修士論文

電荷交換X線の観測に向けた2段式断熱消磁冷凍機の開発とTES型X線マイクロカロリメータの動作環境の構築

首都大学東京 理工学研究科 物理学専攻 修士課程
宇宙物理実験研究室

指導教員 大橋 隆哉

榎 崇利

2012年3月

目 次

第 1 章　はじめに **1**
1.1　X 線分光による電荷交換反応機構の解明 1
1.1.1　軟 X 線背景放射と電荷交換反応 1
1.1.2　観測例 2
1.1.3　地上応用実験 2
1.2　X 線分光 4
1.2.1　回折格子 4
1.2.2　X 線マイクロカロリメータ 4
1.3　本研究の目的 5

第 2 章　断熱消磁冷凍機と TES カロリメータの原理 **7**
2.1　1 段式断熱消磁冷凍機の冷却原理 7
2.1.1　理想常磁性体の基本的性質 7
2.1.2　断熱消磁冷却の原理 9
2.1.3　温度制御 11
2.2　2 段式断熱消磁冷凍機の冷却原理 12
2.3　TES カロリメータの動作原理 13
2.3.1　X 線マイクロカロリメータの概要 13
2.3.2　TES 型 X 線マイクロカロリメータの概要 14
2.3.3　TES と SQUID の回路 15
2.4　SQUID の原理 19

第 3 章　宇宙科学研究所での dADR の設計/性能 **21**
3.1　dADR 開発の経緯 21
3.2　dADR の構造 22
3.2.1　超伝導マグネットコイル 22
3.2.2　ヒートスイッチ 23
3.2.3　磁性体 23
3.3　熱流入の計算と LHe 保持時間の理論値 23
3.3.1　室温から LHe tank までの熱流入 25
3.3.2　LHe tank から極低温部 (50mK) までの熱流入 30
3.4　宇宙科学研究所での冷却性能試験 30
3.4.1　dADR の性能 30

3.4.2 性能評価試験 32

第 4 章 AGGHS の評価と組み込み 33

4.1 AGGHS について 33

4.1.1 要求性能 33

4.1.2 設計 33

4.1.3 性能 35

4.2 dADR への組み込み (写真、図面) 38

4.3 AGGHS を導入した dADR の性能評価 40

4.3.1 目的 40

4.3.2 要求性能 40

4.3.3 設計 41

4.3.4 評価結果 42

第 5 章 TES、SQUID の整備 47

5.1 TES 47

5.1.1 TES 素子の選択 47

5.1.2 TES 素子の仕様 (パラメータ) 47

5.1.3 dADR への組み込み (写真、図面) 47

5.1.4 TES の性能評価 50

5.2 SQUID 52

5.2.1 420-SSA の仕様 (パラメータ) 52

5.2.2 dADR への組み込み (写真、図面) 52

5.2.3 SQUID の性能評価 1 52

5.2.4 SQUID の性能評価 2 54

第 6 章 dADR 内の磁場測定 59

6.1 測定目的 59

6.2 ホール素子とは 59

6.3 ホール素子の校正試験 60

6.3.1 実験目的 61

6.3.2 ホール素子及び測定機器 61

6.3.3 実験セットアップ 63

6.3.4 実験方法 65

6.3.5 実験結果 65

6.4 dADR 内の磁場測定試験 69

6.4.1 実験目的 70

6.4.2 実験方法 70

6.4.3 実験セットアップ 70

6.4.4 実験結果 70

6.5 dADR 内の磁場測定試験 2 75
6.5.1 目的 75
6.5.2 セットアップ 75
6.5.3 実験結果 75

第 7 章 まとめ **79**
7.1 TES の RT 測定結果の考察 79
7.2 ホール素子による磁場測定結果の考察 80
7.2.1 CPA 励消磁時の 1000[mA] の折れ曲がりについて 80
7.2.2 ホール素子による実測値と磁場解析による予想値との比較 81
7.3 TES が転移しない原因について 82
7.3.1 TES が転移温度に到達していることの確認 82
7.3.2 TES の劣化 82
7.3.3 磁場の漏れ込み 82
7.3.4 TES(SII182) が元々磁場に弱い可能性 83
7.3.5 冷却手順による磁気シールドの有効性 83
7.4 今後の展望 83

図 目 次

1.1 ROSAT 衛星による 3/4[keV] の軟 X 線背景放射の全天探査. 1
1.2 電荷交換反応からの X 線放射の機構. 1
1.3 Suzaku 衛星で地球近傍の中性水素との電荷交換反応で説明される X 線の観測 (Fujimoto et al. 2007). 2
1.4 Chandra 衛星で彗星周辺の H_2O との電荷交換反応で説明される X 線の観測. 2
1.5 電荷交換反応を実現する装置 (首都大学東京原子物理実験研究室). 3
1.6 Si(Li) 検出器により観測した電荷交換反応のスペクトル (首都大学東京原子物理実験研究室) 3

2.1 常磁性体のエントロピーと温度の関係 10
2.2 温度制御の原理 11
2.3 2 段式 ADR の構造の概略図 12
2.4 2 段式 ADR の冷却サイクルの例. 赤: 高温ステージの温度と磁場強度, 青: 低温ステージの温度と磁場強度. 13
2.5 TES の $R-T$ 曲線 14
2.6 TES(ID:SII14b) の $R-T$ 特性の磁場依存性 (5). 緑: $B_\perp = 0$ [G], 青: $B_\perp = 0.06$ [G], 赤: $B_\perp = 0.26$ [G]. 15
2.7 TES(ID:SII182) のエネルギー分解能 (FWHM) の磁場依存性 (Ishisaki et al. 2007). 左: $B_\perp = 0$[G], 中: $B_\perp = 2$ [G], 右: $B_\perp = 3$[G]. 15
2.8 16
2.9 1 次元系フィードバック 18
2.10 dc-SQUID の構造. 19

3.1 dADR の内部構造 22
3.2 dADR の外観 22
3.3 超伝導マグネットコイル. 左が高温ステージ (最大磁場 4[T]), 右が低温ステージ用 (最大磁場 3[T]). 22
3.4 磁性体カプセル 24
3.5 左から CPA(CrK ミョウバン)・GGG(Gallium Gadolinium Garnet)・FAA(鉄ミョウバン) の結晶. 24
3.6 各磁性体の S-T 線図. 左の線が外磁場 0Tesla で, 右の線が 2Tesla での S-T 曲線となっている. 縦軸は単位体積あたりとしている. 赤：CPA、黒：FAA、緑：MAS、青：GGG、黄：GLF. GGG は, 1 mole=1012.4/3 g で計算. 縦線は, 左から 0.05,1.3,1.8K. 24
3.7 室温から LHe tank までの輻射熱を抑制する MLI の設置箇所の概略図. 26

3.8 表 3.6 の値から近似曲線を用いて求めた熱伝導率の関数. 28
3.9 PGGHS を導入した dADR の内部. 31
3.10 PGGHS. 31

4.1 AGGHS 概略図 34
4.2 断熱消磁冷却中の AGGHS の On/OFF 動作手順. 上段は横軸が時間, 縦軸は温度, 下段は横軸が時間, 縦軸がヒーターの熱量と磁性体にかける磁場強度. 緑: ヒーターの熱量, 赤: GGG の温度と磁場強度, 青: CPA の温度と磁場強度, マゼンダ: LHe tank 温度. 36
4.3 Charcoal に必要な熱量の測定. 黒: Thermal anchor A 3 本, Thermal anchor B 4 本, 赤: Thermal strap 8 本, 緑, 青: Thermal anchor A 5 本, Thermal anchor B 8 本. 緑: 1 回目の測定値, 青: 2 回目の測定値. 水色, マゼンダ: Thermal anchor B 15 本. 37
4.4 AGGHS off time の測定結果 37
4.5 AGGHS 導入後の dADR デュワー内部. 2 段式による性能評価測定のセットアップ. . . 38
4.6 Thermal anchor を固定した AGGHS の様子. 写真の上側が cold side, 下側が hot side. 38
4.7 2 段式のセットアップの概略図. GGG と CPA の両方を正面から見た時の図. 緑: 温度計, 赤: ヒーター. 39
4.8 Thermal anchor のセットアップの概略図. GGG 側から見た図で, CPA は GGG の裏側にある. 緑: 温度計, 赤: ヒーター. Thermal anchor A: Cu 線, Thermal strap B : Cu 被膜 NbTi 線. 39
4.9 AGGHS colde side と CPA stage を繋ぐ銅箔 strap. 30mm × 9mm × 0.05 mmt . . . 39
4.10 熱収支. 42
4.11 首都大に搬送後の LHe 減圧下での冷却試験の結果. 上段: 温度変化, 下段: 磁場変化. 赤: GGG stage, 青: CPA stage, マゼンダ: LHe tank(1.5K), 黒の実線: GGG magnet の生成磁場, 黒の点線: CPA magnet の生成磁場. 43
4.12 首都大に搬送後の LHe 減圧なしでの冷却試験の結果. 上段: 温度変化, 下段: 磁場変化. 赤: GGG stage, 青: CPA stage, マゼンダ: LHe tank(4.2K), 黒の実線: GGG magnet の生成磁場, 黒の点線: CPA magnet の生成磁場. 43
4.13 CPA の $S-T$ 曲線. 黒の線は 2011/5/26 の冷却試験のデータ. 45
4.14 LHe 保持時間. 宇宙科学研究所と首都大での測定値. 黒: LHe 温度からの冷却, 赤: LHe 減圧後の冷却. 46

5.1 磁場解析ソフト FEMM によりシミュレーションする際に, CPA 中心を軸としている. 点線の枠内についてシミュレーションを行った. 48
5.2 TES 動作温度 100mK で dADR を温度制御する際の, TES 周辺の磁場を FEMM によりシミュレーションした結果. 左図より, 磁気シールドが Fe(Si), Cryoperm, Pb の場合, TES 周辺の磁場は 13G 程度となり, Al 磁気シールドを加えた右図の場合, 0G まで遮蔽されていることが分かる. 48
5.3 2010/11/29 の試験セットアップ 49
5.4 49

5.5 2010/12/07 の試験セットアップ 49
5.6 49
5.7 2011/01/14 の試験セットアップ. ただし, Detector box 内に設置してある TES を Al 磁気シールドで覆っている. 49
5.8 49
5.9 2011/05/26 の試験セットアップ. ただし, Detector box 内に設置してある TES を Al 磁気シールドで覆っている. 50
5.10 50
5.11 SII182 の $R-T$ 特性. 50
5.12 CPA 消磁時 (温度下降時) の SII182 の R–T 特性. 右図は左図の拡大図. 赤: 2010/12/08, 緑: 2011/01/14, 青: 2011/05/26. 51
5.13 左: CPA 最大電流後 (温度下降時) の SII210 の RT 図. 右: 拡大図. 51
5.14 SQUID のセットアップ図. (1) 10kΩ, (2) SQUID(420-SSA). 52
5.15 液体ヘリウム温度での SQUID の $\Phi-\mathrm{V}$. 53
5.16 54
5.17 LHe tank 底面に設置した SQUID の様子. 55
5.18 SQUID input に 114mmΩ 抵抗を接続した様子. 55
5.19 SQUID の $\Phi-\mathrm{V}$. 左: GGG 励磁前, 中: GGG 最大磁場到達時, 右: LHe 減圧時の断熱消磁後. 55
5.20 LHe 温度で断熱消磁前, GND は別. 56
5.21 LHe 温度で断熱消磁前, GND は共通. 56
5.22 LHe 減圧時で断熱消磁前, GND は共通. 56
5.23 LHe 減圧時で断熱消磁後, GND は別. 56
5.24 LHe 減圧の停止後. GND は別. 56
5.25 LHe 減圧の停止後. GND は共通. 56
5.26 減圧再開後. GND は共通. 56

6.1 ホール効果の様子. 59
6.2 ホール素子の出力電圧の温度依存性. 60
6.3 ホール素子 HG-106A 61
6.4 ホール素子 HG-106A の出力電圧と磁束密度の関係 62
6.5 ホール素子 HG-106A の出力電圧の温度依存性 62
6.6 小型超伝導コイル 62
6.7 PROBE MMT-6J04-VH 62
6.8 ホール素子と測定機器セットアップ 63
6.9 室温での校正試験 63
6.10 LN_2 での校正試験 63
6.11 LHe 温度での校正試験 63
6.12 小型コイルに固定したホール素子 64

6.13 ジャボ浸け棒に固定したホール素子と小型コイル 64
6.14 素子 J の室温下で測定したコイルの入力電流と生成磁場の関係 65
6.15 素子 K の室温下で測定したコイルの入力電流と生成磁場の関係 65
6.16 素子 M の室温下で測定したコイルの入力電流と生成磁場の関係 65
6.17 素子 J の校正結果 (室温, I_{in}=5mA) 66
6.18 素子 J の校正結果 (室温, I_{in}=10mA) 66
6.19 素子 J の校正結果 (LN_2 温度, I_{in}=5mA) 66
6.20 素子 J の校正結果 (LN_2 温度, I_{in}=10mA) 66
6.21 素子 J の校正結果 (LHe 温度, I_{in}=5mA) 66
6.22 素子 J の校正結果 (LHe 温度, I_{in}=10mA) 66
6.23 素子 K の校正結果 (室温, I_{in}=5mA) 67
6.24 素子 K の校正結果 (室温, I_{in}=10mA) 67
6.25 素子 K の校正結果 (LN_2 温度, I_{in}=5mA) 67
6.26 素子 K の校正結果 (LN_2 温度, I_{in}=10mA) 67
6.27 素子 K の校正結果 (LHe 温度, I_{in}=5mA) 67
6.28 素子 K の校正結果 (LHe 温度, I_{in}=10mA) 67
6.29 素子 M の校正結果 (室温, I_{in}=5mA) 68
6.30 素子 M の校正結果 (室温, I_{in}=10mA) 68
6.31 素子 M の校正結果 (LN_2 温度, I_{in}=5mA) 68
6.32 素子 M の校正結果 (LN_2 温度, I_{in}=10mA) 68
6.33 素子 M の校正結果 (LHe 温度, I_{in}=5mA) 68
6.34 素子 M の校正結果 (LHe 温度, I_{in}=10mA) 68
6.35 ホール素子 J. CPA 中心軸方向 (磁束方向). 70
6.36 ホール素子 K. 磁束と垂直な方向. 70
6.37 ホール素子 M. 磁束と垂直な方向. 70
6.38 3 軸方向の概略図. 70
6.39 LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 J, I_{in}=10mA). 71
6.40 LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 J, I_{in}=10mA). 71
6.41 LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 K, I_{in}=10mA). 72
6.42 LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 K, I_{in}=10mA). 72
6.43 LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 M, I_{in}=10mA).
励消磁の offset のずれは, Max current の測定時に offset がずれたために生じた. 72
6.44 LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 M, I_{in}=10mA). 72
6.45 LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 J,
I_{in}=10mA) と、FEMM による磁場解析結果 (青). 72
6.46 LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 J,
I_{in}=10mA) と、FEMM による磁場解析結果 (青). 72

6.47 LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 K, I_{in}=10mA). 73
6.48 LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 K, I_{in}=10mA). 73
6.49 LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 M, I_{in}=10mA). 励消磁の offset のずれは, 最大磁場到達時に offset がずれたために生じた. 73
6.50 LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 M, I_{in}=10mA). 73
6.51 図 6.46 の拡大図. LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 J, I_{in}=10mA) と、FEMM による磁場解析結果 (青). 73
6.52 図 6.48 の拡大図. LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 K, I_{in}=10mA). 74
6.53 図 6.49 の拡大図. LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 M, I_{in}=10mA). 74
6.54 GGG 断熱消磁中の 3 軸方向を足し合わせた結果. 実測値と解析結果で比較. 右図は左図の拡大図. 74
6.55 ホール素子のセットアップ. CPA 中心軸上から GGG と反対の方向へ 24[mm] ずらした位置。. 75
6.56 3 軸方向の概略図. 75
6.57 LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 J, I_{in}=10mA). 76
6.58 LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 J, I_{in}=10mA). 76
6.59 LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 K, I_{in}=10mA). 76
6.60 LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 K, I_{in}=10mA). 76
6.61 LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 M, I_{in}=10mA). 励消磁の offset のずれは, Max current の測定時に offset がずれたために生じた. 77
6.62 LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 M, I_{in}=10mA). 77
6.63 LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 J, I_{in}=10mA). 77
6.64 LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 J, I_{in}=10mA) と、FEMM による磁場解析結果 (青). 77
6.65 LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 K, I_{in}=10mA). 77
6.66 LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 K, I_{in}=10mA). 77
6.67 LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 M, I_{in}=10mA). 励消磁の offset のずれは, 最大磁場到達時に offset がずれたために生じた. 78
6.68 LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 M, I_{in}=10mA). 78

7.1 CPA のソレノイドコイルと SiFe shield. 80
7.2 CPA 断熱消磁中の 3 軸方向を足し合わせた結果と FEMM による予想値. 右図は左図の拡大図. 81
7.3 GGG 断熱消磁中の 3 軸方向を足し合わせた結果と FEMM による予想値. 右図は左図の拡大図. 81
7.4 GGG 断熱消磁中の 3 軸方向を足し合わせた結果. 実測値と解析結果で比較. 右図は左図の拡大図. ただし, 解析結果の絶対値は最大電流 8000[mA] 時の実測値の絶対値に合わせるため 0.68 倍にする補正をしている。 82

表 目 次

3.1 必要結晶量、LHe tank への排熱量、低温ステージへの流入熱の見積もり 21
3.2 MLI の設置箇所と枚数 25
3.3 支持材料 GFRP 27
3.4 LHe 注入口のベローズ (材質:SUS) 27
3.5 High-Tc を覆う GFRP 28
3.6 材料の熱伝導率 28
3.7 dADR の設計値 (*shinozakietal*.2010) 31
3.8 性能評価試験の結果 (*shinozakietal*.2010) 32

4.1 AGGHS の要求性能 34
4.2 AGGHS の ON/OFF 時の性能. 35
4.3 NEEDLE からの熱流入 (Thermal anchor なしの場合). 35
4.4 AGGHS hot side への熱流入計算のパラメータ 40
4.5 AGGHS の ON/OFF 時の NEEDLE の熱伝導率 40
4.6 実験セットアップ 41
4.7 Cu の熱伝導率 42
4.8 AGGHS hot side への流入熱 42
4.9 AGGHS hot side への流入熱. G_{anchorA}, G_{anchorB}, P_{HShot}: hot side への流入熱, C: 1 時間における GGG への侵入熱に対する Hot side への侵入熱の割合 ($P_{HShot} \times 3600/1.08$) 43
4.10 LHe tank 減圧をした場合の冷却試験結果 44
4.11 LHe 減圧なしの場合の冷却試験結果 44

5.1 47
5.2 各試験での磁気シールドのセットアップ 48
5.3 TES の RT 測定結果 50
5.4 SQUID の仕様 52
5.5 dADR と希釈冷凍機での white noise の比較 53

6.1 ホール素子の種類と特徴 60
6.2 測定機器 61
6.3 小型超伝導コイル 62
6.4 Gauss meter の測定感度 (PROBE: MMT-6J04-VH) 63
6.5 ホール素子の磁場感度 69
6.6 ホール素子の磁気感度の誤差 69

6.7 残留磁場 71
6.8 7000[mA] 到達時の TES 周辺の磁場強度の絶対値 76

7.1 ソレノイドコイルの電流値と SiFe 内の磁束密度の関係 80
7.2 Fe と SiFe の磁性 80

第1章　はじめに

1.1　X 線分光による電荷交換反応機構の解明

1.1.1　軟 X 線背景放射と電荷交換反応

軟 X 線とは、1keV 以下という低エネルギー側の X 線のことで、宇宙のあらゆる方向から観測されている。1990 年代に X 線天文衛星 ROSAT により、この軟 X 線背景放射が時間変動していることが発見され、その起源の 1 つとして考えられているのが電荷交換反応による輝線である。

電荷交換反応とは、中性原子又は分子中の電子が多価イオンの励起状態へとある確率で移る反応のことで、その後、励起状態に入った電子が基底状態へと遷移する際に X 線輝線を放射する。図 1.2 には、水色でそれぞれの粒子のポテンシャルが描かれており、2 つの粒子が接近することで中性粒子の基底状態が多価イオンの励起状態とそろい、電子が移動する様子が描かれている。

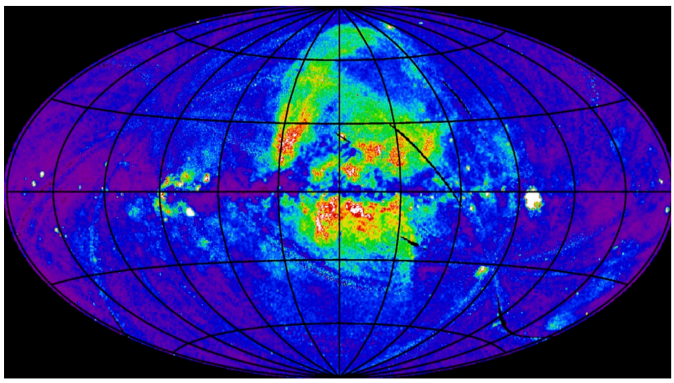

図 1.1: ROSAT 衛星による 3/4[keV] の軟 X 線背景放射の全天探査.

