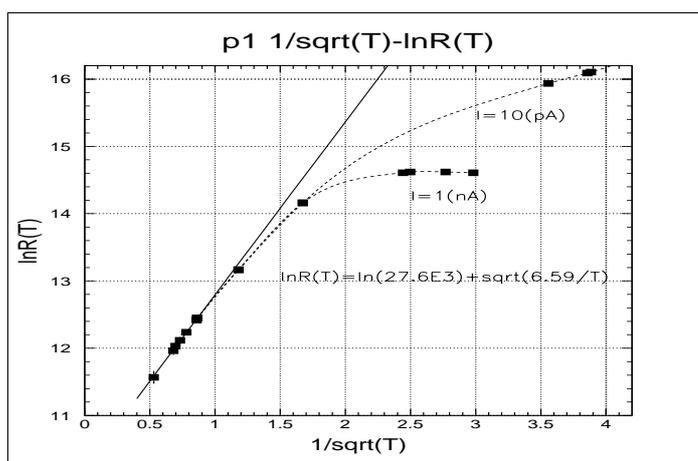


Figure 3.6: pixel 1 温度 - 抵抗特性

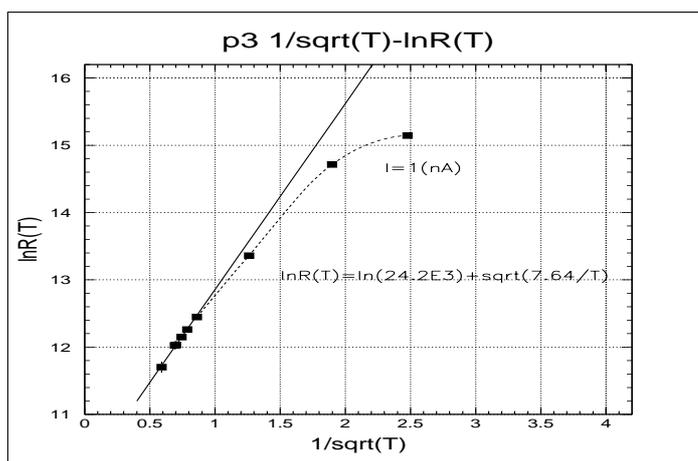


Figure 3.7: pixel 3 温度 - 抵抗特性

⁴局所的には、ある温度 T で抵抗値を式 (3.2) の接線として式 (2.39) で近似できる。

そのようにしてプロットしたデータ点は、式 (3.2) に従うとすれば、もちろんある直線上にのるわけだが、Fig.3.6、Fig.3.7を見ると、温度の高いところ ($1/\sqrt{T}$ の小さいところ) ではリニアな関係を保っている一方で、温度の低いところ ($1/\sqrt{T}$ の大きいところ) ではこの関係が成り立っておらず、抵抗値が一定になっていくのがわかる。このことは次のように考えられる。抵抗温度計は温度を下げていくと抵抗値が上がるが、このとき温度計に流れている電流が一定だとするとこの電流によって温度計で発生するジュール熱 (RI^2) が増加し、従って温度計の温度が上昇して抵抗値が減少する。すると抵抗値の増減はキャンセルされてある一定の値に落ち着くことになる。従ってカロリメータの抵抗測定では、温度が低くなるほど温度計に流す電流値を小さくしていかなければならない。Fig.3.6、Fig.3.7のように p1 に関しては電流値:10pA と 1nA、p3 には 1nA を流して測定をした。もう少し小さい電流値でも測定をするべきであるが、とりあえずこのデータを式 (3.2) で合わせると

$$p1: \quad R(T) = (27.6 \times 10^3) \exp\left(\sqrt{\frac{6.59}{T}}\right) \quad [\Omega] \quad (3.3)$$

$$p3: \quad R(T) = (24.2 \times 10^3) \exp\left(\sqrt{\frac{7.64}{T}}\right) \quad [\Omega] \quad (3.4)$$

と求まる。

次に、Fig. 3.3と同じ回路で R-I、Z-I カーブ (ロードカーブ) を求める。カロリメータをある一定の温度に固定して、カロリメータに流す電流を徐々に大きくしていく。 $Z \equiv dE/dI$ より、ある電流値とその微小増加分での電圧値を測定してやれば Z を求めることができる。実験では微小増加分をある電流値の 10% とした。p1 の、電流を流す前の温度が 70mK のときのロードカーブと p3 の、電流を流す前の温度が 60mK のときのロードカーブを Fig. 3.8に示す。

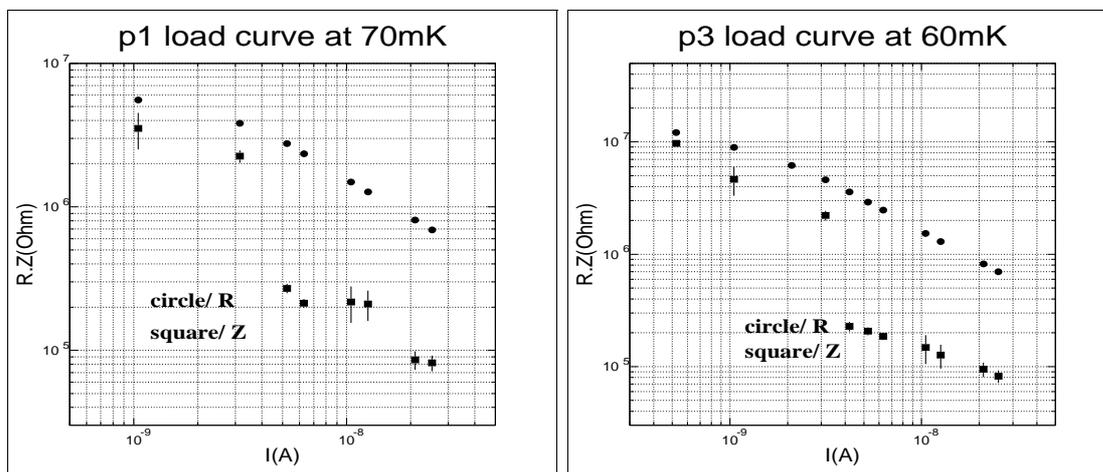


Figure 3.8: pixel 1(左)、 pixel 3(右) のロードカーブ

カロリメータに流す電流が多くなるほど、自己発熱によって抵抗値が下がっていくのがわかる。

3.1.2 熱伝導度

理論的には、先のロードカーブのデータを用いて式 (2.8)、(2.9) から熱伝導度 G とそのときの温度 T を計算できるが、 Z は微分量であるために測定から Z の正確な値を求めるのは非常に難しい。実際 Fig.3.8の Z のデータから熱伝導度を求めると、この bilinear の GSFC で既に求められている値 (後述) と全く一致しない。そこで、Fig.3.8の R のみを用いて

$$P \equiv RI^2 = G(T - T_b) \quad (3.5)$$

から、温度 - 熱伝導度の関係を求める。ここで T_b は熱浴の温度で、温度 T は式 (3.2) から逆算する。こうして p1、p3 それぞれについて熱伝導度とそのときの温度をプロットしたのが Fig. 3.9である。

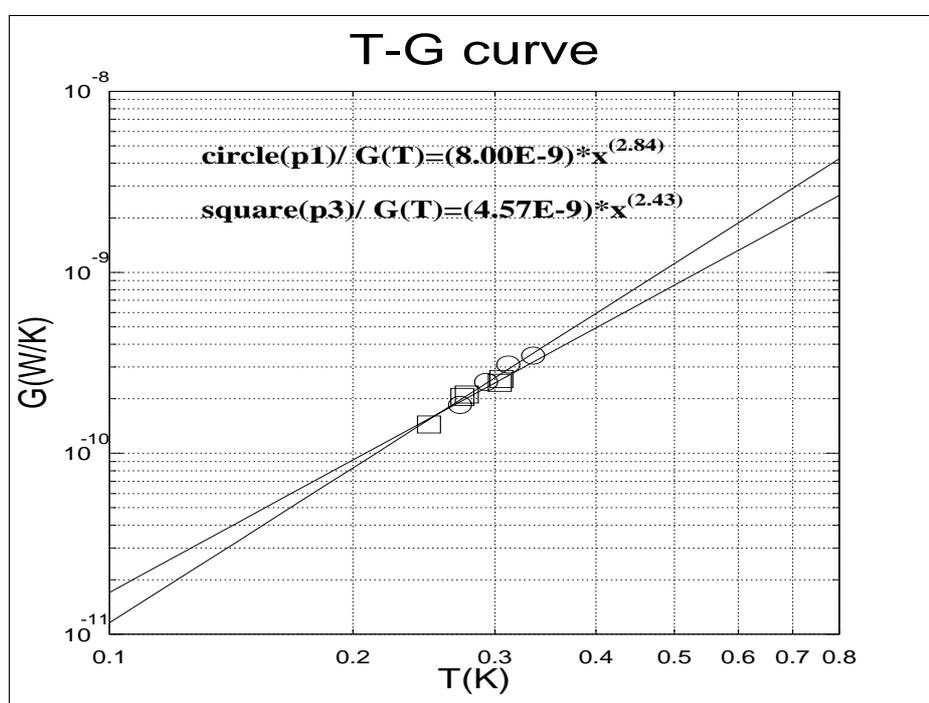


Figure 3.9: pixel 1・3 の温度 - 熱伝導度特性

これらデータを $G(T) = G_0T^\beta$ で fit すると

$$p1 : \quad G(T) = (8.01 \times 10^{-9})T^{2.84} \quad [\text{W/K}] \quad (3.6)$$

$$p3 : \quad G(T) = (4.58 \times 10^{-9})T^{2.43} \quad [\text{W/K}] \quad (3.7)$$

となる。

3.1.3 カロリメータの動特性のパラメータの導出

カロリメータで X 線を検出するために必要となるパラメータを見積もるまえに、予めカロリメータの比熱を知っておく必要がある。一般に、半導体でドナーの数が 10^{18}cm^{-3} より大きい場合は、Si:P は金属として扱うことができる。したがって、低温での比熱は

$$C = \gamma T + \alpha T^3 \quad (3.8)$$

と近似することが可能である。ここで、 T に比例する項は電子による比熱で、 T^3 に比例する項は結晶による比熱であり、カロリメータを動作させる温度では前者の方が支配的である。

bilinear カロリメータの温度計とその配線は、シリコンにリンをドーピングさせて作ったためにドナーによる電子比熱が優位になってくる。bilinear の比熱は公開されている情報によれば、80mK で Table 3.1 のようになる。

	熱容量 [J/K]
シリコンピクセル	0.08×10^{-14}
温度計	0.8×10^{-14}
配線	1.1×10^{-14}

Table 3.1: bilinear ピクセルの 80mK での熱容量

ここでこのデータから、温度計と配線は電子比熱 ($\propto T$) を、シリコンピクセルは結晶の格子比熱 ($\propto T^3$) を持つものとしてピクセルの温度 - 熱容量を計算したのが Fig. 3.10 である。

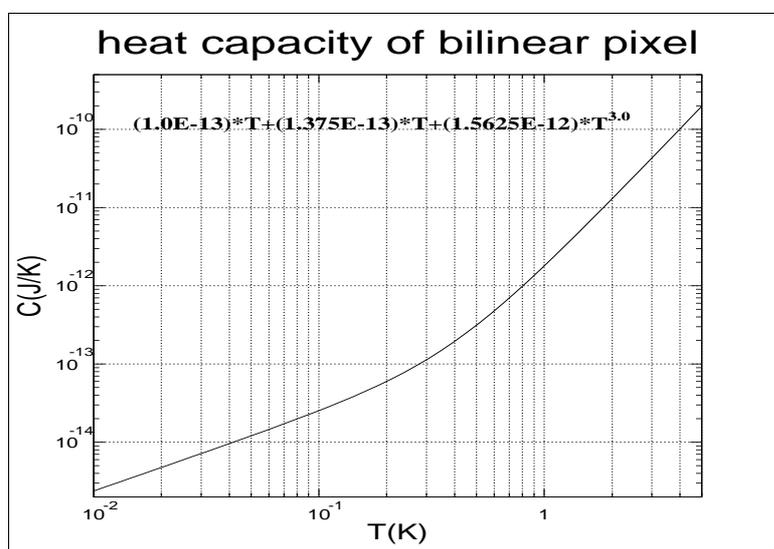


Figure 3.10: 温度 - 熱容量

このときの熱容量の温度依存の関係式は

$$C(T) = 1.0 \times 10^{-13}T \quad (\text{温度計}) \quad (3.9)$$

$$+ 1.375 \times 10^{-13}T \quad (\text{配線}) \quad (3.10)$$

$$+ 1.5625 \times 10^{-12}T^3 \quad (Si \text{ピクセル}) \quad (3.11)$$

と表すことができる。

以上のカロリメータの静特性及び熱容量のデータから実際に X 線を検出するために必要となる種々のパラメータの動作点を決定する。

まず、カロリメータに流す最適なバイアス電流値 I_B を見つける。例えば、バイアス電流を多くかけたためにカロリメータの自己発熱によって温度が上昇し、カロリメータのエネルギー分解のが悪くなるというようなことが考えられる。そこで、式 (2.50) から ξ が最小値をとるような、あるいは同じことだがエネルギー分解能が最小となるような温度を (2.51) から見つける。Fig. 3.11 と Fig. 3.12 はそのようにして、p1 と p3 のエネルギー分解能と温度の関係を計算したグラフである (ただし、熱浴の温度は 80mK である⁵)。そのようにして求めた温度はバイアス電流と thermal link による熱の散逸とのバランスによって決まる最適値であると考えられるため、その温度におけるバイアス電流値 (バイアス電流の最適値) を (2.45) から求めることができる。

さらに、この最適化されたバイアス電流を使うと (2.28) から responsivity $S(0)$ を求めることができ、これと静特性パラメータから求めた τ_e を用いて

$$V(0) = Q \frac{S(0)}{\tau_e} \quad (3.12)$$

から、X 線が入射した瞬間のパルスハイト $V(0)$ を求めることができ、したがって、信号の波形を予測することができるわけである。

⁵ ξ の最小値は熱浴の温度には依存せず、カロリメータの温度特性・熱伝導率・熱容量で決まる量である。

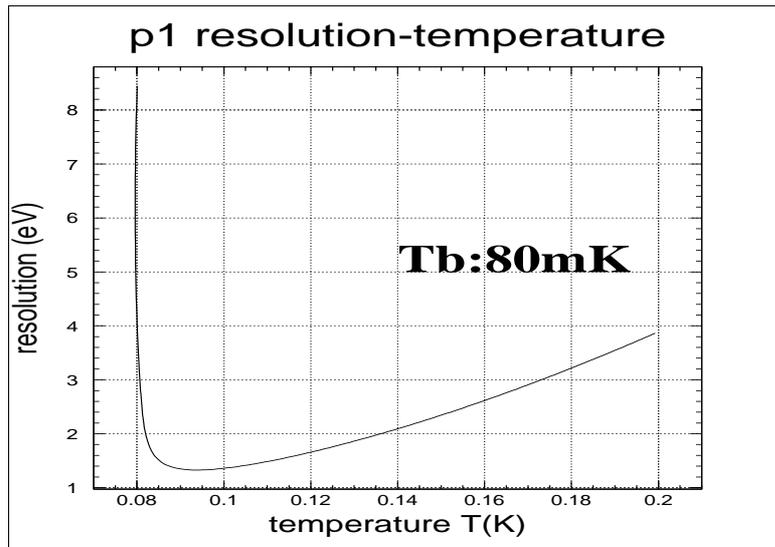


Figure 3.11: p1 の温度 – エネルギー分解能

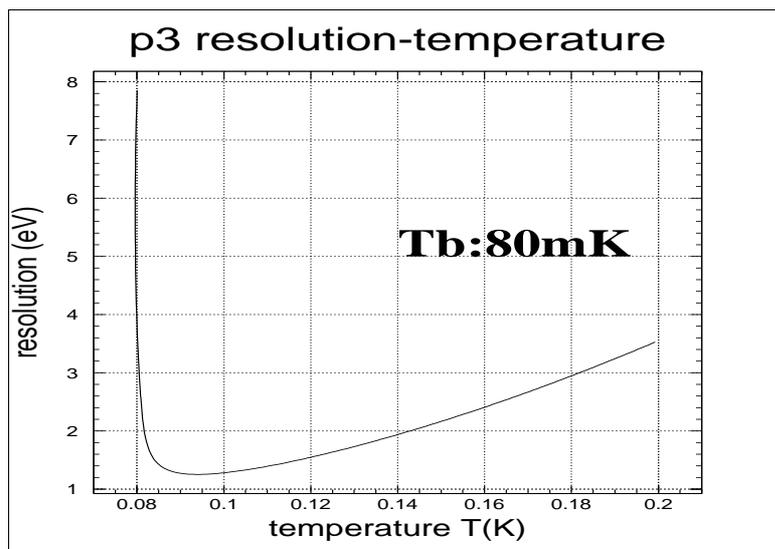


Figure 3.12: p3 の温度 – エネルギー分解能

以上のような考察から、bilinear ピクセル:p1、p3 の主要なパラメータを求めたのが Table 3.2 と 3.3 である。ただし、熱浴の温度は表の上から順に 80mK、100mK、120mK、140mK、180mK とした。さらに、ロード抵抗は 90M Ω を仮定し、X 線フォトンエネルギーは ^{55}Fe の 5.9keV とした。ここで、p1、p3 とともに X 線吸収体は取り付けしていないためピクセルのシリコンで、入射した X 線のエネルギーを 100% 吸収すると仮定している。

I[pA]	T[K]	R[M Ω]	C[J/K]	G[W/K]	τ_e [s]	S(0)[V/W]	V(0)[mV]	ΔE [eV]
29.6	0.094	122	2.22×10^{-14}	9.62×10^{-12}	2.50×10^{-3}	-7.70×10^9	-2.76	1.33
70.7	0.117	50.2	2.78×10^{-14}	1.81×10^{-11}	1.36×10^{-3}	-3.58×10^9	-2.28	2.01
139	0.140	26.1	3.34×10^{-14}	3.04×10^{-11}	8.97×10^{-4}	-1.85×10^9	-1.72	2.83
253	0.165	15.3	3.93×10^{-14}	4.83×10^{-11}	6.38×10^{-4}	-1.03×10^9	-1.29	3.78
596	0.213	7.25	5.05×10^{-14}	9.86×10^{-11}	3.97×10^{-4}	-4.12×10^8	-0.76	6.07

Table 3.2: バイアス電流の最適値と、そのとき Fe5.9keV の X 線に対して予想される p1 のパラメータ

I[pA]	T[K]	R[M Ω]	C[J/K]	G[W/K]	τ_e [s]	S(0)[V/W]	V(0)[mV]	ΔE [eV]
28.7	0.094	201	2.22×10^{-14}	1.45×10^{-11}	1.94×10^{-3}	-7.50×10^9	-3.45	1.25
67.8	0.117	77.7	2.78×10^{-14}	2.50×10^{-11}	1.07×10^{-3}	-3.76×10^9	-3.04	1.89
138	0.142	37.2	3.37×10^{-14}	3.97×10^{-11}	7.11×10^{-4}	-1.99×10^9	-2.34	2.66
236	0.165	21.6	3.93×10^{-14}	5.77×10^{-11}	5.38×10^{-4}	-1.16×10^9	-1.73	3.54
544	0.213	9.68	5.05×10^{-14}	1.06×10^{-10}	3.64×10^{-4}	-4.83×10^8	-0.97	5.68

Table 3.3: バイアス電流の最適値と、そのとき Fe5.9keV の X 線に対して予想される p3 のパラメータ

パルスを観測するには、p1 よりパルスハイトの高い p3 で測定するのが良いだろう。4章で述べることになるゲインが 360 倍のアンプを用いれば、カロリメータの熱浴が 80mK のときに 1V 程度のパルスを観測できるはずである。

この章で述べてきたのと同じ bilinear カロリメータの、NASA の Goddard Space Flight Center で測定された抵抗、熱伝導度の温度依存の式を以下に示す⁶。

$$R(T) = (2.26 \times 10^3) \exp\left(\sqrt{\frac{5.32}{T}}\right) \quad [\Omega] \quad (3.13)$$

$$G(T) = (5.3 \times 10^{-8}) T^{3.0} \quad [\text{W/K}] \quad (3.14)$$

⁶情報提供: Caroline Kilborne Stahle 氏 (NASA Goddard Space Flight Center)

であり、これまで述べてきた静特性測定で得られた抵抗は式 (3.4) より一桁小さく、また熱伝導度は式 (3.7) より一桁大きい。このように同じ素子で異なる結果になったが、以下の章では本章で述べてきた結果に基づいて議論していく。

Chapter 4

半導体素子の動作について

chapter4 で製作するカロリメータの測定系では、JFET やトランジスタなどの半導体素子を室温あるいは液体窒素温度以上で使用する。また、特にカロリメータ用信号測定のバッファーとしての JFET の雑音はカロリメータの分解能に大きく寄与するため、JFET を動作させたときの雑音をどう抑えるかが課題となる。ここでは、これら半導体素子の動作を調べるとともに、JFET を動作させる時の最適な条件を探る。

4.1 JFET、バイポーラトランジスタの動作

カロリメータの抵抗値は動作温度付近で高い (数十 $M\Omega$) ので、このままカロリメータで生じた信号を取り出すと信号に付随した雑音を無視できなくなるため、このカロリメータの高い抵抗をバッファーによりインピーダンス変換する必要がある。液体窒素温度で動作し、なおかつ低雑音で入力インピーダンスが高いことからカロリメータ用信号測定のバッファーとして JFET を用いる。しかし、液体窒素温度以上で動作することはわかっているものの、その液体窒素温度での特性についてはほとんど公開されていないのが実状である。ここでは JFET として東芝製の 2SK371 を使用する。この JFET はイコライザアンプなどへの使用が推奨されている代表的な低周波低雑音増幅用の JFET であり、また NASA の Goddard Space Flight Center で ASTRO-E の XRS 用のバッファーとして様々な JFET を測定した結果、この 2SK371 が雑音の面で最も最適である¹ という結果が出ている。また、バイポーラトランジスタとしては小信号用として広く用いられている 2SC1815 を使い、これは 4 章で述べるプリアンプの初段で使用する。

4.1.1 JFET

JFET の静特性のうち、回路を設計する上で欠かせないのが $V_{GS}-I_D$ 特性の情報である。その特性を測定するための回路を Fig. 4.9 に示す。この回路で測定するにあたって V_{GS} には可変電圧電源 (Kiethley 社製、source measure unit 236 model) を使い、 V_{CC} には 9V の乾電池を使

¹しかし、この 2SK371 は、多数の素子からの読み出しのための集積化されたパッケージがないため、XRS には採用されなかったらしい。

用し、ドレイン電流を電流計 (Kiethley 社製、Multimeter 2001 model) で測定した。この方法では V_{CC} が固定されてしまうが V_{CC} が十分大きければ I_D の V_{CC} 依存性が小さいため、特に問題はない。

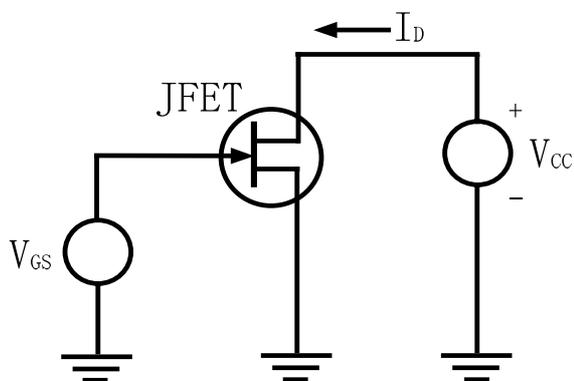


Figure 4.1: JFET の $V_{GS} - I_D$ 特性測定回路

Fig. 4.9の回路を用いれば常温での JFET の $V_{GS} - I_D$ 特性を簡単に測定できる。液体窒素温度以上での測定では、4章のバッファの熱設計のところ述べるように JFET を真空中に置き、液体窒素温度の熱浴から熱伝導の悪い物質で吊し、JFET に接したヒーターに電力を加えて JFET を液体窒素温度から昇温させる。このとき JFET の温度は、JFET に接着させた Si diode 抵抗温度計でモニターする。

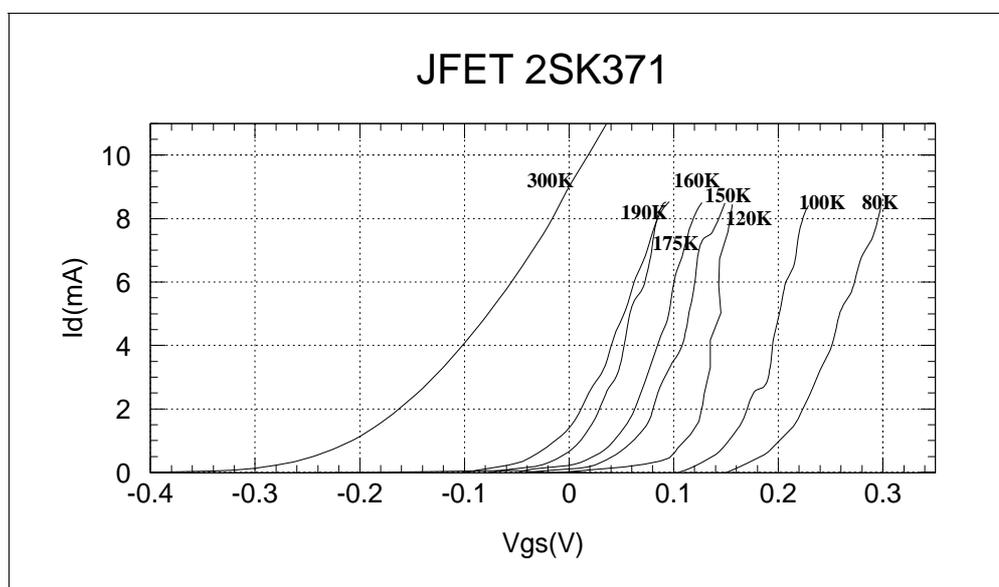


Figure 4.2: JFET(2SK371) の液体窒素温度以上での、ドレイン電流 - ゲート・ソース間電圧

JFET:2SK371 の温度が 80K、100K、120K、150K、160K、175K、190K、室温のときの V_{GS} - I_D 特性の測定結果を Fig. 4.2に示す。図からわかるように低温になればなるほど特性は V_{GS} が高くなる方向にシフトしていく。一般に JFET は V_{GS} が負の領域で使用するが図から明らかのように、 $-0.3V < V_{GS} \sim 0.4V$ にわたって V_{GS} でドレイン電流を制御することができる。

実際に JFET をカロリメータ用信号測定のバッファーとして使用するときには、後に示す Fig. 4.9のように JFET のソースから信号を取り出す (ソースフォロワ)。いま、JFET のゲートにカロリメータの信号が入ったとする。このときの入力信号の電圧の変化分を ΔV_{in} とする、また JFET からの信号の出力の変化分を ΔV_{out} とすると、 ΔV_{out} はドレイン電流の変化によるものだから

$$\Delta V_{out} = \Delta I_D R_S \quad (4.1)$$

と書ける。ここで ΔI_D はドレイン電流で、 R_S はソース抵抗である。また $g_m \equiv \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$ より、信号の入力の電圧変化は

$$\Delta V_{in} = \Delta V_{GS} + \Delta V_{out} \quad (4.2)$$

$$= \Delta V_{GS} + \Delta I_D R_S \quad (4.3)$$

$$= \left(1 + \frac{1}{g_m R_S}\right) \Delta V_{out} \quad (4.4)$$

$$(4.5)$$

と書ける。すなわち JFET による信号の増幅分 G は

$$G \equiv \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} \quad (4.6)$$

と表すことができる。このようにソースフォロワ回路では信号のゲインは 1 より小さくなる。

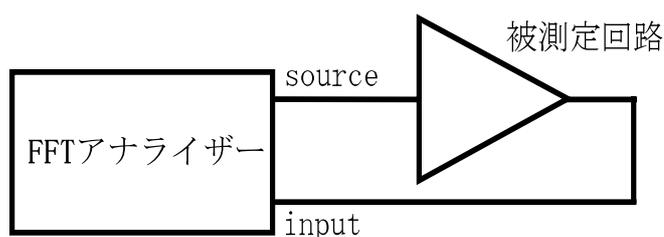


Figure 4.3: FFT アナライザによるゲイン測定

実際に、室温でソース抵抗を $3k\Omega$ (このときドレイン電流は約 $1.0mA$) にして Fig. 4.9のような測定回路で FFT アナライザにより周波数 - ゲイン特性を取った。2SK371 の標準的な g_m は規格表によれば $40mS$ だからソース抵抗が $3k\Omega$ のときのゲインは $120/121 = 0.99$ となり測定値とほぼ一致している。