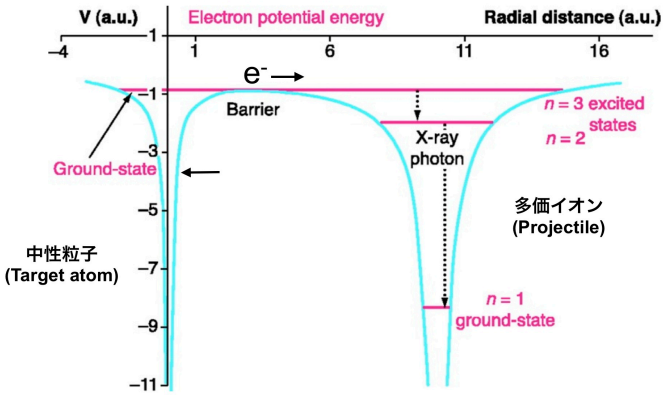

図 1.2: 電荷交換反応からの X 線放射の機構.

1.1.2　観測例

宇宙では実際に、太陽風に主に含まれている炭素、窒素、酸素の高電離イオンによる電荷交換反応が起きており、その観測が行われている。太陽風は、低速で 300-400km/s、高速で 700-800km/s で飛んでくる。そして図 1.3 左は、太陽風が地球の磁気圏にまで入り込んでいる様子を 描いたものである。この地球近傍での電荷交換反応を X 線天文衛星 Suzaku が観測に成功し、その時のスペクトルが図 1.3 右となっており、酸素の多価イオンからの輝線が確認できる。図 1.4 左は、太陽風により彗星周辺が X 線で輝いている様子を X 線天文衛星 Chandra で観測したもので、その時のスペクトルが図 1.4 右であり、炭素や酸素の高電離イオンからの輝線が確認できる。

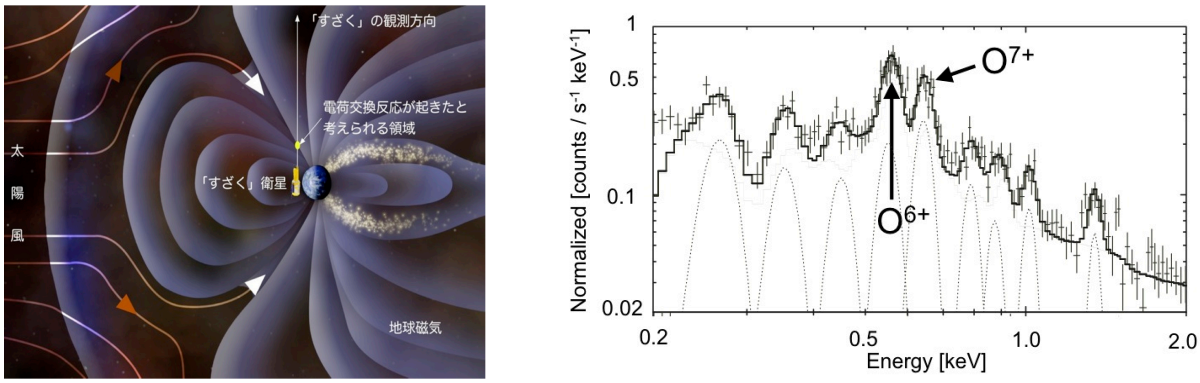

図 1.3: Suzaku 衛星で地球近傍の中性水素との電荷交換反応で説明される X 線の観測 (Fujimoto et al. 2007).

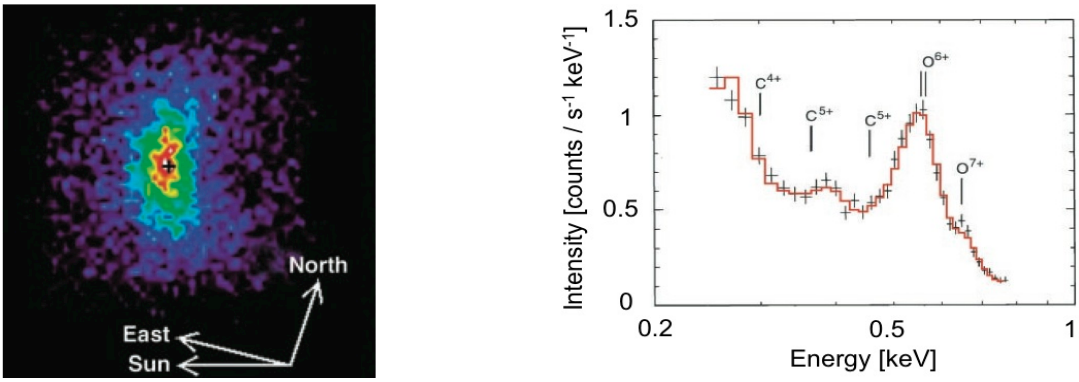

図 1.4: Chandra 衛星で彗星周辺の H_2O との電荷交換反応で説明される X 線の観測.

1.1.3　地上応用実験

本節では、TES(Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータの地上応用実験の概要を紹介する。

目的

電荷交換反応の断面積や X 線スペクトルを測定し、イオンとターゲット元素の衝突エネルギーや、イオンの種類、ターゲット元素による違いを理解すること。

方法

電荷交換反応の実現する ECR 型イオン源、多価イオン衝突装置の開発を首都大学東京原子物理実験研究室が行い、X 線スペクトルの測定に用いる TES カロリメータの動作環境の構築を我々の研究室が行っている。

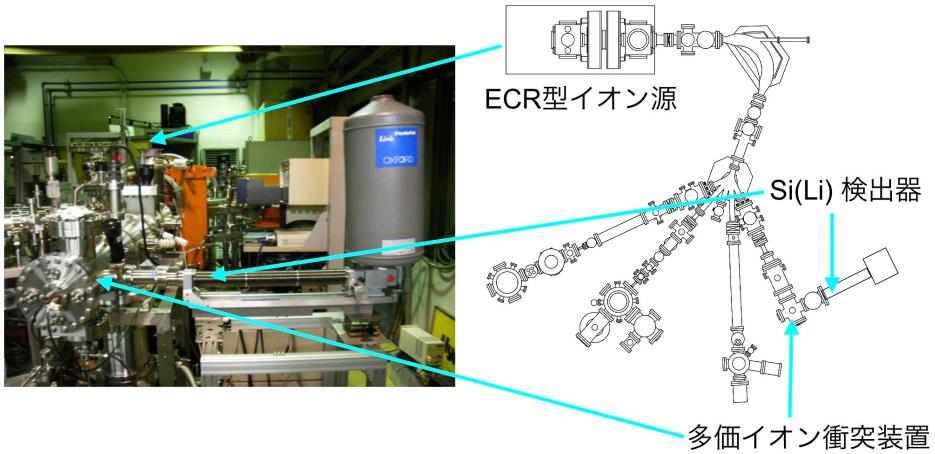

図 1.5: 電荷交換反応を実現する装置 (首都大学東京原子物理実験研究室).

現状

電荷交換反応から X 線の測定を原子物理実験研究室が行っており、その結果を簡単に紹介する。目標は、O^{7+} と H による電荷交換反応を起こすことだが、現時点では O^{7+} と O^{8+} の生成を実現している。図 1.6 は Si(Li) 検出器による予備実験の結果で、O^{8+} と H_2 の電荷交換反応を分光観測した結果である。黒が実測値で、赤は各遷移ごとに fitting した結果になる。図にある FWHM(Full Width at Half Maximum) とはエネルギー分解能の指標で、ここで用いた Si(Li) 検出器は 1.5keV の X 線に対して FWHM が 120 eV である。この結果では、3p と 4p からの輝線が分離できていないが、これを TES カロリメー タで観測した場合、エネルギー分解能の目標値 10eV で仮定すると図の緑のスペクトルが得られる。電荷交換反応は、3p、4p からの輝線強度が強く表れるという特徴があり、その輝線を分離することはとても重要である。

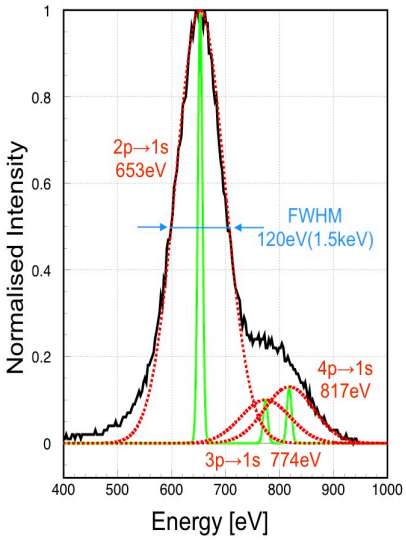

図 1.6: Si(Li) 検出器により観測した電荷交換反応のスペクトル (首都大学東京原子物理実験研究室)

1.2　X 線分光

1.2.1　回折格子

回折格子とは、X 線を波として扱う分光素子で、X 線望遠鏡
と焦点面検出器の間に位置する。回 折格子には多数のスリッ
トがあり、光が当たると非常に多くのスリットによる光の干渉が起こる。 スリットの間隔を d、回折角を θ とすると、回折格子を透過した光の道のりには d sin θ ずつの差が生じる。光の強め合う条件は、波長を λ とすると、$d \sin \theta = m \lambda$ (m = 0,1,2,...) である。回折されな かった 0 次光と回折光とで、焦点の位置は異なってくる。また、回折光は波長が異なることで焦点位置もずれる。この隣り合う焦点を結ぶことで、ローランド円と呼ばれる円ができる。よって、 回折格子と焦点面検出器はこのローランド円上に位置する必要がある。回折格子は低エネルギーほど分解能が良いため、回折光を検知する焦点面検出器 (CCD 等) も低エネルギーで感度の高いものが良い。回折格子の長所は、2 keV 以下の低エネルギーにおいてマイクロカロリメータをも凌ぐほどの分解能を誇ることである。また、技術的に比較的単純で軽量であるため、いろいろな衛星に利用されている。それに対し短所は、基本的に入射してくる X 線は平行光である必要があり、広がった X 線源に対しては高いエネルギー分解能は得られない。

1.2.2　X 線マイクロカロリメータ

マイクロカロリメータとは、極低温 (50 ∼ 100 mK) で動作し、光子 1 個のエネルギーの温度上昇を利用して分光する検出器である。ガス検出器や半導体検出器は電離によって作られた電子群を 測っていたのに対し、フォノンすなわち熱を測るところが大きな違いである。構成としては、X 線吸収体、温度計、熱浴から成る。X 線が吸収体に吸収されると、温度がわずかに上昇し、元の温度に戻る。この間の温度変化が X 線のエネルギーを反映しており、これをパルスとして取り出す ことで X 線光子 1 個の信号となる。この温度変化をどれだけ正確に測定できるかで、エネルギー 分解能が決まる。マイクロカロリメータには、半導体カロリメータや TES 型 X 線マイクロカロリ メータ (TES カロリメータ) がある。半導体カロリメータは、低温動作のサーミスタの温度変化を 測る検出器である。サーミスタは、半導体中に大量 ($\sim 10^{20}\mathrm{cm}^{-3}$) の不純物をドープしたものである。2014 年に打ち上げを計画している ASTRO-H 衛星では、50 mK で動作し FWHM 6 keV の X 線に対して 5 eV 程度の分解能が実現される。この分解能により、電子を 2 個残すまでに電離した鉄からの K 輝線のスペクトルが、共鳴線や禁制線等いくつかの輝線からなることがはっきりと分離される。TES カロリメータは、超伝導体が常伝導に遷移する際の急激な抵抗変化を温度計として利用するものである。半導体サーミスタに比べ抵抗変化が急激であるため、分解能に優れ、明るい X 線源も観測することが出来る。マイクロカロリメータの長所は、100 %に近い検出効率と FWHM ∼ 10eV の分解能を実現し、広がった X 線源 (銀河団、超新星残骸など) が観測可能となる。それに対し短所は、宇宙空間で極低温を実現する冷凍機が必要とされることである。また、半導体サーミ スタ及び TES カロリメータには避けられない原理的な雑音がある。

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、高分光性能、高量子効率の TES 型 X 線マイクロカロリメータ (TES カロリメータ) の動作環境の構築であり、更にこの研究を元に地上で太陽風による CX 機構の解明を目指す。この地上応用実験では、CX による輝線 (2p→1s, 3p→1s など) を分離し、反応の断面積、太陽風速度 (300 - 800 km/s) との相関等を明らかにすることを目指している。CX は、本学の原子物理実験研究室で、O^{q+} 等を安定して生成可能な ECR 型イオン源と多価イオン衝突装置を用いて実現される。特に減速装置を導入して, 太陽風と同等の速度を実現する予定である。

第2章　断熱消磁冷凍機とTESカロリメータの原理

我々は地上応用実験に向け、TES(Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータ、及び 2 段式断熱消磁冷凍機 −dADR(double Adiabatic Demagnetization Rerigerator) を用いる。本章では、それぞれの基本原理を示す。

2.1　1段式断熱消磁冷凍機の冷却原理

断熱消磁冷却とは、冷媒である常磁性体のエントロピーを磁場を用いて変化させ、極低温を生成する冷却法である。ADR の主な特徴の 1 つは、磁場を用いて冷却を行うため、無重力空間において冷却可能なことである。2 つ目は、冷媒 (個体) 自信の温度を制御することが可能であるため、ヒーターを使用した温度制御を行う希釈冷凍機に対し、より正確な温度制御が可能となる。

2.1.1　理想常磁性体の基本的性質

まず、冷媒である常磁性体の基本的性質、特に磁気モーメント、エントロピーについて示す。ここでは特殊なバンド模型を考える強磁性体は除き、局在スピンをもつ金属や化合物に限定して議論する。これは 3d 殻が不完全殻となり、不対電子をもつ遷移金属元素、4f 殻に不対電子をもつ希土類元素が代表的である。

$$\mu = -g_j \mu_{\mathrm{B}} J \tag{2.1}$$

熱平衡状態にあるスピン系の磁気モーメント M(T, B) は、個々の原子の磁気モーメント μ_i の熱的な平均量を $\langle \mu_i \rangle$ とし、原子数を N とすると、次式のようになる。

$$M = N\langle \mu \rangle = N g \mu_{\mathrm{B}} \langle J \rangle \tag{2.2}$$

外部磁場がない場合 M = 0 だが、外部磁場がある場合は次式のようになる。

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

ここで、$x = g\mu_{\mathrm{B}} J B / k_{\mathrm{B}} T$ と置くと、次式のようになる。

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

2.4 式の対数内は更に次式に変形出来る。

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

よって、磁気モーメントは以下のように求まる。

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

磁気モーメントと相互作用を行うのは磁場であるが、これは注目するある局在スピンとその周囲のスピンにより生成される内部磁場 b との相互作用と考えることもできる。

次にスピン系のエントロピーを求める。熱力学的マックスウェル方程式より、磁気モーメントを用いてエントロピーは次式で表せる。

$$S(T,B)=S_0+\int_0^B\frac{\partial M}{\partial T}\,dB \tag{2.7}$$

ここで、 2.7 式で求めた $M(T,B)$ の括弧内は、

$$-\left(\frac{2J+1}{2J}\right)^2\frac{x}{\sinh^2\left(\frac{2J+1}{2J}x\right)}\frac{1}{T}+\left(\frac{1}{2J}\right)^2\frac{x}{\sinh^2\left(\frac{1}{2J}x\right)}\frac{1}{T} \tag{2.8}$$

と変形できるので、エントロピーは次式のようになる。

$$S(T,B)=\int_0^B\frac{\partial M}{\partial T}\,dB=Nk_{\mathrm{B}}\left[-\frac{2J+1}{2J}x\coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right)+\frac{1}{2J}x\coth\left(\frac{1}{2J}x\right)\right.$$
$$\left.+\ln\left(\frac{\sinh(\frac{2J+1}{2J}x)}{\sinh(\frac{1}{2J}x)}\right)\right] \tag{2.9}$$

常磁性体が磁化した場合、すなわち高温側の極限でのエントロピーは、$x\ll 1$ と近似すると、次式のように求まる。

$$S=Nk_{\mathrm{B}}\ln(2J+1) \tag{2.10}$$

ここで、k_{B} はボルツマン定数である。また、低温側の極限でのエントロピーは、$x\gg 1$ と近似すると、S=0 となる。

別解として、統計力学よりエントロピーを求めてみる。エントロピーは、

$$S=Nk_{\mathrm{B}}\ln W \tag{2.11}$$

と表せるので、常磁性体が磁化した場合、すなわち高温側の極限では、常磁性体内部で準位の分裂が起こり、$W=2J+1$ となるためエントロピーは 2.11 式となる。また、低温側の極限では W=1 より、$S=0$ となる。

ここで、x≪1 の場合、 2.6 式を x で展開して 1 次の項だけをとると、

$$M(T,B) = \frac{CB}{\mu_0 T} \qquad C = \frac{N\mu_0 g^2 \mu_{\mathrm{B}}^2 J(J+1)}{3k_{\mathrm{B}}} \tag{2.12}$$

ここで M/H はキュリー温度を指し、C はキュリー定数である。同様にエントロピーは、x≪1 で $T \sim \infty$ の時に 2.11 式と等しくなるので、

$$S(T,B) = Nk_{\mathrm{B}} \ln(2J+1) - \frac{CB^2}{2\mu_0 T^2} \tag{2.13}$$

となる。

2.1.2　断熱消磁冷却の原理

始めに、求めたエントロピーの式から、断熱消磁冷却の原理を示す。T_1K で等温な状態で、磁性体を磁化すると、 2.13 より、

$$\delta S(T,B_1) = S(T,0) - S(T,B_1) = \frac{CB_1^2}{2\mu_0 T^2} \tag{2.14}$$

となる。この時、エントロピーの変化に伴い、磁性体は δS の磁化熱を発生する。これは外磁場の行った仕事と考えられる。次に磁場を $B_2(B_2 < B_1)$ へ断熱的に消磁させる。ここで、外部から磁性体へ侵入する熱量を δS とすると、エントロピーは $\delta S = \frac{\delta Q}{T}$ と表されるので、断熱状態ではエントロピーは変化しない。よって、 2.14 式より、

$$\frac{CB_1^2}{2\mu_0 T_1^2} = \frac{CB_2^2}{2\mu_0 T_2^2} \tag{2.15}$$

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

次に、磁性体のスピンを用いて、より詳細な断熱消磁冷却の手順を示す。図 2.1 中にある 2 本の曲線は、磁性体にかかる磁場が B_L 及び $B_H(B_L < B_H)$ の場合のエントロピーと温度の関係を表しており、赤で囲った部分は、カルノーサイクルとなる。

励磁前 (状態 1)

液体ヘリウム予冷により、磁性体が T_H まで冷えているとする。この時、磁性体は断熱状態で、そのスピンはバラバラである (エントロピー：大)。

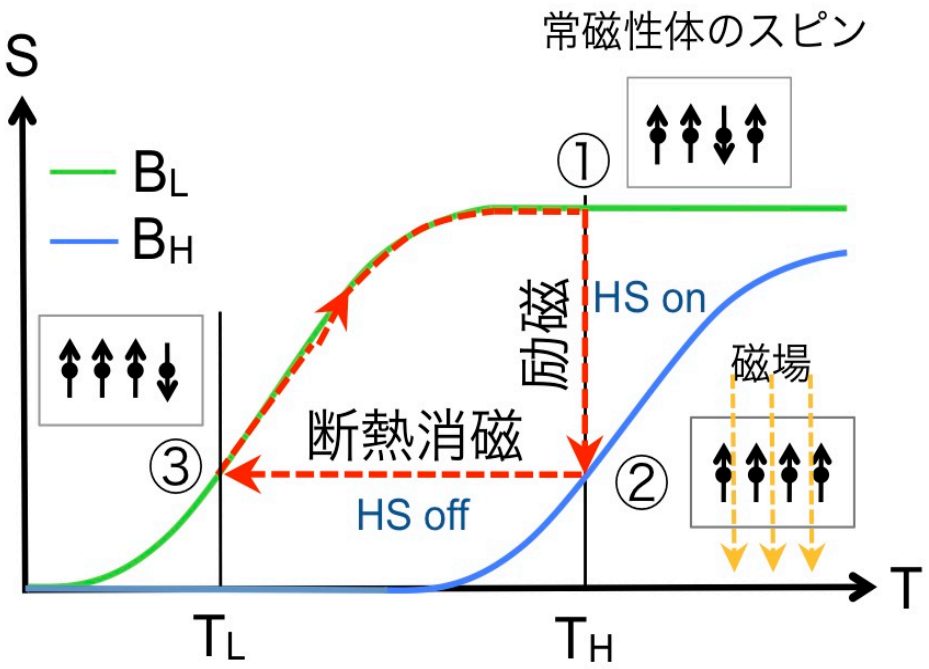

図 2.1: 常磁性体のエントロピーと温度の関係

等温励磁 (状態 1 → 状態 2)

磁性体と熱浴である液体ヘリウムタンクとを熱的に繋げる HS(Heat Switch) を On にし、磁性体を液体ヘリウムタンクと熱平衡状態にする。そして、徐々に磁場を加える (励磁)。これにより磁性体のスピンが揃い、エントロピーが減少する。この時、磁性体の温度は T_H のまま等温変化し、B_L の曲線から B_H の曲線へ状態が移る。

断熱消磁 (状態 2→ 状態 3)

HS を Off にすることで磁性体を液体ヘリウムタンクと断熱状態にし、磁場を徐々に弱めていく (消磁)。磁性体は断熱状態にあるため、エントロピーは変化しない。よって、 2.15 式からも分かるように、

$$\frac{B_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} = \frac{B_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}} \tag{2.16}$$

の式が成り立つので、再び B_H の曲線から B_L の曲線に状態が移る。ここで最低温度に到達する。

消磁後 (状態 3→ 状態 1)

HS は OFF の状態だが、外部からの侵入熱により、温度上昇する。そして、状態 1 へと戻る。

2.1.3　温度制御

最低温度に到達した後の磁性体は、支持材料や輻射熱などにより徐々にその温度を上昇させ、最終的には熱浴である液体ヘリウムの温度に達する。この上昇速度は磁性体の比熱と流入熱との関係による。

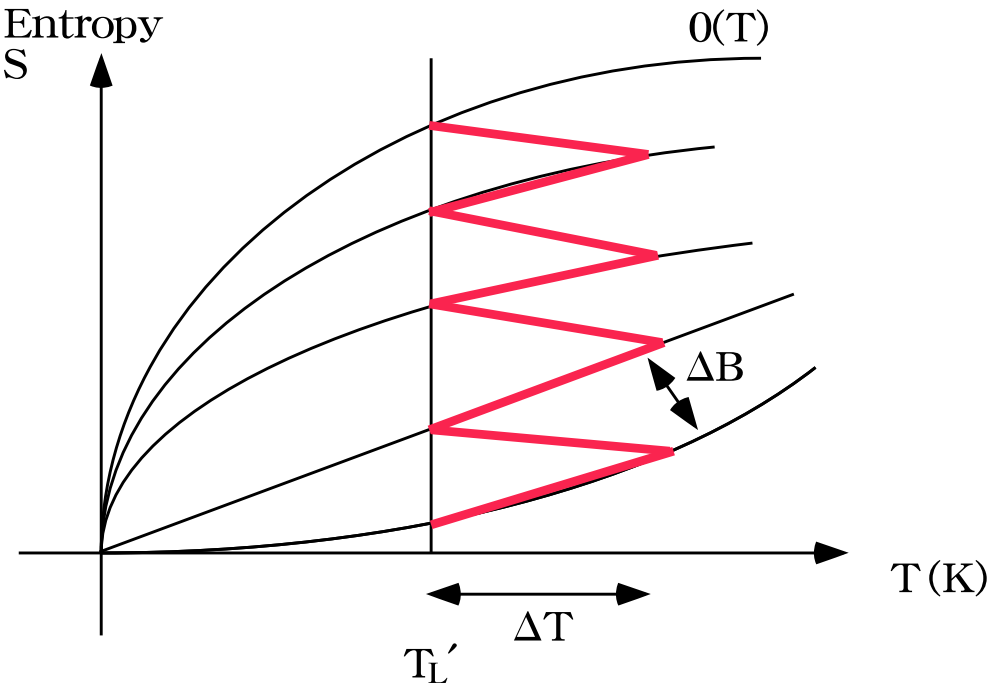

図 2.2: 温度制御の原理

磁性体は、比熱よりかなりの流入熱に耐えることができる。しかし実験上温度の安定性を保つことは冷凍機の第 1 条件であり、最低温度に到達してから徐々に温度が変化していくのは多くの場合好ましくない。よって、実際の実験を行う時には磁場を残して温度制御を行う。

図 2.2 に温度制御の概念図を示す。T_L'K を設定温度とした場合、断熱消磁後の温度は等磁場曲線上に上昇していく。ここで外部磁場をわずかに下げて元の T_L'K に戻す。温度の上昇に合わせてこれを繰り返す。この時の温度揺らぎは δT となる。

温度 T_0 における磁場 B_0 の状態があり、この断熱消磁での最低温度が T_L であったとする。最低到達温度とは断熱消磁の際に完全に磁場がなくなった場合で、エントロピー変化がないものとする。この場合、単位時間当りの磁場 ΔB は単純計算で、

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

となる。この時必要とされる磁場制御については、例えば、最低到達温度が 50mK、制御温度が 100mK、100mK 時の磁場が 0.2T とすると、4mT = 40G の制御が必要になる。

2.2　2 段式断熱消磁冷凍機の冷却原理

前章では 1 段式での冷却原理について説明したが、2 段式も 1 段式と基本的な冷却原理は同じである。1 段式と大きく異なる点は、2 段式になることで磁性体、HS、超伝導マグネットコイルが 2 つずつになることで、これにより構造及び冷却方法が 1 段式に比べ複雑になる。ここでは、HS の種類を問わず、典型的な 2 段式での冷却方法を記す。2 段式の構造の概略図は 図 2.3 のようになり、冷却方法は以下の手順となる。また、冷却手順の 1 例を 図 2.4 に示す。

1. 1-st HS を ON、2-st HS を OFF の状態で、高温ステージを励磁。
2. 高温ステージが LHe tank と同じ温度まで下がったら 1-st HS を OFF にし、高温ステージの消磁開始後、2-st HS を ON。
3. 高温ステージの消磁終了後、低温ステージの励磁開始。
4. 両ステージが同じ温度になったら、2-st HS を OFF にし、低温ステージの消磁開始。
5. 低温ステージの消磁終了後、最低温度に到達。

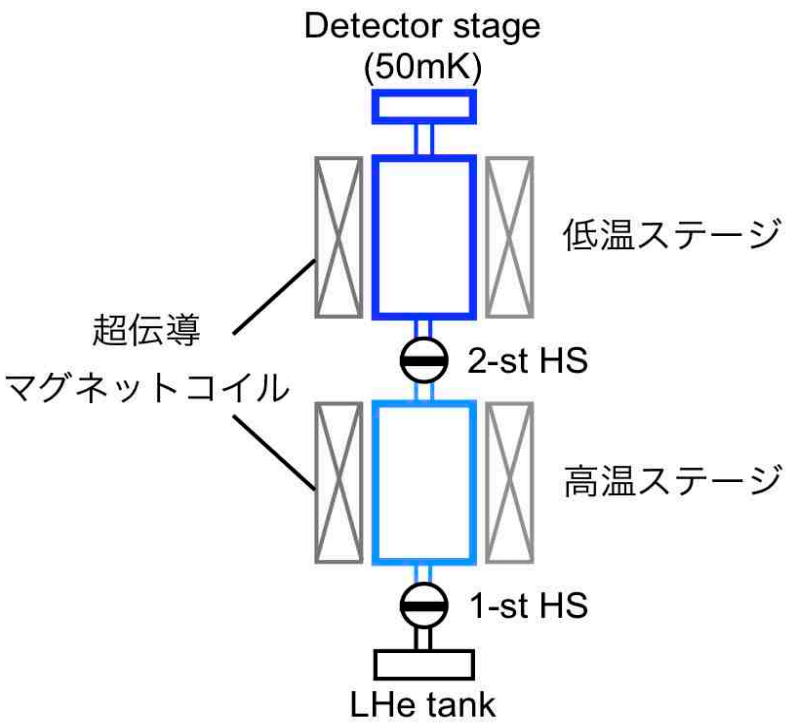

図 2.3: 2 段式 ADR の構造の概略図

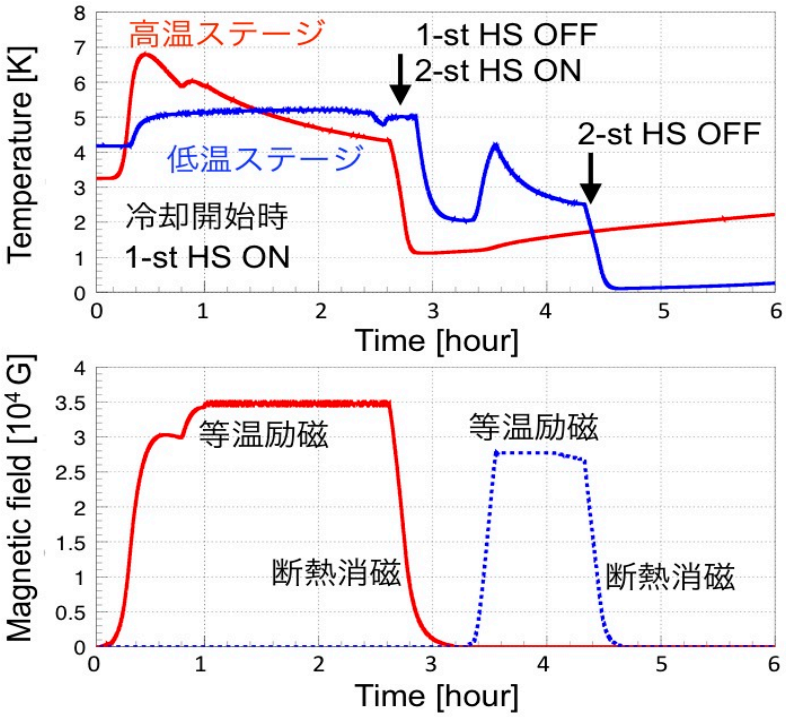

図 2.4: 2 段式 ADR の冷却サイクルの例. 赤: 高温ステージの温度と磁場強度, 青: 低温ステージの温度と磁場強度.

2.3 TES カロリメータの動作原理

2.3.1 X 線マイクロカロリメータの概要

X 線マイクロカロリメータとは、素子に X 線が入射する際の温度変化を利用して分光する検出器である。主な構成は、吸収体、素子、熱浴である。入射した X 線のエネルギーを E、吸収体の熱容量を C とした時の素子の温度変化 ΔT は、

$$\Delta T = \frac{E}{C} \tag{2.17}$$

と表せる。素子と熱浴は熱伝導度 G で繋がれており、X 線が吸収体に吸収されると、温度がわずかに上昇した後、元の温度に戻る。この変化は次式のようになる。

$$C\frac{d\Delta T}{dt} = -G\Delta T \tag{2.18}$$

よって素子の温度上昇は時定数

$$\tau = \frac{C}{G} \tag{2.19}$$

に従って指数関数的に減衰していく。

X 線マイクロカロリメータのエネルギー分解能は素子の熱揺らぎによって制限される。素子中のフォノン数は $N \sim CT/k_BT = Ck_B$ と書けるので、素子の熱揺らぎは、

$$\Delta U \sim \sqrt{N}k_BT = \sqrt{k_BT^2C} \tag{2.20}$$

となる。より一般的には、カロリメータの動作条件や素子の感度 α 等に依存する $\xi \propto \sqrt{1/\alpha}$ を用いると、エネルギー分解能は以下のように表される。

$$\Delta E_{\mathrm{FWHM}} = 2.35\xi\sqrt{k_B T^2 C} \tag{2.21}$$

この式から分かるように、エネルギー分解能は、熱容量の温度依存性を考慮すると温度に大きく依存し、極低温で非常に高い分解能を得ることができる。

2.3.2　TES 型 X 線マイクロカロリメータの概要

TES カロリメータとは、TES に X 線が入射する際の、超伝導遷移における急激な抵抗変化を利用して TES の温度上昇を計る検出器のことである。超伝導遷移は、典型的には 数 mK という非常に狭い温度範囲で起こるため、とても高い TES 温度計の感度を実現することができる。図 2.5 には TES の温度 T と抵抗 R の関係が描かれており、TES カロリメータは超伝導遷移端を動作点としている。温度計感度 α は、超伝導遷移端の傾きで定義され、図 2.5 のようになる。

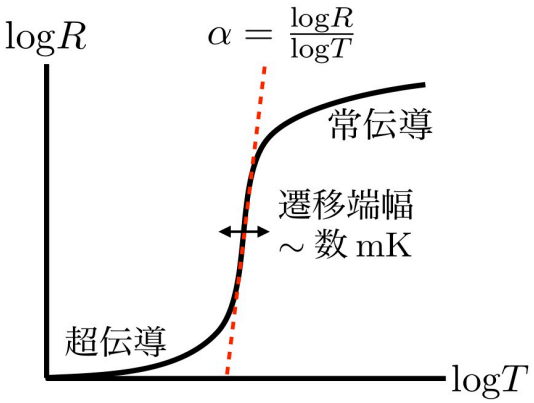

図 2.5: TES の $R-T$ 曲線

よって、TES カロリメータの動作温度は TES が超伝導遷移する温度範囲に保つ必要がある。そのため、動作温度は遷移温度により決まってしまうが、TES の遷移温度は、TES を二層薄膜で形成することで生じる近接効果を利用して制御することが可能である。

TES は二層薄膜で形成することにより、その超伝導遷移の特性に磁場が大きく影響するという性質を持っている。ここでは、TES の性能評価方法と、Ishisaki et al. 2007 の内容を元に磁場による性能への影響について簡単に記す。TES カロリメータの性能評価を行うに当たり、始めに TES の温度と抵抗の関係 (R-T 特性) を測定し、TES の遷移温度 T_c、遷移幅、遷移の様子から TES カロリメータが動作可能か確認する必要がある。TES に磁場を加えた際の、抵抗 R と温度 T の関係は、図 2.6 になる。ここで、TES に対し垂直な方向の磁場強度を $B_\perp$、TES に流す電流値を I_B とする。$B_\perp = 0$、0.06、0.26G の場合での $R-T$ 測定を行っており、磁場の影響により遷移端幅が広がり、温度計感度は $B_\perp = 0$G で $\alpha \simeq 350$、$B_\perp = 0.26$G で $\alpha \simeq 150$ と下がっている。

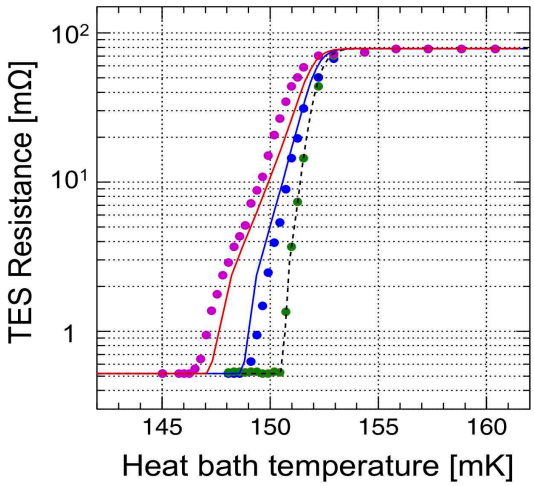

図 2.6: TES(ID:SII14b) の $R-T$ 特性の磁場依存性 (5). 緑: $B_\perp = 0$ [G], 青: $B_\perp = 0.06$ [G], 赤: $B_\perp = 0.26$ [G].

次に、TES に Mn-Kα の X 線 (5.9keV) を照射して、エネルギー分解能に対する磁場の影響を測定した結果が 図 2.7 になる。$B_\perp = 0$、2、3G それぞれの場合で FWHM $= 9.8 \pm 0.2$eV、FWHM $= 12.5 \pm 0.2$eV、FWHM $= 24.8 \pm 0.6$eV となっている。

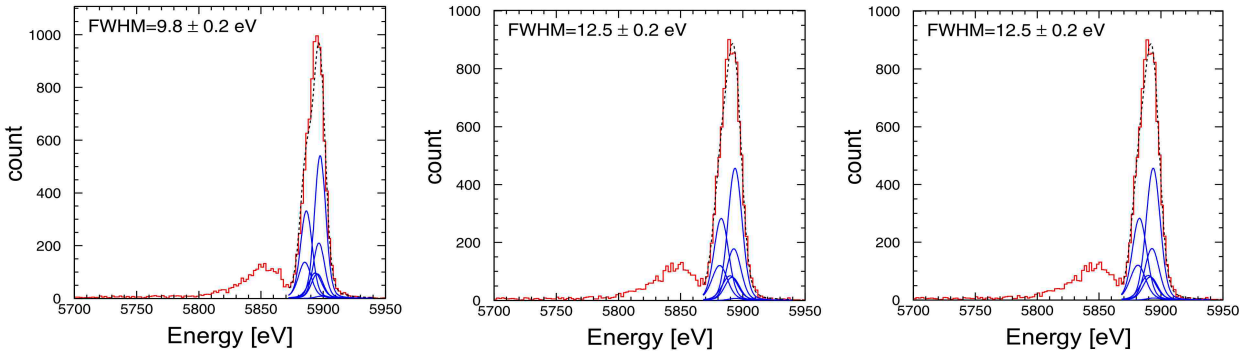

図 2.7: TES(ID:SII182) のエネルギー分解能 (FWHM) の磁場依存性 (Ishisaki et al. 2007). 左: $B_\perp = 0$[G], 中: $B_\perp = 2$ [G], 右: $B_\perp = 3$[G].