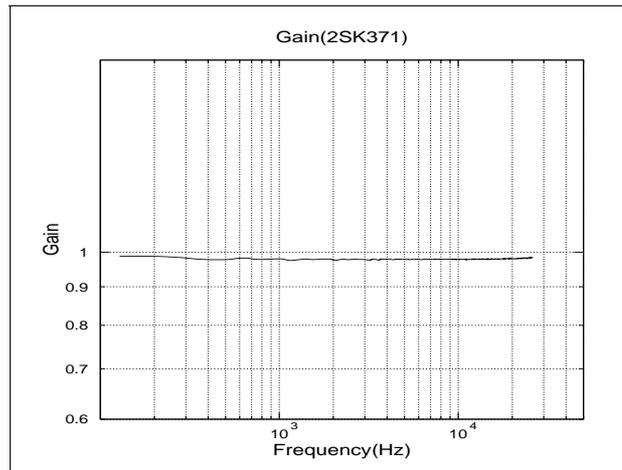


Figure 4.4: JFET の周波数 - ゲイン特性

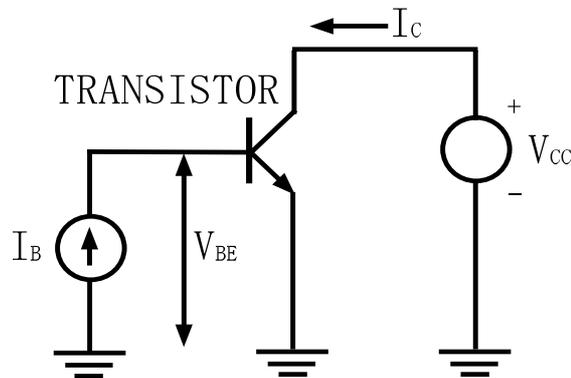


Figure 4.5: バイポーラトランジスタの特性測定回路

4.1.2 バイポーラトランジスタ

バイポーラトランジスタの静特性回路を Fig. 4.5に示す。

この回路で、 $V_{BE} - I_B$ 特性、 $I_B - I_C$ 特性というバイポーラトランジスタを使用する上で重要な2つの特性を測定することができる。この回路ではベース電流 I_B はベース・エミッタ間電圧 V_{BE} によって決まり

$$I_B = I_S \left[\exp\left(\frac{eV_{BE}}{k_B T}\right) \right] \approx I_S \exp\left(\frac{eV_{BE}}{k_B T}\right) \quad (4.7)$$

のようになる。ここで I_S は飽和電流、 e は電子の電荷、 k_B はボルツマン定数を、 T は pn 接合部の温度を表す。このとき逆バイアスになっているコレクタ・ベース間にベース電流に比例したコレクタ電流 I_C が流れる。このときの比例係数を直流電流増幅率 h_{FE} と呼ぶ。すなわち

$$h_{FE} \equiv \frac{I_C}{I_B} \quad (4.8)$$

で、一般に h_{FE} は数百程度である。このことを利用して微小なベース電流の変化で数十～数百倍のコレクタ電流を制御するのがバイポーラトランジスタによる増幅の原理である。

[測定法]

本実験ではバイポーラトランジスタとして小信号汎用の 2SC1815 を使い、KIETHLEY 社の微小電流計内蔵の電源 (236 SOURCE MEASURE UNIT) をベース・エミッタ間につなぎ、ベース電流を測定する。コレクタ・エミッタ間電圧はコレクタ電流 I_C にはそれほど依存しないので V_{CC} には 9V の乾電池を用い、KIETHLEY 社のマルチメータ (2001 MULTIMETER) でコレクタ電流を測定する。室温温度での特性は、素子を液体窒素に沈め、室温に置いた測定器で特性を調べる。

[室温での特性]

室温における $V_{BE} - I_B$ 特性を Fig. 4.6 の上に示す。Fig. 4.6 から $V_{BE} > 0.7V$ ではベース・エミッタ間電圧とベース電流の間に $I_B \propto e^{(const \times V_{BE})}$ すなわち (4.7) のような関係が成り立っている。したがって $V_{BE} \leq 0.64V$ の測定とを比較すると

$$I_S = 8.71 \times 10^{-17} \quad [A] \quad (4.9)$$

$$T = 304 \quad [K] \quad (4.10)$$

という値が得られる。この $T = 304[K]$ は室温に近く (4.7) がよい近似式であることを示している。また $V_{BE} = 0.66V$ の測定値は (4.7) の示す値から大きくずれているが、これは大きなコレクタ電流 (75.6mA) が流れて PN 接合部の温度が上昇したためである。

次に $I_B - I_C$ 特性を Fig. 4.6 の下に示す。この図から I_C の大きなところを除いて (4.8) がよく成り立っていることがわかる。このとき直流電流増幅率を求めると

$$h_{FE} \equiv \frac{I_C}{I_B} = 159.7 \quad (4.11)$$

となる。

[液体窒素温度での特性]

Fig. 4.7 の上に液体窒素温度での $V_{BE} - I_B$ 特性を、Fig. 4.7 の下にこのときの $I_B - I_C$ 特性を示す。

(4.7) では 4.7 の結果をうまく説明できないことは明らかである。 $V_{BE} = 0.96V$ 付近で $V_{BE} - I_B$ 特性に折れ曲がりが見られ、 $V_{BE} > 1.06V$ ではベース電流が飽和している。この結果のうち $0.96V < V_{BE} < 1.06V$ の値を用いて I_S 、 T を求めると

$$I_S = 1.79 \times 10^{-59} \quad [A] \quad (4.12)$$

$$T = 97.4 \quad [K] \quad (4.13)$$

という値が得られる。この $T = 97.4[K]$ は液体窒素温度よりも大きい値となった。また Fig. 4.7 (下) では I_B が飽和する手前で I_B と I_C の間に比例関係が見られ、このときの直流電流増幅率は

$$h_{FE} \equiv \frac{I_C}{I_B} = 4.17 \quad (4.14)$$

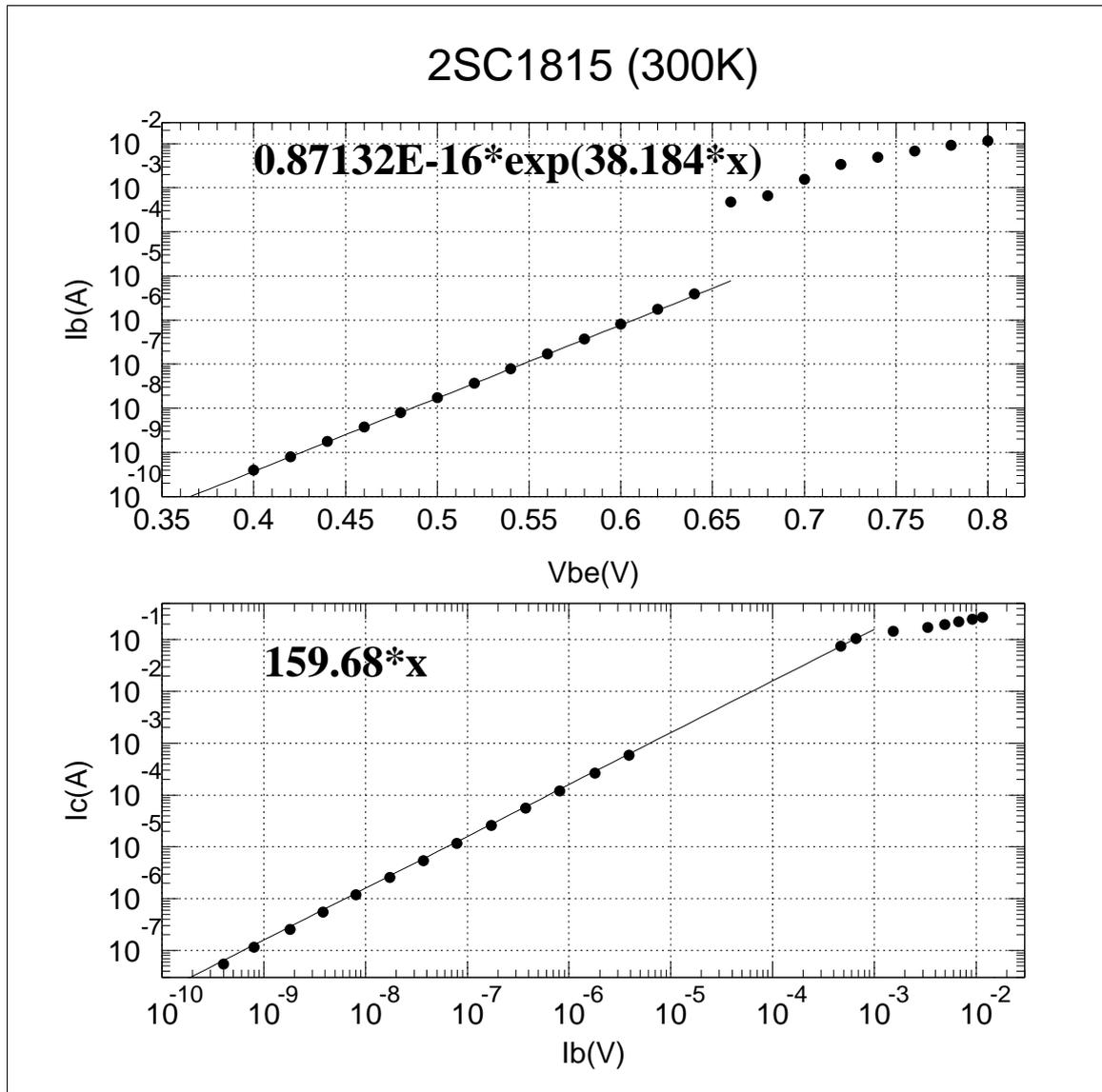


Figure 4.6: 2SC1815 の室温での $V_{BE} - I_B$ 特性 (上)、 $I_B - I_C$ 特性 (下)

である。

以上 Fig. 4.7(上) 及び (4.13) の結果から、液体窒素温度でも pn 接合がダイオードとして機能していることは明らかである。また、Fig. 4.7(下) 及び (4.14) からこの温度でもバイポーラトランジスタが増幅作用を持っていることを示している。しかし、その直流電流増幅率は 10 以下であり大きなゲインは期待できない。また、エミッタフォロワとして使うにもベース電流を大量に流す必要がある。

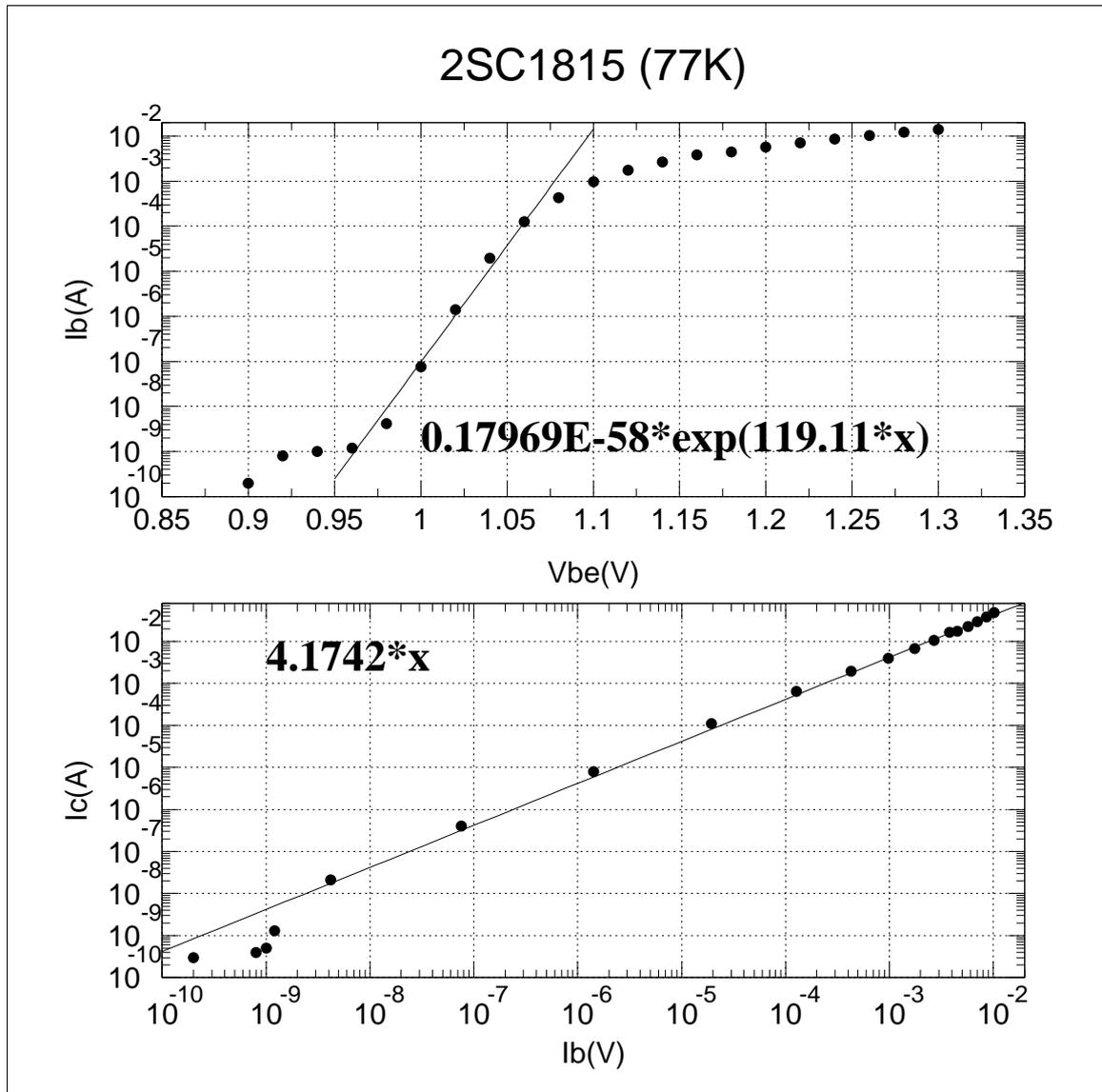


Figure 4.7: 2SC1815 の液体窒素温度での $V_{BE} - I_B$ 特性 (上)、 $I_B - I_C$ 特性 (下)

4.2 JFET(2SK371) の雑音特性

カロリメータのエネルギー分解能に大きく寄与してくる、バッファーとしての JFET の雑音をいかに抑えるかが大きな課題である。Fig.4.8に示すグラフ²は、XRS とほぼ同様の行程で作られたカロリメータ素子で発生した信号と各種ノイズの内訳を表すものである。このグラフから X 線カロリメータで重要となる 1kHz 以上ではカロリメータで生じる熱雑音に次いで JFET の雑音が支配的となってくるのがわかる。

²SSD 21 シンポジウム (98 年 12 月 4 ~ 6 日 奈良) での B.MaCammon(University of Wisconsin) 氏の講演 OHP からの抜粋 (一部加筆)

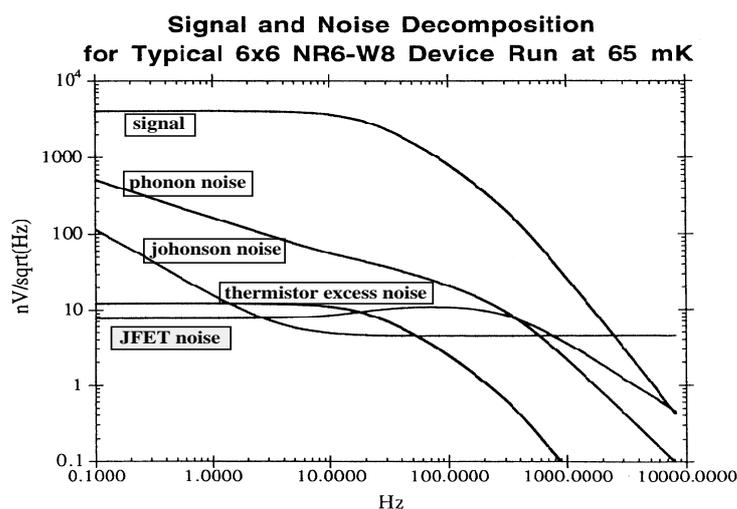


Figure 4.8: 6×6 array の信号と各種ノイズの雑音スペクトル

実際に JFET に要求される性能はどれくらいなのだろうか。ここでバッファの、カロリメータのエネルギー分解能に対する寄与は式 (2.55) から見積もることができる。一般に使われている低雑音の JFET の電圧性の雑音が $e_B \sim 10^{-9} V/\sqrt{Hz}$ であるのに対し、電流性の雑音は $i_B \leq 10^{-17} A/\sqrt{Hz}$ と非常に小さいため (2.55) の 2 つの項のうち電流性の雑音に関しては無視して問題ない。したがって、バッファの寄与は (2.56) となる。ここで典型的なカロリメータのパラメータとして $\tau_e \sim 10^{-3} \text{sec}$ 、 $|S(0)| \sim 10^9 \text{V/W}$ とし、エネルギー分解能 ΔE を 1eV とするとバッファの電圧性の雑音を数 nV/\sqrt{Hz} 程度に抑えなければならないことがわかる。

ここでバッファの雑音を左右する要因として考えられるのが

1. JFET の動作温度
2. ソース・ドレイン間に流す電流 (以下ドレイン電流)

であり、以下では JFET の温度 - 雑音特性とともに、ドレイン電流 - 雑音特性を調べ、JFET を動作させるときの最適な条件を探る。

4.2.1 測定方法

測定するための回路が複雑になると JFET 以外からの雑音の寄与が大きくなる可能性があり、それを避けるために Fig. 4.9 のような単純な回路を用いて雑音を測定する。この回路で V_{CC} には雑音を最小に抑えるため乾電池 (1.5V × 4) を使った。またソースからの (雑音) 信号の、1/f ノイズなどの低周波成分を切るためにハイパスフィルターを付け、さらにカタログによれば 2SK371 の入力換算雑音電圧は $0.7 nV/\sqrt{Hz}$ と低いため FFT アナライザーで測定するにはハイパスフィルターの後ろでアンプによって増幅してやる必要がある。

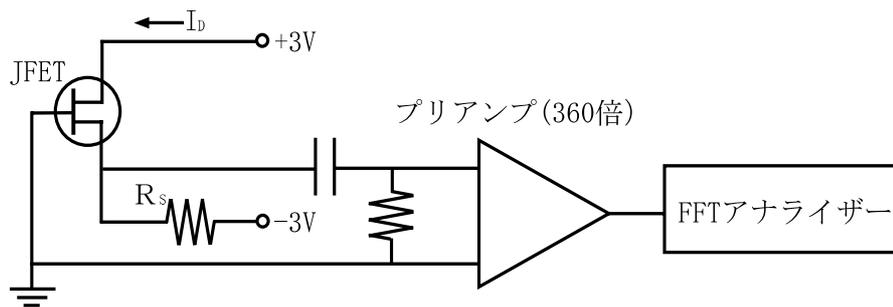


Figure 4.9: FFT アナライザによる雑音測定

4.2.2 JFET の温度 – 雑音特性

まず、JFET の雑音が JFET の温度に対してどのように変化するかを調べた。Fig. 4.9の回路で JFET を液体窒素温度になった熱浴に接触させ、JFET に接したヒーター（抵抗）を発熱させて JFET を温め、温度が 77K、96K、110K、120K、140K、160、そして室温のときの入力換算雑音電圧レベルをプロットしたのが Fig. 4.10 である。周波数 – 雑音レベルのうち 1 ~ 3kHz を抜きだし、平均をとったのが Fig. 4.10 の であり、9 ~ 11kHz で平均をとったのが である。さらにこれらの点は、アンプによる雑音とローパスフィルターの抵抗の熱雑音からの寄与を差し引いてある（つまり、理想的には JFET からのみの雑音）。ここで、ソース抵抗 R_s を $3k\Omega$ に固定した。このときのドレイン電流は、JFET の温度によって若干変り $0.895\sim 0.924\text{mA}$ である。

どの点もカタログによるスペック値の $0.7\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ より大きな値になっているが、これは外乱の雑音により全体的に雑音レベルが上がっているからであると考えられる。また、低温になるほど雑音が上がることがわかるが、140K あたりで雑音が最小になり 160K で再び上がる。このことをいまのところ理論的に説明できないので、単に現象論的にとらえて、JFET を 130K~150K が動作させるのが最も雑音が低く（数 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下）最適であるとした。

このときの 96K と 140K での周波数 – 雑音レベルを比較したものが Fig. 4.11 である。

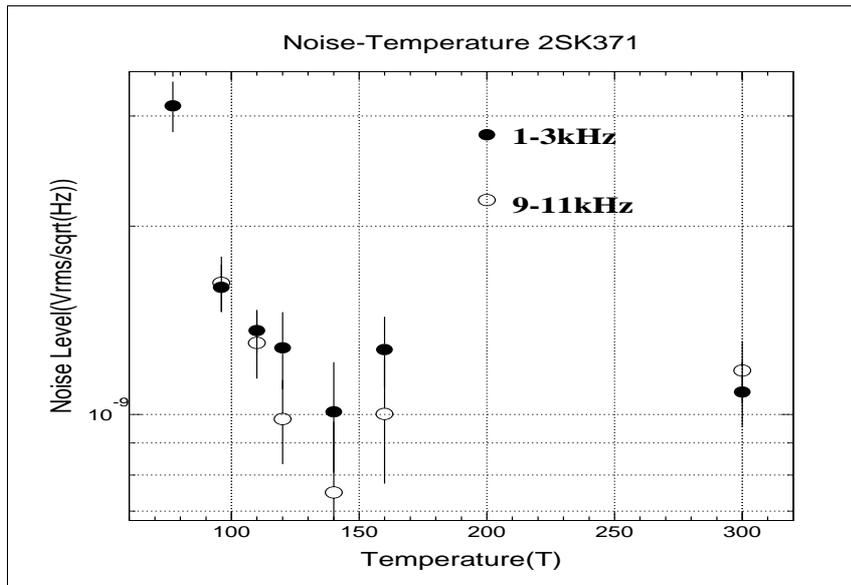


Figure 4.10: 2SK371 の雑音の温度依存性

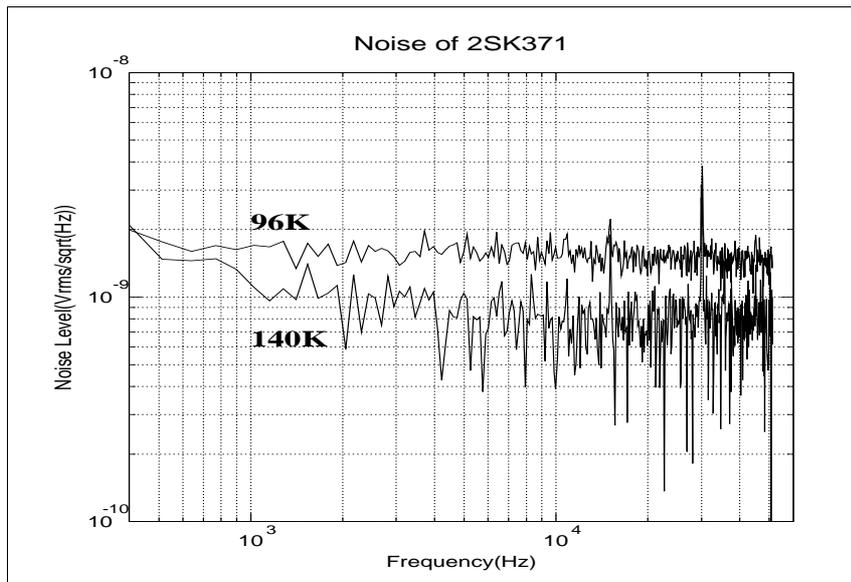


Figure 4.11: 2SK371 の 96K と 140K での雑音

4.2.3 ドレイン電流 – 雑音特性

次にドレイン電流を変化させながら雑音レベルがどう変わるかを調べた。測定回路は前と同様 Fig. 4.9である。ドレイン電流の設定にはソース抵抗を取り換えることによって行った。このようにして液体窒素温度と室温で測定した結果を Fig. 4.12に示す。

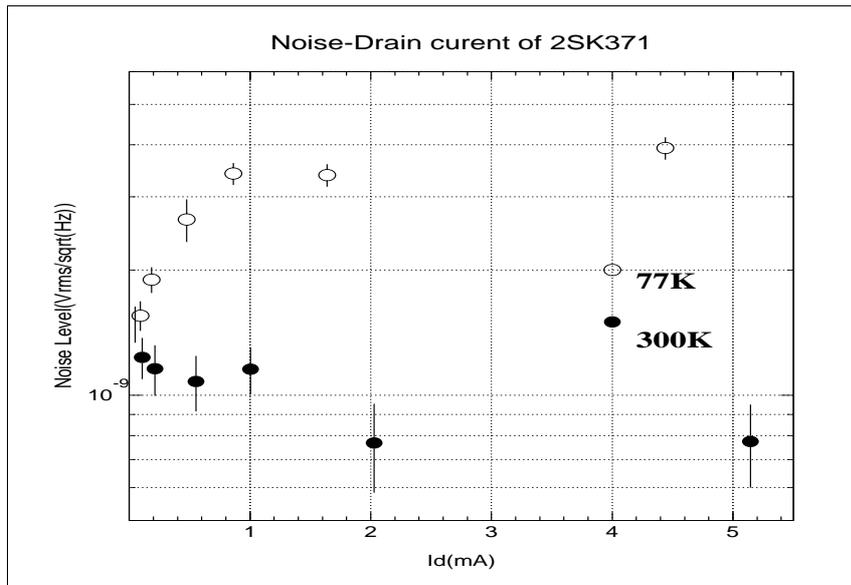


Figure 4.12: 2SK371 の雑音の室温と液体窒素温度でのドレイン電流依存性

Fig.4.2からわかるように、この 2SK371 は温度を変化させることによって $-0.3V < V_{GS} \sim 0.4V$ にわたって V_{GS} でドレイン電流を制御することができる。しかし、低雑音な JFET ながらその性能が保証されているのは室温動作時であり、つまり V_{GS} が負の領域で使用してこそ低雑音を実現できるわけである。Fig. 4.12を見ると、室温ではドレイン電流が大きくなるほど、すなわち Fig.4.2のドレイン電流-ゲート・ソース間電圧特性での動作点が右にずれるほど雑音が増え、一方 77K ではドレイン電流が小さくなるほど、すなわちドレイン電流-ゲート・ソース間電圧特性での動作点が左にずれるほど雑音が減少することがわかる。このことから、室温動作に近いところ、すなわち V_{GS} が小さいほうが好ましいと考えられる。JFET を 130K~150K で動作させる場合、この温度ではドレイン電流の値に関わらず V_{GS} は正であるため、室温動作に近づけるためには Fig.4.2から、小さなドレイン電流で JFET を動作させる必要がある。

4.2.4 まとめ

以上から、JFET を低雑音で使用するには

1. JFET の動作温度 : 130K~150K
2. ドレイン電流 : 小さく

となる。しかし、JFET を通した後のカロリメータの信号を低雑音で取り出すには、ドレイン電流が小さすぎると配線が拾う雑音に対して弱くなるため注意が必要である。

Chapter 5

カロリメータ測定系の開発

一般にカロリメータの信号は微小で信号処理系のアンプの雑音がエネルギー分解能に大きく効いてくるため、回路系全体が低雑音であることが要求される。また、カロリメータの出カインピーダンスは高い(数 $M \Omega$) ので、ノイズの影響や伝送途中での信号のロスを最小限にするため、できるだけセンサーに近い段階でインピーダンス変換しなければならない。このことを実現するために、Fig.5.1のようにカロリメータからの信号を素子の近くに置いた低雑音の JFET でインピーダンス変換した後、冷却系(希釈冷凍機)から取り出し、低雑音の増幅器で十分な大きさにする。

この章では、数十 mK を実現するための希釈冷凍機について簡単に説明するとともに、この信号処理系に要求される性能と、実際に製作した回路の性能の評価をおこなう。

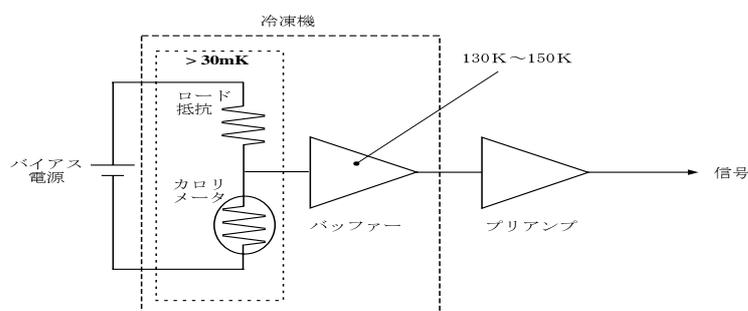


Figure 5.1: カロリメータの信号処理系

5.1 冷却系

Chapter2からもわかるように、カロリメータのエネルギー分解能は、動作温度が低い程小さい。本研究では、数十 mK という極低温の冷却を実現できる Oxford Instruments 社製の希釈冷

凍機を使用した。

5.1.1 希釈冷凍機の原理

この節では、その希釈冷凍機の動作原理の簡単な説明をする。

希釈冷凍機の模式図を Fig. 5.2に示す。この図に書かれている各部の役割はすぐ後で述べる。冷却したい試料は experimental plate の下からねじどめして固定する。

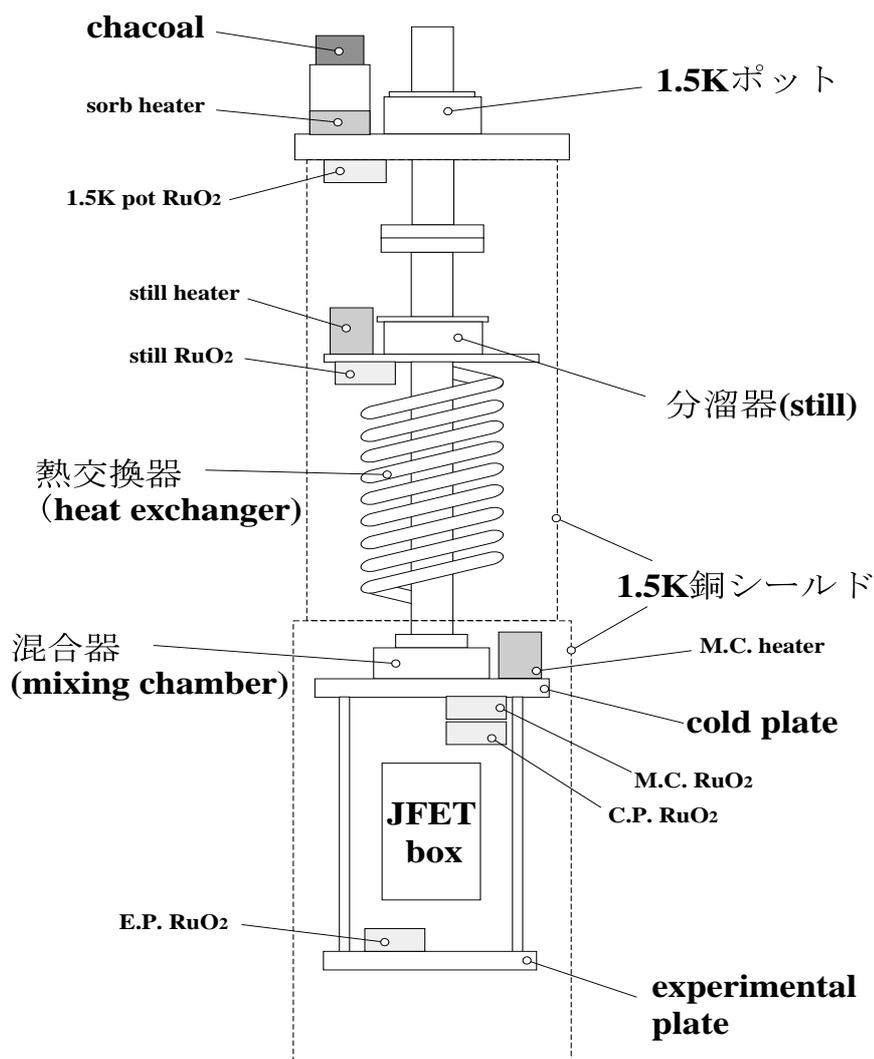


Figure 5.2: 希釈冷凍機模式図

³He と ⁴He の、冷却時での流れを追った希釈冷凍機のダイアグラムは Fig. 5.3である。

³He と ⁴He の混合液 (mixture) は、臨界温度 0.87K 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、濃厚層は、希薄層の上に浮かぶ。³He のエンタルピーは、2つの層で異なり、³He を濃厚層から希薄層へ

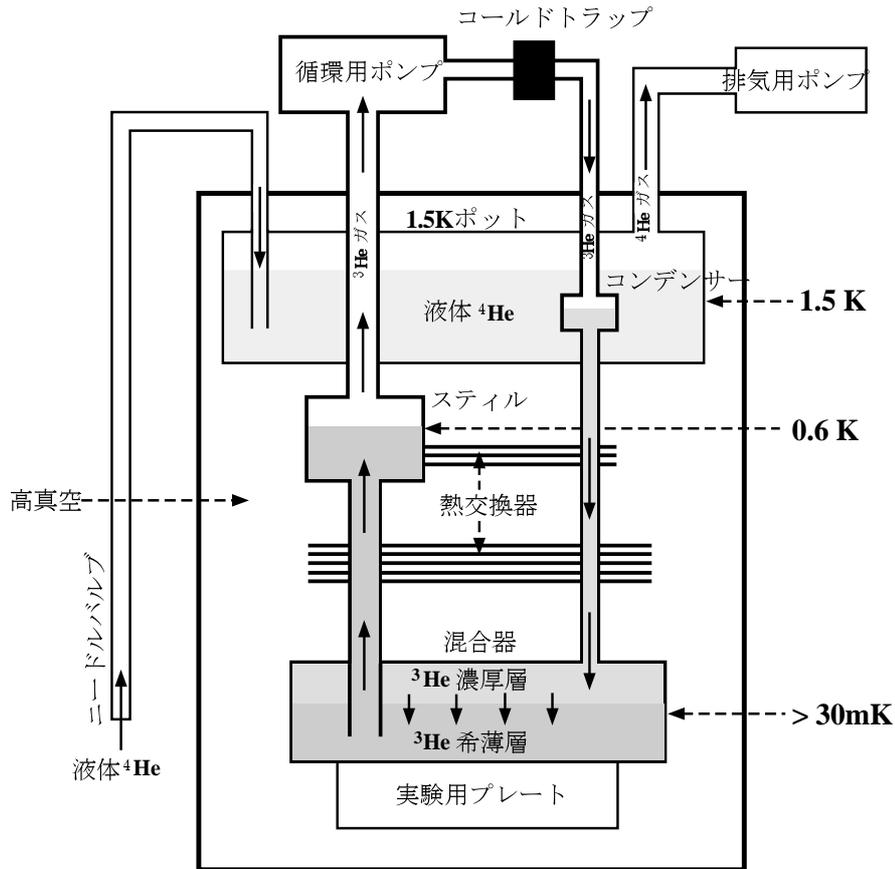


Figure 5.3: 希釈冷凍機ダイアグラム

希釈混合させることにより、冷却が起こる。この過程は混合器 (mixing chamber) 内でなされ、混合器は最終的に、この冷凍機のスペックである最低到達温度:30mK に達し、実験試料を冷却する。この冷却を維持するために、 ^3He を連続的に混合器に供給しなければならず、 ^3He をロータリーポンプで循環させることによって行う。濃厚層では、 ^4He は超流動状態にあり、わずかな濃度で含まれる ^3He 原子は、 ^4He と全く相互作用せず、理想気体に近い振る舞をする。

混合器を出た ^3He は、熱交換器によって、混合器に帰還した濃厚層の ^3He を冷却しながら分溜器 (still) へ向かう。分溜器は、 ^3He と ^4He を分離する部屋で、 ^3He を循環中は 0.6 ~ 0.7K の温度に保たれている。このため、1.5K POT で液化されて帰ってきた循環中の暖かい ^3He を分溜器の脇にある熱交換器で再び臨界温度以下に冷却できる。さらにこの温度では、 ^3He の蒸気圧は、 ^4He のそれより約 1000 倍も大きく、循環用口 - タリ - ポンプを使って、ほとんど ^3He だけを選択的に蒸発できる。したがって、分溜器内の ^3He の濃度は混合器内より低くなり、その結果浸透圧の勾配が生じ、混合器から分溜器への ^3He の流れが促進される。

循環用口 - タリ - ポンプで still から排気された ^3He は、数百 mbar に圧縮され、フィルタ - やコールドトラップを通して空気や油煙等を取り除かれた後、クライオスタットに戻ってくる。そして、メインバスの液体ヘリウムに予冷され、コンデンサーに入る。コンデンサーは、分溜器

からポンプによって排気され、昇圧した ^3He ガスを約 1.2K の温度で再び液化させる部屋であり、1.5K pot 内部にある。ガスがコンデンサーで凝縮するのに充分高い圧力を維持するために、インピーダンスが 1.5K pot の下についている。1.5K pot は、細い管の先にあるニードルバルブを開くことにより、4.2K の ^4He 槽であるメインバスから液体 ^4He を取り込み、また 1.5K pot の減圧と still を出た ^3He ガスによる冷却によって、定常的な 1.5K ステージをつくっている。

コンデンサーを出た ^3He は、一連の熱交換器で冷却されながら再び混合器に戻る。

5.1.2 センサー

Fig.5.3の各場所に Table5.1に示すような温度センサーが設置されている。

温度計	場所	Range[K]
270 Ω Allen Bradley	sorb	4~270
2200 Ω RuO ₂	1.5K pot	30m~7
2200 Ω RuO ₂	分溜器	30m~7
2200 Ω RuO ₂	cold plate	30m~7
2200 Ω RuO ₂	混合器	30m~7
2200 Ω RuO ₂ (Fully calibrated)	experimental plate	30m~4.2

Table 5.1: dilution unit の各場所に設置された温度センサーと、その温度範囲

experimental plate の RuO₂ 温度計は 20m~4.2K の範囲で更正済みで、抵抗値は Fig. 5.4 のような温度依存性を示す。

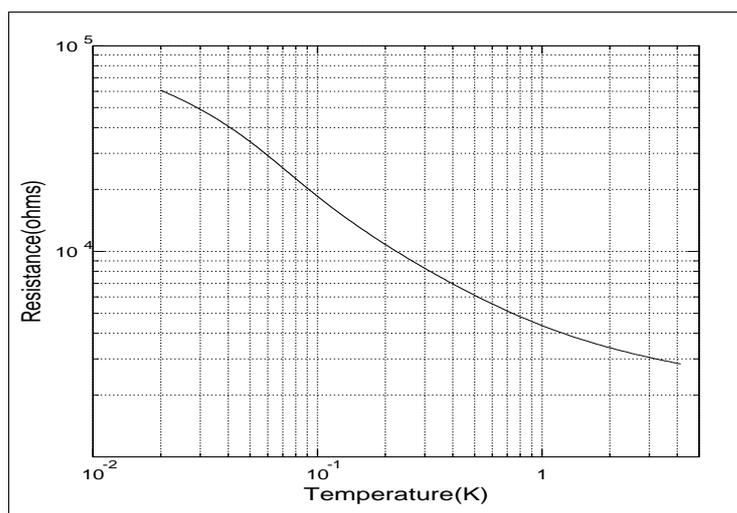


Figure 5.4: RuO₂ 温度計のキャリブレーションカーブ

5.2 buffer の熱設計

5.2.1 設計

本章の始めにも触れたように、カロリメータの出力インピーダンスは高く、伝送途中での信号の損失を防ぐために buffer となる JFET をカロリメータの近くに置く必要がある。一方、Section 4.2 で説明したように、JFET の雑音を抑えるにはその温度を 130K~150K 程度にする必要があるが、希釈冷凍機の冷却系には、130K~150K になるステージがない。そこで、この2つの要請を満たすために、JFET を混合器と experimental plate の間に設置する(カロリメータは、experimental plate の下側に固定)。JFET が剥き出しのままでは、輻射によって混合器等の冷却系が温まってしまうため、放射率の低いアルミニウム製の箱 (JFET BOX) で覆う。この様子を Fig.5.6 と Fig. 5.6 に示す。

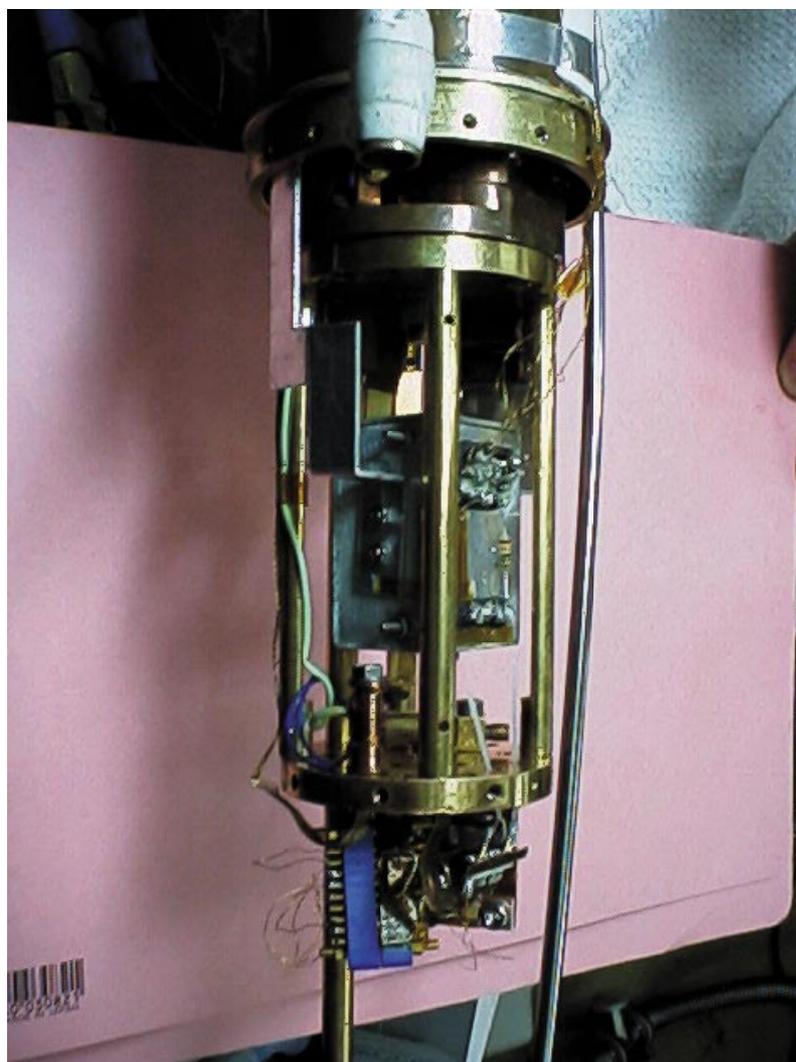


Figure 5.5: 希釈冷凍機に組み込んだ JFET BOX の写真

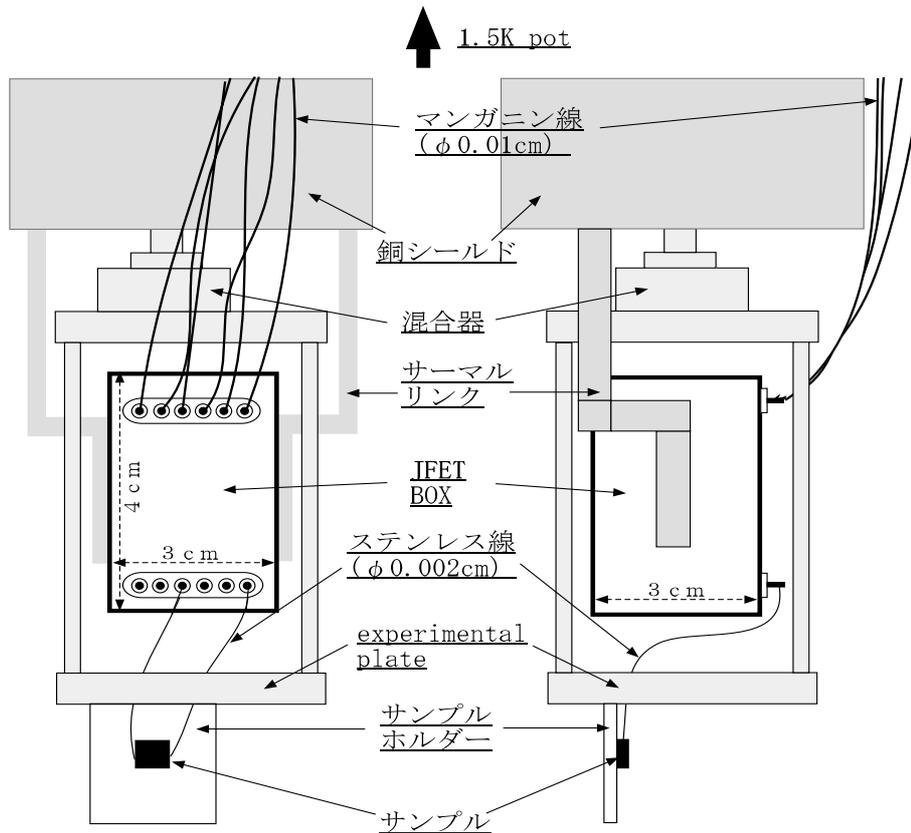


Figure 5.6: 希釈冷凍機に組み込んだ JFET BOX の模式図

Fig.5.6のように、混合器のすぐ上には 1.5K pot のあるステージから、銅製筒のシールドがかぶせられている (Fig. 5.3も参照)。その銅製シールドの下端に取り付けたアルミニウム板で、JFET BOX を固定した。つまり、そのアルミニウム板が 1.5K pot への thermal link となり、基本的に JFET BOX は 1.5K になるわけである。また、BOX とアルミ板は、混合器等の近くの冷却系には熱接触しないような造りになっている。

JFET BOX の内部の様子を Fig.5.7に示す。プラスチック板の上に JFET(東芝製 2SK371) を接着し、それに隣接して温度を上げるためのヒーターとして 10k Ω の抵抗を取り付けた。さらに、JFET の上に温度をモニターするための更正済 Lake shore 製 Si diode 抵抗温度計がのっている。プラスチック板自体は BOX から延びている 4 本のステンレス線 ($\phi 0.02\text{mm}$) で吊下げられていて、このステンレス線の端は BOX の端にあるスプリングに結ばれ、適度な tension がかかっている。

これらプラスチック板の上の JFET・温度計・ヒーターは、これらから発する radiation を抑えるため、また同時に radiation の反射によってこれらをさらに温めるという目的で、 $2\mu\text{m}$ 厚のアルミナイズドマイラで 2 重にくるんだ。

これらの素子から配線を BOX の外に取り出すには 7 系統 (JFET の 3 本・温度計の 2 本・ヒーターの 2 本) 必要となるわけだが、そのうち JFET のゲートからの 1 本は、Fig.5.7の BOX の下

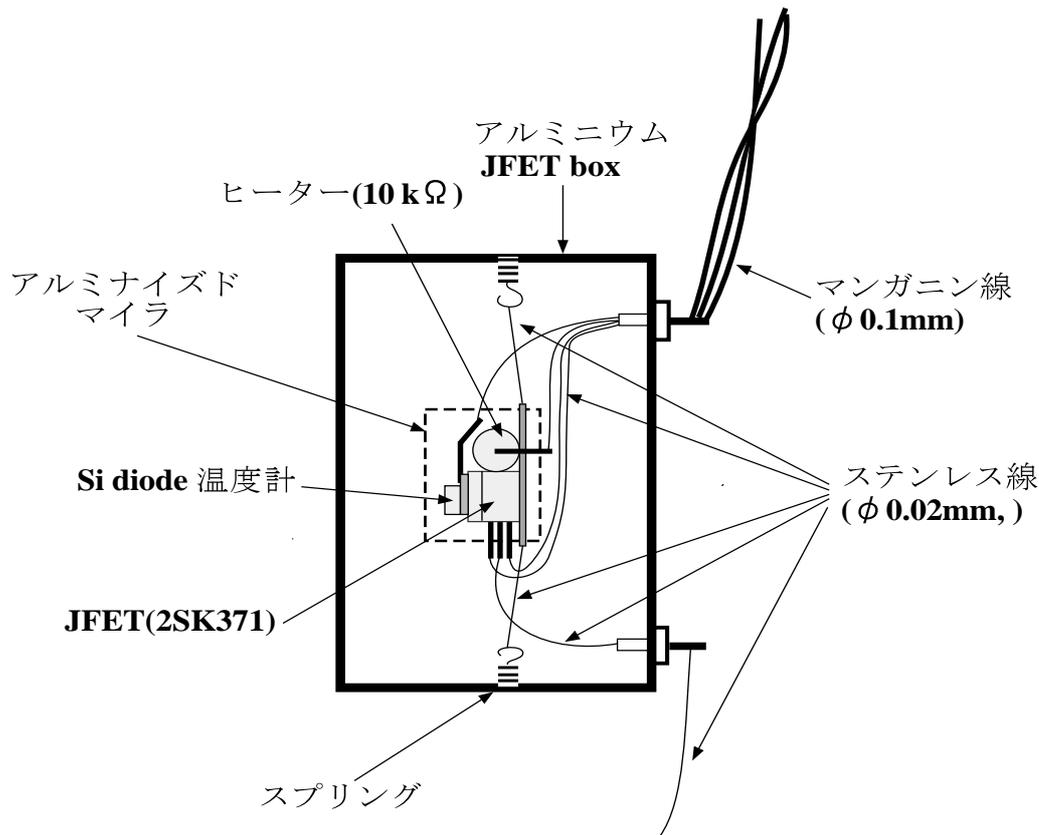


Figure 5.7: JFET BOX の内部の模式図

側のコネクターにいき、外側に突き出したピンに半田付けされたステンレス線 ($\phi 0.02\text{mm}$) がカロリメータの一方の端子とつながる。一方、残りの6系統、すなわちヒーターの2本、温度計の2本、JFETのソース・ドレインの2本は、BOXの上側のコネクターにいき、BOXの外側に突き出したピンに半田付けされたマンガン線 ($\phi 0.1\text{mm}$) が1K potのそばのコネクターまでいき、そのコネクターを通して希釈冷凍機の外に取り出される。以上のような状況で、JFETとヒーターによって発生する熱は、全てBOXに逃げていくと考えられるが、その熱は、BOXから thermal link を通じて1K potに向かうわけである。ところが、この希釈冷凍機の1K potに、スペック値で5mW以上の発熱を加えると1K potが昇温し冷却系全体が温まってしまう恐れがある。したがって、JFETにかかる電力を抑えつつ(数mWに)、雑音が低くなる温度にまでJFETを温めるといった断熱技術が必要となる。

Fig.5.7のセットアップでBOXへの熱輸送は主に、

- ① ステンレス線 (配線の7系統 + プラスチック板を吊っている4系統) を通じての固体による熱輸送。
- ② JFETの輻射による熱輸送。

であると考えられる。また、ガスによる熱伝導も考えられるがこれについては無視する。固体による熱輸送については、断面積 A [cm²] を通って x 方向に流れる熱量は毎秒

$$\dot{Q} = -\kappa(T) \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad [\text{W}] \quad (5.1)$$

で与えられる。ここで $\kappa(T)$ [W/cm K] は物質の熱伝導率である。特に物体の断面積が一定の時は長さを L とすると温度が T_1 と T_2 の間の熱流は

$$\dot{Q} = \frac{A}{L} \cdot \left(\int_{T_0}^{T_2} \kappa(T) dT - \int_{T_0}^{T_1} \kappa(T) dT \right) \quad [\text{W}] \quad (5.2)$$

$$= \frac{A}{L} \cdot (\theta_2 - \theta_1) \quad [\text{W}] \quad (5.3)$$

である。ここで θ_1, θ_2 は熱ポテンシャルと呼ばれる。

つまり JFET から BOX への熱伝導を抑えるには、配線と JFET を吊す線として、細く、長くそして熱伝導率が低い物質を選ぶ必要がある。熱伝導率が低いものとして、マンガン線とステンレス線が上げられる (B.1参照)。数 K 以下で、マンガンはステンレスよりも熱伝導率が低い、それ以上の温度では逆にステンレスの方が低くなる。このような理由から、5.7に描いたように配線と JFET を吊す素材として、皮膜なしの $\phi 0.02\text{mm}$ のステンレス線を使うことにした。Fig. 5.8は、マンガンとステンレスの熱ポテンシャルである。

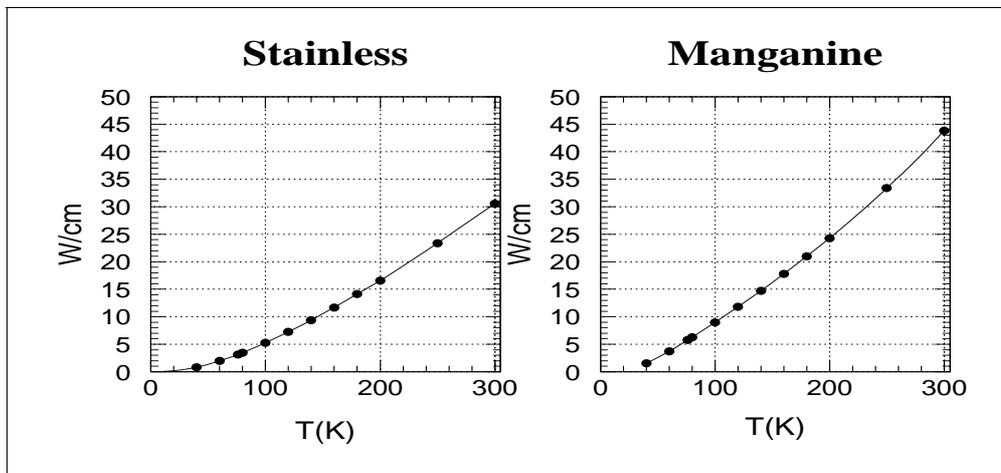


Figure 5.8: ステンレス線とマンガン線の熱ポテンシャル

次に輻射による熱輸送について考える。いま温度 T_2 、放射率が ε_2 、表面積が A_2 の物体が温度 $T_1 (< T_2)$ 、放射率 ε_1 、表面積 A_1 の物体に囲われているとする。このとき高温側 (T_2) から低温側 (T_1) に、毎秒次式で与えられるエネルギーが放射によって運ばれる。

$$\dot{Q}_0 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 A_1}{\varepsilon_2 + (A_2/A_1)(1 - \varepsilon_1) \varepsilon_2} \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad [\text{W}] \quad (5.4)$$

σ は Stefan-Boltzman 係数で $\sigma = 5.67 \times 10^{-12} [\text{W}/\text{cm}^2 \text{K}^4]$ である。一般に放射率は光沢のある材料ほど小さく、また低温になると小さくなる ($\varepsilon(300\text{K})/\varepsilon(77\text{K})$)。容易に入手ができて加工しやすい素材であるアルミニウムと銅の放射率を Table 5.2に示す。

アルミニウム	温度 (K)	放射率	銅	温度 (K)	放射率
研磨面	450~850	0.04~0.06	電解研磨面	350	0.02
購入板面	350	0.09	研磨面	300	0.04
粗面	300	0.07	つや消し面	300	0.15
酸化処理面	350~800	0.2~0.33	黒色酸化面	300	0.76

Table 5.2: アルミニウム、銅の放射率。(文献 [13] より)

輻射による熱輸送を抑えるには、放射率の小さい材質を選ぶ必要があるが、またその一方で、輻射源となる物質とその周囲の間に n 枚のシールドを挿入することによって、熱輸送は

$$\dot{Q} = \frac{1}{n+1} \dot{Q}_0 \quad [\text{W}/\text{cm}^2] \quad (5.5)$$

のように減少する。

前にも説明したように、JFET で発生する輻射熱を、数十 K という極低温に達する冷却系に逃さないために Fig. 5.7のように JFET をアルミニウムの角材 (JFET BOX) で覆った。アルミを選んだ理由は、加工しやすく放射率が小さいからである。さらに、JFET には厚さ $\phi 0.02\text{mm}$ のアルミナイズドマイラを二重に巻き、BOX への輻射熱を防ぐ。