以上より、この測定結果から分かることは、

1. TES は垂直な方向からの磁場に敏感。
2. 素子によるが、測定した素子の場合、3[G] までは X 線検出が可能。

と言える。

2.3.3 TES と SQUID の回路

TES と SQUID の回路は、図 2.8 のようになる。TES カロリメータは、TES に並列に Shunt 抵抗 R_{sh} を接続することにより実現する擬似的な定電圧バイアスで動作させる。定電圧下で電流を流すことで、 X 線が入射すると TES が温度上昇し抵抗値も急に上昇するが、発熱量は下がるので TES の

動作点を狭い遷移端中に保つことができる。この作用を電熱フィードバック (ETF: Electron-thermal feedback) と呼んでいる。本節では、擬似的定電圧を実現する回路、電熱フィードバックについて記す。

図 2.8 の I_{bias} は、以下のように表される。

$$I_{bias} = \frac{V_{\mathrm{bias}}}{R_{\mathrm{bias}} + \frac{R_{\mathrm{sh}}R}{R_{\mathrm{sh}}+R}} \sim \frac{V_{\mathrm{bias}}}{R_{\mathrm{bias}}} \tag{2.22}$$

この式から、$R_{bias} \gg R$ かつ $R_{bias} \gg R_{sh}$ の時、I_{bias} は R に依存しないことが分かる。図 2.8 を定電流源の回路とすると、図 **??** の左のようになり、この回路を Thevenin の定理を用いて等価回路を考えると、$V_{bias} = I_{bias}R_{sh}$、$R_L = R_{sh}$ となる。$R_{bias} \gg R$ かつ $R_{bias} \gg R_{sh}$ の時、この回路は定電圧となる。

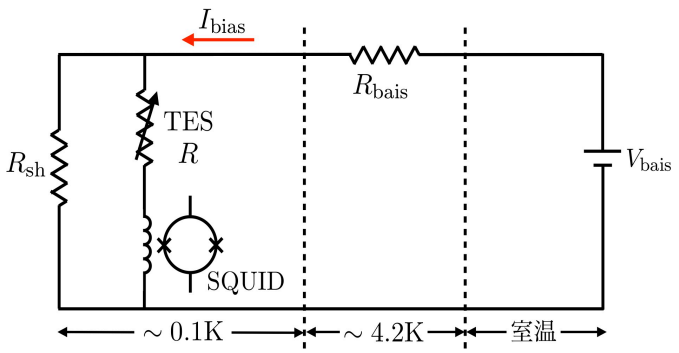

図 2.8:

この回路系から TES の熱伝導方程式、及び回路方程式を以下に記す。ただし、TES の温度を T、TES に流れる電流を I、TES の抵抗は温度と電流に依存するため $R(T, I)$、TES と吸収体の熱容量を C、TES から熱浴へ流れる熱量を $-P_{\mathrm{bath}}$、Joule 発熱によるエネルギー損失を P_{J}、外部入力によるパワーを P_{out}、SQUID の入力インダクタンスを L、図 **??** の右図のバイアス電圧を V_{sh} とそれぞれ定義する。また、TES カロリメータの動作実験では定常状態において外部からの熱入力は無視出来るため、$P_{\mathrm{out}} = 0$ としている。

$$C\frac{dT}{dt} = -P_{\mathrm{bath}} + P_{\mathrm{J}} + P_{\mathrm{out}} \tag{2.23}$$

$$L\frac{dI}{dt} = V_{sh} - IR_L - IR(T, I) \tag{2.24}$$

まず、定常状態を考える。この時、式 2.23、2.24 はそれぞれ以下のように変形できる。ただし、添字が 0 の変数は定常状態の値を表す。

$$P_{bath0} = P_{J_0} = R_0 I_0^2 \tag{2.25}$$

$$V_{sh} = I_0 R_L + I_0 R_0(T_0, I_0) \tag{2.26}$$

次に、定常状態からの TES の温度変化を δT、電流変化を δI に対する抵抗変化の一次近似式は、以下のように表せる。ただし、$\delta I = I - I_0$ と定義する。

$$R(T, I) \sim R_0 + \left.\frac{\partial R}{\partial T}\right|_{\mathrm{I}_0} \delta T + \left.\frac{\partial R}{\partial I}\right|_{T_0} \delta I \tag{2.27}$$

ここで、抵抗の温度、電流に対する無次元量の対数感度をそれぞれ、

$$\alpha = \frac{\partial \log R}{\partial \log T}\Big|_{\mathrm{I_0}} = \frac{T_0}{R_0}\frac{\partial R}{\partial T}\Big|_{\mathrm{I_0}} \tag{2.28}$$

$$\beta = \frac{\partial \log R}{\partial \log I}\Big|_{T_0} = \frac{I_0}{R_0}\frac{\partial R}{\partial I}\Big|_{T_0} \tag{2.29}$$

と定義すると、式 2.27 は以下のようになる。

$$R(T,I) \sim R_0 + \alpha_I \frac{R_0}{T_0}\delta T + \beta \frac{R_0}{I_0}\delta I \tag{2.30}$$

今、温度一定を仮定すると、電流の微小変化に対する電圧は以下のようになる。ただし、常識の右辺第二項を無視して一次近似を行うと、

$$V = V_0 + \delta V = R(T,I)I = \Big(R_0 + \beta_I \frac{R_0}{I_0}\delta I\Big)(I_0 + \delta I) = R_0 I_0 + (R_0 + \beta_I R_0)\delta I + o(\delta I^2) \tag{2.31}$$

よって、微分抵抗は、

$$R_{\mathrm{dyn}} = \frac{\partial V}{\partial I}\Big|_{T_0} = R_0(1+\beta_I) \tag{2.32}$$

となる。また、熱浴へ流れる熱量は、

$$P_{\mathrm{bath}} \sim P_{\mathrm{bath0}} + G\delta T \tag{2.33}$$

と表される。Joule 発熱によるエネルギー損失も一次近似より、

$$\begin{aligned} P_J &= I^2 R(T,I) \sim (I_0 + \delta I)^2 \Big(R_0 + \alpha_I \frac{R_0}{T_0}\delta T + \beta_I \frac{R_0}{I_0}\delta I\Big) \\ &= P_{\mathrm{J_0}} + 2I_0 R_0 \delta I + \alpha_I \frac{P_{\mathrm{J_0}}}{T_0}\delta T + \beta_I \frac{P_{\mathrm{J_0}}}{\mathrm{I_0}}\delta I + o(\delta T^2 + \delta T \delta I + \delta I^2) \end{aligned} \tag{2.34}$$

以上より、TES の δT、δI の微小変化に対して、式 2.23、2.24 はそれぞれ次のようになる。

$$C\frac{d\delta T}{dt} = \Big(\delta\alpha_I \frac{R_0 I_0^2}{T_0} - G\Big) + (2I_0 R_0 + \beta_I R_0 I_0)\delta I + \delta P_{\mathrm{out}} \tag{2.35}$$

$$L\frac{d\delta I}{dt} = -[R_L + R_0(1+\beta_I)]\delta I - \alpha_I \frac{R_0 I_0}{T_0}\delta T \tag{2.36}$$

ここで、$R_L = 0$、$L = 0$ とし、完全な定電圧の回路を考える。A=δT とし、上の 2 つの式を Laplace 変換すると、

$$\mathcal{L}[A] \equiv \int_0^\infty A(t)e^{-st}dt$$

$$\mathcal{L}[A'] = s\mathcal{L}[A] - A(0)$$

より、

$$Cs\mathcal{L}[\delta T] = \Big(\alpha_I \frac{R_0 I_0^2}{T_0} - G\Big)\mathcal{L}[\delta T] + (2I_0 R_0 + \beta_I R_0 I_0)\mathcal{L}[\delta I] + \mathcal{L}[\delta P_{\mathrm{out}}] \tag{2.37}$$

$$0 = -R_0(1+\beta_I)\mathcal{L}[\delta I] - \alpha_I \frac{R_0 I_0}{T_0}\mathcal{L}[\delta T] \tag{2.38}$$

となる。式 2.38 より、

$$\mathcal{L}[\delta I] = \frac{-\alpha I_0 \mathcal{L}[\delta T]}{(1+\beta_2)T_0} \tag{2.39}$$

と変形し、式 2.37 に代入すると、

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= \frac{1}{Cs} + G + \frac{\alpha_I P_{J_0}}{(1+\beta_I)T_0}\mathcal{L}[\delta P_{out}] \\ &= \frac{1}{G\Big(1+\frac{\alpha_I P_{J_0}}{(1+\beta_I)T_0 G}\Big)\Big(1+\tau s\Big)}\end{aligned} \tag{2.40}$$

$$\tau \equiv \frac{C}{G}\frac{1}{1+\frac{\alpha_I P_{J_0}}{(1+\beta_I)T_0 G}} \tag{2.41}$$

となる。ただし、時定数 τ を以下のように表される。よって、逆ラプラス変換をすると、以下のように減衰する指数関数が解として求まることが分かる。ただし、u(t) はヘヴィサイドの階段関数である。

$$\delta T = \frac{1}{B\tau} e^{-\frac{1}{\tau}t} u(t)\delta P_{\mathrm{out}} \tag{2.42}$$

ここで、フィードバック回路は 図 2.9 のように表され、G_1、G_2 は伝達関数である。よって、この系

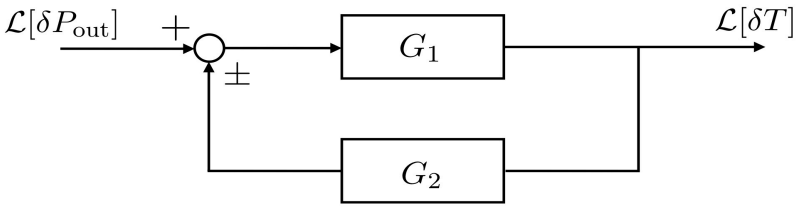

図 2.9: 1 次元系フィードバック

全体の伝達関数は、

$$\mathcal{L}[\delta T] = G_1(\mathcal{L}[\delta P_{\mathrm{out}}] \pm G_2 \mathcal{L}[\delta T]\mathcal{L}[\delta P_{\mathrm{out}}]) \tag{2.43}$$

$$\frac{\mathcal{L}[\delta T]}{\mathcal{L}[\delta P_{\mathrm{out}}]} = \frac{G_1}{1 \mp G_1 G_2} \tag{2.44}$$

と変形できる。この式より、フィードバックがネガティブに働いていることが分かり、実際に TES カロリメータの動作時は TES の発熱量を減らす方向に働く。フィードバックがない場合、熱容量 C の物体が熱伝導度 G の熱リンクで熱浴に繋がれている系を考えれば良いので、

$$G_1(s) = \frac{1}{Cs+G} = \frac{1/G}{\tau s + 1} \tag{2.45}$$

と表される。よって、式 2.40 と 2.44 を比較して、

$$G_2(s) = \frac{\alpha_I P_{J_0}}{(1+\beta_I)T_0} \tag{2.46}$$

と求まる。

2.4 SQUID の原理

SQUID(Superconducting QUantum Interference Device) とはジョセフソン効果を利用した素子で、特に 2 つのジョセフソン接合から成る超伝導リングを持つ素子を dc-SQUID という。ジョセフソン接合とは、薄い常伝導体や絶縁体を 2 つの超伝導体で挟んだ弱結合部のことである。この接合部の厚みは非常に薄いため、常伝導/絶縁体を介して超伝導電流が流れる。主な特徴は、低インピーダンスで、低ノイズ、また、極低温で動作可能という特徴をもった電流計であり、高いエネルギー分解能を実現する TES カロリメータに最適である。また、磁場の影響を大きく受ける特徴を持っている。本節では、dc-SQUID の原理について説明する。

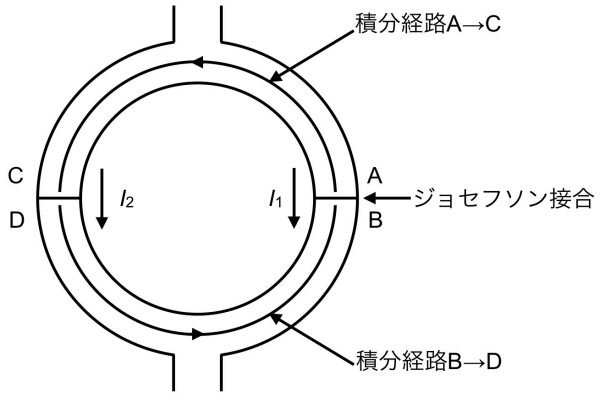

図 2.10: dc-SQUID の構造.

dc-SQUID は、動作時において 図 2.10 にある 2 つのジョセフソン接合をもつ超伝導リングに、上下に電流を流す。ジョセフソン接合は，接合の上下間に臨界値以下の電流を流すとその電流値に応じた位相差 θ が接合の上下に生じるという特徴がある (直流ジョセフソン効果)。ここで、臨界電流 T_{c} 以上の電流を流すと、電流は超伝導電流とある電圧降下を伴って流れる常伝導電流の和で表される。常伝導電流が増加すれば電圧降下も増加することから、接合部の上下の電位差は超伝導電流の量に依存する。2 つの接合が等価であるとすると、超伝導電流はそれぞれの接合部で以下のように表される。ただし、A、B、C、D は 図 2.10 中に対応する点での位相を表す。

$$I_1 = I_0 sin(\mathrm{B} - \mathrm{A}) \tag{2.47}$$

$$I_2 = I_0 sin(\mathrm{D} - \mathrm{C}) \tag{2.48}$$

よって、超伝導リングを上から下まで流れる電流は、

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 \\ &= I_0\{sin(\mathrm{B} - \mathrm{A}) + sin(\mathrm{D} - \mathrm{C})\} \\ &= 2I_0\Big(sin\frac{(B+D)-(A+C)}{2}cos\frac{(B-D)+(C-A)}{2}\Big) \end{aligned} \tag{2.49}$$

となる。更に、電流値が最大となる位相差をとる場合を考えると、

$$I_{\max} = 2I_0\Big(cos\frac{(B-D)+(C-A)}{2}\Big) \tag{2.50}$$

となる。ここで、B−D、A−C 間の位相差はベクトルポテンシャル A を用いて以下のように表される。ただし、Φ_0 は磁束量子である。

$$B - D = \frac{2\pi}{\Phi_0}\int_{D\to B} A d\ell \tag{2.51}$$

$$C - A = \frac{2\pi}{\Phi_0}\int_{A\to C} A d\ell \tag{2.52}$$

よって、超伝導リング上の経路全体を考えると、リングを貫く磁束を Φ として、

$$\begin{aligned} B - D + C - A &= \frac{2\pi}{\Phi_0}\int_{A\to C\to D\to B} A d\ell \\ &= \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} \end{aligned} \tag{2.53}$$

となる。以上より、式 2.50 に 式 2.53 を代入すると、

$$I_{\max} = 2I_0 cos\frac{\pi\Phi}{\Phi_0} \tag{2.54}$$

上式より、超伝導電流は超伝導リングを貫く磁束に対して周期的に変化することが分かる。また、常伝導電流も周期的に変化していることが分かるので、接合部の上下に生じる電位差は磁束に対して周期的に変化することが分かる。ここで、接合部の抵抗を R とおくと電位差は、

$$V = R\cdot\sqrt{I^2 - I_{\max}^2} \tag{2.55}$$

と表される。

第3章　宇宙科学研究所でのdADRの設計/性能

3.1　dADR 開発の経緯

将来の宇宙科学において必要とされる冷却システムは、極低温検出器が最適に動作するために、50−100 mK まで冷却出来る冷却能力 (1−2uW) が必要とされる。例えば、極低温検出器である X 線マイクロカロリメータは 100 mK 以下にまで冷却することで最適な動作、すなわち高いエネルギー分解能を実現できる。ADR(An Adiabatic Demagnetization Refrigerator) は宇宙開発には欠かせない冷凍機であり、以下の特徴を持っている。(1) 冷媒が固体、(2) 無重力下で動作可能、(3) 部品の移動がない。2005 年に打ち上げられた日本の X 線天文衛星すざくには、搭載された X 線マイクロカロリメータの冷却システムとして 1 段式の ADR を採用した。この ADR は宇宙空間において、1.3K から冷却で 60mK の極低温を実現した。しかし、この 1 段式の ADR の欠点は、ADR 本体の大きさがとても大きく、大きな磁場を要することである。この 1 段式 ADR に対して、多段式の ADR も開発されている。ここで多段式とは 2 段以上を指す。多段式 ADR の利点は、小型で数 Tesla の低磁場で冷却が可能で、ADR 本来の極低温 (50−100 mK) に至る高い冷却能力を持ち併せている。欠点としては、1 段式と比べ構成部品が多く、冷却方法が複雑になることである。これら 1 段式及び多段式の問題を踏まえ、開発された冷凍機が 2 段式 ADR(dADR: double Adiabatic Demagnetization Refrigerator) である。1 段式と比べ、小型で構成部品も少なく、低磁場により極低温への冷却が可能である。また 3 段以上の多段式と比べ、冷却方法が複雑でないといった特徴がある。具体的な dADR の利点については、浅野卒論発表の資料に記載されている。ここで、LHe tank 温度が 4.2K で、50mK の保持時間を 5.7 時間と仮定した場合で、必要結晶量、LHe tank への排熱量、低温ステージへの流入熱を見積もった結果が図 3.1 である。2 段式の方が、50mK への侵入熱が、4.2K→50mK でなく、1K→50mK であることから、流入熱が抑えられていることが分かる。また、2 段式の方が圧倒的に結晶量が少ないため、小型となり、1 段式よりケブラーワイヤーも少なくて良いことから流入熱を抑えることができる。2 段式の方が排熱量も少ないことから、LHe tank への熱負荷も軽減できる。以上の結果から、２段式が有効的であることが分かる。

表 3.1: 必要結晶量、LHe tank への排熱量、低温ステージへの流入熱の見積もり

	1 段式	2 段式 (高温ステージ)	2 段式 (低温ステージ)
必要結晶量 [g]	5882(FAA)	600(GGG)	85(CPA)
流入熱 [μW]	15.9	4.6	0.94
排熱量 [J]	367.8	52.4	0.55

3.2　dADR の構造

dADR の主要な構造材料である、超伝導マグネットコイル、ヒートスイッチ、磁性体について記す。1 段式ではそれぞれ 1 つずつであるのに対し、2 段式では 2 つずつとなる。

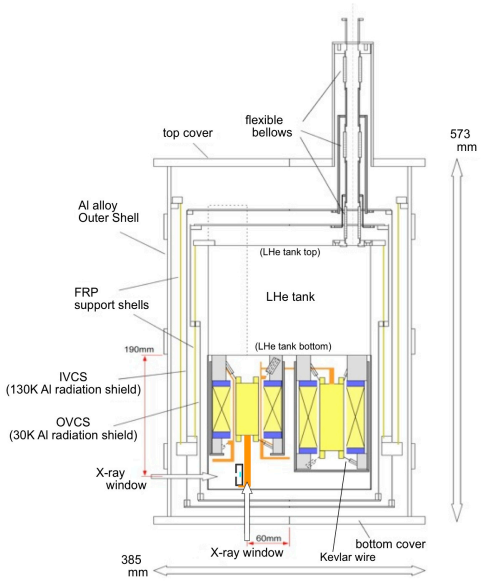

図 3.1: dADR の内部構造

図 3.2: dADR の外観

3.2.1　超伝導マグネットコイル

dADR に導入されている超伝導マグネットコイルは、高温ステージのコイルでは最大電流 8.0[A] (最大磁場 3.5 [T])、低温ステージのコイルでは最大電流 8.5[A] (最大磁場 2.7 [T]) の磁場を生成する。ここで超伝導線を用いる理由は、断熱消磁冷却を行う際のジュール発熱を避けるためである。

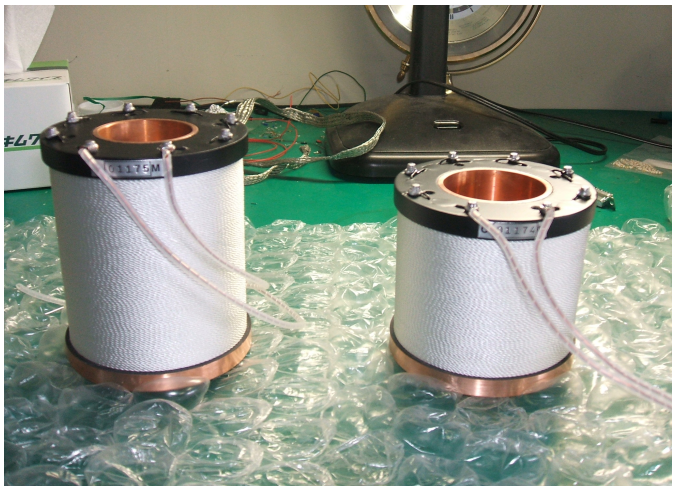

図 3.3: 超伝導マグネットコイル. 左が高温ステージ (最大磁場 4[T]), 右が低温ステージ用 (最大磁場 3[T]).