5.2.2 評価

以上のように製作した JFET BOX が熱的な設計としてうまく動作するものか、すなわち発熱量が数 mW 程度で、はたして JFET 自身は 130K~150K まで昇温するかを検証する。まず (5.3)、(5.4)、(5.5) 式と Fig. 5.8、Table 5.2のパラメータをもとにして、JFET から BOX までの配線 (7 本)、吊線 (4 本)、輻射、それらの total ごとに JFET にある一定の発熱量があったときにどれだけ温度上昇するかを計算したのが Fig. 5.9と、Fig. 5.10である。ここで輻射については、BOX の放射率を Table 5.2の購入板面の 0.09、JFET・温度計・ヒーターの放射率を 1.0 として計算した。Fig. 5.9は JFET BOX が液体窒素温度のときの発熱を、Fig. 5.10は希釈冷凍機の循環運転中 BOX を 1.5K にしたときの発熱を想定している。いずれの場合でも、輻射が最も効くことがわかる。

次に、実際に JFET の隣に取り付けた 10k Ω の抵抗を発熱させ、どれだけの昇温が起こるかを測定した。測定データは Fig. 5.9、Fig. 5.10の”all” にプロットしてある点である。理論曲線の上にきれいにのっているのがわかる。Fig. 5.10から液体ヘリウムを使った循環運転で、JFET を 130K~150K にするには 2~4mW の発熱を必要とする。

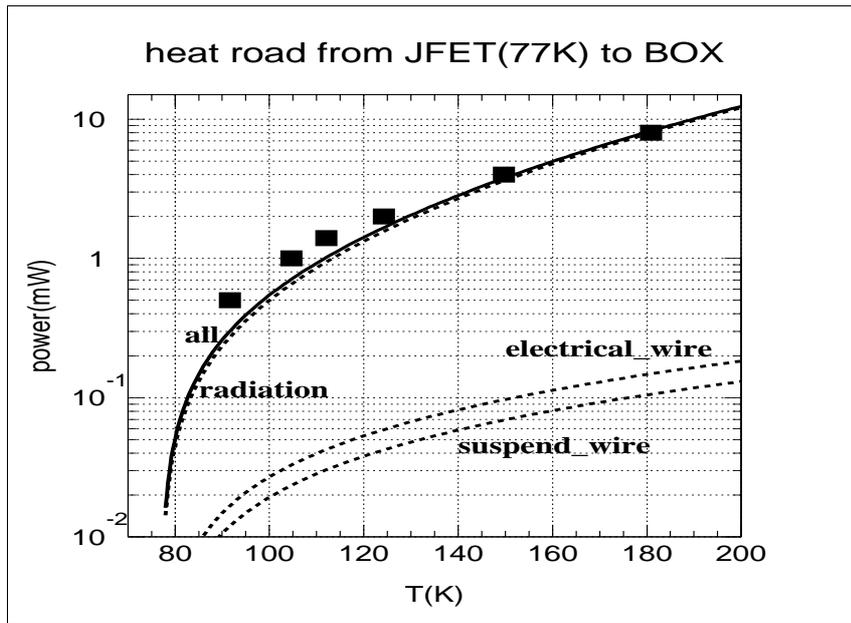


Figure 5.9: JFET BOX の温度:77K で、JFET で発生した各発熱量とそのときの JFET の温度

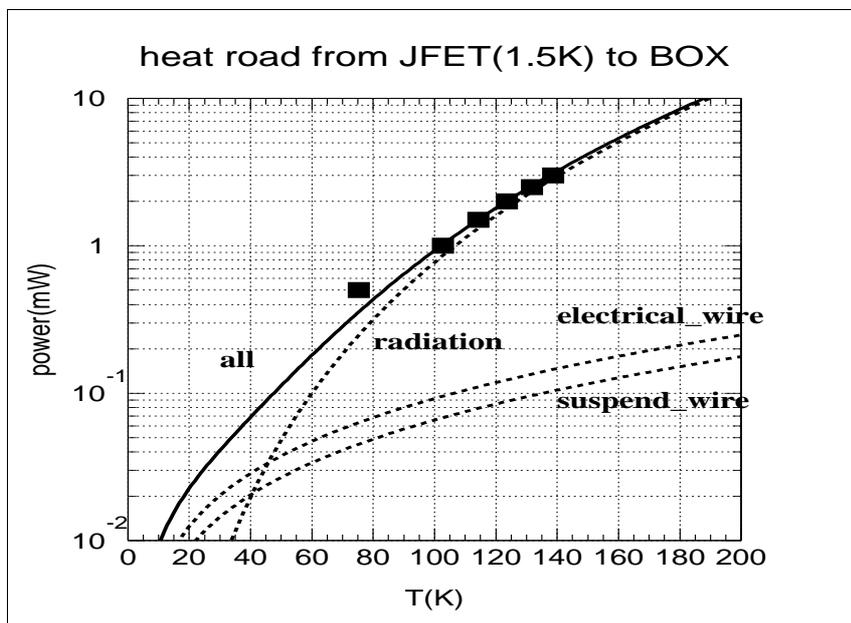


Figure 5.10: JFET BOX の温度:1.5K で、JFET で発生した各発熱量とそのときの JFET の温度

5.2.3 XRS のバッファの熱設計

前にも述べたように、JFET は雑音が低くなる 130K~150K で動作させる必要がある。しかし、希釈冷凍機にはそのような高温になるステージがないために、以上のように JFET BOX を製作し、バッファで発生した熱が逃げないうちにバッファ自身を温めるといった断熱技術を用いた工夫が必要であった。このことは一見、希釈冷凍機に高温ステージがないがための突貫工事という印象を与えるかもしれない。しかし、カロリメータに高エネルギー分解能を求めるならばカロリメータを極低温で動作させる必要があり、一方カロリメータよりずっと高温で動作させるバッファを、インピーダンス変換のために極低温下のカロリメータのすぐそばに設置する必要があるため、バッファで生じた熱でカロリメータを昇温させない、以上のような断熱技術は場当たり的なものではなく、むしろ必然とも言えるものである。実際、XRS でもバッファの熱設計で以上のような断熱技術を駆使している。

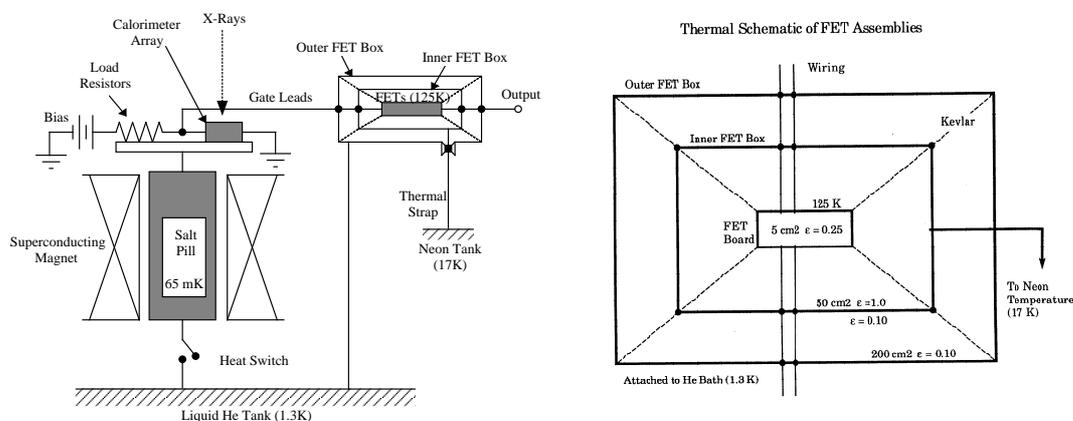


Figure 5.11: XRS:FEA(Front-End Assembly) の熱的な構成 (左) と JFET 周りの熱的な構成 (右)

XRS では JFET は 125K で動作させる。そして、Fig.5.11¹ に示すように、JFET の搭載されたボードが二重のケースに収められ、それを熱伝導の悪い合成繊維:Kevlar² で吊し、JFET ボードで発生した熱のほとんど (~99%) を 17K のネオンタンクに捨てる。また、JFET からの配線は JFET BOX 内では CuNi でコートした太さ 17 μ m のステンレススチール線を、BOX の外部では太さ 20 μ m の NbTi 線を使用している。

Fig.5.12³ は XRS の JFET ボードから BOX に流れる各熱輸送、すなわち輻射・配線 (マンガン線⁴)・吊り線 (Kevlar) の熱輸送と温度の関係を示したものである。Fig.5.9、5.9と同様に輻射による熱輸送が最も支配的であることがわかる。

¹左の図は、文献 [11] より。右の図は、Goddard Space Flight Center による Preliminary Design Review (95 年 3 月 1~3) からの抜粋。

²Du pon 社の登録商標。

³Goddard Space Flight Center による Preliminary Design Review(95 年 3 月 1~3) からの抜粋 (一部加筆)。

⁴Fig.5.12は古い (95 年) データで、JFET BOX 内の配線としては、熱伝導度の面でマンガン線が優れており候補となったが、強度の面で劣るため現在ではステンレススチール線に取って替わった。

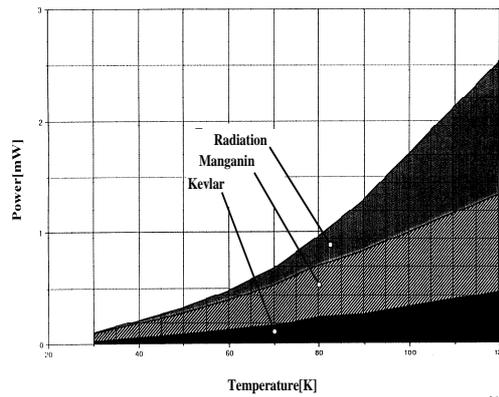


Figure 5.12: XRS の JFET ボードで発生した各熱輸送の熱量と温度

5.3 プリアンプ

5.3.1 設計

ここで取り上げるのは、バッファーを通しただけの微小なカロリメータからの信号を希釈冷凍機の外へ取り出して増幅するためのプリアンプの製作とその評価である。

可能な限り小さな温度変化を測定するには、その雑音レベルは少なくともバッファーと同程度 (nV_{rms}/\sqrt{Hz}) である必要がある。またコモンモードノイズを除去できるようにプリアンプの初段には JFET による差動増幅器とした。雑音特性がそれほど厳しく要求されない後段には取扱が容易である OP アンプを用いてゲインをかせぐ。このようにして製作したプリアンプの回路を Fig. 5.13 と、Fig. 5.14 に示す。

Fig. 5.13 の回路で温度変化によるオフセット、ゲインの変化を防ぐために JFET1・2 には、特性の良くそろった 2 つの JFET がパッケージされている dual JFET の 2SK389 を用いる。また、トランジスタには汎用の小信号用 NPN トランジスタの 2SC1815 を使用した。 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_D はそれぞれ $39k\Omega$ 、 $11k\Omega$ 、 $1k\Omega$ 、 $2k\Omega$ とする。これらのうち $R_1 \sim R_3$ の抵抗と transistor は JFET のドレイン電流を一定に保つためのものである。また、 V_{CC} は $\pm 12V$ とする。

Fig. 5.14 の回路では $IC_1 \sim IC_3$ にオーディオ用低雑音 OP アンプ $\mu PC4570$ を用い、 $R_4 \sim R_7$ の抵抗にはそれぞれ $1k\Omega$ 、 $100k\Omega$ 、 $10k\Omega$ 、 $10k\Omega$ の抵抗を用いた。

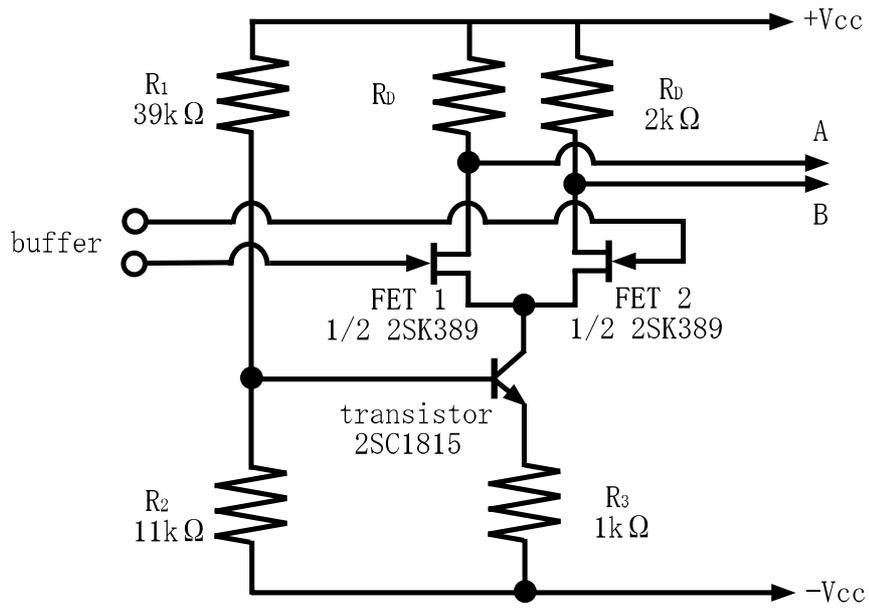


Figure 5.13: プリアンプの初段

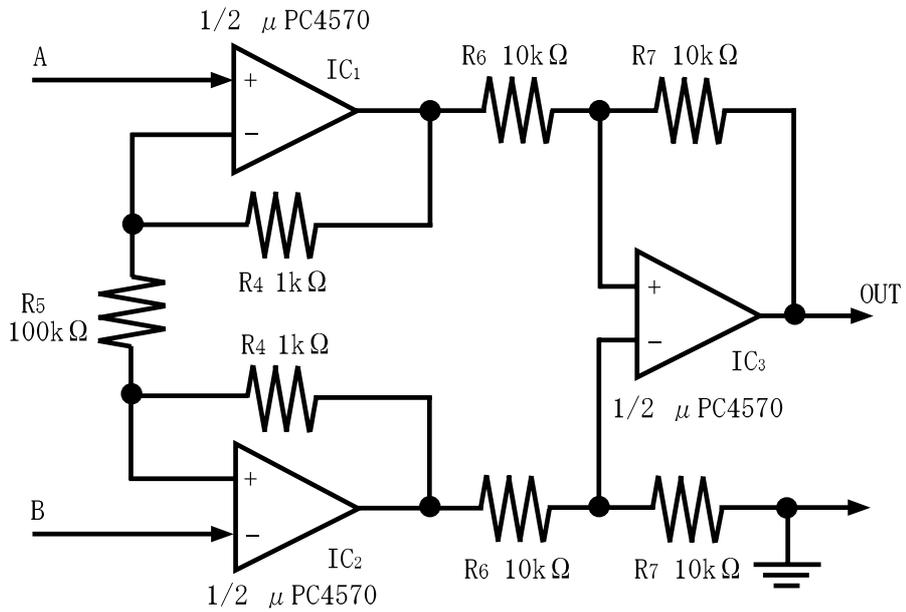


Figure 5.14: プリアンプの後段

5.3.2 プリアンプの動作・雑音とその評価

[差動増幅回路 (初段)]

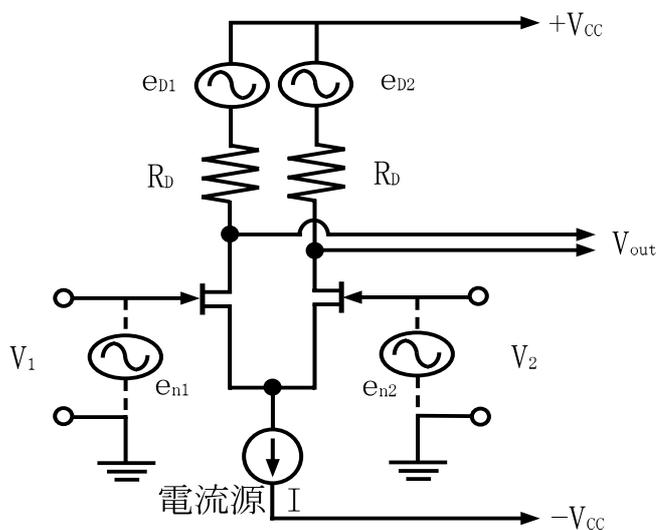


Figure 5.15: 差動増幅器の雑音源

プリアンプの初段すなわち Fig. 5.13の差動増幅回路の基本回路を Fig. 5.15に示す。まずは差動増幅回路の動作について考える。以下では V_1 、 I_{D2} のような大文字の量は直流電位、直流電流を表し、これらの量の微小変化分 (交流成分) は v_1 、 i_{D2} のような小文字で表すこととする。

そうすると、Fig. 5.15の JFET の相互コンダクタンス g_m は

$$g_m \equiv \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} = \frac{i_D}{v_{GS}} \quad (5.6)$$

であり、これを用いると

$$v_{GS} = \frac{i_D}{g_m} \quad (5.7)$$

であるから Fig. 5.15で V_1 の微小変化 v_1 に対して

$$v_1 = \frac{i_{D1}}{g_{m1}} \quad (5.8)$$

のように変化する。また、回路全体に流れる電流は電流源によって $I_1 + I_2 = I$ のように固定されているから

$$i_{D1} + i_{D2} = 0 \quad (5.9)$$

であり、これと (5.8) をあわせると

$$i_{D2} = -i_{D1} = -g_{m1}v_1 \equiv g_{m2}v_2 \quad (5.10)$$

のように I_{D2} が変化する。したがって $g_{m1} = g_{m2} \equiv g_m$ 、 $R_{D1} = R_{D2} \equiv R_D$ とすると出力電圧 v_{out} は

$$v_{out} = v_{D1} - v_{D2} \quad (5.11)$$

$$= R_D(i_{D1} - i_{D2}) \quad (5.12)$$

$$= g_m R_D(v_1 - v_2) \quad (5.13)$$

のようになる。すなわち、Fig. 5.15の回路は入力電圧の変化の差 ($v_1 - v_2$) の $G_1 \equiv g_m R_D$ 倍を出力する差動増幅器として動作しているわけである。Fig. 5.13の回路では、2SK389の g_m が 20mS であるから $G_1=40$ 倍程度になる。

次に差動増幅器の雑音について考察する。Fig. 5.15に主な雑音源が記してある。この回路では定電流回路の雑音を考慮する必要はない。というのは、電流源に i_n という雑音のつたととしても、それは R_{D1} と R_{D2} に等しく $\frac{i_n}{2}$ ずつ流れ、出力側では

$$\frac{i_n}{2} R_{D1} - \frac{i_n}{2} R_{D2} = 0 \quad (5.14)$$

のように相殺されるからである。

まず JFET 自身が持つ雑音 e_{n1} 、 e_{n2} について考える。これらは V_1 、 V_2 の微小変化と考えられるから $G_1 \equiv g_m R_D$ を用いて (5.13) より出力には

$$v_{out} = G_1(v_1 - v_2) + G_1(e_{n1} - e_{n2}) \quad (5.15)$$

のような雑音が現われる。

次にドレイン抵抗 R_D の熱雑音 e_D について考える。この雑音によって (5.13) は

$$v_{out} = R_D(i_{D1} - i_{D2}) + e_{D1} - e_{D2} \quad (5.16)$$

$$= g_m R_D(v_1 - v_2) + e_{D1} - e_{D2} \quad (5.17)$$

のようになる。つまり、 e_D はそのままの大きさに出力に現われる。

以上の考察から、Fig. 5.15の回路の出力に現われる雑音は

$$G_1 v_n = \sqrt{G_1^2(e_{n1}^2 + e_{n2}^2) + e_{D1}^2 + e_{D2}^2} \quad (5.18)$$

$$= G_1 \sqrt{2e_n^2 + 2\left(\frac{e_D^2}{G_1}\right)^2} \quad (5.19)$$

である。 G_1 が十分大きければ e_D の項は無視できるので、このとき入力換算雑音電圧は Fig. 5.13の回路では、2SK389のスペック値： $e_n \sim 1.1nV/\sqrt{Hz}$ を用いて

$$v_{n1} = \sqrt{2}e_n \sim 1.6nV/\sqrt{Hz} \quad (5.20)$$

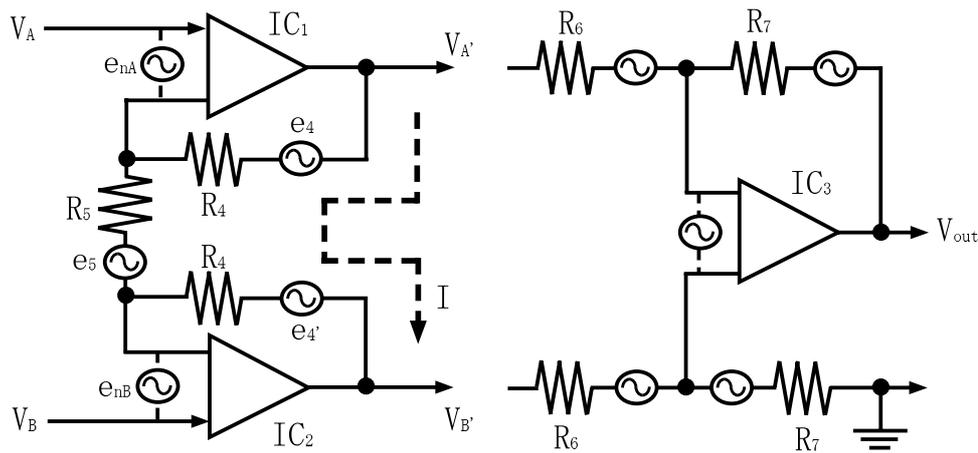


Figure 5.16: OP アンプ増幅器の雑音源

程度になる。

[OP アンプ増幅回路 (後段)]

Fig. 5.14の回路の動作は Fig. 5.16のように IC₁ 及び IC₂ と、IC₃ に分けて考えることができる。IC₁、IC₂ の部分を考えるためにこれらの OP アンプに流れる電流を I とする。OP アンプの正負入力端子間は同電位で、しかも、その間には電流が流れないと考えることができるから

$$V_A - IR_5 = V_B \quad (5.21)$$

すなわち

$$I = \frac{V_A - V_B}{R_5} \quad (5.22)$$

と表すことができる。また、2つの OP アンプの出力端子間の電圧降下に着目すると

$$V_{A'} - I(R_A + R_B + R_A) = V_{B'} \quad (5.23)$$

である。以上の (5.22)、(5.23) 式を用いると、

$$V_{A'} - V_{B'} = \frac{V_A - V_B}{R_5} (2R_4 + R_5) \quad (5.24)$$

$$= \left(2\frac{R_4}{R_5} + 1\right) (V_A - V_B) \quad (5.25)$$

$$= G_2(V_A - V_B) \quad (5.26)$$

のように表すことができる。IC₃ の回路のゲインは 1 であるため IC₃ の回路でこの V_{A'} と V_{B'} の差をとることにより、Fig. 5.14の回路全体ではゲインは

$$G_2 \equiv \left(2\frac{R_4}{R_5} + 1\right) \times \frac{R_6}{R_7} = 21 \text{倍} \quad (5.27)$$

の差動増幅器として動作することになる。

次に OP アンプ増幅器の雑音について考察する。Fig. 5.16に主な雑音源が記してある。 e_{nA} 、 e_{nB} は OP アンプ自身の入力換算雑音電圧を、 e_4 、 e_5 はそれぞれ R_4 、 R_5 の抵抗の熱雑音を表す。以下ではこれらの雑音の、出力に対する寄与を考える。OP アンプの入力換算雑音電圧 e_{nA} 、 e_{nB} は V_A 、 V_B の微小変化分と考えることができるので、これらの雑音は出力に G_2 倍になって現われる。

次に、 R_4 の熱雑音 e_4 を考える。この雑音が存在することにより (5.23) は

$$V_{A'} - e_4 - I(R_A + R_B + R_A) - e_{A'} = V_{B'} \quad (5.28)$$

のように書き換えられる。すなわち

$$V_{A'} - V_{B'} = G(V_A + V_B) + e_4 + e_{A'} \quad (5.29)$$

であるから、これらの雑音は出力にそのままの大きさと現われる。

最後に R_5 の熱雑音 e_5 を考える。この項は式 (5.21) に対して

$$V_A - e_5 - IR_5 = V_B \quad (5.30)$$

という形で書いてくる。また、式 (5.23) に対しては

$$V_{A'} - I(R_A + R_B + R_A) - e_5 = V_{B'} \quad (5.31)$$

のような寄与を示す。すなわちこの雑音によって

$$V_{A'} - V_{B'} = G_2(V_A - V_B) + (G_2 - 1)e_5 \quad (5.32)$$

というように出力が変化する。 G_2 が十分大きければ、この雑音は出力に G_2 倍の大きさと現われる。

以上の雑音のうち、出力に対して大きく寄与する可能性のあるものは OP アンプのゲイン： G_2 倍になって現われてくるもの、すなわち e_{nA} 、 e_{nB} 、 e_5 である。ところがこの回路の入力抵抗は OP アンプのみで決まるため、 R_5 の値を数 $10 \sim 100 \Omega$ 程度の小さな値にとることができる。例えば、 $R_5 = 100 \Omega$ としても熱雑音は $1.3nV_{rms}/\sqrt{Hz}$ であり、一般に用いられている低雑音な OP アンプの雑音 $\sim 4.5nV_{rms}/\sqrt{Hz}$ に比べて十分無視できる。また、 IC_3 の回路に関しては $R_6 = R_7$ のため、この回路のゲインは 1 となり出力にそれほどきいてこないと考えられる。

以上のことから R_5 を小さくして、 G_2 を大きくとればこの増幅回路の入力換算雑音電圧は OP アンプの雑音だけで決まり、したがって

$$v_{n2} = \sqrt{e_{nA}^2 + e_{nB}^2} \sim \sqrt{2}e_n \quad (5.33)$$

となる。Fig. 5.14の OP アンプ： $\mu PC4570$ の入力換算雑音電圧のスペック値 $\sim 4.5nV_{rms}/\sqrt{Hz}$ を用いると

$$v_{n2} = \sqrt{2}e_n \sim 6.4nV/\sqrt{Hz} \quad (5.34)$$

になる。

[プリアンプ全体]

以上の議論を総合すると、プリアンプ全体でのゲインは

$$G = G_1 \times G_2 = 840 \text{倍} \quad (5.35)$$

となる。また、プリアンプ全体での入力換算雑音電圧は

$$v_n = \frac{G_2 \sqrt{(G_1 v_{n1})^2 + v_{n2}^2}}{G} = 1.6 \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (5.36)$$

というようにほぼ初段の差動増幅器の雑音で決まってしまうことがわかる。

以上のような考察から、実際に製作したアンプが理論通り動作するか測定した。アンプノ雑音レベルとゲインの実測を Fig. 5.17に示す。このグラフから

$$G = 360 \text{ 倍} \quad (5.37)$$

$$v_n = 1.58 \text{ [nV}/\sqrt{\text{Hz}}] \text{ (1kHz以上)} \quad (5.38)$$

という結果を得た。ゲインの実測値は予想した値 (5.35) と大きな差があるが、これは 2SK389 の g_m のばらつきのためである。

また、アンプにカロリメータと同型のテストパルスを入力し、出力に入力の 360 倍の波形が現われるかを測定した結果が Fig.5.18であり、設計通り動作することが確認できた。

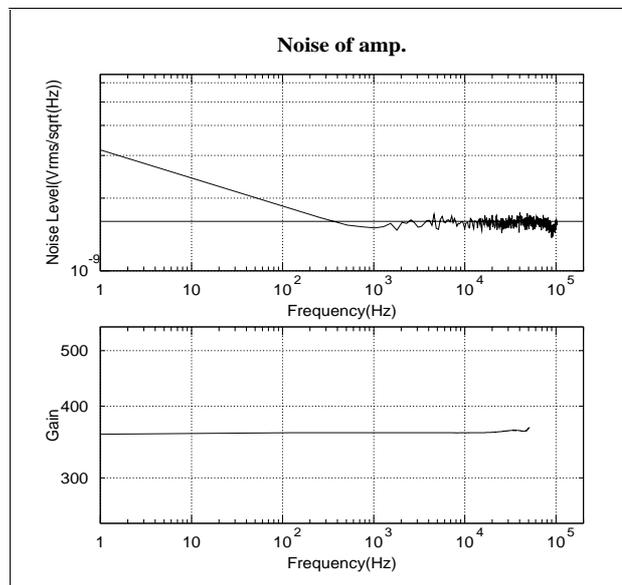


Figure 5.17: プリアンプの雑音 (上) とゲイン (下)

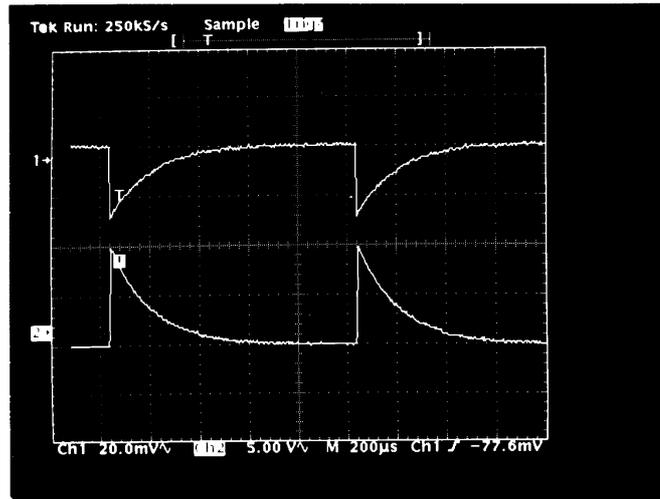


Figure 5.18: プリアンプの入力に入れたテストパルス (上) と、出力波形 (下)

5.4 カロリメータによる X 線検出のための測定回路の製作

ここでは、Section 5.2 と 5.3 で述べた JFET BOX とアンプを組み込んで製作した、実際にカロリメータで X 線を検出するための測定回路について述べる。製作した回路は、主に Fig.C.1 に示す XRS の電気回路を参考にしたものである。

5.4.1 製作

製作した回路図を Fig.5.19 に示す。先に述べたが、この回路は主に XRS の回路を参考にして作製したものだが、ここで製作した回路は X 線検出のために必要な最小構成とした。したがって、到底高エネルギー分解能を得るには及ばないものであるかもしれない。しかし、いきなり複雑な回路を作るのは、雑音源を特定することが困難になるなどの問題が考えられるため、最小構成からスタートして徐々にバージョンアップしていくのが好ましいと考えられる。

カロリメータで X 線を検出するための回路は大まかに 3 つの構成からなる。1 つ目はカロリメータとロード抵抗にかけるバイアス回路、2 つ目は JFET を電流でドライブする回路、そして最後がカロリメータに入射した X 線の信号を検出する回路である。もちろんこれらはそれぞれ独立した回路ではなく密接にリンクしている。以下ではそれぞれの回路について説明する。

カロリメータとロード抵抗に電流を流すバイアス回路では、数 nA という非常に小さな電流を流すためにこの回路は雑音に対して弱い。したがってこの回路で拾う可能性のある電流性の雑音を相殺させるために、Fig.5.19 に示すように配線を冷凍機内からツイストにして取り出す。冷凍機外へ取り出した配線にはシールド線を使用し、このシールドを電氣的に冷凍機に落とした。微小電流源には Keithley 社の Source Measure Unit 236 を使用するが、この電流源で拾う可能性のある商用電源の 1/f ノイズを切るために電流源をローパスフィルタに通す。このローパスフィルタ ($RC=0.047[\text{sec}]$) を収めたシャーシも、冷凍機から取り出したシールド線に落とす。

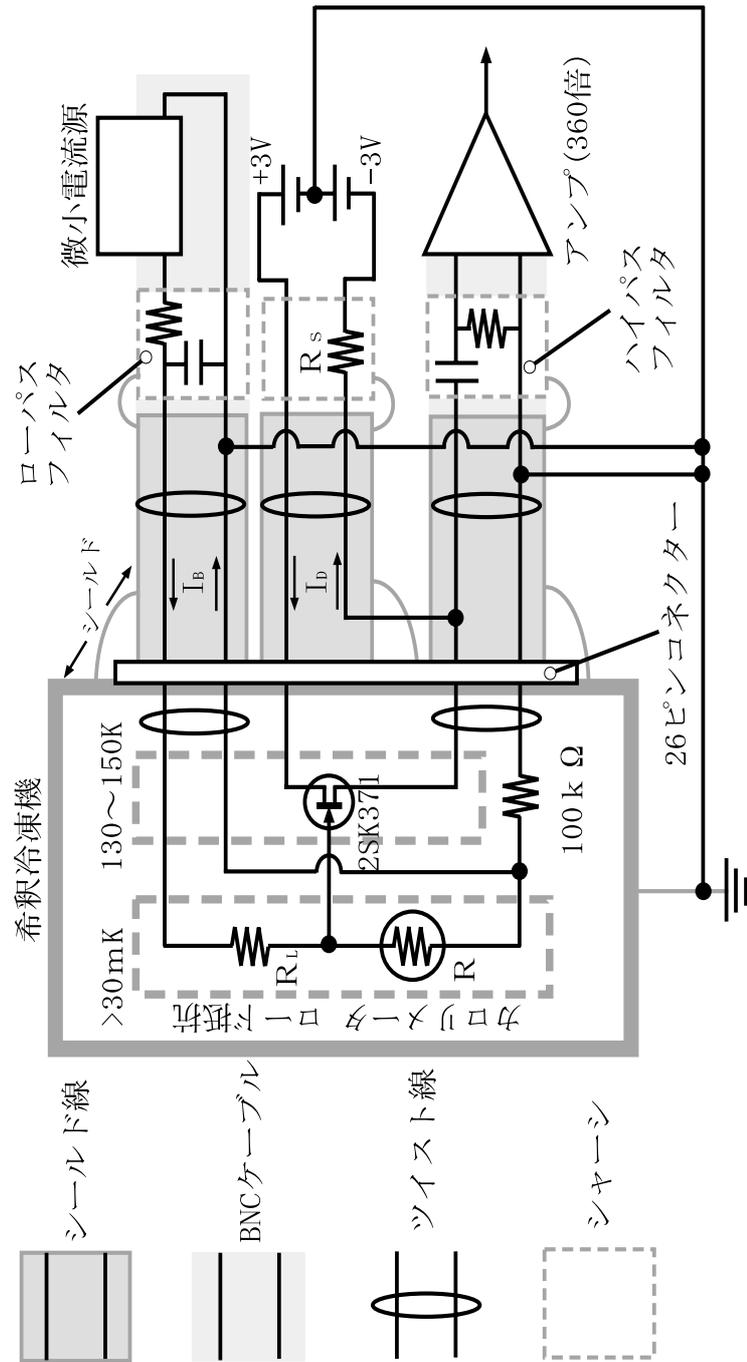


Figure 5.19: X線検出のために作製した測定回路

JFETにドレイン電流を流す回路では、電源として $\pm 3V$ の乾電池を使用する。この回路は途中で信号線と分岐するが、JFETに定電流を流すために結合する抵抗 R_S (以下ソース抵抗)は、配線が持つ抵抗値($120 \sim 140\Omega$ ⁵)に比べて十分大きくなければならない(本実験では $R_S =$

⁵希釈冷凍機内の極低温ステージからの配線を外に取り出すには、熱伝導をわるくする必要があり、配線を

3.3kΩとした)。そのためドレイン電流が非常に小さくなり、乾電池の負極側をマイナスの電位にとる必要がある。信号線と分岐した後の配線にツイストしたシールド線を用い、このシールドを冷凍機とソース抵抗を収めたシャーシに電気的に落として乾電池までシールドを保つ。

ソースフォロワとして JFET のソースから引き出した信号線は、最も雑音の侵入を防がなければならない配線である。この信号線を冷凍機の外に取り出すときに、信号線とツイストさせる配線として、カロリメータの後段でバイアス電流回路と分岐した配線を使う。しかし、この配線にバイアス電流の漏れこみがあると、その変動によって信号線に雑音の可能性がある。これを防ぐために配線に 100kΩ の抵抗を挟んだ。このようにして信号線をツイストさせて冷凍機の外に取り出し、取り出した配線にもツイストしたシールド線を用いた。また、信号の直流成分を切るためにハイパスフィルタ (RC=0.053[sec]) をつなぎ、その後段に信号増幅のための Section5.3 で述べたアンプを結合する。また、冷凍機から取り出したシールド線のシールドも前と同様に冷凍機、ハイパスフィルタを収めたシャーシとアンプのシャーシに電気に落として信号を検出する機器 (オシロなど) までシールドをつなぐ。

ここで、Fig.5.19の回路で、ドレイン電流が JFET にどれだけ流れるかを計算する。いま、カロリメータの抵抗値を R 、カロリメータに流すバイアス電流を I_B とすると JFET のゲート電位 V_G は

$$V_G = RI_B \quad (5.39)$$

であり、ソース抵抗を R_S 、ドレイン電流を I_D とすると、ソース電位 V_S は

$$V_S = R_S I_D - 3 \quad (5.40)$$

であるため、ゲート・ソース間電圧 V_{GS} とドレイン電流の間には

$$I_D = \frac{RI_B + 3}{R_S} - \frac{1}{R_S} V_{GS} \quad (5.41)$$

という関係が成り立ち、したがって、この $I_D - V_{GS}$ 直線が Fig.4.2の $I_D - V_{GS}$ 特性曲線と交差する点が JFET の動作点となる。また、このとき、ドレイン電流によって JFET で発生するジュール熱 W は

$$W = (6 - R_S I_D) I_D \quad (5.42)$$

となる。

したがって、JFET を Section4.2で述べたように JFET 起源の雑音を低く抑えることができる温度 $\sim 140K$ にするには、希釈冷凍機による冷却では Fig.5.10より、発熱量を 3.0mW にすればよい。そのためには例えばドレイン電流を 1.0mA とすれば、ソース抵抗は 3kΩ と決まる。

非常に細くしている。したがってこのように大きな抵抗値を持つ。

5.4.2 評価

製作した Fig.5.19の回路の評価として、希釈冷凍機に組み込んだ JFET を接地してそれより後段の回路の雑音レベルを測定する。しかし、Section4.2で述べたように、JFET 起源の雑音は温度によって変わるため、隣接したヒーターを焚いて温度を変えながら、その温度での雑音レベルを FFT アナライザーを用いて測定する。このようにして得られたアンプの入力換算雑音レベルと JFET の温度の関係をプロットしたのが Fig.5.20である。

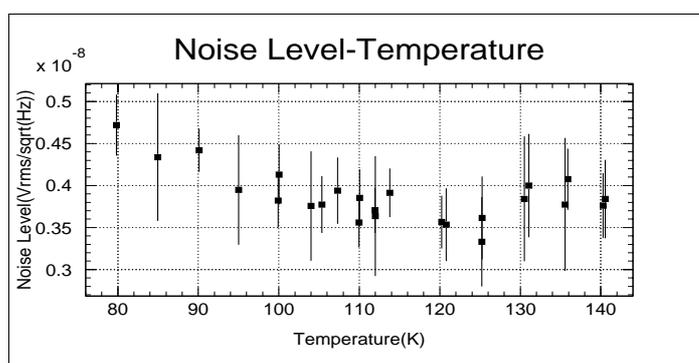


Figure 5.20: JFET- アンプ間の入力 (アンプの input) 換算雑音レベル

ただし、ドレイン電流は 1.0mA に固定した状態で測定を行った。JFET の温度が低温になるほど雑音が増すのは、JFET 起源の雑音 – 温度特性 (Fig.4.10) をそのまま反映しているからと考えられる。ある温度、例えば 140K のとき、Fig.5.20から雑音レベルは $3.8nV/\sqrt{Hz}$ 程度になる。一方、JFET のみでの雑音は 140K で、Fig.4.10から $1.0nV/\sqrt{Hz}$ 程度であり、また、5.3で述べたようにアンプの雑音は $1.58nV/\sqrt{Hz}$ であるから、JFET とアンプ以外の回路で拾った雑音は

$$\sqrt{3.8^2 - 1.0^2 - 1.58^2} \times 10^{-9} = 3.3 \quad [\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad (5.43)$$

になる。この雑音を JFET の雑音と同程度にする必要である。例えば、Fig.5.19の回路では、信号線として希釈冷凍機から取り出した配線には、ツイストしたシールド線を使用しているが、このシールド線とハイパスフィルタ、ハイパスフィルタとアンプの間の配線にはシールドしていない BNC ケーブルを使っているため、この部分もツイストしたシールド線を用いるなどの改善が必要であろう。

Chapter 6

X 線パルス測定

この章では、Section5.4で述べた測定回路すなわち、Fig.5.19を用いて bilinear カロリメータによる X 線検出の測定を行う。

6.1 測定条件

6.1.1 X 線源

カロリメータに当てる X 線としては、前にも述べたように 5.9keV の ^{55}Fe の低温用線源を用いた。この線源をカロリメータとともに希釈冷凍機内の experimental plate(Section5.1参照) に設置した様子を Fig.6.1に示す。

ここで、Fig.6.1のセットアップでカロリメータピクセルが 5.9keV の X 線をどれくらいのカウントレートで検出できるかを見積もる。

ここで使用した ^{55}Fe の X 線源は 5.7×10^5 (0.96Mbq、半減期 2.37 年で 2 年経過) 程度のカウントレートがある。一方カロリメータの、厚さ $20\mu\text{m}$ のシリコンピクセルの X 線透過率は Fig.6.2のようになるため、5.9keV では透過率は 50% 程度で検出効率は良くない。ここで、Fig.6.1のように X 線源から面積 $1.0\text{mm} \times 0.25\text{mm}$ のカロリメータピクセルを 15.0mm 離して置いたときには

$$(5.7 \times 10^5) \times \frac{1.0 \times 0.25}{4\pi \times 15.0^2} \times (1 - 0.5) \sim 25 \quad [\text{c/s}] \quad (6.1)$$

程度のカウントレートで X 線を検出できるはずである。

6.1.2 カロリメータに関する最適設定

まず、カロリメータについての設定を述べる。X 線検出の測定では、Chapter3で求めた bilinear カロリメータを使う。ただし Section3で静的特性を測定した pixel 1 と pixel 3 は破損してしまっただめに、他のピクセルを使った¹。また、カロリメータの抵抗値は低温で数十 $\text{M}\Omega$ に達

¹Fig. 3.1の右の列の下から 6 番目のピクセル

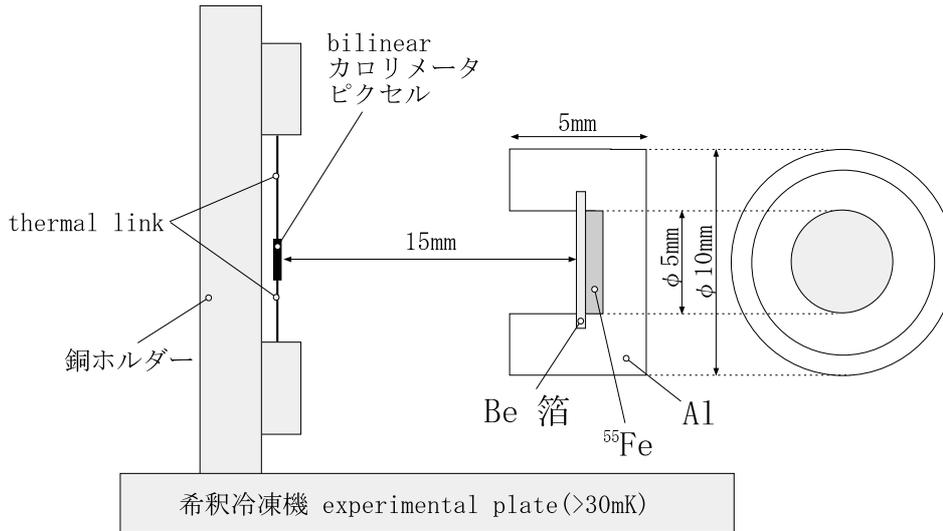


Figure 6.1: カロリメータと ^{55}Fe の X 線源を希釈冷凍機内の experimental plate に設置した様子

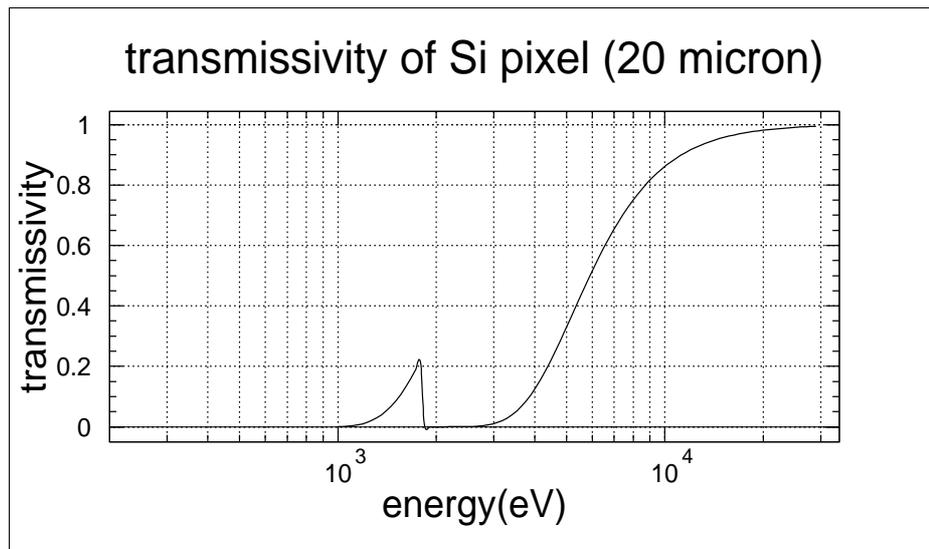


Figure 6.2: 厚さ $20\mu\text{m}$ のシリコンの X 線透過率

するので、一定のバイアス電流をかけるためにロード抵抗は $90\text{M}\Omega$ を使用した。ロード抵抗の雑音は式 (2.54) から温度の 0.5 乗に比例するので、エネルギー分解能に対する寄与を抑えるためには、ロード抵抗を希釈冷凍機内のカロリメータと同じステージに置いた。また、p1 と p3 が破損したために他のピクセルを使った訳だが、このピクセルで X 線を検出するために必要となる種々のパラメータの値を p1 の値、すなわち Table3.2 で代用する。ここで再び、Table3.2 のうち、最適化したバイアス電流 I_B とそのときのカロリメータの温度 T_{calo} 、カロリメータ + ロー

ド抵抗の発熱量 W 、また、 ^{55}Fe の 5.9keV の X 線がカロリメータに入射したときのパルスハイ
トとディケイタイムを Table6.1に示す。また、式 (2.54) と (2.56) からそのときのバッファと
ロード抵抗によるエネルギー分解能に対する寄与と、これらを含めたカロリメータのエネルギー分
解能を Table6.1に示す。ただし、熱浴の温度は表の上から順に 80mK、100mK、120mK、140mK、
180mK と仮定した。ここで、バッファとロード抵抗の寄与を含めたカロリメータのエネルギー
分解能は

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_{calo}^2 + \Delta E_{buff}^2 + \Delta E_{load}^2} \quad (6.2)$$

である。ただしバッファ及びアンプの雑音はそれぞれ Section4.2、Section5.3で述べたように
 $1.0nV/\sqrt{Hz}$ 、 $1.58nV/\sqrt{Hz}$ とした。

T_B [mK]	I [pA]	T_{calo} [K]	$V(0)$ [mV]	W [pW]	τ_e [sec]	ΔE_{buff} [eV]	ΔE_{load} [eV]	ΔE [eV]
80	29.6	0.094	-2.76	0.08	2.50×10^{-3}	0.10	1.06	1.70
100	70.7	0.117	-2.28	0.71	1.36×10^{-3}	0.15	1.13	2.13
120	139	0.140	-1.72	2.2	8.97×10^{-4}	0.24	1.22	3.09
140	253	0.165	-1.29	6.7	6.38×10^{-4}	0.36	1.28	4.00
180	596	0.213	-0.76	34.5	3.97×10^{-4}	0.71	1.52	6.30

Table 6.1: p1 のバッファ・ロード抵抗のエネルギー分解能に対する寄与
と、それらを含めたカロリメータのエネルギー分解能

6.1.3 バッファに関する最適設定

次に JFET の動作条件を決める。Fig.5.19の回路においてソース抵抗 R_S を $3.3k\Omega$ とした。こ
のとき JFET に流れるドレイン電流 I_D は、式 (5.41) と I_D-V_{GS} 特性曲線:Fig.4.2から、0.9mA
となり、発熱量は式 (5.42) から 2.7mW となる。このとき JFET の温度は Fig.5.10から 130K~140K
になるが、Section4.2で調べたようにこの温度は JFET 起源の雑音を最小に抑えられる温度で
ある。

JFET(2SK371)		
	最適値	実際の値
R_S [k Ω]	3.3	3.3
I_D [mA]	0.9	0.8
W_{JFET} [W]	2.7	2.69
T [K]	130~140	?

Table 6.2: X 線を検出するために設定した JFET に関するパラメータ

以上、カロリメータと JFET に関わるパラメータの値をまとめたものを Table6.2に示す。ここで、温度をモニターする機器が故障していたために、実際の JFET の温度はわからなかった。

6.2 測定

Section6.1で述べたような設定で測定を行おうとして、バイアス電流に Table6.1のような数十～数百 pA の非常に微小な電流を流したところ、カロリメータとロード抵抗にかかる電圧値が全く安定しなかったため、それよりも大きな数 nA の電流を流して安定させた。これはおそらく外乱のノイズの影響である。さらにまた、カロリメータとロード抵抗のあるステージ (experimental plate) の温度が安定せず (数十 mK のゆらぎ)、しかも experimental plate に設置してある RuO₂(Fig.5.2参照) の示す温度が 0.1K 以上で、使用した希釈冷凍機のスペックである最低到達温度:30mK に比べると高温と言わざるを得ない。この原因として 1.5K の熱浴に接した JFET BOX からの 3 本の配線による熱流入と考えられる。揺らいでいるカロリメータの温度が本当に 0.1K 以上なのか、その温度のおおよその値を以下のようにして求める。

まず、カロリメータにバイアス電流 I_B を流し、そのときのカロリメータとロード抵抗の両端にかかる電圧 V_B を測定すれば、ロード抵抗の値 R_L はわかっているから (温度依存はないと考える)、カロリメータの抵抗値 R は

$$R = \frac{V_B - R_L I_B}{I_B} \quad (6.3)$$

から求まり、したがって、式 (3.4) すなわち

$$R(T) = (27.6 \times 10^3) \exp\left(\sqrt{\frac{6.59}{T}}\right) \quad [\Omega] \quad (6.4)$$

からカロリメータの温度がわかる。例えば、バイアス電流に 3.0nA を流したとき、カロリメータの温度は 0.18K と見積もることができ、やはり 0.1K 以上であることがわかった。この温度はカロリメータの自己発熱によって熱浴の温度から昇温したためと考えられるので、次に熱浴の温度を見積もる。

バイアス電流を変えながら、カロリメータの発熱量と式 (6.3) から求まるカロリメータの抵抗値をプロットした図を Fig.6.3に示す。図のように発熱量を増やすと抵抗値が下がることからカロリメータが温度計として正しく動作していることがわかる。この発熱量と抵抗値の関係と、式 (6.4) で求めた温度 T から、発熱量と thermal link の熱伝導で温度を決める式 (2.45) すなわち

$$P = GT \frac{1 - \theta^{-1(1+\beta)}}{1 + \beta} \quad (6.5)$$

を用いると ($\beta \equiv T/T_B$)、熱浴の温度 T_B を求めることができる。例えばバイアス電流が 3.0nA のとき発熱量は Fig.6.3から 9.0×10^{-11} [W] で、そのときの発熱によって昇温したカロリメータの温度は先に求めたように 0.18K であるから、熱浴の温度は 0.17K と求まる。ここで、熱浴の温度を 0.17K と仮定し、カロリメータとロード抵抗にかかる電圧値を安定させるためにバイアス電流を 3.0nA とする。さらにこのときのバイアス電流でカロリメータの温度は 0.18K にな

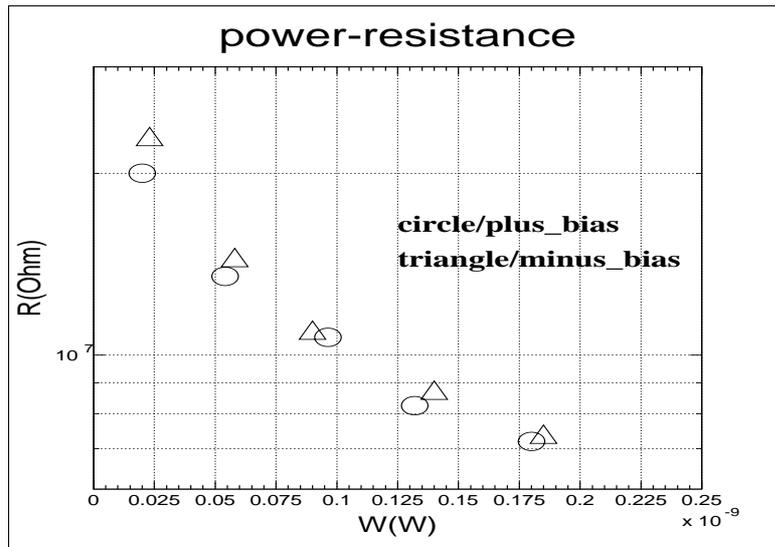


Figure 6.3: カロリメータの発熱量と抵抗値

ると仮定する。この 3.0nA というバイアス電流は最適化されたものではないため、X 線入射によって予想されるパラメータは、Table6.1とは当然異なるため再び求め直す必要がある。

いま、Fig.6.3のカロリメータの発熱量 W を縦軸に、抵抗値 R を横軸にとって再びプロットし、ログスケールで表示すると Fig.6.4のように書ける。

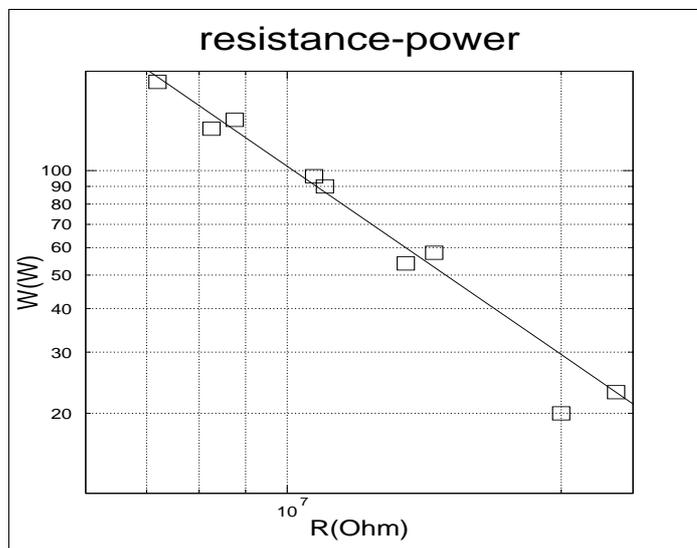


Figure 6.4: カロリメータの抵抗値と発熱量

このグラフを slope parameter(2.7) すなわち

$$H \equiv \frac{d \log W}{d \log R} \quad (6.6)$$

で fit すると

$$H = -1.80 \quad (6.7)$$

と求まるため、これを式 (2.31)

$$\tau_e \equiv \frac{H(R_L + R)}{R_L(H - 1) + R(H + 1)} \frac{C}{G} \quad (6.8)$$

に代入すると

$$\tau_e = 4.66 \times 10^{-4} \quad [\text{sec}] \quad (6.9)$$

となる。次に ^{55}Fe 5.9keV の X 線入射によって生じるパルスハイト $V(0)$ を見積もる。 $V(0)$ は式 (2.34) から

$$V(0) = \frac{S(0)}{\tau_e} \quad (6.10)$$

であり、これに式 (2.31) と (2.29) を代入すると

$$V(0) = -E \frac{R_{calo} R_L}{R_{calo} + R_L} \frac{I_B A}{CT} \quad (6.11)$$

となる。ここで E は X 線のエネルギー、 A は温度計の係数である。この式を用いて上で仮定した値を用いると

$$V(0) = 1.03 \times 10^{-2} \quad (6.12)$$

と求まる。以上得られたパラメータ値を Table 6.3 に示す。これらの値は、カロリメータ起源の雑音を最小に抑えることのできるバイアス電流から求めたのではないので、最適なパラメータではないことに注意すべきである。