3.2.2 ヒートスイッチ

dADR では、熱の流れを 2 つのヒートスイッチ (HS:Heat Switch) を用いて制御する。1 つは He tank(熱浴) − GGG 間、もう 1 つは GGG − CPA 間での熱平衡状態及び断熱状態を作り出す。HS にはいくつか種類があるが、ここでは機械式 HS、PGGHS(Passive Gas Gap HS)、AGGHS(Active Gas Gap Heat Switch) について記す。それぞれの機構の詳細について、まず機械式 HS とは、He tank と熱接触させてあるハサミ型の部品があり、GGG から伸びている銅板が挟まれるように設置されている。これが閉じれば ON となって熱接触が起こって熱平衡状態となり、開けば OFF となって断熱状態となる。PGGHS は、ガスの大きな熱伝導を用いた HS である。まず、高温側と低温側をつなぐ密封性の高いカプセルを用意し、熱伝導ガスとそのガスに対し吸着性を持った吸着剤を用意する。吸着剤の吸着性能は温度に依存するのでその性質を利用し、吸着剤がある温度以上になるとガスを脱離しカプセル内を必要な圧力へと上げ熱平衡状態 (ON) となり、ある温度以下になるとガスを吸着しカプセ ル内を高真空にし断熱状態 (OFF) へと切り替える。特に Passive という名前がついている理由は、HS が動作してほしい温度状態時にあわせ吸着剤の温度も変化するように設計し自動的に ON/OFF の切り替えが行われる設計となっているためである。AGGHS とは、PGGHS と同じくガスの大きな熱伝導を用いた HS だが、抵抗などを用いて強制的に吸着剤の温度を制御させ、ON/OFF の切り替えを行う HS である。詳細は辺見修論を参照。

3.2.3 磁性体

dADR では冷媒である磁性体として、GGG(Gallium Gadolinium Garnet)、CPA(CrK ミョウバン) を採用している。ここでは、磁性体は、図 3.4 にあるカプセルに充填されており、超伝導マグネットコイルの中心に設置してある。また、図 3.5 にあるように磁性体はいくつか種類があり、この選択により冷却性能が決まる。ここで、各磁性体の特徴について述べる。図 3.6 は、各磁性体の 0[T] と 2[T] での S-T 曲線である。ADR の 1 ユニット (磁性体、超伝導マグネットコイル、ヒートスイッチ、磁気シールド) を考えた場合、その総重量は超伝導マグネットコイルと磁気シールドがほぼ占めており、それぞれの大きさはコイル中心に設置する磁性体の大きさに依存する。よって磁性体は、系全体の重量や大きさを考えると、単位体積あたりの冷凍能力を十分に考慮する必要がある。これを踏まえて図 3.6 を見ると、50mK 以下では CPA、50−200mK では FAA、200−500mK では MAS という選択となる。500mK を超えると GGG、GLF が圧倒的に有利になる。ただし、磁性体の選択は S-T 曲線からだけでなく、それぞれの結晶の特性や予備冷却系の性能を踏まえた上で考える必要がある。

3.3 熱流入の計算と LHe 保持時間の理論値

流入熱の種類は 2 種類に分けられ、輻射熱と固体伝道熱がある。ここでは、室温 −LHe tank 間、LHe tank−Detevtor stage 間に分けて、それぞれにおける輻射熱と固体伝道熱を求める。ただし、dADR は減圧無しで冷却可能なように設計されており、またそれが長所であるため、本章での熱流入の計算では LHe tank 温度を LHe 温度の 4.2K とする。

図 3.4: 磁性体カプセル

図 3.5: 左から CPA(CrK ミョウバン)・GGG(Gallium Gadolinium Garnet)・FAA(鉄ミョウバン) の結晶.

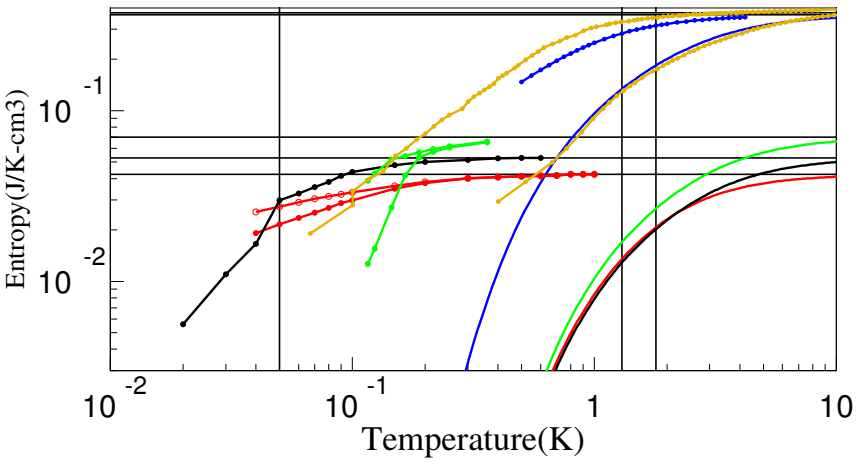

図 3.6: 各磁性体の S-T 線図. 左の線が外磁場 0Tesla で, 右の線が 2Tesla での S-T 曲線となっている. 縦軸は単位体積あたりとしている. 赤：CPA、黒：FAA、緑：MAS、青：GGG、黄：GLF. GGG は, 1 mole=1012.4/3 g で計算. 縦線は, 左から 0.05,1.3,1.8K.

3.3.1 室温から LHe tank までの熱流入

室温 (300K) から LHe tank (4.2K) までの流入熱について求める。輻射熱については多層断熱の役割を担う MLI を挿入することで、抑制している。また、固体伝道熱については、高抵抗、低熱伝導度を持つガラスエポキシによって、少しでも侵入する熱を抑えている。よって、MLI の熱制御効果やガラスエポキシの熱伝導を考慮して、流入熱を求める。また、この流入熱から LHe 保持時間 (LHe が消失するまでの時間) を求める。

輻射熱による熱流入

図 3.1 の各箇所に設置した MLI の枚数を、表 3.2 にまとめた。また、表 3.2 から、室温部から OVCS までは、外側ガラエポ 10 枚と OVCS の全面を足し合わせた枚数となるが、OVCS に巻かれている枚数は平均して 12 枚とし、合わせて 22 枚とした。OVCS から IVCS までは、内側ガラエポ 9 枚と IVCS の全面を足し合わせた枚数となるが、IVCS に巻かれている枚数は平均して 12 枚とし、合わせて 21 枚とした。 まず、高温側と低温側の温度をそれぞれ T_H、T_L とすると、MLI を挿入した場合の T_H

表 3.2: MLI の設置箇所と枚数

外側ガラエポ	10 枚
OVCS 側面	6 枚
OVCS 側面 (リング下)	5 枚
OVCS 上面	20 枚
OVCS 底面	20 枚
内側ガラエポ	9 枚
IVCS 側面上	9 枚
IVCS 側面下	なし
IVCS 側面下 (下半分)	6 枚
IVCS 上面	18 枚
IVCS 底面	18 枚

から T_L への輻射熱 Q[W] は、

$$Q = \frac{\sigma S \varepsilon^2}{(n-1)+2\varepsilon}({T_H}^4 - {T_L}^4) \quad [W] \tag{3.1}$$

MLI を挿入しない場合の T_H から T_L への輻射熱 Q[W] は、

$$Q = \sigma S \varepsilon^2 ({T_H}^4 - {T_L}^4) \quad [W] \tag{3.2}$$

と表せる。ただし、Sm^2 は外側にあたる高温側の容器の全表面積、n は MLI の枚数、ε は高温及び低温側からの放射率、σ は ステファン = ボルツマン定数 である。この式に当てはめて、実際の輻射熱を求める。dADR dewar の内側の全表面積を S、室温部を T_{300K}、OVCS を T_{ovcs}、IVCS を T_{ivcs}、

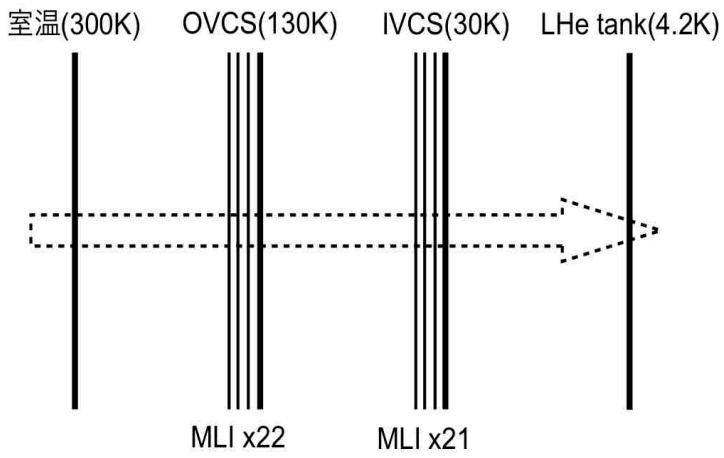

図 3.7: 室温から LHe tank までの輻射熱を抑制する MLI の設置箇所の概略図.

LHe tank を $T_{4.2K}$ とすると輻射熱 Q[W] は、

$$Q_1 = \frac{\sigma S \varepsilon^2}{(22-1)+2\varepsilon}({T_{300\mathrm{K}}}^4 - {T_{\mathrm{ovcs}}}^4) \ \ [W] \ \ (\text{室温} \rightarrow \mathrm{OVCS}) \tag{3.3}$$

$$Q_2 = \frac{\sigma S \varepsilon^2}{(21-1)+2\varepsilon}({T_{\mathrm{ovcs}}}^4 - {T_{\mathrm{ivcs}}}^4) \ \ [W] \ \ (\mathrm{OVCS} \rightarrow \mathrm{IVCS}) \tag{3.4}$$

$$Q_3 = \sigma S \varepsilon^2 ({T_{300\mathrm{K}}}^4 - {T_{\mathrm{ovcs}}}^4) \ \ [W] \ \ (\mathrm{IVCS} \rightarrow \mathrm{LHe\ \ tank}) \tag{3.5}$$

と表せる。ここで、以下のように定義する。

$$A = \frac{\sigma S \varepsilon^2}{(22-1)+2\varepsilon} \ \ B = \frac{\sigma S \varepsilon^2}{(21-1)+2\varepsilon} \ \ C = \sigma S \varepsilon^2 \tag{3.6}$$

よって、

$$\frac{Q_1}{A} = {T_{300\mathrm{K}}}^4 - T_{\mathrm{ovcs}}^4 \ \ \frac{Q_2}{B} = {T_{\mathrm{ovcs}}}^4 - T_{\mathrm{ivcs}}^4 \ \ \frac{Q_3}{C} = {T_{\mathrm{ivcs}}}^4 - T_{4.2\mathrm{K}}^4 \tag{3.7}$$

となり、輻射熱がそれぞれのシールド間で全て等しいとして Q と置き、上式を足し合わせて、

$$(\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{C})Q = {T_H}^4 - {T_L}^4 \tag{3.8}$$

よって、以下のように変形できる。

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{C}}({T_H}^4 - {T_L}^4) \tag{3.9}$$

以上より、S = 0.904[m^2]、$\varepsilon = 0.1$ とし、$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}[WK^{-4}m^{-2}]$ であるから、

$$A = \frac{5.67 \times 10^{-8} \times 0.904 \times 0.1^2}{(22-1)+2\times 0.1} \simeq 2.42 \times 10^{-11} \tag{3.10}$$

$$B = \frac{5.67 \times 10^{-8} \times 0.904 \times 0.1^2}{(21-1)+2\times 0.1} \simeq 2.54 \times 10^{-11} \tag{3.11}$$

$$C = 5.67 \times 10^{-8} \times 0.904 \times 0.1^2 \simeq 5.13 \times 10^{-10} \tag{3.12}$$

となる。この値及び $T_{300\mathrm{K}} = 300$、$T_{4.2\mathrm{K}} = 4.2$ を 式 3.9 に代入し、室温部から LHe tank まで侵入する輻射熱を求める。

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{2.42\times10^{-11}} + \frac{1}{2.54\times10^{-11}} + \frac{1}{5.13\times10^{-10}}}(300^4 - 4.2^4) \simeq 0.0979 \simeq 97.9[\mathrm{mW}] \tag{3.13}$$

上記のように輻射熱を求めたが、実際は VCS による冷却効果と熱輻射がキャンセルするため、LHe tank への輻射熱は、IVCS − LHetank 間を考えれば良い。因に各層ごとの輻射熱は以下のようになる。ただし、$T_{ovcs} = 150K$、$T_{ivcs} = 40K$ としている。

$$Q_1 \simeq 2.418 \times 10^{-11} \times (300^4 - 180^4) \simeq 171[\mathrm{mW}] \quad (300\mathrm{K} - 180\mathrm{K}) \tag{3.14}$$

$$Q_2 \simeq 2.537 \times 10^{-11} \times (180^4 - 50^4) \simeq 26.5[\mathrm{mW}] \quad (180\mathrm{K} - 50\mathrm{K}) \tag{3.15}$$

$$Q_3 \simeq 5.126 \times 10^{-10} \times (50^4 - 4.2^4) \simeq 3.20[\mathrm{mW}] \quad (50\mathrm{K} - 4.2\mathrm{K}) \tag{3.16}$$

固体伝道熱による熱流入

固体伝導熱については、dewer 内の支持材料、LHe 注入口、High-Tc、の 3 カ所からの熱流入が支配的と考えられる。dewar の支持材料とは、ガラス繊維強化プラスチック (GFRP:Glass Fiber Reinforced Plastics) であり、設置箇所や長さ、断面積については 表 3.3 の通りである。LHe 注入口は、3 つのベローズとそれを繋ぐ Cu 製の筒で構成されている。High-Tc とは、室温部からの Cu 線と超伝導マグネットコイルの NbTi 線との間に位置する高温超伝導線のことで、IVCS − LHe tank 間に設置してある。High-Tc は転移温度が約 100K であり、GFRP で覆われている。

表 3.3: 支持材料 GFRP

	内径 [cm]	厚み [cm]	長さ [cm]	断面積 [cm^2]
dewar − OVCS	30.95	0.08	41.7	7.80
OVCS − IVCS	26.55	0.08	15.0	6.69
IVCS − LHe tank	26.55	0.08	17.7	6.69

表 3.4: LHe 注入口のベローズ (材質:SUS)

	内径 [cm]	厚み [cm]	高さ [cm]	断面積 [cm^2]
dewar − OVCS	1.75	0.01	5.9	0.05529
OVCS − IVCS	1.75	0.01	5.9	0.05529
IVCS − LHe tank	1.59	0.01	6.3	0.05027

まず、支持材料である GFRP からの流入熱を求める。GFRP の熱伝導率は 表 3.6 にある軟ガラスの場合の値を用いる。熱伝導率 $\kappa(T)$ は、表 3.6 の値から 図 3.8 にあるように近似曲線を用いて以下のように求まった。

$$\kappa(T)_G = 0.50T^{0.49} \tag{3.17}$$

表 3.5: High-Tc を覆う GFRP

	長さ [cm]	断面積 [cm^2]	本数
IVCS − LHe tank	25	0.785	2

表 3.6: 材料の熱伝導率

材料名	熱伝導率 [$mWcm^{-1}K^{-1}$]								
	T= 0.1[K]	0.4	1	4	10	40	80	150	300
軟ガラス	-	-	0.15	1.15	1.9	2.6	4.6	-	-
ステンレス	-	-	0.59	2.5	7	46	80	110	150
テフロン	0.0002	0.004	0.04	0.45	0.95	1.96	2.3	-	-
ナイロン	0.0005	0.0052	0.025	0.125	0.39	-	-	-	-

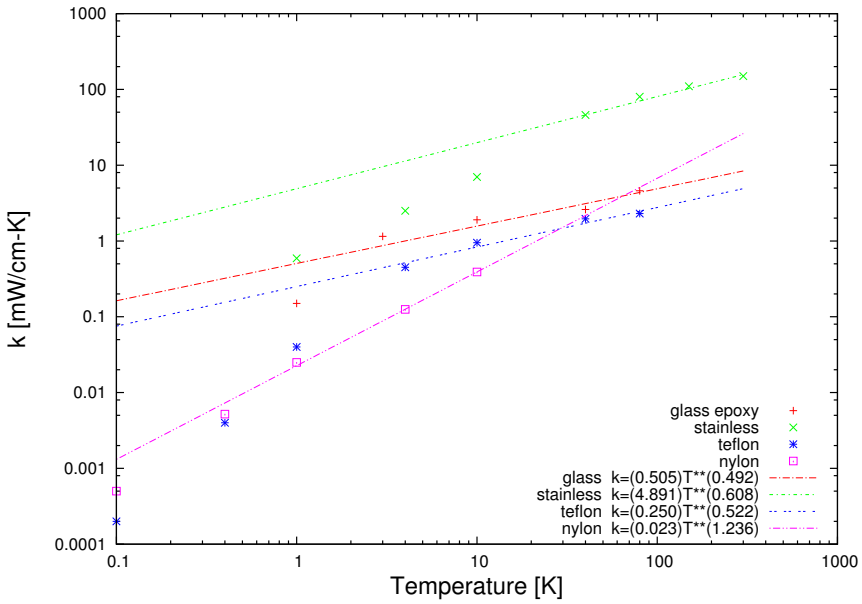

図 3.8: 表 3.6 の値から近似曲線を用いて求めた熱伝導率の関数.