再設定値					
T_B [mK]	I [nA]	T_{calo} [K]	$V(0)$ [mV]	τ_e [sec]	W [nW]
0.174	3.0	0.184	10.3	4.66×10^{-4}	0.91

Table 6.3: 再設定したパラメータ値。バイアス電流 I_B によってカロリメータは、熱浴の T_B から T_{calo} まで上昇している。

6.3 結果と検証

^{55}Fe からの X 線をカロリメータに入射させたときにオシロスコープで観測されたパルス波形の例を Fig.6.7 に示す。Fig.6.7 のようなパルスが枚秒 2~3 個以上観測できた。このカウントレートは Section 6.1.1 で予測した $25[\text{c/t}]$ よりも少ないが、オーダー的にはそれほどかけ離れたものではない。

また、パルスハイトはアンプの入力換算で $1.7\sim 2.7\text{mV}$ であり、Table 6.3 の予想値よりも一桁小さい。この理由を検証してみよう。すなわち式 (6.11) で使われているパラメータのうち、パルスハイト $V(0)$ に factor10 をもたらすものは何であろうか？。Section 3 で述べたように、カロリメータ静特性測定で得た抵抗-温度特性が GSFC で測定された値 (式 (3.13)) よりも一桁高く見積もってしまったことが考えられる。しかし、GSFC で得られたデータすなわち

$$R(T) = (2.26 \times 10^3) \exp\left(\sqrt{\frac{5.32}{T}}\right) \quad [\Omega] \quad (6.13)$$

からパルスハイトを見積もると 10^{-4} のオーダーとなり、やはり合わない。式 (6.11) の R_0 と T_0 の値を適当に振りると $R_0 \sim 10^3\text{k}\Omega$ 、 $T_0 \sim 6$ あたりでパルスハイトが数 mV なることがわかったが、これらの値を一義的に求めることはできないため、今後再び温度-抵抗キャリブレーションをする必要がある。

また、パルスのディケイタイムは 0.5msec ほどである。この値は予想値とほぼ一致している。このようにパルスハイトが予想値と異なるのに対してディケイタイムが一致するのは、式 (2.31) すなわち

$$\tau_e = \frac{(Z + R)(R + R_L)}{2R(Z + R_L)} \tau \quad (6.14)$$

において、抵抗値 R の不確定性 (Z についても同様) が分子と分母で相殺されるからである。

また、Fig.6.7 のようなパルスを検出できたにも関わらず、MCA でスペクトルを取るときにパルスが現われなくなってしまった。これはおそらく JFET の温度が下がるなどして JFET が正しく動作していなかったからだと思われる。実際このときの JFET のゲート・ソース間電圧 V_{GS} 、ドレイン電流 I_D を Section 4.1 の Fig.4.2 にプロットすると Fig.6.5 の 印に示したところにあり (Table 6.2 の設定では 印のようになるはず)、この点は液体窒素温度以下であり、JFET は明らかに動作していなかった² ことがわかる。

そこで、それまでに得られた 16 個のパルス波形から波高を読み取り、Fig.6.6 のようなスペクトルを書いた。少ないデータしか得られなかったが、かろうじてピークを確認することができた。

²温度モニターが故障していたため、実験中は JFET の温度がわからなかった。

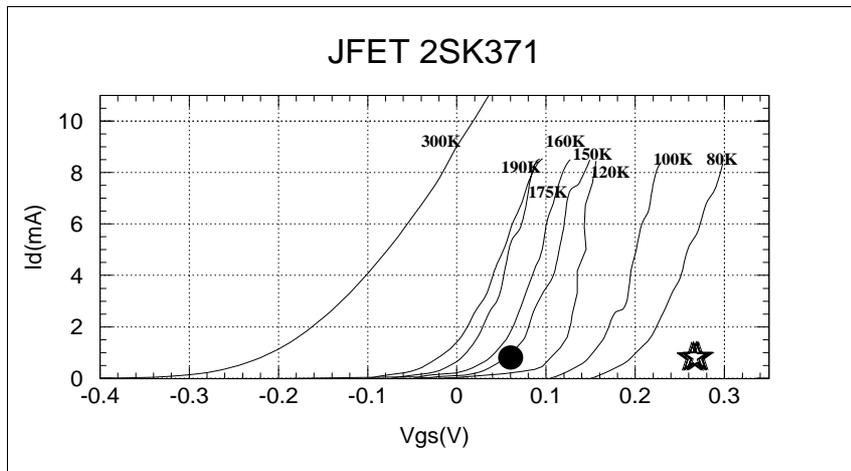


Figure 6.5:

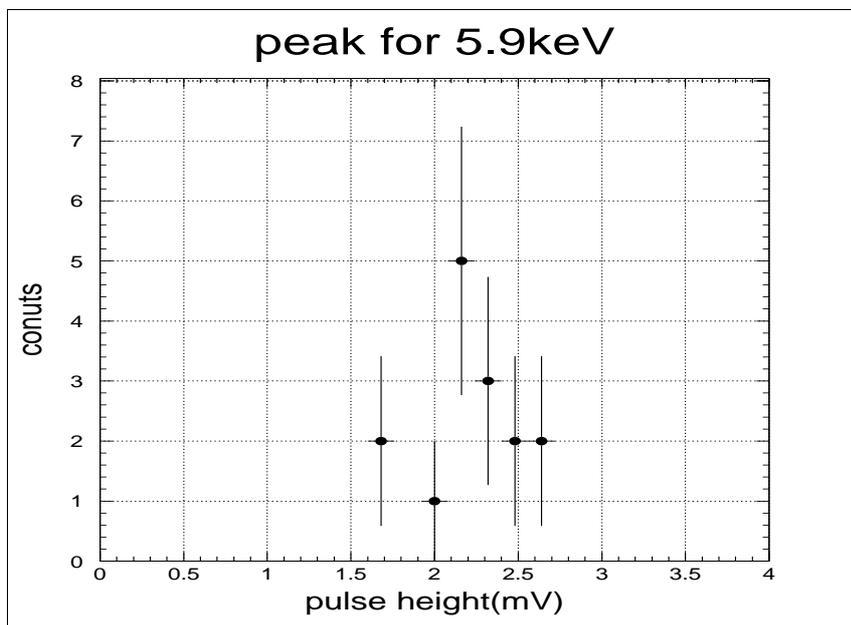


Figure 6.6: ^{55}Fe 5.9keV の X 線入射による信号のパルスハイト-カウント数 (パルスハイトはアンプの入力換算)

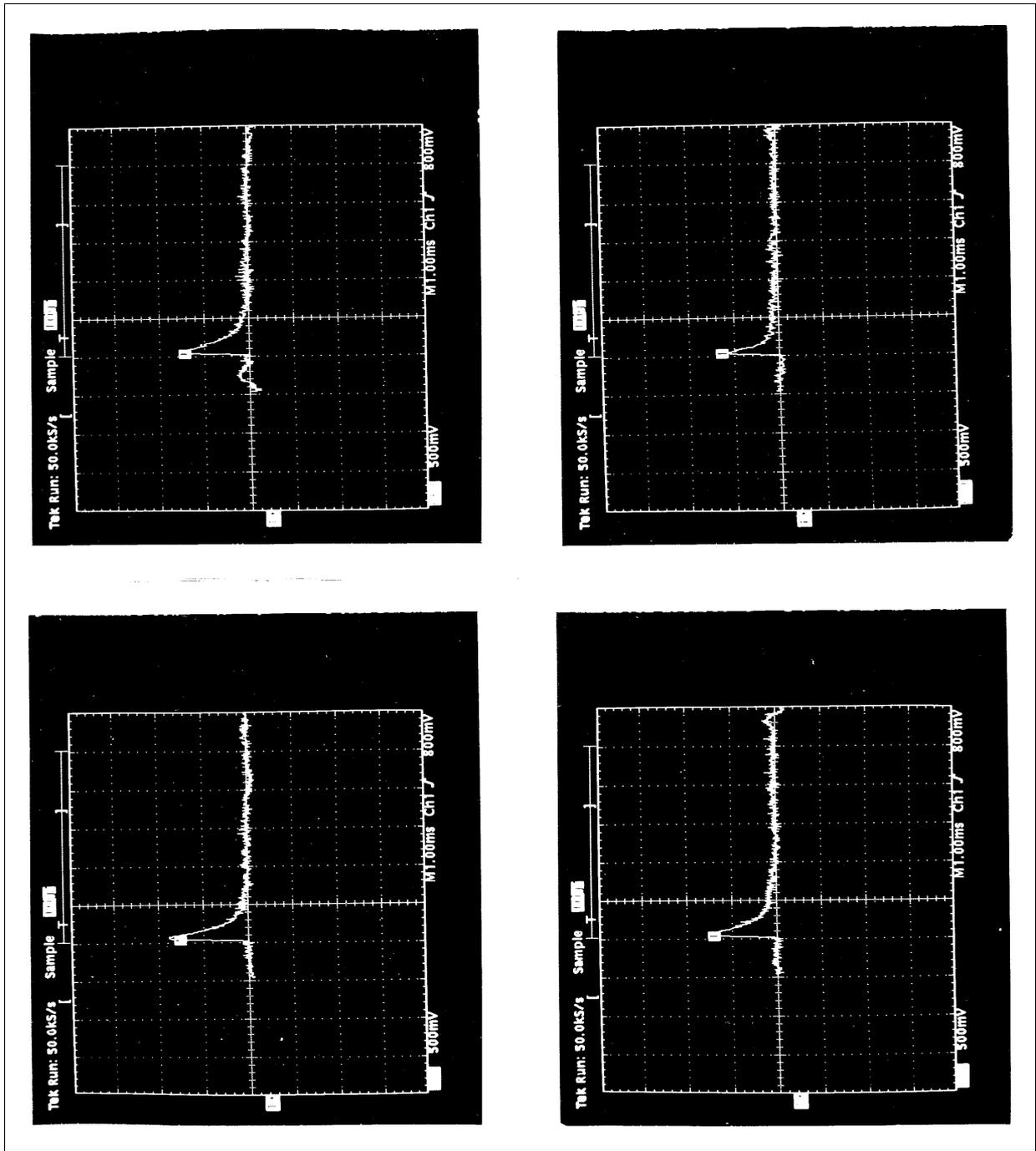


Figure 6.7: ^{55}Fe 5.9keV の X 線入射による信号

Chapter 7

まとめと課題

7.0.1 まとめ

2000年初頭に打ち上げが予定されている X 線天文衛星 ASTRO-E には、X 線検出器としては初めてマイクロカロリメータ (X-Ray Spectrometer: XRS) が搭載される。大きな特徴としては、従来の半導体検出器を 1 桁も上回る約 12eV という高いエネルギー分解能を実現していることで、その成果が期待されている。しかし、優れた素子でも読みだし回路系が低雑音でなければ、素子の性能を十分に引き出すことはできない。また、カロリメータは 100mK 以下という極低温で動作するため、プリアンプの配置や消費電力の最適化といった回路・熱設計にも配慮が必要である。そこでこれまでに、カロリメータの信号検出のための低雑音測定系の研究と開発をしてきた。

低雑音な回路を作るまえに、素子の性能を知る必要がある。そこで XRS と同タイプの bilinear カロリメータを用いて、基本的な静特性である抵抗 - 温度、熱伝導度 - 温度関係を調べた。得られた情報から、カロリメータを高エネルギー分解能で動作させるための最適なパラメータを導出した。

抵抗値の高いカロリメータからの信号をインピーダンス変換するために、バッファとして JFET を用いた。その雑音特性、温度特性を調べ、動作条件を求めた。また、信号を低雑音で取り出すために JFET を極低温下のカロリメータの近くに置き、なおかつ JFET を、動作する温度まで温めるという要請から、JFET で発生した熱が冷凍機に逃げないようにして、JFET を温める熱設計が必要となる。断熱技術を用いて、設計通りわずかな発熱で JFET を動作温度に昇温させることができた。

カロリメータの高いエネルギー分解能を実現するためには、雑音の回路への侵入を防ぐ工夫が必要となる。配線にシールド線を用い、低雑音なアンプを組み合わせて信号検出のための測定回路を製作した。この回路系全体の雑音レベルを測定し、入力換算で $3.4nV/\sqrt{Hz}$ という低雑音を実現できた。

製作した測定回路を用いて、カロリメータ素子から X 線信号を検出することに成功した。

7.0.2 今後の課題

X線パルスを検出できたが、突発的にしか現われず、カロリメータの静特性とJFETの雑音・温度特性から導いた最適な条件で観測したとは言い難く、カロリメータ、JFETの動作点の安定化が必要である。その上でスペクトルをとることを目標としている。

製作した回路には、BNCケーブルをシールド線に変えるなど、見直すべき箇所多く残っており今後高エネルギー分解能を達成するための測定系の改良をしていく。

Appendix A

抵抗の熱雑音

回路の雑音源として最も重要なものの一つに抵抗の熱雑音がある。この雑音は有限の温度である限り、抵抗において必ず発生する。したがって低雑音の回路では熱雑音が支配的になって低雑音化の妨げになることも有り得る。ここでは熱雑音について簡単な理論的考察を行う。

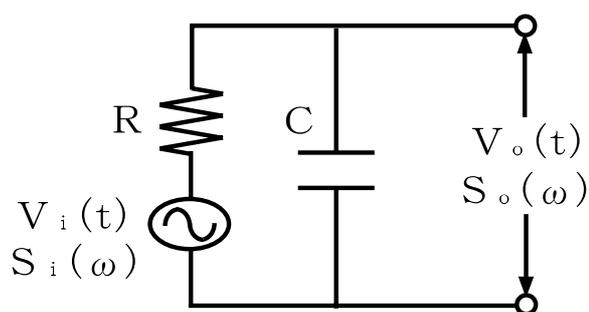


Figure A.1: 抵抗の熱雑音計算のための等価回路

Fig.A.1は抵抗 R とその熱起電力 $v_i(t)$ およびそれに並列に加わっている容量 C とその両端に現われる電圧 $v_o(t)$ を表している。また $v_i(t)$ および $v_o(t)$ のパワースペクトルをそれぞれ $S_i(\omega)$ 、 $S_o(\omega)$ とする。このとき Fig.A.1の回路の伝達関数は

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + i\omega CR} \quad (\text{A.1})$$

で表される。従って $S_i(\omega)$ と $S_o(\omega)$ の関係は

$$S_o(\omega) = |H(\omega)|^2 S_i(\omega) = \frac{1}{1 + (\omega CR)^2} S_i(\omega) \quad (\text{A.2})$$

となる。また熱雑音のスペクトルは平坦であるから

$$S_i(\omega) = D \quad (\text{A.3})$$

と置くことができ、その自己相関関数は Wiener-Khintchine の公式を用いて

$$C_i(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_i(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega = 2\pi D\delta(\tau) \quad (\text{A.4})$$

と表される。次に平衡状態ではエネルギー等分配則から、ボルツマン定数 k_B 、抵抗の温度 T を用いて

$$\frac{C \overline{v_o^2(t)}}{2} = \frac{k_B T}{2} \quad (\text{A.5})$$

である。式 (A.2)、(A.3) から

$$\overline{v_o^2(t)} = \int_{-\infty}^{\infty} S_o(\omega) d\omega = \frac{\pi D}{CR} \quad (\text{A.6})$$

が成り立ち、これと (A.5) を組み合わせることにより

$$S_i(\omega) = \frac{k_B T R}{\pi} \quad (\text{A.7})$$

が得られる。また

$$C_i(\tau) = 2k_B T R \delta(\tau) \quad (\text{A.8})$$

である。 $\omega CR \ll 1$ では $S_o(\omega) \sim S_i(\omega)$ としてよいから、温度 T にある抵抗 R の両端に現われる熱雑音電圧を帯域幅 Δf で観測したときの 2 乗平均は

$$\overline{V_n^2} = 4k_B T R \Delta f \quad (\text{A.9})$$

で表される。これがナイキストの熱雑音の式である。以上より単位帯域幅あたりの雑音電圧密度は

$$e_n = \sqrt{4k_B T R} \quad (\text{A.10})$$

になり、その単位は V/\sqrt{Hz} である。

Appendix B

種々の物質の熱伝導率

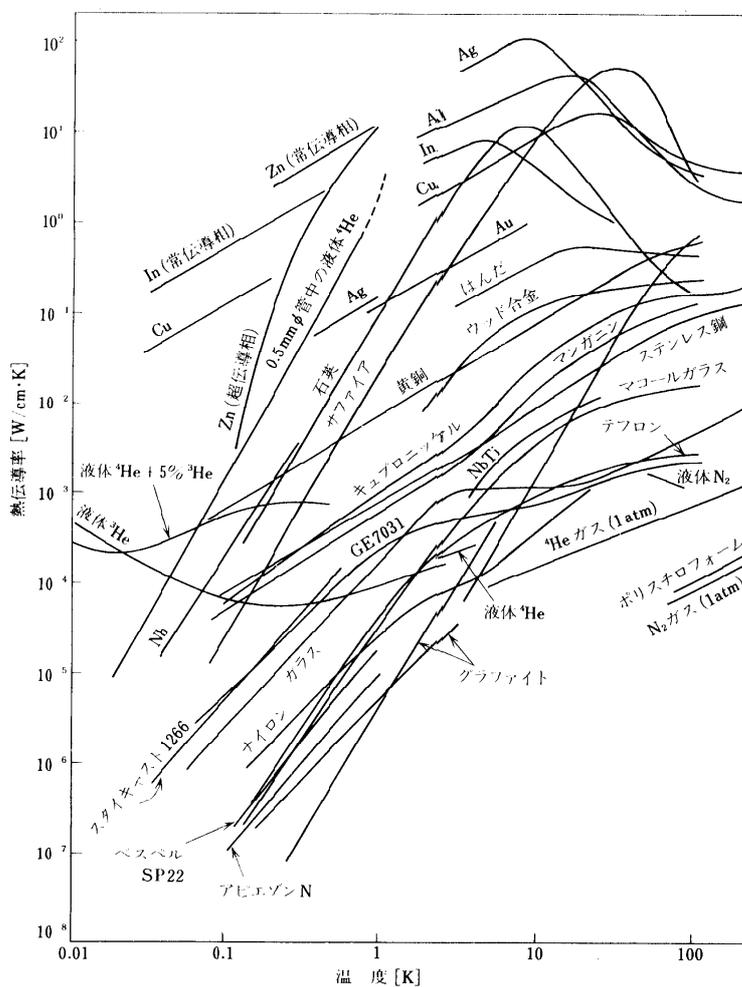


Figure B.1: 種々の物質の熱伝導率。文献 [12] より抜粋

Appendix C

XRS FEA-CAP

XRS の信号処理回路である FEA-CAP を Fig.C.1に示す。FEA(Front-End Assembly の略) はカロリメータ、ロード抵抗、FET、 anti-coincidence 検出器、2つのブロックングフィルタ、キャリアレーションソース等を含むユニットを指す。また CAP(Calorimeter Analog Processor の略) はアナログ信号処理を行うコンポーネントである。FEA に電源とバイアスを供給し、FEA からのアナログ信号を増幅して CDP¹ に送る他、JFET ボードの温度制御も行う。電氣的に同等な2系統 (CAP-A、CAP-B) が存在し、それぞれ16チャンネルのカロリメータを受け持つ。

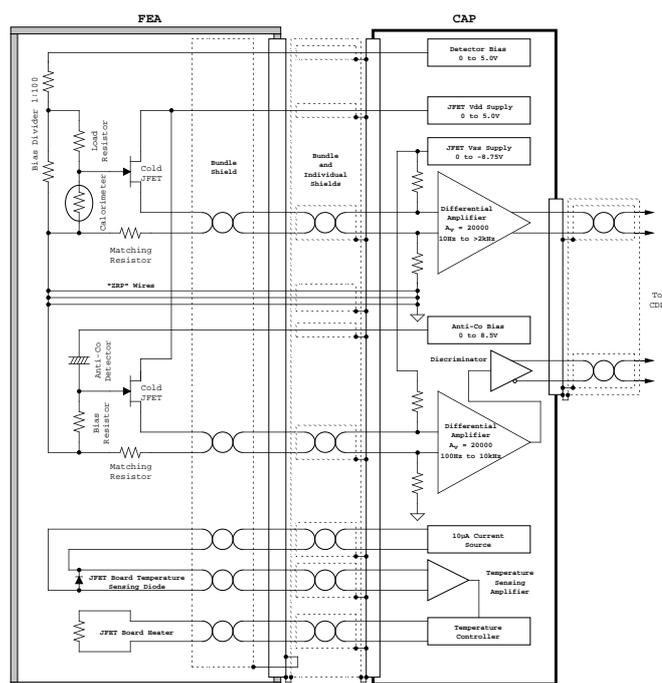


Figure C.1: FEA-CAP Single Functional Diagram(XRS の信号処理回路)。文献 [11] より抜粋

¹Calorimeter Digital Processor の略。信号をデジタル化する。

Appendix D

OXFORD 社製希釈冷凍機 Kelvinox25 の構造とその操作手順

道川 幸男 編



Figure D.1: 希釈冷凍機のデュワー部

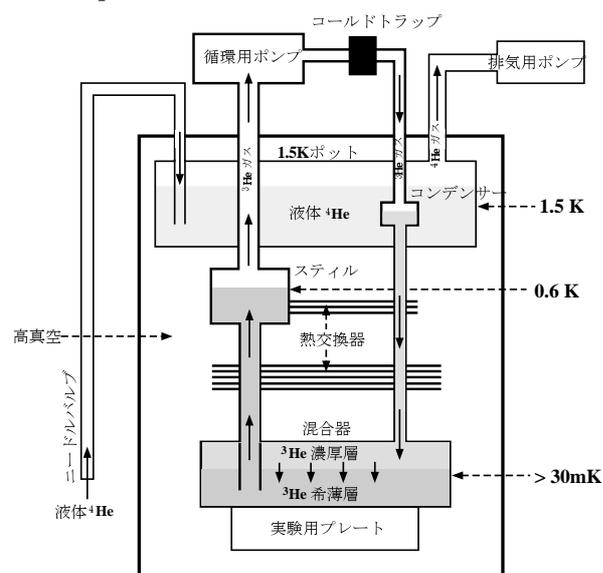
D.1 はじめに

本書は、Oxford Instruments 社製の Kelvinox Dilution Refrigerator system の構造の簡単な解説と取扱手順書であり、付属のマニュアル:Operator's Handbook を参考にまとめた。

D.2 構造

D.2.1 希釈冷凍機の原理の概要

下の図のように、 ^3He と ^4He の混合液 (mixture) は、臨界温度 0.87K 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 に比べ軽いので、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 へ希釈混合させることにより、冷却が起こる。この過程は mixing chamber 内でなされ、mixing chamber は最終的に、この冷凍機の最低到達温度: 30mK に達し、実験試料を冷却する。この冷却を維持するために、 ^3He を連続的に mixing chamber に供給しなければならず、dump に収容されている ^3He を循環させることによって行う。dilution phase では、 ^4He は超流動状態にあり、わずかな濃度で含まれる ^3He 原子は、 ^4He と全く相互作用せず、理想気体に近い振る舞いをする。mixing chamber を出た ^3He は、heat exchanger によって、mixing chamber に帰還した concentrated phase の ^3He を冷却しながら still へ向かう。



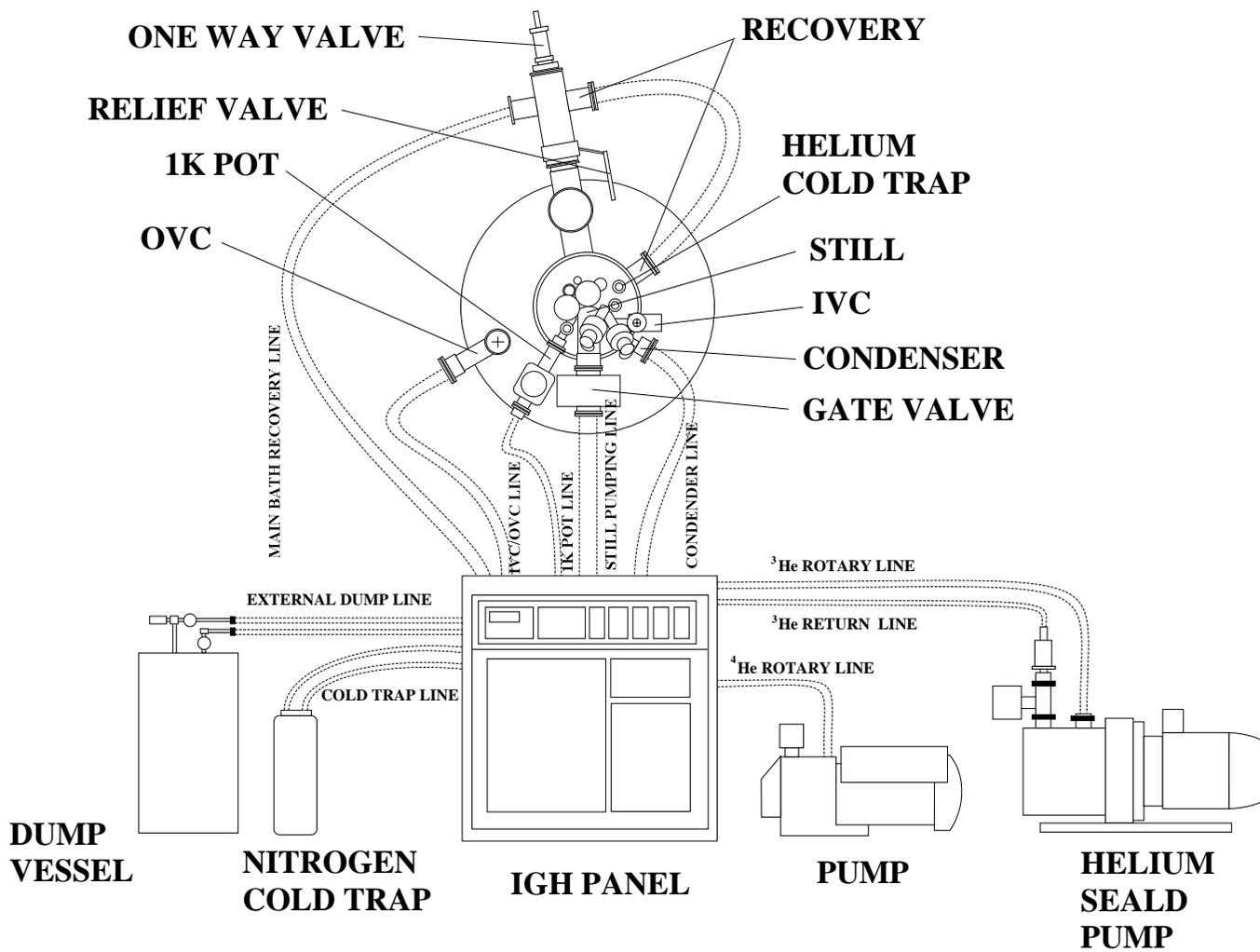
still(分溜室)は、 ^3He と ^4He を分離する部屋で、 ^3He を循環中は $0.6 \sim 0.7\text{K}$ の温度に保たれている。このため、 1.5K POT で液化されて帰ってきた循環中の暖かい ^3He を still heat exchanger で再び臨界温度以下に冷却できる。さらにこの温度では、 ^3He の蒸気圧は、 ^3He のそれより約 1000 倍も大きく、循環用口 - タリ - ポンプを使って、ほとんど ^3He だけを選択的に蒸発できる。したがって、still 内の ^3He の濃度は mixing chamber 内より低くなり、その結果浸透圧の勾配が生じ、mixing chamber から still への ^3He の流れが促進される。

循環用口 - タリ - ポンプで still から排気された ^3He は、数百 mbar に圧縮され、フィルタ - やコ - ルドトラップを通して空気や油煙等を取り除かれた後、クライオスタットに戻ってくる。そして、メインパスの液体ヘリウムに予冷され、condenser に入る。

condenser は、still からポンプによって排気され、昇圧した ^3He ガスを約 1.2K の温度で再び液化させる部屋であり、 1.5K POT 内部にある。ガスが condenser で凝縮するのに充分高い圧力を維持するために、primary impedance が 1.5K POT の下についている。

1.5K POT は、細い管の先にあるニ - ドルバルブを開くことにより、 4.2K の ^4He 槽である

KELVINOX 100/25 SYSTEM



メインバースから液体 ⁴He を取り込み、また 1.5K POT の減圧と still を出た ³He ガスによる冷却によって、定常的な 1.5K ステージをつくらせている。condenser を出た ³He は、一連の heat exchanger で冷却されながら再び mixing chamber に戻る。