よって、各層ごとの固体伝導熱は以下のように求まる。

$$Q_1 = \frac{7.81}{41.7}\int_{180}^{300}\kappa(T)_G dT \sim 164[\mathrm{mW}] \quad (300\mathrm{K} - 180\mathrm{K}) \tag{3.18}$$

$$Q_2 = \frac{6.69}{15.0}\int_{50}^{180}\kappa(T)_G dT \sim 292[\mathrm{mW}] \quad (180\mathrm{K} - 50\mathrm{K}) \tag{3.19}$$

$$Q_3 = \frac{6.69}{17.7}\int_{4.2}^{50}\kappa(T)_G dT \sim 42.0[\mathrm{mW}] \quad (50\mathrm{K} - 4.2\mathrm{K}) \tag{3.20}$$

次に LHe 注入口からの流入熱を求める。ただし、Cu は熱伝導が良いことから、SUS であるベローズの熱伝導率のみ考慮して流入熱を求める。熱伝導率 $\kappa(T)$ は、GFRP の時と同様に 表 3.6 の値から図 3.8 にあるように近似曲線を用いて以下のように求まった。

$$\kappa(T)_S = 4.89T^{0.60} \tag{3.21}$$

よって、各層ごとの固体伝導熱は以下のように求まる。

$$Q_1 = \frac{0.055}{5.9}\int_{180}^{300}\kappa(T)_S dT \sim 146[\mathrm{mW}] \quad (300\mathrm{K} - 180\mathrm{K}) \tag{3.22}$$

$$Q_2 = \frac{0.055}{5.9}\int_{50}^{180}\kappa(T)_S dT \sim 101[\mathrm{mW}] \quad (180\mathrm{K} - 50\mathrm{K}) \tag{3.23}$$

$$Q_3 = \frac{0.050}{6.3}\int_{4.2}^{50}\kappa(T)_S dT \sim 12.4[\mathrm{mW}] \quad (50\mathrm{K} - 4.2\mathrm{K}) \tag{3.24}$$

最後に High-Tc からの流入熱を求める。High-Tc は転移温度が 100K 程度の高温超伝導配線であるが、断熱消磁時に電流を流した際の High-Tc の温度は最大でも 70K 程度と考えられるため、High-Tc を覆う GFRP を伝う流入熱を考えれば良い。表 3.5 より、2 本からの流入熱は、以下にように求まる。

$$Q = \frac{0.785}{25}\int_{4.2}^{50}\kappa(T)_G dT \times 2 \sim 6.99[\mathrm{mW}] \quad (50\mathrm{K} - 4.2\mathrm{K}) \tag{3.25}$$

LHe 保持時間の理論値

VCS を考慮すると、室温部から IVCS までの流入熱はキャンセルされるため、実際の LHe tank への流入熱は、IVCS − LHe tank 間を考えれば良い。よって、式 3.16、3.20、3.24、3.25 より、室温部から LHe tank までの流入熱は、

$$Q_{all} \simeq 64.6[\mathrm{mW}] \tag{3.26}$$

となり、LHe の蒸発熱が 728mW-h ℓ より、

$$\frac{728 \times 7.4}{64.6} \simeq 83.4\mathrm{hour} \tag{3.27}$$

3.3.2　LHe tank から極低温部 (50mK) までの熱流入

輻射熱による熱流入

$$Q = S_1\sigma\varepsilon^2 \times (4.2^4 - 0.05^4) + S_2\sigma\varepsilon^2 \times (4.2^4 - 0.05^4) + S_3\sigma\varepsilon^2 \times (7.0^4 - 0.05^4) \tag{3.28}$$

$$= 5.67 \times 10^{-8} \times 0.1^2(128.47(4.2^4 - 0.05^4) + 16.61(4.2^4 - 0.05^4) + 16.61(7.0^4 - 0.05^4)) \tag{3.29}$$

$$\simeq 4.82 \times 10^{-5}[\mathrm{mW}] = 48.2[\mathrm{nW}] \tag{3.30}$$

固体伝導熱による熱流入

固体伝道熱として考えられるのが、ケブラーワイヤーからである。ケブラーワイヤーは、テフロンとナイロンの合成樹脂と考えられるため、それぞれの熱伝導率から流入熱を求めた上で平均する。熱伝導率 $\kappa(T)$ は、表 3.6 の値から 図 3.8 にあるように近似曲線を用いて以下のように求まった。

$$\kappa(T)_T = 0.25T^{0.52} \tag{3.31}$$

$$\kappa(T)_N = 0.02T^{1.23} \tag{3.32}$$

よって、

$$Q = 6\frac{5.6 \times 10^{-4}}{2} \times \int_{0.05}^{4.2} \kappa(T)_T dT \simeq 2.44 \times 10^{-3} = 2.44[\mu\mathrm{W}] \tag{3.33}$$

$$Q = 6\frac{5.6 \times 10^{-4}}{2} \times \int_{0.05}^{4.2} \kappa(T)_N dT \simeq 3.67 \times 10^{-4} = 367[\mathrm{nW}] \tag{3.34}$$

以上より、求まった値の平均値をケブラーワイヤーからの流入熱とすると、1.40 μW と求まる。

3.4　宇宙科学研究所での冷却性能試験

3.4.1　dADR の性能

dADR に関する設計値は 図 3.9 にまとめてある。図 3.1 の上側に予冷用の dewar(LHe tank)、下側に磁性体、超伝導マグネットコイル、HS 等の断熱消磁冷却を行うセットアップが組み込まれている dewar がある。dADR は LN_2 予冷と LHe 予冷を同じ dewar を用いて行う設計となっており、LN_2 予冷後は LN_2 の追い出しをし、He ガスでパージ後に LHe の転送を行う。LHe 注入口は LHe tank に直接繋がっているため、蒸発する LHe を利用した蒸気冷却 (VCS: Vapor Cooling System) により注入口や支持材料の冷却を行う設計となっている。磁性体は高温ステージに GGG、低温ステージに CPA、超伝導マグネットコイルは高温ステージ、低温ステージにそれぞれ冷却時の最大磁場が 4T と 3T のもの、HS は He tank(熱浴) − GGG 間に機械式 HS、GGG − CPA 間に PGGHS を用いている。また、超伝導マグネットコイルを覆う磁気シールドとして SiFe を設置している。

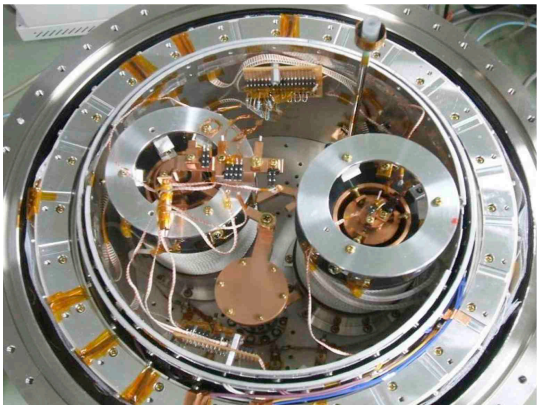

図 3.9: PGGHS を導入した dADR の内部.

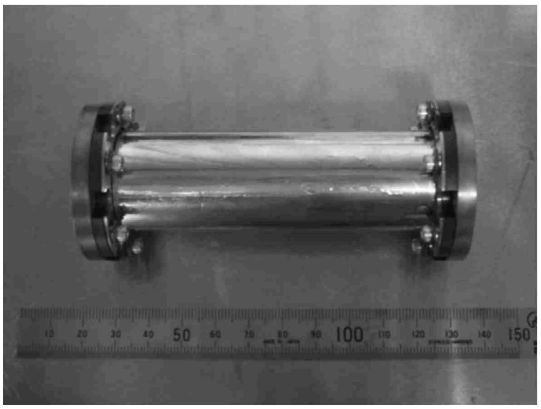

図 3.10: PGGHS.

表 3.7: dADR の設計値 (*shinozakietal*.2010)

磁性体	GGG (higher) / CPA (lower)
磁性体の質量	600 g / 90 g
最大磁場	4 Tesla / 3 Tesla
ヒートスイッチ	機械式 HS / PGGHS
保持時間	>15 h / > 10 h
各ステージへの流入熱	10 uW / 1.0 uW
cooling power の設計値	20 uW / 0.4 uW
熱容量 (最低温度到達時)	1.08 J / 0.0504 J
予冷	液体ヘリウム (4.2 K, 7.4 ℓ)
総質量	55 kg

3.4.2　性能評価試験

dADR は宇宙科学研究所で制作され、その性能評価試験の結果は次の表のようになる。評価項目は、HS の熱伝導度の測定と評価、冷却性能の評価である。冷却試験では、GGG 消磁後の GGG の温度が 0.9K、CPA の温度が 1.5K、CPA 消磁開始時の CPA の温度が 2.2K、CPA 消磁後の CPA の温度 (最低到達温度) が 50mK となった。この試験において 4.2K から 50mK までの冷却に成功しており、冷却性能は理論値とほぼ一致していることが分かる。

表 3.8: 性能評価試験の結果 (*shinozakietal*.2010)

液体ヘリウムの保持時間	∼ 50 h
機械式 HS の熱伝導度	10 mW/K (4.2 K), 2mW/K (2K)
PGGHS の熱伝導度	1 mW/K (2.0 K), 1uW/K (1.0 K)
GGG ステージ	
(励磁開始温度 4.5 K, 最大磁場 3.5 Tesla)	
最低到達温度	0.9 K (0.8 K in principle)
エントロピー損失	1.4 J/K (600 g, GGG), (1.5 J/K in principle)
期待される保持時間 (30 uW)	22 h(1.1K), 12 h(1.2 K), 23 h(1.3 K)
CPA ステージ	
(励磁開始温度 2.2 K, 最大磁場 2.6 Tesla)	
最低到達温度	50 mK (40 mK in principle)
エントロピー損失	1.5 J/K (90 g, CPA)
期待される保持時間	11.6 h (100 mK), 6.2 h (80 mK), 1.1 h (50 mK)

第4章　AGGHSの評価と組み込み

前章で記したように宇宙科学研究所での性能評価試験時は低温側ステージと高温側ステージの間のHSとしてPGGHS(Passive Gas-Gap Heat Switch)を用いたが、本研究ではAGGHS(Active Gas-Gap Heat Switch)を導入し、2段式による冷却試験を行った。ただし、本章に記載のLHe tank 温度は4.2K(LHe減圧無し)とする。また、4.2章ではLHe減圧時、すなわちLHe tank 温度が1.5Kの場合の結果も記してある。

4.1　AGGHSについて

ヒートスイッチは先にも述べたようにADRの重要な構成部品の1つで、ON/OFF の切り替え時間や熱伝導度がADR の最低到達温度や保持時間、冷却サイクル時間に影響を与える。様々なヒートスイッチがある中、Gas-Gap ヒートスイッチであるPGGHSとAGGHSは、ON/OFF の切り替え方法が異なる。

まず、HSのON/OFFとは、熱的に繋がった場合をON、熱的に切り離した場合をOFFとしている。特に、Gas-Gap ヒートスイッチの場合、ヒートスイッチ内のガスにより熱的に繋がったON状態となり、ガスが吸着剤に吸着されることでOFF状態となる。PGGHSはある温度になると自動的にガスが吸着剤に吸収、または吸着剤から放出されてON/OFF が切り替わるが、AGGHS は抵抗などを用いて強制的に吸着剤の温度を制御させ、ON/OFF の切り替えが行われるヒートスイッチである。PGGHSの欠点は、ON/OFFが1-2K程度で切り替わるため、高温側のGGGが1K程度まで冷えるとOFF状態となり、低温側のCPAの消磁開始温度をより低くする事ができなくなる。それに対し、AGGHSはON/OFFを制御できるため、この欠点を補うことができる。

4.1.1　要求性能

ヒートスイッチの要求性能は表4.1のようになる。dADR の GGG ス テージの吸熱量は約 4J 程度であるため、GGG の励消磁から CPA の励磁、消磁開始までに約 2 時間かかると想定した場合、NEEDLE から HS 本体への熱流入を GGG ステージ全体の吸熱量 4J の 10% 以下の 0.4J にする必要がある。従って、ON 時の要求値は $0.4\mathrm{J}/7200\mathrm{sec} = 56\mu\mathrm{W}$ と要求する。

4.1.2　設計

設計図は図4.1.2のようになる。Gas Gap HS では微小なギャップ (0.5mm) を実現できるかどうかが設計に大きな制限をかける。AGGHS は、ON 時熱伝導度は内部の向かい合う平行平板 (ROD DISC と CASE の間) の面積によって決定され、OFF 時熱流入は外側の CYLINDER が決定する。吸

表 4.1: AGGHS の要求性能

減圧なし	使用温度域	50 mK − 4K
	ON 時熱伝導度	10mW/K 以上
	OFF 時熱伝導度	0.8 μW/K 以下
	ON/OFF 切り替え時間	2 分以下
	NEEDLE から HS 本体 (0.6K と仮定) への熱流入	
	ON 時	56 μW 以下 (15-0.6 K)
	OFF 時	10μW 以下 (4.2-0.6 K)
減圧あり	使用温度域	50 mK − 2K
	ON 時熱伝導度	10mW/K 以上
	OFF 時熱伝導度	0.8 μW/K 以下 (1−0.05K)
	ON/OFF 切り替え時間	2 分以下
	NEEDLE から HS 本体 (0.6K と仮定) への熱流入	
	ON 時	56 μW 以下 (15-0.6 K)
	OFF 時	10μ W 以下 (4.2-0.6 K)

収剤として Charcoal を用いており、これは巨大な表面積 (800∼1000cm^2) を持ち、∼20K 以下の温度になると急激にヘリウムガスを吸いだす特徴を持つ。Charcoal Box は図面上には描かれていないが、Charcoal が入っている OFC 製の Box である。Needle は、Charcoal Box とフランジの間を繋ぐガスの通り道である。これは、低い熱伝導度が要求されるため強度を考慮した上で細く長い設計が必要である。PIPE は、AGGHS 制作時にガスを封入するためのものであり、動作時には使用しない。

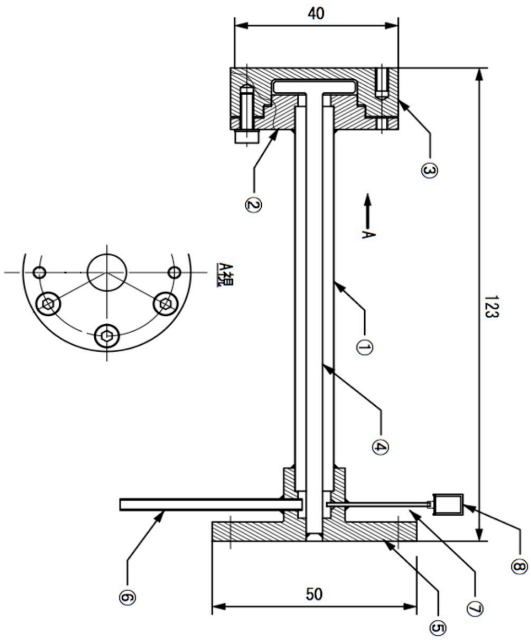

図 4.1: AGGHS 概略図

表 1: AGGHS 各コンポーネントの名称と素材

	名称	材質
1	CYLINDER	SUS304
2	CASE, cold upper	3N OFC
3	CASE, cold lower	3N OFC
4	ROD DISC	5N OFC
5	FLANGE	3N OFC
6	PIPE	OFC
7	NEEDLE	SUS304
8	Charcoal box	3N OFC

表 2: CYLINDER のパラメータ

長さ [mm]	外形 [mm]	厚み [mm]
100	10	0.08

表 3: NEEDLE のパラメータ

長さ [mm]	外形 [mm]	内径 [mm]
30	0.9	0.6

4.1.3 性能

本 AGGHS は首都大 ADR(LHe tank 減圧下) で使用する事を想定し、以下のような性能がを測定により確認されている (14)。

表 4.2: AGGHS の ON/OFF 時の性能.

ON 時の熱伝導度	5.28 mW/K (2K)
OFF 時の流入熱	3.70 μW/K (2K)

表 4.3: NEEDLE からの熱流入 (Thermal anchor なしの場合).

	熱流入値 [μW]	熱流入上限値 [μW]	温度域 [K]
On 時	96.28	169.91	2-15
OFF 時	0	0	2

ここで、AGGHS、PGGHS の性能を比較する。AGGHS の性能が 表 4.2、4.3 であり、PGGHS の性能が 表 3.8 であり、ヒートスイッチの要求値 表 4.1 と比較すると、AGGHS の方が OFF 時の熱伝導度は大きいものの、ON 時の熱伝導度は要求値に近いことが分かる。AGGHS の OFF 時の熱伝導度が高い原因としては、ガスの吸収剤が吸収しきれなかった残留ガスが原因と考えられる。ただし、OFF 時の熱伝導度は非常に小さく、温度の校正や、測定における誤差の範囲内ということも考えられ、正確な評価が難しい。よって、dADR では ON 時の熱伝導度が要求値に近い AGGHS を採用した。

Charcoal に必要な熱量と AGGHS OFF time

AGGHS を動作させる上で必要となる要素は、ON 状態にするための Charcoal(吸着剤) に必要な熱量、ON から OFF へ切り替わる時間 (OFF time) である。Charcoal に必要な熱量と AGGHS OFF time の結果は辺見修士論文に記載されている。断熱消磁冷却を行う上で、AGGHS の ON/OFF のタイミングは、効率の良い冷却サイクルや断熱状態を作り消磁を行う作業などにおいてとても重要である。ここで、AGGHS の ON/OFF の切り替えのタイミングを、実際の冷却試験結果を用いて説明する。図 4.2 の緑は、ヒーターの熱量を表している。断熱消磁冷却では 2 回に分けて ON にしており、1 回目は 47.2∼47.4 時間の間で、2 回目は 47.6∼49 時間の間である。1 回目は、CPA の温度を GGG の温度まで下げるためである。GGG の励磁により CPA 及び Detector stage の温度は上昇するが、GGG は LHe tank と熱的に繋がっているため温度が下降する。図を見ると 47 時間辺りで GGG と CPA の温度が逆転しており、CPA の方が温度が高い事が分かる。よって、AGGHS を ON にすることで、CPA の温度を下げる。ただし、超伝導マグネットコイルに大電流が流れており、High-Tc が温度上昇を続けている状態であるため、GGG の励磁時間は 2 時間半が目安となる。これ以上の時間の延長は High-Tc の超伝導状態が破れ、クエンチを起こす原因となる。2 回目は、GGG 消磁開始後に GGG の温度下降と共に CPA の温度も下げるため、また、GGG を CPA 励磁時の熱浴とするためである。そして、CPA 消磁開始前に OFF 状態にする。以上が ON/OFF の動作手順である。

まず、Charcoal に必要な熱量の測定結果を記す。AGGHS の ON/OFF 操作は、ヒーターを温めることで可能となる。このヒーターを温める際の、Charcoal の温度の変化が 図 4.3 である。

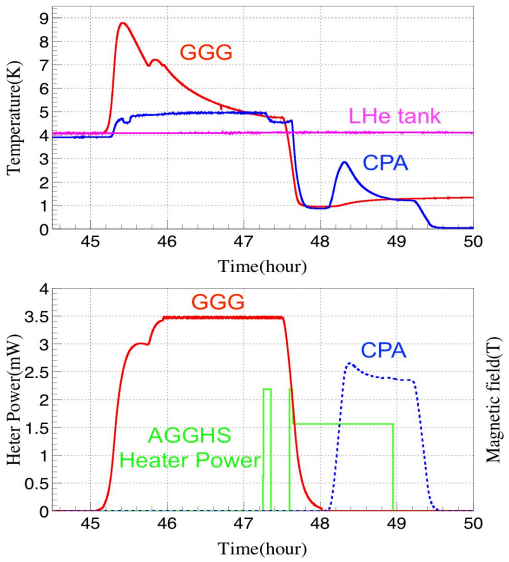

図 4.2: 断熱消磁冷却中の AGGHS の On/OFF 動作手順. 上段は横軸が時間, 縦軸は温度, 下段は横軸が時間, 縦軸がヒーターの熱量と磁性体にかける磁場強度. 緑: ヒーターの熱量, 赤: GGG の温度と磁場強度, 青: CPA の温度と磁場強度, マゼンダ: LHe tank 温度.

4.3.3 節で dADR の冷却性能評価試験時のセットアップについて詳しく述べるが、ヒーターにより暖まる Chacoal から AGGHS hot side への流入熱が大きいため、anchor を取り付けた。Needle の中間部分から 4.2 K への anchor を thermal anchor A、Charcoal box から 4.2 K への anchor を thermal anchor B とし、それぞれに Cu 線、Cu 被膜 NbTi 線を用いている。この anchor の取り方で Chacoal に必要な熱量の測定結果が図 4.3 であり、黒と赤のデータは thermal anchor B のみ、緑、青、水色、マゼンダのデータは thermal anchor B と thermal anchor A の両方をセットアップした場合の結果である。この結果から、赤、緑、青について 12K より高温側で比較すると、緑と青は赤より熱量を多く必要としていることが分かる。これは、Needle から 4.2K に繋がる thermal anchor A による影響と考えられる。

次に、AGGHS OFF time を測定した。AGGHS OFF time とは、ON 状態から Charcoal に完全にガスが吸着されるまでの時間である。測定方法は、まず Charcoal をヒーターで各温度 15K、14K、12K まで温めた後、ヒーターを OFF にした時間から温度が下がりきるまでの時間を測定した。結果は、図 4.4 のように 3 温度からの OFF time がほぼ一致し、約 3.5 分であることが分かった。ここで、下がりきった温度が 6K になっているが、6K は熱浴温度ではなく、セットアップの影響による。図 4.4 の温度計は AGGHS Hold side の温度を読んでいるが、セットアップは CPA 単段であり、Hold side は GGG とは繋がっておらず宙に浮いている状態になっている。そのため、熱浴とも繋がっておらず、AGGHS OFF 時の温度が 6K となっている。

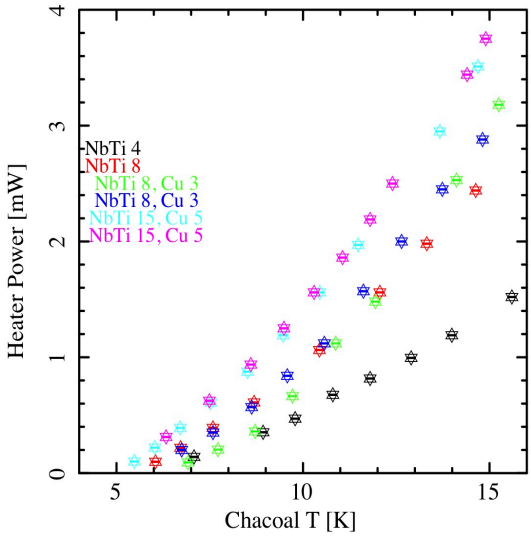

図 4.3: Charcoal に必要な熱量の測定. 黒: Thermal anchor A 3 本, Thermal anchor B 4 本, 赤: Thermal strap 8 本, 緑, 青: Thermal anchor A 5 本, Thermal anchor B 8 本. 緑: 1 回目の測定値, 青: 2 回目の測定値. 水色, マゼンダ: Thermal anchor B 15 本.