Figure D.2: 希釈冷凍機全体のシステム

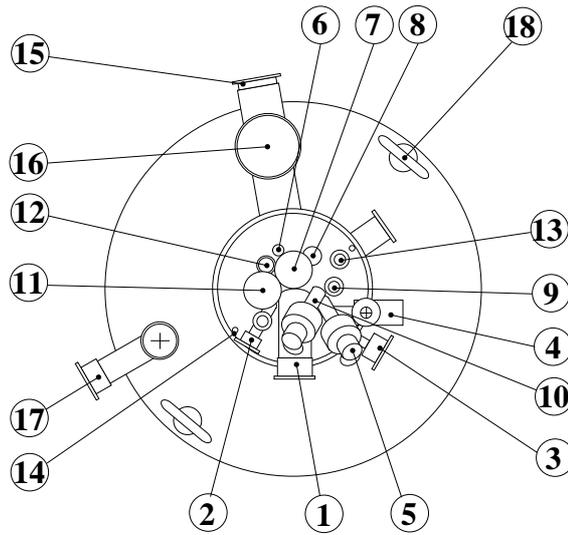


Figure D.3: 希釈冷凍機の俯瞰図

番号	名称	主な用途 / コメント
①	^3He PUMPING LINE / RELIEF VALVE	–
②	1.5K POT PUMPING LINE / RELIEF VALVE	1.5K POT 真空引き
③	^3He RETURN LINE RELIEF VALVE	–
④	IVC PUMPING LINE / RELIEF VALVE	IVC 真空引き
⑤	2 × 24 WAY ELECTRICAL ACCESS TO IVC	配線抵抗 100~130Ω
⑥	HELIUM LEVEL PROBE ENTRY	液面計挿入口
⑦	MOVABLE SHUTTUR CONTROL (VERTICAL MOTION)	放射線源 (@E.P.) のシャッター
⑧	SPARE PORT (NOT LINE OF SIGHT)	?
⑨	SYPHON ENTRY	transfar tube の挿入等
⑩	2 × 24 WAY ELECTRICAL ACCESS TO JFET BOX	配線抵抗 100~130Ω
⑪	1.5K POT AUTO NEEDLE VALVE	POT への液体 He 取り込みの調節
⑫	10 WAY ELECTRICAL CONNECTION TO 1506 COIL	磁場印加用
⑬	HELIUM COLD TRAP ENTRY	ヘリウムコールドトラップ挿入口
⑭	INSERT LIFTING POINT - 2 OFF	dilution unit の引き上げ用
⑮	MAIN BATH RECOVERY PORT	メインバス真空引き
⑯	MAIN BATH RELIEF VALVE	–
⑰	OVC VACUUM VALVE	OVC 真空引き
⑱	LIFTING EYE BOLT - 2 OFF	デュワーの引き上げ用

Table D.1: 各部の名称

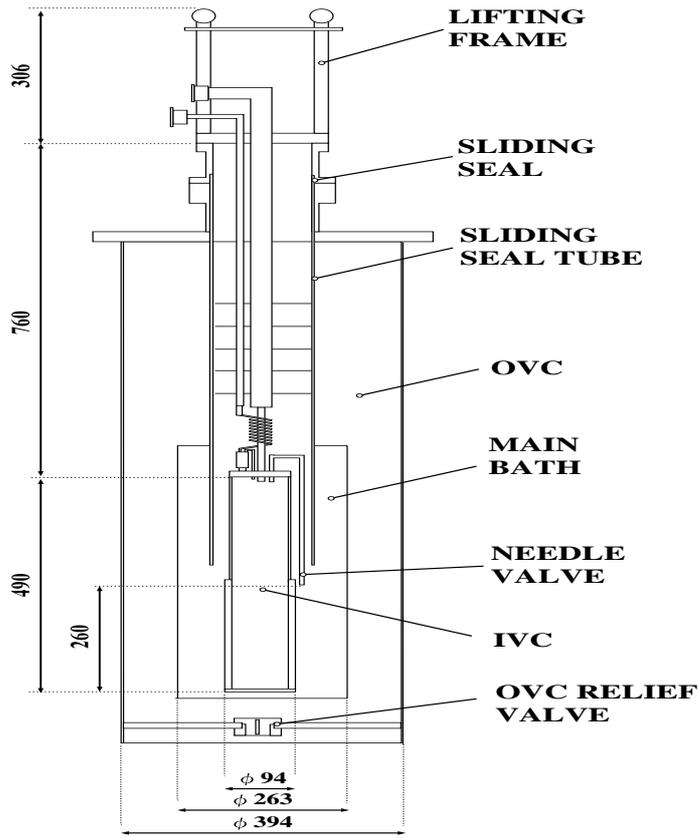


Figure D.4: デュワー及び dilution unit

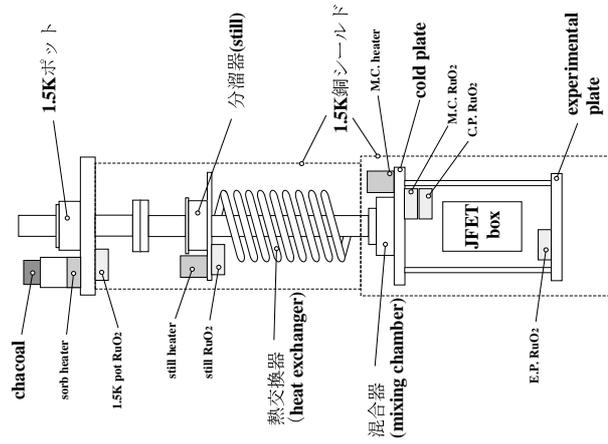


Figure D.5: IVC 内部の主要な器官

D.2.2 Kelvinox Gas Handling Systems

Kelvinox 希釈冷凍機システムは、操作のほとんどを National Instruments 社のソフトウェア:LabVIEW を使って、自動化でき、シリアルポートを通して端末からのリモート操作が可能である。このシステムは、19 インチラックに収められた gas handling system と冷凍機に取り付けてある3つのセンサをモニタする希釈冷凍機 power supply から成る。前者によって、 ^3He の循環運転、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ mixture の安全な取扱、auxiliary pump の操作などが可能であり、front panel (Fig.D.3の IGH PANEL) から手動で操作できる(ロカル操作)。後者は、exchange gas sorb、1.5K POT、mixing chamber の温度と、sorb heater、still heater、mixing chamber heater へ供給する電力をコントロールする。また、温度を正確にコントロールするために AVS-47 AC resistance bridge と TS-530 temperature controller がシステムにリンクされている。

gas handling system は、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ circulation system と Auxiliary gas handling system から成る。

D.2.3 $^3\text{He}/^4\text{He}$ Circulation System

$^3\text{He}/^4\text{He}$ circulation system のダイアグラムを示したのが Fig.D.9である。図の Helium(3) の太線が、 ^3He の循環ラインである¹。 ^3He は Fig.D.3の helium sealed pump(以降、循環用ロタリポンプと呼ぶ)によって時計回りに循環され、Oil Mist Filter を通過して不純物が取り除かれる。ポンプの入口には圧力を測るためにピラニゲージが取り付けられていて、Fig.D.9の P1 で読める。ポンプ出口の圧力は、G2 で見れる(G1 と G2 の圧力差は、コールドトラップによる圧力降下を意味し、これによってコールドトラップが block されはじめたかどうかをチェックできる)。さらに循環 ^3He ガスは、コールドトラップを通過して純度が増し、その後 condenser に戻る。

D.2.4 Auxiliary Gas Handling System

auxiliary gas handling system は Fig.D.9の Auxiliary の部分で、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 循環系すなわち図の Helium(3) とは VENT を通じてつながっている。この auxiliary gas handling system には、auxiliary pump(以降、排気用ロタリポンプと呼ぶ)がつながっており、この用途は、主に 1.5K POT、IVC/OVC、main bath を排気することである。また $^3\text{He}/^4\text{He}$ 循環系と、液体窒素コールドトラップからエアーを除去するのにも使う。

Fig.D.9からわかるように、この排気用ロータリーポンプは、IVC と OVC の両方同時に真空引きしてしまう。そこで、ヘリウムガスが OVC 内の断熱材を汚染するリスクのため、また、OVC を高真空にするために、OVC を別のポンプ(例えば、ターボ)で、IVC を排気用ロータリーポンプで排気するのが良い。

¹Fig.D.9は、LabVIEW の WINDOW 画面であり、gas handling system の IGH PANEL(Fig.D.3 参照)と同じダイアグラムが描かれている。

D.2.5 Dump

システムを使用していないときは、mixture($^3\text{He}+^4\text{He}$)はdumpへ収納しておく。dumpへのアクセスは、バルブ:4、9、10、14(Fig.D.9参照)とdumpに付いている手で開ける2つのバルブを通じて行う。dump内のガスの圧力は、バルブ:9を開き、G2で見ることができる。

循環システムは、dumpへ直通している二つのpassive by-pass valveでプロテクトされており、その圧力差が500mbar程度になると、バルブが開くようにセットされている。その一つがバルブ:9で、もう一つがバルブ:4である。さらに、dumpから大気につながるpassive by-pass valveがあり、これは1mbar以上のoverpressureがあった場合に開く。これはシステムへの空気のリークの結果、excessive pressureを防止するためである。

D.2.6 Sliding Seal

クライオスタットの入口付近の内壁にある環状のsliding sealが、dilution unitの外側にある、硬化プラスチック製で熱伝導が小さい筒状のsliding seal tubeと密着して、クライオスタットからdilution unitを引き抜くとき、あるいはクライオスタットにdilution unitを挿入するときに空気がメインバスに混入するのを防ぐ。このメインバスの密閉により、メインバスに液体ヘリウムがある状態でdilution unitをクライオスタットに引き降ろしているときには、蒸発、上昇した ^4He が効果的にdilution unitを冷却していく。

D.2.7 Cold Trap

これは、循環中の ^3He ガスに含まれる不純物をchacoalに吸着させて取り除くためのものである。液体ヘリウムコールドトラップはメインバスの液体ヘリウムに漬けておくため、4.2Kに冷やされている。これは ^3He RETURN LINEのすぐ前に結合されている。また、液体窒素コールドトラップは専用のデュワーに入れた液体窒素に漬けておくため、77Kに冷やされている。これは ^3He PUMPING LINEのすぐ後に結合されている。

高い吸着力を得るために、冷却前にコールドトラップをドライヤーなどで温めて、既に吸着しているガスを脱着させておく必要がある。

D.2.8 Needle Valve

これは、メインバスから1.5K POTに液体ヘリウムを汲み上げるノズルの端にあるバルブのことを指す。バルブの開閉は、LabVIEW・IGH FRONT PANEL双方から0~100%の調整が可能である。

OXFORD社製の希釈冷凍機は、ニードルバルブの開まりが悪く、したがって空気の混入で冷却時に凍って動かないといった事態が度々起こる。これを避けるために、冷却前に電源を落とし、ニードルバルブを0点調整(初期化)するといった措置が必要である。

D.2.9 IVC sorption pump(sorb)

sorption pump(以降、sorbと呼ぶ)は、IVC内部の1.5K plateにマウントされている(Fig.D.5参照)。これはその内部にあるchacoalに気体を吸着させることで真空を得る。ただし 5cm^3 以上

は吸着できない。8K 以下で IVC 内の熱交換ガス (ヘリウムガス) を吸着し、IVC を高真空にする。

高い吸着力を得るために、冷却前に chacoal を取り出してドライヤーであぶり、既に吸着しているガスを脱着させておく必要がある。

D.2.10 Electric Wire

希釈冷凍機から電気信号を取り出す (送る) ために、 $\phi 0.1\text{mm}$ の銅線が IVC 内部まで延びている。配線の端は 26way コネクターとつながっており、もう一方の端は冷凍機から取り出すために fischer コネクター (Fig.D.3の⑤及び⑩) とつながっている。fischer コネクターは 4 系統あり、1 から 4 までの番号が振られている。この番号と、もう一方の端のある IVC 内での場所との対応は以下のようになっている。

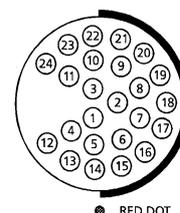


Figure D.6: fischer コネクターのピン番号

- 1 : Fig.D.5の各場所にある各センサー・ヒーター
- 2 : M/C 脇の 26way コネクター (配線抵抗 $\sim 112\Omega$)
- 3 : 1.5K POT 脇の 26way コネクター (配線抵抗 $\sim 105\Omega$)
- 4 : E/P に設置の 26way コネクター (配線抵抗 $\sim 128\Omega$)

各 fischer コネクターにつながる銅線は 24 系統で、そのうち 2 本ずつが燃っておりさらにそれらを順に並べて樹脂で固めてある。この並べた順は Fig.D.6fischer コネクターのピン番号に対応する²。

D.2.11 Thermometer

Fig.D.5のように、dilution unit 内部に以下のような温度計がついている。

温度計	場所	Range[K]	pin number	channel	その他
270 Ω Allen Bradley	sorb	4~270	1(I_+),2(V_+)	IGH 1	
2200 Ω RuO ₂	1.5K POT	30m~7	3(I_+),4(V_+)	IGH 2	
2200 Ω RuO ₂	分溜器	30m~7	5(I_+),6(V_+)	AVS 0	
2200 Ω RuO ₂	cold plate	30m~7	7(I_+),8(V_+)	AVS 1	
2200 Ω RuO ₂	混合器	30m~7	9(I_+),10(V_+)	AVS 0	
2200 Ω RuO ₂ (Fully calibrated)	experimental plate	30m~4.2	11(I_+),12(V_+) 13(V_-),14(I_-)	AVS 2	

Table D.2: dilution unit の各場所に設置された温度センサーと、その温度範囲

experimental plate の温度計は 20m~4.2 の範囲で更正済みで、次の式ような曲線を描く。

²fischer コネクター:1 については、ピン番号 1~12 には 1.5K POT までは $\phi 0.1\text{mm}$ の銅線、M/C までは超伝導線を使用し、ピン番号 13~24 には $\phi 0.1\text{mm}$ のコンスタンタン線を使用している。

$$\ln(T) = \sum_i a_i \left(\frac{1}{\ln(R)} \right)^i \quad (D.1)$$

この温度計のキャリブレーションカーブを Fig.D.7に示す。

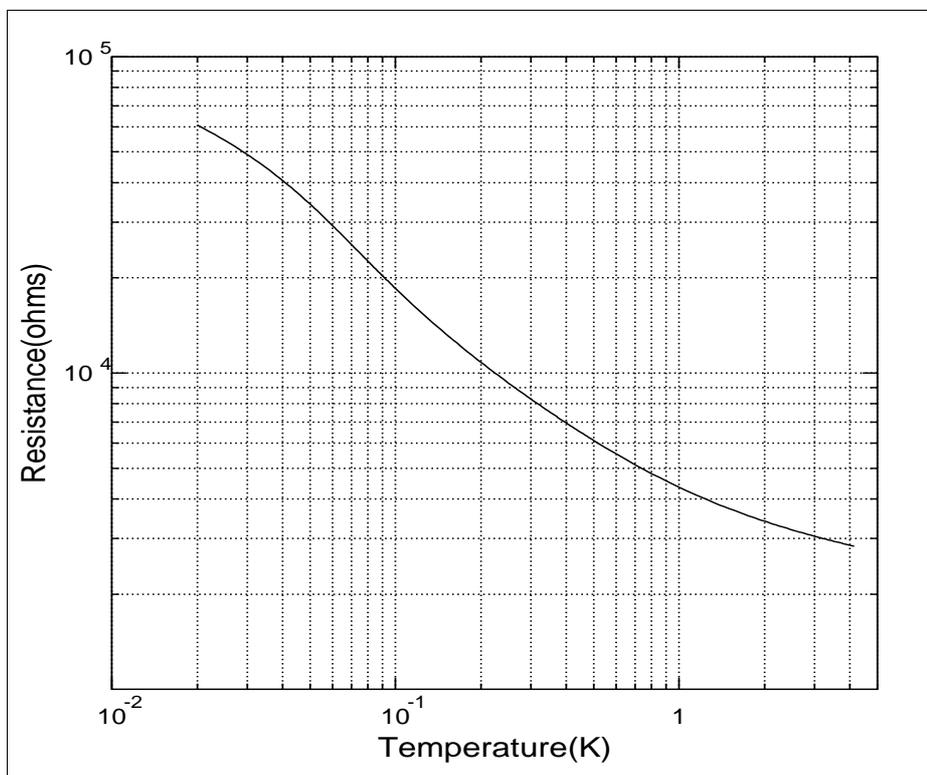


Figure D.7: RuO₂ 温度計のキャリブレーションカーブ

D.2.12 Heater

Fig.D.5のように、dilution unit 内部に以下のようなヒーターがついている。

場所	pin number	wire resistance
sorb	19, 20	85 Ω
still	21, 22	500Ω
M/C	23, 24	500Ω

Table D.3: ヒーター

これらのヒーターの主な用途は以下の通りである。

- sorb heater : 8K 以上で、吸着した IVC 内のヘリウムガスをヒーターで加熱することにより脱着させる。
- still heater : still 中の超流動 ^4He は内壁をフィルム状にはい上がり、排気管の高温部で蒸発する。これは循環ガスの ^3He の純度を下げるが、これを避けるためにヒーターで熱を加え、フィルムを強制的に蒸発させる。蒸発した ^4He は壁面で再縮し、排気ラインに流れないようになっている。
- M/C heater : 実験試料を冷やしたい温度に調節する。

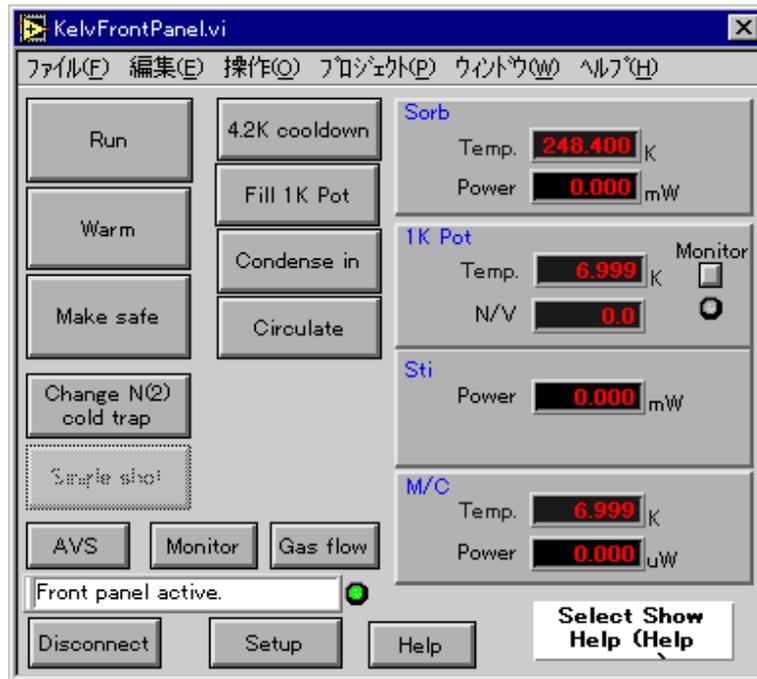


Figure D.8: Kelvinox front panel

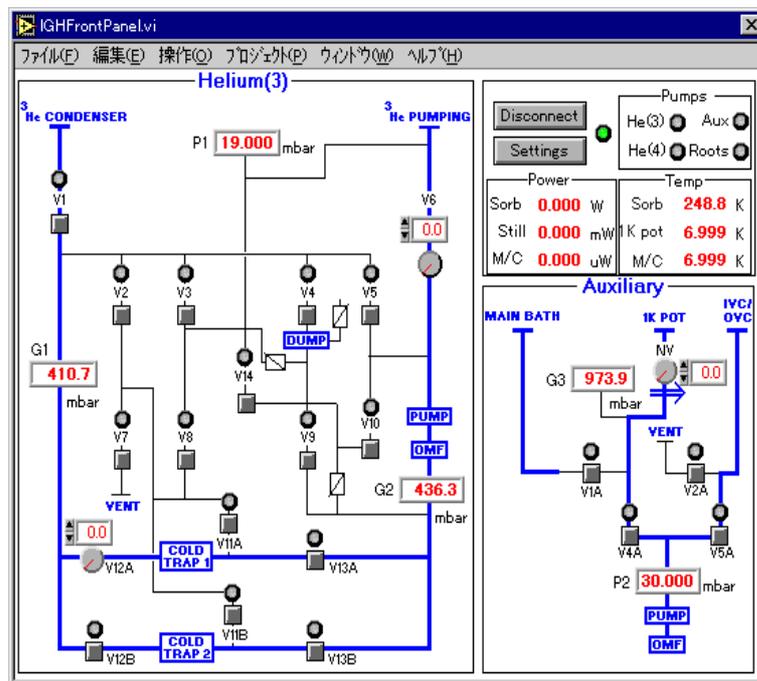


Figure D.9: “Gas flow”、 ^3He 、 ^4He ガスのダイアグラム

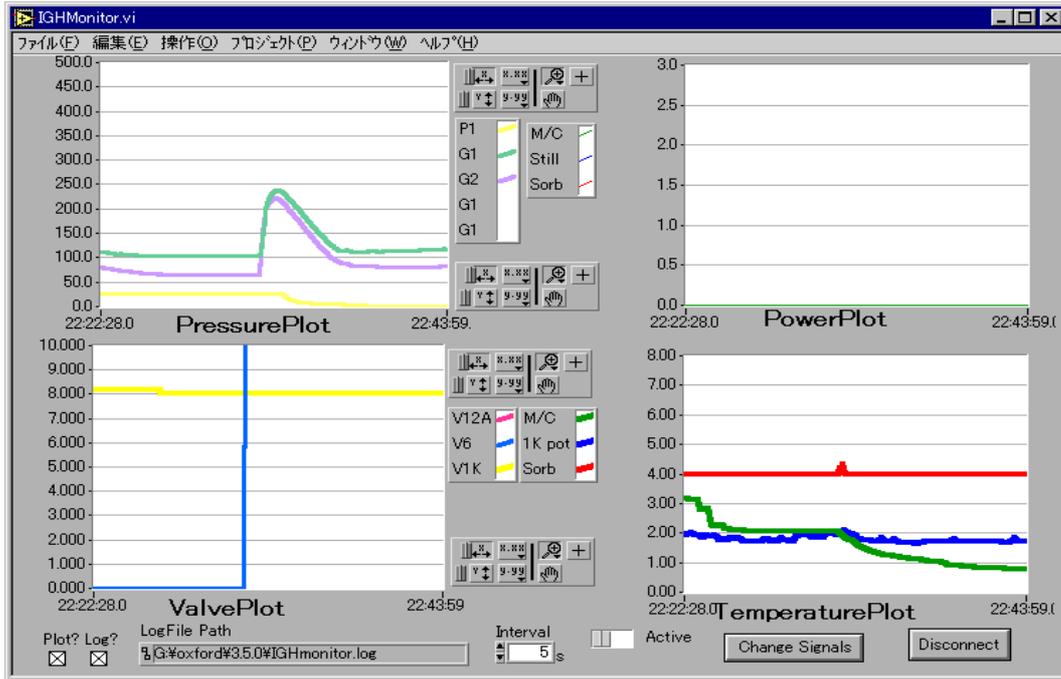


Figure D.10: "Monitor"

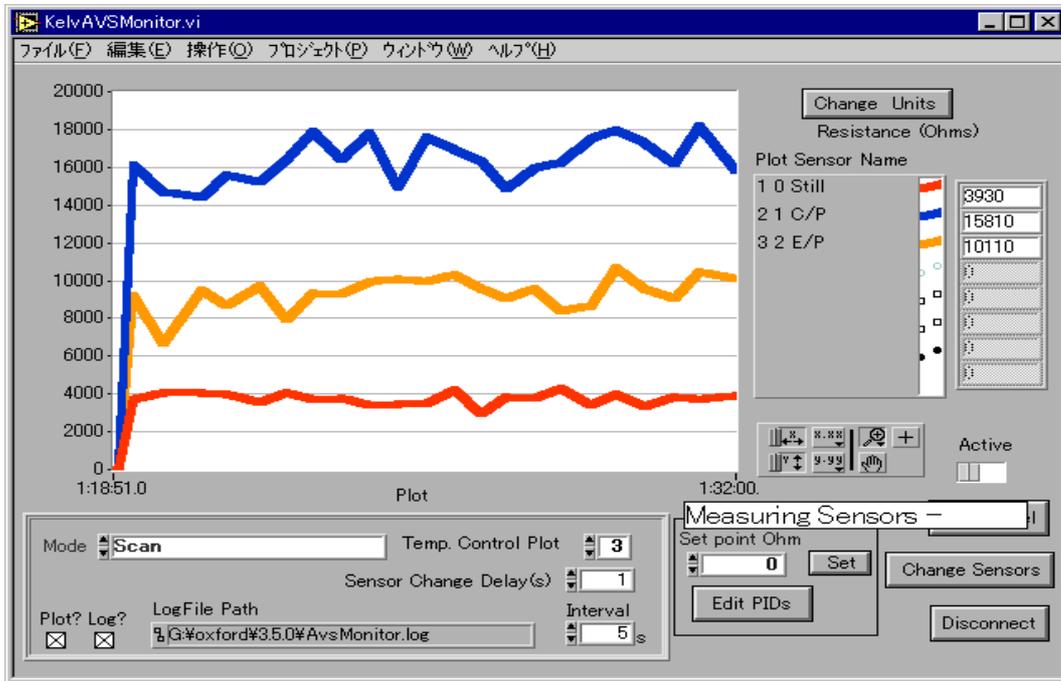


Figure D.11: "AVS"

D.3 操作手順

D.3.1 試料のマウント

- (a) E/P に実験試料を取り付ける。

D.3.2 Kelvinox 25 insert(筒) の取り付け

- (a) 1.5K POT のそばにある IVC exchange ●下に振った番号順に筒を取り付けていく
gas sorb(charcoal) を取り出して、ドライヤーで 2 ~ 3 時間あぶる。

- (b) 忘れずに charcoal を取り付け。

- (c) インジウムを Fig.D.13 に示す要領で筒に巻き付ける。また、dilution unit に 5 本の筒を付ける。付けていく順序及び用いるねじ類を Fig.D.12 に示す。

注意 インジウムシールをはる筒は、前回の冷却で使用したインジウムを軟らかいプラスチックなどできれいに削ぎ落しておく。

- (d) sliding seal tube をねじどめする。

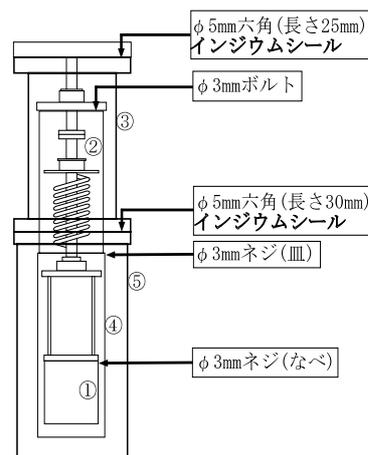


Figure D.12: 筒を取り付ける順序

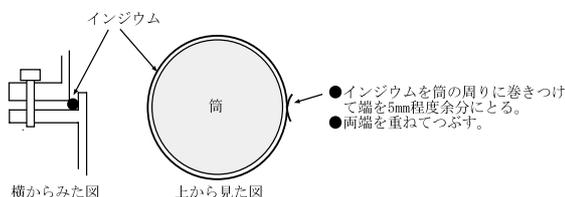


Figure D.13: インジウムシールの貼り方

D.3.3 sliding seal tube の挿入

いま、sliding seal はクライオスタットから引き上げられて、クライオスタットにはメインバスが汚れないように baffle がかぶせてあり、また sliding seal tube から各金属管は外されているという状態である。

- (a) sliding seal tube の上方にあるポ - トと、⑮:MAIN BATH RECOVERY PORT を金属管 (リカバリ - ライン) でつなぐ。
- (b) ⑮:MAIN BATH RECOVERY PORT (吹き出し口とリカバリーラインの間のポート) に風船を付ける (MAIN BATH に液体ヘリウムがある場合。なければ付けなくてよい)。

- (c) クライオスタットから baffle を取り、sliding seal tube の下端を素早くクライオスタットの入口に挿入する。⇒ sliding seal tube の引き下ろし開始。
風船が適度に張ったら、引き下ろしを中止し、萎んだら再開する。
- (d) 引き下ろしが完了したら、sliding seal tube をクライオスタットにボルトで固定する。
- (e) sliding seal tube に各金属管を所定の位置につなぐ。
- (f) ⑬:HELIUM COLD TRAP ENTRY にヘリウムコールドトラップを挿入し、キャップを閉める。

D.3.4 初期設定

ここでは、液体窒素による予冷の前準備として、各部の真空引き等を行う。

1. OVC 真空引き

OVC を高真空に引くために、タ - ポンプで真空引きする。

- (a) タ - ポンプを ⑦:OVC VACUUM VALVE につなぐ。
- (b) ポンプを作動させ、ポンプ側からバルブを開けてゆく。24 時間以上真空引きして、 10^{-6} Torr 程度にする。この操作は冷却の度に行う必要はない。

2. transfar tube 真空引き

- (a) taransfar tube を 10^{-6} Torr 程度まで真空に引く (およそ 24 時間)。この操作は冷却の度に行う必要はない。

3. IVC の真空引き

- (a) IVC を真空引きする。

注意 IVC の真空度はなかなか上がらないだろうが、これはほとんどの場合 sorb のチャコールからのアウトガスによるものであるが、ひょっとすると IVC にリークがある可能性も皆無ではない。どちらかをはっきりさせるにはリークディテクターで丹念に調べるのが良いが、一方で、dilution unit を MAIN BATH に突っ込んだ状態で MAIN BATH を真空引きし、このときポンプのバルブを閉めて真空度が落ちるようであれば sorb からのアウトガスと考えて良い (かもしれない)。

4. 1.5K POT 真空引きとガスパーズ

- (a) 排気用ロータリーポンプを作動。フロントパネルの 4 A を開いて 1.5K POT を真空に引く。
- (b) 4A を閉じる。
- (c) メインバスをフラッシングした後 (後述の『メインバスのフラッシュ』を見よ)、メインバスを大気圧程度のヘリウムガスで満たしておく (メインバスの圧力はバルブ:1A を開けて、G3 でモニター)。

- (d) ニードルバルブを全開する。
- (e) しばらくしたら、ニードルバルブを閉じ、1A も閉じる。
- (f) 4A を開けて、1.5K POT 内を真空引き。
- (g) ニードルバルブを開け、液体 ^4He 吸い込み口からヘリウムガスを送り込み、1.5K POT 内をパージする。これは、内部に空気があると 1.5K POT が凍結してしまうからである。
- (h) 再び、(c) \Rightarrow (d) \Rightarrow (e) を 2 ~ 3 回繰り返す。

5. ニードルバルブの初期化

OXFORD 社製の希釈冷凍機はニードルバルブがきちんと閉まらないということが度々起こるようだ。そこで冷却前に必ずニードルバルブの初期化を行い、ニードルバルブの 0 点を調節する(つまりニードルバルブがちゃんと閉まっている状態にする)。いま手順通り冷却準備を進めているなら、メインバスにはヘリウムガスが残っているはずである。もしそうでないなら初期化をすればニードルバルブが開閉し、1.5K POT にメインバス内の空気が入り込むのでメインバスはヘリウムガスで満たしておく。

- (a) フロントパネルの裏側のコンセントを抜き電源を切る。コンセントを入れるとニードルバルブのゼロ点の自動化された 0 点調整が行われる(初期化)。
- (b) 初期化中はニードルバルブの開閉によって 1.5K POT にメインバスのヘリウムガスが入るので、排気用ロータリーポンプで 1.5K POT をよーよーく排気する。

6. 循環ラインの排気と液体窒素コールドトラップのベ - キング

いま、循環ラインの金属配管の中には空気が入っている状態でこれを排気するとともに、コールドトラップ内のチャコ - ルに吸着された不純物を取り除くために、コ - ルドトラップをベ - キングし、ポンプで排気してコールドトラップをきれいにすることを目的とする。

- (a) 排気用ロータリーポンプでコ - ルドトラップまでの管内を排気する。(バルブ:5A \Rightarrow 2A \Rightarrow 7 \Rightarrow 2、11A の順に開ける。)注意 5A を開けるときは、IVC ヘリークがあるので IVC への配管はめくらにする。
- (b) 排気している状態で、コ - ルドトラップを液体窒素用デュウ - から引き抜き、表面をドライヤーで 100 度以上に熱する。
- (c) さらにバルブ:1、3、5、6、8、①:HE3 PUMPING LINE のゲートバルブ、○3:HE3 RETURN LINE のバルブを開け管内のガスを排気する。
- (d) コ - ルドトラップを室温まで冷ました後、液体窒素用デュウ - に戻す。

D.3.5 予冷

ここでは、液体窒素によって IVC 内部を 77K まで予冷する。これは、システムがいきなり極低温状態になった時に、熱的ショックによってダメージを受けない様にするためと、室温にある状態をいきなり極低温にすると液体ヘリウムを浪費してしまうためである。液体窒素は、メイン

バスにイれる訳であるが、IVC が高真空では、熱がIVC 内部の各ユニットに伝わらない。この為、ヘリウムガスを熱交換ガス (exchang gas) として IVC に約 5cm^3 導入する。

1. 熱交換ガスの導入

下の図のように、④:IVC PUMPING LINE、風船、ヘリウムポンベ、排気用口 - タリ - ポンプを十字につなぐ。

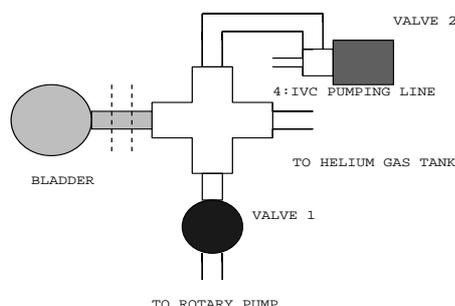


Figure D.14: 熱交換ガスを IVC に導入する時のセットアップ

- (a) 排気用口 - タリ - ポンプを作動させる。図のバルブ 1 を開け、④:IVC PUMPING LINE までの管内を真空引きする。このときバルブ 2 (上図) は閉じている。
- (b) バルブ 1 を閉じる。
- (c) 図の十字の配管内を 2 ~ 3 回フラッシュした後、ヘリウムガスを管内に入れる。
- (d) 風船の管の部分: 図の点線の部分を折り、ガスを確保する。
この折った状態で、再び (a),(b) を行い、管内のヘリウムガスを排気する。
- (e) (d) で折っていた片側 (風船側でない方) を放し、④:IVC PUMPING LINE のバルブ (上図の 2) を開け、ヘリウムガスを IVC に導入する。
これで熱交換ガスの IVC への導入は完了である。

2. メインバスのフラッシュ

メインバス内にあるエア - や水分を取り除くために、ヘリウムガスでページする。

注意 メインバスを真空引きするときは、OVC はすでに真空状態でなければならない。

- (a) まず、⑮:MAIN BATH RECOVERY PORT に排気用口 - タリ - ポンプをつなぎ、1mbar 程度まで荒引きする (メインバスの圧力はバルブ:1A を開けて、G3 でモニター)。
- (b) 同じく ⑮:MAIN BATH RECOVERY PORT にヘリウムガスポンベをつなぎ、1000mbar 程度になるまでガスをメインバスに送り込む。
- (c) 再び (a) ⇒ (b) ⇒ (a) ⇒ (b)。

3. 液体窒素の導入

液体窒素をメインバスへ、満たんに入れる。

- (a) OVC の真空引きを終了する。

- (b) blow out tube(単なる金属管だが、片側にねじの切り込みがあって、固定できるようになっている。)を ⑨:SYPHON ENTRY に差し込み、固定する。
- (c) blow out tube と窒素タンクをサイフォンのゴムチューブでつなぐ。(サイフォンには加圧用風船が付いている)
- (d) 窒素タンクに付けたサイフォンの加圧用風船を押して、窒素をメインバスに転送する。

⑮:MAIN BATH RECOVERY PORT から窒素が液化して出てきたら、満たんになった証拠。

液体窒素のメインバスへの転送はこれで完了である。あとは、77K に冷えるまで数時間放置する。(フロントパネルの Sorb の温度を監視)

4. 窒素追い出し

ヘリウムでメインバスを加圧し、メインバスの底まで延ばした blow out tube から、予冷に使った液体窒素を押し出す。

- (a) 窒素タンクからサイフォンを外し、blow out tube にゴムチューブをつけ、ゴムチューブのもう一方の端を液体窒素コールドトラップのデュワーの入口に垂らしておく。
- (b) ⑮:MAIN BATH RECOVERY PORT にヘリウムガスポンベのゴムチューブをつなげる。
- (c) ⑮:MAIN BATH RECOVERY PORT のバルブを開け、ヘリウムガスポンベの圧力計を 200mbar 程度にしてヘリウムをメインバスに送り込む。
このとき窒素タンクの入口に垂らしたゴムチューブからは、窒素が噴き出してくるが、これが止まって窒素を全て回収した後でも、ヘリウムを 5 分程度 flow させておく。
- (d) blow out tube を引き抜き、⑨:SYPHON ENTRY に栓をする。
- (e) メインバスを排気用口 - タリ - ポンプで 10mbar まで真空引きする (フロントパネルからバルブ:4A、1A を開ける)。
圧力は、フロントパネルの G3 でモニタ - する。もしこのとき 10mbar まで下がらない場合は、まだメインバスに液体窒素が残っている可能性がある。
- (f) バルブ:4A を閉じ、再びメインバスにヘリウムガスを大気圧 (900 ~ 1000mbar) になるまで注入する。このときフロントパネルのバルブ:1A を開けておく (フロントパネルの G3 でメインバスの圧力を見る為)
- (g) (e)⇒(f) をもう 2~3 回繰り返す。注意 この手順終了後、メインバスはヘリウムガスで満たされている状態。

D.3.6 液体ヘリウム注入

メインバスに液体ヘリウムを注入する。この液体ヘリウムは IVC 内の熱交換ガスを通じて、dilution unit を 4.2K まで冷却する。この冷却も予冷を意味する。

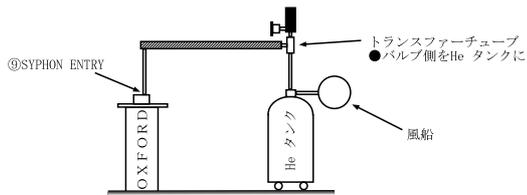


Figure D.15: トランスファーチューブによる液体ヘリウムの転送

- (a) ⑮:MAIN BATH RECOVERY PORT にゴムチューブを取り付け、ゴムチューブのもう一方を床に垂らしておく。これは、空気より軽いヘリウムのリクによって、空気のメインバスへの混入を防ぐためである。
- (b) ⑯:MAIN BATH RELIEF VALVE を開けておく。(リクさせるため)
- (c) transfer tube のクライオスタット側の管に予め、⑨:SYPHON ENTRY のOリングとキャップを付けておく。
- (d) transfer tube の片側 (バルブがある側) を液体ヘリウムタンクへゆっくり入れてゆく。もう一方の側 (クライオスタット側) から気化したヘリウムが出てきたら、それを⑨:SYPHON ENTRY へゆっくり降ろしてゆく。
- (e) Oリングを付け、キャップをしめる。
- (f) 液体ヘリウムタンクに風船を取り付けて、加圧し、液体ヘリウムをメインバスに転送する。
⑥:HELIUM LEVEL PROBE ENTRY から液面計を入れ、液面をまめにチェックする。⇒メインバスの底から約60cm以上(約16リットル)。[check] 最終的に液面はどれくらいになったか。
- (g) 転送し終わったら、transfer tube を液体ヘリウムタンクとクライオスタットから同時に抜き、素早くOリングを元に戻し、⑨:SYPHON ENTRY のキャップを締める。
- (h) ⑮:MAIN BATH RECOVERY PORT からゴムチューブを外し、逆流防止用の one way valve をつける。
- (i) 4.2K になるまで放置する (フロントパネルの Sorb, Mixing Chamber, 1K pot をモニターする)。
- (j) IVC 内の熱交換ガスは、8K 以下で Sorb によって吸着されるが、念のため IVC を真空引きしておく。(15 ~ 30 分)⇒④:IVC PUNPIG LINE にタポポンプをつなぎ、真空引きする。

D.3.7 循環運転

これからの操作は端末で、LabVIEW からコントロールすることにより自動運転する。手動で操作する場合は、Operator's Handbook を見てほしい。

ニードルバルブ、バルブ:6、12A は、LabVIEW Front Panel からどれくらい開きたいかを 0 ~ 100% の間で調節できる。自動運転中は、これらのバルブの開閉は自動化され、端末がやってくれる。このときのバルブの状態によって、フロントパネルの、バルブの開閉を示す LED の色が以下のように変化する。

LED の色	バルブの状態
緑	100% 開
赤	開 (100% ではない)
黄	開閉中
消灯	閉

Table D.4: LED の色とその時のバルブの状態

いまシステムは、

- sorb、1.5K POT、mixing chamber の温度は、ほぼ 4.2K ⇒
- メインバスには液体ヘリウムが maximum helium level 以上である (約 60cm)
- IVC は高真空

という状態であるはずである。

- ^3He 循環系のバルブが全て閉まっていることを確認する。(フロントパネルのバルブの状態を示す LED は全て消灯)
- ①:HE3 PUMPING LINE のゲートバルブ、③:HE3 RETURN LINE のバルブ、それと、②:1.5K POT PUMPING LINE のバルブを開ける。
- ^4He 排気用ロータリーポンプを作動させる。
- Fig.D.8:Kelvinox Front Panel.vi の をクリック。

これは、排気用ロータリーポンプで 1.5K POT を減圧することによって、ニードルバルブを通じてメインバスから 1.5K POT へ液体ヘリウムを汲み上げる操作である。このとき、バルブ:4A が開き、1.5K POT を排気する。その後、4A が閉じニードルバルブと 1A が開く。

注意 この段階でニードルバルブが動作しない³ といったことが、これまでに何度かあった。これは、やはりニードルバルブが正確に初期化されておらず、混入した空気がバルブに凍り付いたためと考えられる。

このときの対処方としては、まず青色の円筒を固定している 2 本の皿ねじを外し、円筒を左右にぐりぐり回して凍ったバルブを力で動かす (力をかけ過ぎないように)。次にねじを元の位置に戻して筒を固定し、再びニードルバルブを初期化する。メインバスから気化したヘリウムによる 1.5K POT の過圧を避けるために、初期化中は 1.5K POT を排気している状態にする。

以上を実行した上で再び 。

バルブの終状態 (LED の色) は、

である。Auxiliary に関しては、以後同じ状態で、排気用ロータリーポンプはメインバスから汲み上げた液体ヘリウムを少しずつ 1.5K POT から排気し続ける。

1.5K POT の温度が 1.5K 程度に下るまで待つ。温度は Fig.D.10 に示す "Monitor" を開いて (開くには Fig.D.8 の "Monitor" をクリック) モニターする。

³ニードルバルブの青色の円筒内部の金属が回転しないということ。

Helium(3)	Auxiliary
全て消灯	4A : 緑 NV : 黄 (数%)

Table D.5: Fill 1K Pot 終了時のバルブの状態

- (e) dump についで ”out” のバルブを開ける (このバルブは、mixture を回収し終わるまで開けたまま)。
- (f) check バルブ:9 を開けて、dump の圧力 (G2) を読む。
- (g) ”in” のバルブを開ける。
- (h) 図 6:Kelvinox Front Panel.vi の Condence in をクリック。

これは、mixture を dump から、condenser line(⇒ 図 5、Helium(3) のバルブ:6 より ³He CONDENSER 側) へ導入する手順である。

このとき、同時に循環用口 - タリ - ポンプは作動し、また、バルブ:1、3、9、12A、13A が開く。mixture はバルブ:9 を開くことで、循環用口 - タリ - ポンプの出口から condenser line に乗る。

バルブ:3 は、condenser line と still pumping line(⇒ 図 5、Helium(3) のバルブ:6 より ³He PUMPING 側) の圧力、すなわち図 5 の P1 と G1 をほぼ等しく保つために開かれる。バルブ:12A は、始めゆっくりと開き (LED の色は黄)、condenser line の圧力 (G1) が 200mbar 以下になるよう調節されている。これは、³He を多量に 1.5K POT に送り込むと、1.5K POT に過度の負担がかかるためである。バルブ:12A が全開になったら、G1 は 100mbar 以下に下がって行く。

この手順で、still は 1.2K 以下に冷却され始める。

バルブの終状態は

Helium(3)	Auxiliary
1 : 緑 12A : 赤 (ほぼ 100%)	4A : 緑
3 : 赤 13A : 緑	NV : 黄 (5 ~ 6%)
9 : 赤	

Table D.6: Condence in 終了時のバルブの状態

となり、また循環用口 - タリ - ポンプはスイッチが入ったままのはずである。

終了の目安としては、G2 が 100mbar 程度になることである。

check sorb、1.5K POT、M/C の温度。

- (i) 図 6:Kelvinox Front Panel.vi の Circulate をクリック。
- いよいよ ³He の循環である。この手順により、バルブ:3 と 6 が閉じ、そして今度はバルブ:14 が開くことで mixture は、バルブ:6 の手前から still pumping line に運ばれる。さらにバルブ:6 がゆっくりと開き、G2 の圧力が 100 ~ 200mbar になるよう調節される。バルブ:6 が全開すると、G1 と G2 の圧力は降下し、mixture のほとん

どが dump からクライオスタットに移っていく。そしてしばらくすると、バルブ:14 は閉じる。

終状態は、

Helium(3)	Auxiliary	power
1 : 緑 13A : 緑 6 : 赤 (ほぼ 100%) 12A : 赤 (ほぼ 100%)	4A : 緑 NV : 黄 (数 %)	sorb : 0.0W still : 1.5mW M/C : 0.0 μ W

Table D.7: Circulate
終了時のバルブの状態

となる。

check sorb, 1.5K POT, M/C の温度。

D.3.8 実験中

実験中に行う主な操作を以下に示す。

実験試料の温度モニター : Fig.D.11に示す”AVS”を開いて(開くには Fig.D.8の”AVS”をクリック)RuO₂ 抵抗温度計の抵抗値をモニターし、キャリブレーションカーブ : Fig.D.7を見て対応する温度を調べる。

実験試料の温度調節 : M/C のヒーターを焚いて、実験試料を冷却したい温度に調節する。

ヘリウム継ぎ足し : 実験中、時々メインバス中の液体ヘリウムの液面を測り、液面が Fig.D.4の MINIMUM HELIUM LEVEL(約 26cm) 以下になったら、『3.6 液体ヘリウム注入』の手順で液体ヘリウムを継ぎ足す。

D.3.9 Warming up

これは実験の終了や、実験試料の取り換えなどのために、循環中の ³He を dump に回収する手順である。

注意 この手順を踏むには、メインバスに液体ヘリウムが minimum helium level すなわちメインバスの底からニードルバルブの下端までの高さ:26cm 以上残っている必要がある。

- (a) ⑮:MAIN BATH RECOVERY PORT のバルブを開ける。
- (b) Fig.D.8:Kelvinox Front Panel.vi の Warm をクリック。

この手順により、まず第一に、1K pot 内にある液体 ⁴He を気化させて全て 1.5K POT から追い出す。気化させるために、ニードルバルブが開まり、バルブ:1A が開くことによってメインバスと 1.5K POT をつないで 1.5K POT を温める。そして、バルブ:1A が閉じ、4A が開いて気化したヘリウムガスを排気用ロータリーポンプで排気する。バルブ:1A と 4A は、交互に開閉を繰り返して 1.5K POT を空にしていく。

次に、³He を dilution unit から dump に回収する。いま 1.5K POT に液体 ⁴He は無く、従って循環中の ³He は condenser で液化されることなくガス状のままとなる。バルブ:3 が開き、condenser line と still pumping line の圧力、すなわち Fig.D.9の P1 と G1 をほぼ等しく保つ。そして 13A が閉じて 9 が開き、循環中の ³He が dump

に回収されてゆく。ときどき 13A が開いて温かい mixture を M/C に送り込む。さらに、M/C には 20mW のヒーターが焚かれる。

この自動運転中のバルブの状態をまとめると、

Helium(3)	Auxiliary	power
1 : 緑 3 : 赤 9 : 赤 6 : 赤 (ほぼ 100%) 12A : 赤 (ほぼ 100%) 13A : 消灯 ⇔ 点灯 (緑)	NV : 消灯 1A : 開、閉 ⇕ 4A : 閉、開	sorb : 0.0W still : 45mW M/C : 20mW

Table D.8: Warm
運転時
のバル
ブの状
態

となっている。

check 回収の終わりで、G2 の読みが Condence in のときに見た dump の圧力程度になっているか確認。

- (c) 回収が終わったら、dump の二つのバルブを締める。
- (d) また、①:HE3 PUMPING LINE のゲートバルブ、③:HE3 RETURN LINE のバルブ、それと、②:1.5K POT PUMPING LINE のバルブを閉めておく。

D.3.10 sliding seal tube の引き上げ

sliding seal tube の引き上げは、実験試料の取り換えや、配線をつなげる時以外は通常行わない。

今、dilution unit 内の mixture は全て dump に回収されているはずであり、また、1.5K POT 内の液体 ⁴He も取り除かれている。

- (a) メインバスにどのくらい液体ヘリウムが残っているか、液面計で確認しておく。⇒ check
- (b) クライオスタットの各配管のバルブを全て締める。
- (c) クライオスタットから各金属管を外す (ただし、リカバリーライン以外)。
- (d) ③:HELIUM COLD TRAP ENTRY からヘリウムコールドトラップを引き抜く。
- (e) sliding seal tube を固定しているボルトを外す。
- (f) ⑤:MAIN BATH RECOVERY PORT (吹き出し口とリカバリーラインの間のポート) に風船を付ける。
- (g) sliding seal tube の引き上げを開始する (ゆっくりと)。風船が萎んだら引き上げを止め、風船が軽く張るくらいまで膨らんだら再び引き上げる。
- (h) ⑥:MAIN BATH RELIEF VALVE を開けておく。
- (i) 引き上げが完了したら、素早くクライオスタットに baffle をかぶせる。

希釈冷凍機 操作手順 check seat < Ver2.0 >

時刻	実験項目	チェック覧
:	初期設定	
:	1. ニードルバルブの動作確認	
:	2. IVC の真空引きとリークテスト	リーク:①有・無 ②有・無 IVC 真空度: _____ Torr
:	4. 1.5K POT 真空引き	1.5K pot 真空度: _____ mbar \Leftarrow G3
:	5. コールドトラップのベーキング	
:	6. OVC 真空引き	OVC 真空度: _____ Torr
:	7. メインバスのフラッシュ	
:	予冷	
:	1. 熱交換ガスの導入	
:	2. 液体窒素の導入	sorb の温度: _____ になるのに要した時間: _____
:	3. 窒素追い出し	1K pot 真空度: _____ mbar \Leftarrow G3
:	液体ヘリウム注入	液面チェック (液体 ^4He 転送完了後) 液面: _____ cm
:	循環運転	● ^4He ($\geq 60\text{cm}$) @M.B. ● IVC 高真空 ● [バルブ] 全て消灯
:	システムの状態 \Rightarrow	[温度] sorb: _____ 1K pot: _____ m.c.: _____ [圧力] G1: _____ G2: _____ P1: _____ G3: _____ P2: _____
:	<input type="button" value="Fill 1K Pot"/> クリック	[バルブ] 4A: 緑 NV: 黄 (Helium(3) は全て消灯) [温度] sorb: _____ 1K pot: _____ m.c.: _____
:	<input type="button" value="Condense in"/> クリック	③バルブ 9 点灯時の dump の圧力 _____ \Leftarrow G2 [バルブ] 1: 緑 3: 赤 9: 赤 12A: 赤 13A: 緑 4A: 緑 NV: 黄 [温度] sorb: _____ 1K pot: _____ m.c.: _____ [圧力] G1: _____ G2: _____ P1: _____ G3: _____ P2: _____
:	<input type="button" value="Circulate"/> クリック	[バルブ] 1: 緑 6: 赤 12A: 赤 13A: 緑 4A: 緑 NV: 黄 [温度] sorb: _____ 1K pot: _____ m.c.: _____ [圧力] G1: _____ G2: _____ P1: _____ G3: _____ P2: _____ [power] sorb : 0.0W still : 1.5mW m.c. : 0.0uW
:	実験中	
:	液面チェック	液面 _____ cm ($\leq 26\text{cm}$ で継ぎ足し)
:	液面チェック	液面 _____ cm
:	液体 ^4He 継ぎ足し	『液体ヘリウム注入』と同じ手順 液面 _____ cm
:	液面チェック	液面 _____ cm
:	Warming up	③回収終了時の dump の圧力 _____ \Leftarrow G2
:	<input type="button" value="Warm"/> クリック	[バルブ](Auxi) NV: 消灯 1A: 開 / 閉 \leftrightarrow 4A: 閉 / 開 \leftrightarrow (He(3)) 3: 赤 9: 赤 13A: 消灯
:	sliding seal tube の引き上げ	
:	引き上げ開始	
:	引き上げ終了	

Bibliography

- [1] D.McCammon, S.H.Moseley, J.C.Mater, and R.F.Mushotzky “Experimental tests of a single-photon calorimeter for x-ray spectroscopy”, *J.App.Phys.*, 1984.
- [2] S.H.Moseley, J.C.Mater, D.McCammon “Thermal detectors as x-ray spectrometers”, *J.App.Phys.*, 1984.
- [3] D.McCammon, M.Juda, J.Zhang, R.L.Kelley, S.H.Moseley, and A.E.Szymkowiak “Thermal detectors for high resolution spectrometers”, 1986.
- [4] C.K.Stahle, R.L.Kelley,
D.McCammon, S.H.Moseley, A.E.Szymkowiak “Microcalorimeter array for high resolution soft X-ray spectrometers”, 1996.
- [5] D.McCammon, W.Cui, M.Juda, J.Morgenthaler and J.Zhang “Thermal calorimeters for high resolution X-ray spectrometers”, 1993.
- [6] G.C.Hilton, D.A.Wollman, K.D.Irwin, L.L.Dulcie, N.F.Bergren, and John M.Martinis, “Superconducting Transition-Edge Microcalorimeter for X-ray Microanalysis”, *App.Superconductivity Conf.*, 1998.
- [7] D.A.Wollman, K.D.Irwin, G.C.Hilton, L.L.Dulcie, DALE E.NEWBURY & JOHN M. MARTINS, “High-resolution,energy-dispersive microcalorimeter spectrometer”, *J.Microscopy*, 1997.
- [8] D.A.Wollman, G.C.Hilton, K.D.Irwin, L.L.Dulcie, N.F.Bergren, DALE E.NEWBURY, Keung-Shan Woo, Benjamin Y. H.Liu, Alain C. Diebold and JOHN M. MARTINS, “High-Resolution Microcalorimeter Energy-Dispersive Spectrometer for X-ray Microanalysis and Particle Analysis”, *Characterization and Metrology for ULSI Technology*, 1998.
- [9] Caroline Kilbourne Stahle “The development of high resolution calorimetric X-ray detectors for compton scattering experiments” 1981.
- [10] “Preliminary Design Review”, 1995, Goddard Space Flight Center.
- [11] 「科学衛星 ASTRO-E 中間報告書」, 1998, 宇宙科学研究所 SES データセンター.

- [12] 「低温技術 (第 2 版)」, 1985, 東京大学出版会.
- [13] 「低温工学ハンドブック」, 1982, 内田老鶴園新社.
- [14] 「超低温物理」, 1987, 名古屋大学出版会.
- [15] 「トランジスタ回路の設計」, 1995, CQ 出版社.
- [16] 「続トランジスタ回路の設計」, 1995, CQ 出版社.
- [17] 「Kelvinox Dilution Refrigerator System Operator's Handbook」, Oxford Instruments.
- [18] 「Oxford LabView System Control Software Operator's Handbook」.Oxford Instruments.
- [19] 修士論文「マイクロカロリメータ X 線検出器の開発研究 (大阪版)」, 1997, 宮崎 利行.
- [20] 修士論文「ASTRO-E 衛星搭載用フィルターホイールの開発」, 1998, 古庄 多恵.
- [21] 修士論文「ASTRO-E 衛星搭載用フィルターホイールの特性評価」, 1999, 寅松 雄士.