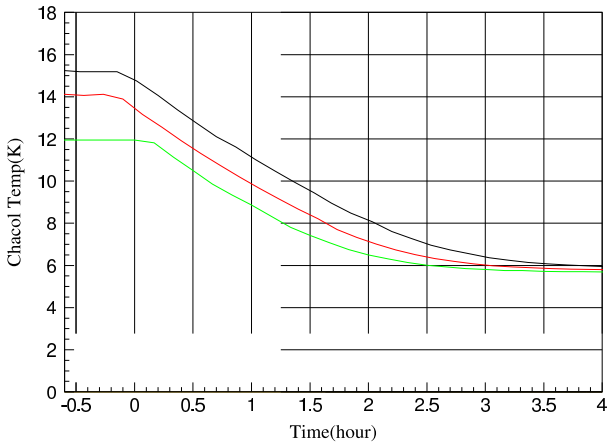

図 4.4: AGGHS off time の測定結果

4.2　dADR への組み込み (写真、図面)

dADR に AGGHS の組み込みを行った様子が図 4.5 である。写真の下の真ん中に見えている丸い銅部品が、AGGHS Cold side の上部である。AGGHS 本体は、図 4.6 である。写真の上部が Cold side、下部が Hot side である。Needle の中間部分、及び Charcoal から LHe tank へ繋ぐ Thermal anchor が固定されている。図 6.12 は、図 4.5 の下側から見た断面図で、高温側に GGG、低温側に CPA があり、熱浴と GGG の間に機械式 HS、GGG と CPA の間に AGGHS があることが分かる。図 6.13 は、図 4.5 の右側から見た断面図で、GGG の裏側に CPA が隠れており、AGGHS の Thermal anchor の種類や接続状況が分かる。Charcoal からは Cu 被膜 NbTi 線、Needle の中間部分からは Cu 線が固定されている。また、熱浴である LHe tank の温度は、減圧有りと明記しない限り、減圧無しの 4.2K とする。

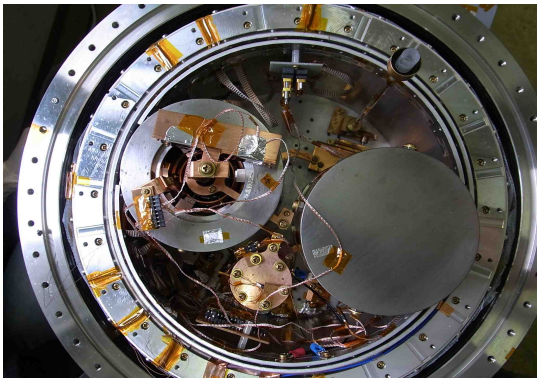

図 4.5: AGGHS 導入後の dADR デュワー内部. 2 段式による性能評価測定のセットアップ.

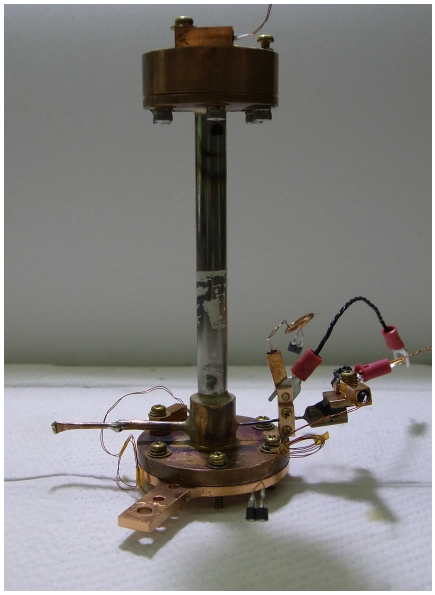

図 4.6: Thermal anchor を固定した AGGHS の様子. 写真の上側が cold side, 下側が hot side.

AGGHS の CPA 側を Cold side、GGG 側を Hot side とすると、セットアップの図にあるように Cold side、Hot side、Needle の中間部分、Charcoal box にそれぞれ温度計を設置した。

AGGHS を dADR に導入する際、GGG stage と CPA stage の両方と接続する必要があるため、AGGHS への負荷を軽減する構造が必要と成る。そこで、AGGHS と CPA stage の間に銅箔を重ねたものを介すことで、衝撃を吸収出来るようにした。2 段式のセットアップは図 **??** のようになっており、そこに図 4.9 のような銅箔 strap を設置した。

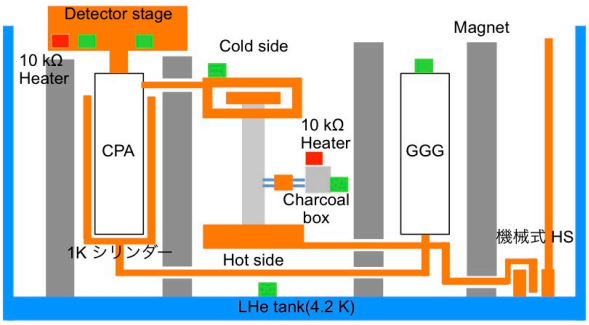

図 4.7: 2 段式のセットアップの概略図. GGG と CPA の両方を正面から見た時の図. 緑: 温度計, 赤: ヒーター.

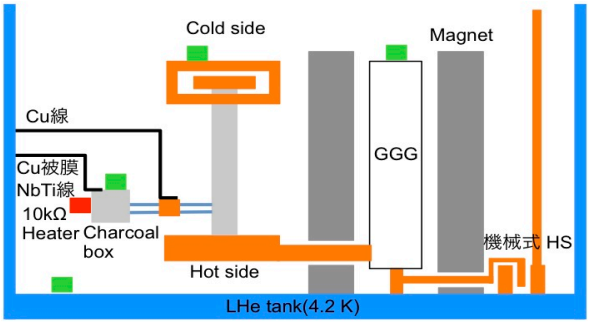

図 4.8: Thermal anchor のセットアップの概略図. GGG 側から見た図で, CPA は GGG の裏側にある. 緑: 温度計, 赤: ヒーター. Thermal anchor A: Cu 線, Thermal strap B : Cu 被膜 NbTi 線.

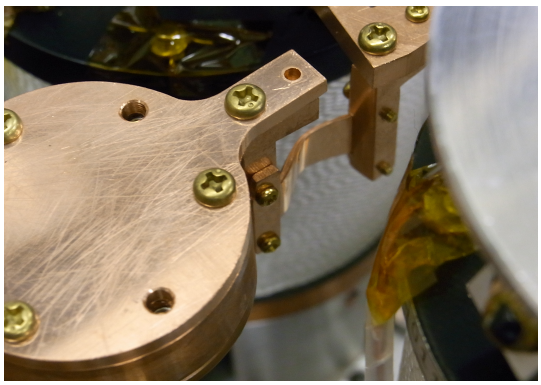

図 4.9: AGGHS colde side と CPA stage を繋ぐ銅箔 strap. 30mm × 9mm × 0.05 mmt

4.3 AGGHS を導入した dADR の性能評価

4.3.1 目的

主な目的は AGGHS を組み込んだ dADR の性能評価試験であり、測定内容は最低到達温度、励消磁時間、LHe 保持時間である。

4.3.2 要求性能

AGGHS は ON にする際に Charcoal をヒーターで 15K 程まで温めるため、Charcoal から AGGHS cold side を介して GGG へと侵入する熱に対する hot side に侵入する熱がどの程度なのか考慮する必要がある。この割合の要求値は、4.1.1 節の AGGHS の要求性能で記したように、10% 程度とする。ここで、AGGHS が ON 時の、Charcoal から NEEDLE を介して AGGHS に侵入する熱を求める。AGGHS は、GGG の消磁中と CPA の励磁中で ON にするが、ここでは CPA 励磁開始時を考えるので、hot side の温度は GGG の最低到達温度と同じと考え $T_{HShot} = 1.0K$ とする。熱浴は 4.2K、Charcoal の温度は $T_{charcoal} = 15K$ とし、NEEDLE の断面積 S、長さ ℓ、熱伝導度 κ_{sus} は 表 4.4 のようになる。 よって、

表 4.4: AGGHS hot side への熱流入計算のパラメータ

NEEDLE の材質	SUS
NEEDLE の断面積　S [mm^2]	0.31
NEEDLE の長さ　ℓ [mm]	22
T_{HShot} [K]	1.0
T_{bath} [K]	4.2

表 4.5: AGGHS の ON/OFF 時の NEEDLE の熱伝導率

parameter	On 時	Off 時
κ_{sus} ($WK^{-1}m^{-1}$)	1.11 @15K	- @4.2K
$T_{charcoal}$ (K)	15	4.2

$$P_{HShot} = \kappa_{sus}\frac{S}{\ell}(T_{charcoal} - T_{HShot}) \tag{4.1}$$

$$= 1.11 \times \frac{0.31 \times 10^{-6}}{22 \times 10^{-3}}(15 - 1) \simeq 2.1 \times 10^{-4} = 210[\mu W] \tag{4.2}$$

と求まる。CPA の励磁開始から消磁開始前までの時間を 1 時間とすると、AGGHS hot side への流入熱は $P = 2.1 \times 10^{-4} \times 3600 = 0.75J$ となる。宇宙科学研究所での評価試験結果 3.7 より、GGG の熱容量は約 1K で 1.08 J であるので、この 1 時間中の AGGHS hot side への流入熱は、GGG への流入熱の約 70% となり、要求値である 10% に対してとても大きいことが分かる。
よって、AGGHS hot side への流入熱を抑える対策が必要であり、本研究では Charcoal や NEEDLE から熱浴への Thermal anchor を導入した。

4.3.3 設計

前節の要求値を満たすには、Hot side への流入熱は $3 \times 10^{-5}W$ に抑える必要がある。ここで、Charcoal からの熱流入は、

$$P_{\mathrm{charcoal}} = P_{\mathrm{HShot}} + P_{\mathrm{anchor}} \tag{4.3}$$

$$= \kappa_{\mathrm{sus}} \frac{S}{\ell}(T_{\mathrm{charcoal}} - T_{\mathrm{HShot}}) + G_{\mathrm{anchor}}(T_{\mathrm{charcoal}} - T_{\mathrm{bath}}) \tag{4.4}$$

と表され、$P_{\mathrm{HShot}} = 3 \times 10^{-5}W$、$P_{\mathrm{charcoal}} = 2 \times 10^{-4}W$ より、$P_{\mathrm{anchor}} = 1.8 \times 10^{-4}W$ となる。よって、anchor に要求される熱伝導度は、$\mathrm{T_{HShot}} = 1.0\mathrm{K}$、熱浴の温度を 4.2K、$\mathrm{T_{charcoal}} = 15\mathrm{K}$ とすると、

$$G_{anchor} = \frac{1}{15-1} \times 1.8 \times 10^{-4} = 1.2 \times 10^{-5}[W/K] \tag{4.5}$$

と求まる。そこで Charcoal と LHe tank を繋ぐ Thermal anchor B を 表 4.6 にあるように導入した。Thermal anchor B には Cu 被膜 NbTi 線を用い、熱伝導度 G_{anchorB} は、Cu 被膜を Cu 線と見なした場合、半径が $r = \sqrt{(0.097/2)^2 - (0.067/2)^2} = 0.035[\mathrm{mm}]$ となる。Cu の熱伝導率は NIST の data base にある $\kappa = 322[\mathrm{Wm^{-1}K^{-1}}]$ (4K, RRR = 50) の値を参考にして求める。この場合の熱伝導度 G_{anchorB} は、表 4.9 のようになり、要求値より約 50 倍大きい値になっている事が分かる。

表 4.6: 実験セットアップ

日時	LHe 減圧	磁性体	Thermal anchor A Cu 線	Thermal anchor B Cu 被膜 NbTi 線
2010/4/12 - 4/18	有	CPA	-	8 本 7.5cm
2010/5/25 - 5/26	-	CPA	3 本 9cm	8 本 7.5cm
2010/6/19 - 6/24	-	GGG, CPA	5 本 12.3cm	15 本 12.3cm
2010/11/29 - 11/30	有	GGG, CPA	5 本 12.3cm	15 本 12.3cm
2011/1/14	-	GGG, CPA	5 本 12.3cm	15 本 12.3cm
2011/5/26	-	GGG, CPA	5 本 12.3cm	15 本 12.3cm

以上の結果から Thermal anchor の本数の変更では要求値に満たないと考え、Needle からも Thermal anchor を取り付ける事にした。これを Thermal anchor A とし、Cu 線を用いた。ここで、図 4.10 のようなモデルを考える。図 4.10 より、 Needle と Thermal anchor との接続部を点 M とすると、熱浴から点 M までの流入熱と温度を P_{anchorA}、T_{anchorA}、点 M から Charcoal への流入熱と温度を P_{charcoal}、T_{charcoal}、点 M から AGGHS hot side への流入熱と温度を P_{HShot}、T_{HShot}、熱浴から Charcoal への流入熱と温度を P_{anchorB}、T_{anchorB} とする。よって以下の式が成り立つ。

$$P_{\mathrm{charcoal}} = P_{\mathrm{HShot}} + P_{\mathrm{anchorA}} + P_{\mathrm{anchorB}} \tag{4.6}$$

ここで、NEEDLE の断面積を S、熱伝導率を κ_{sus}、Thermal anchor A 、Thermal anchor B の熱伝導度を G_{anchorA}、G_{anchorB}、点 M の温度を T' とすると、

$$\kappa_{\mathrm{sus}} \frac{S}{x}(T_{\mathrm{charcoal}} - T') = \kappa_{\mathrm{sus}} \frac{S}{(l-x)}(T' - T_{\mathrm{HShot}}) + G_{\mathrm{anchorA}}(T' - T_{\mathrm{bath}}) + G_{\mathrm{anchorB}}(T_{\mathrm{chacoal}} - T_{\mathrm{bath}})$$

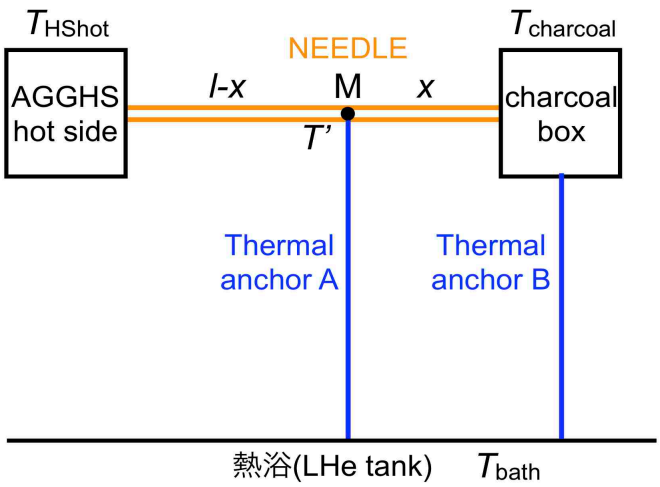

図 4.10: 熱収支.

$$T' = \frac{\kappa_{\mathrm{sus}}\frac{S}{x} \times T_{\mathrm{charcoal}} + G_{\mathrm{anchorA}} \times T_{\mathrm{bath}} + \kappa_{\mathrm{sus}}\frac{S}{(l-x)} \times T_{\mathrm{HShot}} - G_{\mathrm{anchorB}}(T_{\mathrm{chacoal}} - T_{\mathrm{bath}})}{\kappa_{\mathrm{sus}}\frac{S}{(l-x)} + \kappa_{\mathrm{sus}}\frac{S}{x} + G_{\mathrm{anchorA}}} \tag{4.7}$$

と変形できるので、P_{HShot} の式に代入すると AGGHS hot side への流入熱が以下の式から求まる。

$$P_{\mathrm{HShot}} = \kappa_{\mathrm{sus}}\frac{S}{(l-x)}(T' - T_{\mathrm{HShot}}) \tag{4.8}$$

表 4.4 にある G_{anchorA}、G_{anchorB} の導出には、ぞれぞれ 式 4.4、式 4.9 を用いる。図 4.10 の x は、8[mm] である。

表 4.7: Cu の熱伝導率

温度域 [K]	Cu の熱伝導率 κ
4	322
15	1120

表 4.8: AGGHS hot side への流入熱

Thermal anchor	Cu の直径 [mm]	Cu 被膜の直径	NbTi の直径 [mm]
A	0.4	-	-
B	(0.035)	0.097	0.067

表 4.9 に結果から、Needle からの thermal anchor を加えたことで流入熱の大幅な軽減ができており、要求値に近い値に改善されている事が分かる。

4.3.4　評価結果

AGGHS 組み込み後、dADR の性能評価試験を行った。以下に示す結果は、表 4.6 の試験時に性能評価した結果で、図 4.11 には LHe tank を減圧した場合、図 4.12 には LHe tank を減圧しない場合の結果である。

表 4.9: AGGHS hot side への流入熱. G_{anchorA}, G_{anchorB}, P_{HShot}: hot side への流入熱, C: 1 時間における GGG への侵入熱に対する Hot side への侵入熱の割合 ($P_{HShot} \times 3600/1.08$)

Thermal anchor A Cu 線	Thermal anchor B Cu 被膜 NbTi 線	G_{anchorA} [$\mathrm{Wm^{-1}K^{-1}}$]	G_{anchorB} [$\mathrm{Wm^{-1}K^{-1}}$]	T' [K]	P_{HShot} [$\mathrm{WK^{-1}}$]	C [%]
-	8 本 7.5cm	-	4.59×10^{-4}	-	6.77×10^{-4}	225
3 本 9cm	8 本 7.5cm	1.07×10^{-3}	4.59×10^{-4}	1.09	2.19×10^{-6}	0.7
5 本 12.3cm	15 本 12.3cm	1.30×10^{-3}	1.67×10^{-4}	3.16	5.27×10^{-5}	17

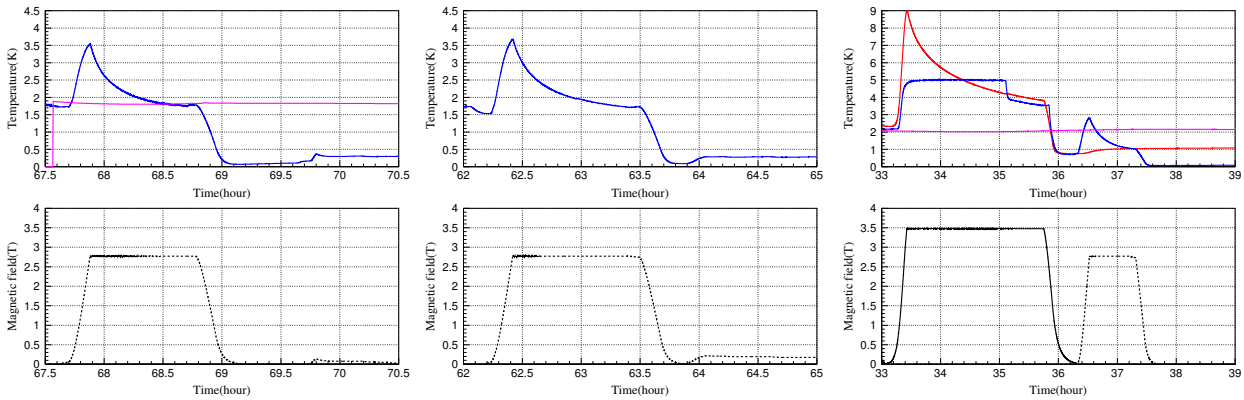

図 4.11: 首都大に搬送後の LHe 減圧下での冷却試験の結果. 上段: 温度変化, 下段: 磁場変化. 赤: GGG stage, 青: CPA stage, マゼンダ: LHe tank(1.5K), 黒の実線: GGG magnet の生成磁場, 黒の点線: CPA magnet の生成磁場.

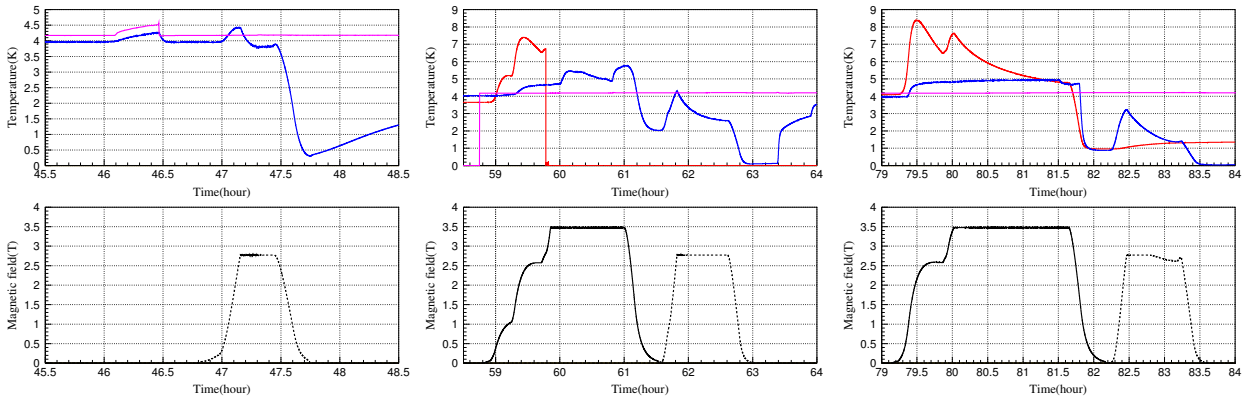

図 4.12: 首都大に搬送後の LHe 減圧なしでの冷却試験の結果. 上段: 温度変化, 下段: 磁場変化. 赤: GGG stage, 青: CPA stage, マゼンダ: LHe tank(4.2K), 黒の実線: GGG magnet の生成磁場, 黒の点線: CPA magnet の生成磁場.

表 4.10: LHe tank 減圧をした場合の冷却試験結果

日時	2010/4/8	2010/4/12	2010/11/30
GGG Max Current [mA]	-	-	8000
CPA Max Current [mA]	8500	8500	8500
GGG cycle time [hour]	-	-	2.68
CPA cycle time [hour]	1.70	1.68	1.46
GGG demag start [K]	-	-	3.82
GGG demag finish [mK]	-	-	756
CPA demag start [K]	1.76	1.72	1.07
CPA demag finish [mK]	69.7	89.5	67.9

表 4.11: LHe 減圧なしの場合の冷却試験結果

日時	2010/5/20	2010/6/17	2011/5/26
GGG Max Current [mA]	-	8000	8000
CPA Max Current [mA]	8500	8500	8500
GGG cycle time [hour]	-	2.71	3.01
CPA cycle time [hour]	0.95	1.46	1.40
GGG demag start [K]	-	5.79	4.77
GGG demag finish [mK]	-	2080	959
CPA demag start [K]	3.88	2.60	1.40
CPA demag finish [mK]	293	96	45

まず、最低到達温度について考察する。表 4.10、4.11 より、減圧無しでも最低到達温度 45mK を確認している。dADR は減圧をしないことを前提に設計されており、減圧なしでも TES カロリメータを動作させる事が可能である事が確認できた。ここで、CPA の $S-T$ 曲線から最低到達温度の理論値と比較する。図 4.13 は CPA の $S-T$ 曲線であり、黒線は 2011/5/26 の冷却試験のデータである。黒線の消磁開始温度から $S-T$ 曲線により見積もられる最低到達温度の理論値は、約 20mK であり、実測値である 45mK より低い事が分かる。この原因としては、CPA の消磁中に、CPA 及び Detector stage の極低温部に外部からの熱が侵入していることが考えられる。侵入熱の原因としては、ケブラーワイヤーを伝う熱や輻射熱が考えられる。

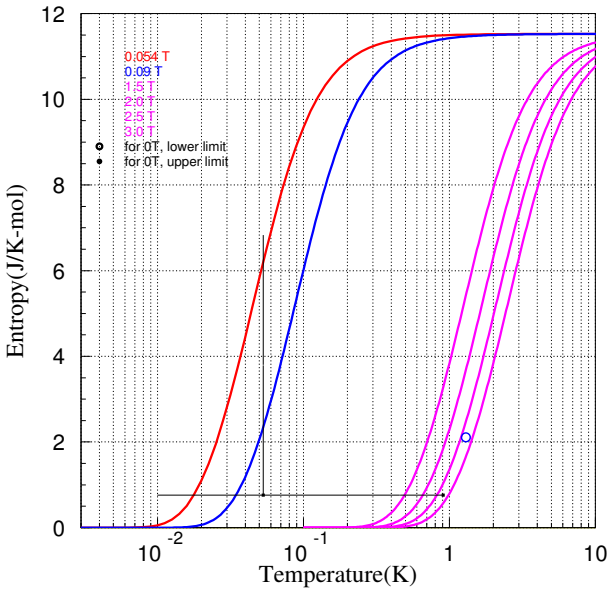

図 4.13: CPA の $S-T$ 曲線. 黒の線は 2011/5/26 の冷却試験のデータ.

次に、励消磁時間については 表 4.10、4.11 にまとめてある。減圧無しの冷却で最低到達温度が最も低い 2011/5/26 の結果より、4.2K から最低到達温度 45mK までの冷却サイクル時間は、4 時間 40 分程度であることが分かる。GGG 消磁後から CPA 励磁開始までの時間を含めても 5 時間程度である。

最後に、LHe 保持時間について考察する。LHe 保持時間の実測値を、図 4.14 にまとめた。この値から室温部から LHe tank への流入熱を見積もってみる。保持時間の最長時間が 56hour、最短時間が 40hour とすると、それぞれから求まる流入熱は以下のようになる。

$$Q = \frac{728 \times 7.4}{56} = 96.2[\mathrm{mW}] \tag{4.10}$$

$$Q = \frac{728 \times 7.4}{40} = 135[\mathrm{mW}] \tag{4.11}$$

この値は、式 3.26 にある理論値と比べ大きいことが分かる。

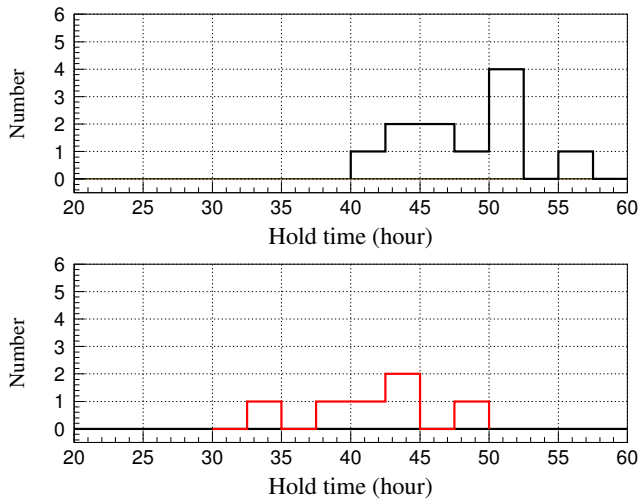

図 4.14: LHe 保持時間. 宇宙科学研究所と首都大での測定値. 黒: LHe 温度からの冷却, 赤: LHe 減圧後の冷却.

第5章　TES、SQUIDの整備

5.1　TES

通常 TES に利用している超伝導金属は Ti であるが、Ti 単体の転移温度は 390 mK であるため、TES カロリメータとして動作させる温度域 100 mK に対して高めである。そこで Ti 上に常伝導金属の Au を成膜し、転移温度を 100mK 前後まで落とす近接効果を利用している。よって、今回使用した TES は Ti と Au の 二層薄膜で形成されている。ただし、本章に記載の LHe tank 温度は 4.2[K](LHe 減圧無し) とする。

5.1.1　TES 素子の選択

2 章でも記したように TES は 2 層薄膜で形成されているため、その特性から磁場に敏感である。よって、磁場対耐性のある素子を採用した。図 2.7 の測定時に使用した素子は、3G まで動作実績のある素子で、セイコーインスツル社が開発した SII182 という素子である。また、同社が開発した SII210 も採用した。

5.1.2　TES 素子の仕様 (パラメータ)

表 5.1:

TES ID	Au[nm]	Ti[nm]	TES size [μm^2]	吸収体 size [μm^3]	転移温度 [mK]	常伝導抵抗 [mΩ]
SII182	120	40	350×350	$150 \times 150 \times 0.50$	147	97
SII210	120	45	350×350	$150 \times 150 \times 0.15$	$250 - 258$	110

5.1.3　dADR への組み込み (写真、図面)

銅製の Detector stage box は内部に TES を設置し、それを覆う形で磁気シールドを設置できる設計になっている。図には、Detector stage に磁気シールドを設置した様子を示す。

図 5.6 で磁気シールドを 3 重に導入しても TES が超伝導転移しなかった。そこで磁場解析ソフト FEMM によりどの程度磁場が TES 周辺にあるか解析した。FEMM は軸対称を仮定したシミュレーションソフトである。ここでは、図 5.1 のように軸を仮定してシミュレーションした。TES が動作する際は温度制御を用いるため、CPA 中心で約 2300[G] の磁場が存在する事が計算から求まる。よって、図 5.6 同様の磁気シールドを導入した時、TES にどの程度影響するか磁場解析ソフト FEMM により求めた結果が図 5.2 になる。磁気シールドに SiFe、Cryoperm、Pb を採用した場合、TES 周辺で

13G まで遮蔽出来ていることが分かる。これより Al シールドを導入し、13G を遮蔽するセットアップにした。

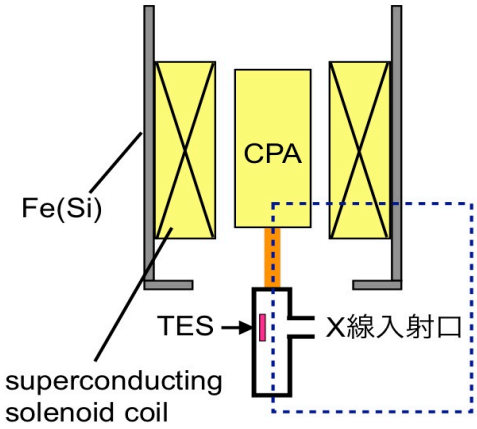

図 5.1: 磁場解析ソフト FEMM によりシミュレーションする際に, CPA 中心を軸としている. 点線の枠内についてシミュレーションを行った.

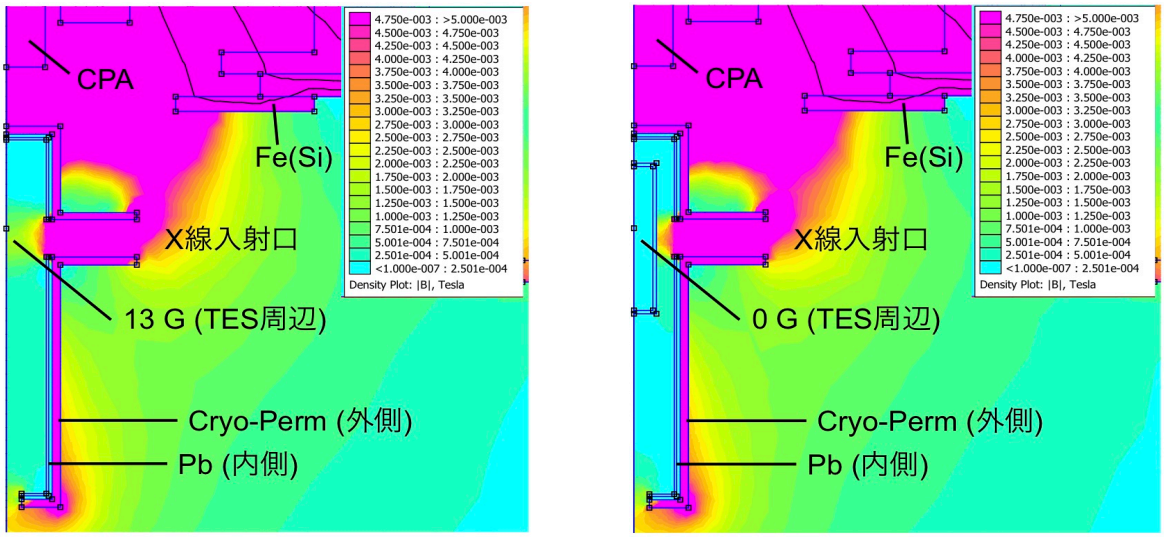

図 5.2: TES 動作温度 100mK で dADR を温度制御する際の, TES 周辺の磁場を FEMM によりシミュレーションした結果. 左図より, 磁気シールドが Fe(Si), Cryoperm, Pb の場合, TES 周辺の磁場は 13G 程度となり, Al 磁気シールドを加えた右図の場合, 0G まで遮蔽されていることが分かる.

表 5.2: 各試験での磁気シールドのセットアップ

日時	TES ID	SiFe	Pb	Cryoperm	Permalloy	Al
2010/11/29	SII182	○	○ (box の裏半分)	-	-	-
2010/12/07	SII182	○	○	○	○	-
2011/01/14	SII182	○	○	○	○	○
2011/05/26	SII182	○	○	-	○	○

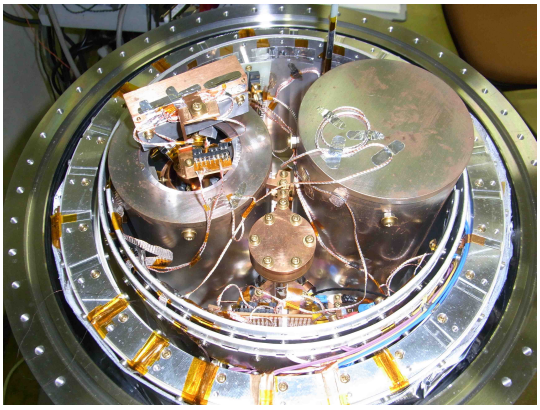

図 5.3: 2010/11/29 の試験セットアップ

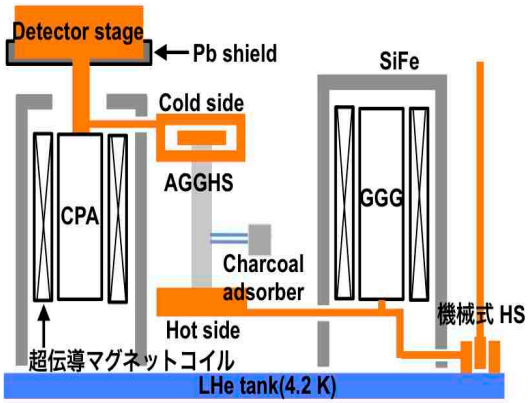

図 5.4:

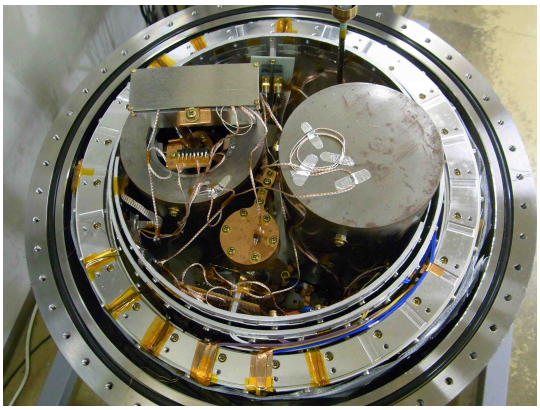

図 5.5: 2010/12/07 の試験セットアップ

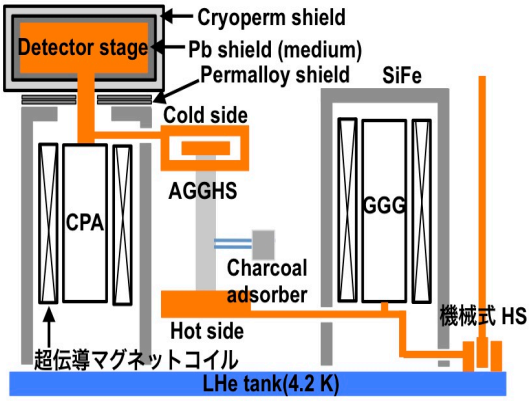

図 5.6:

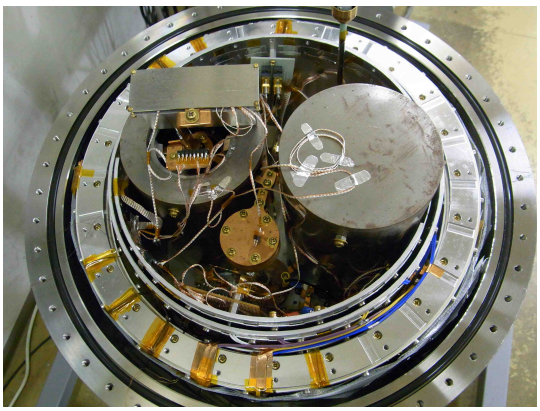

図 5.7: 2011/01/14 の試験セットアップ．ただし，Detector box 内に設置してある TES を Al 磁気シールドで覆っている．

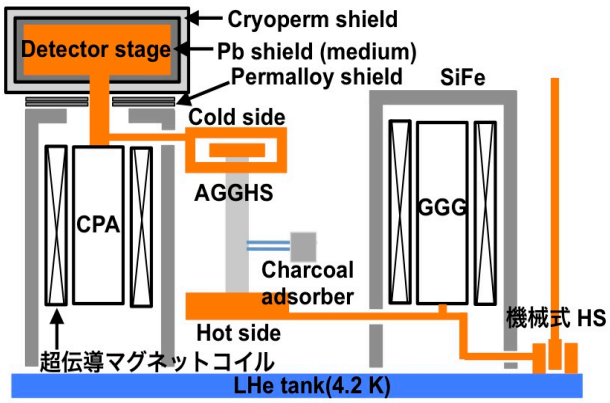

図 5.8:

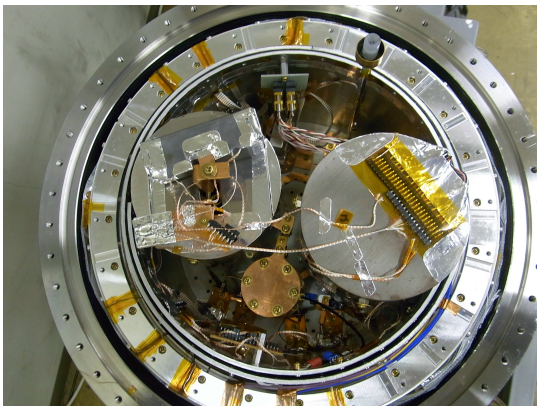

図 5.9: 2011/05/26 の試験セットアップ．ただし，Detector box 内に設置してある TES を Al 磁気シールドで覆っている．

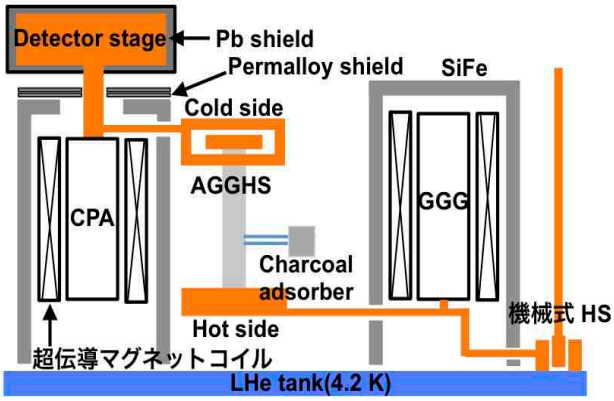

図 5.10:

5.1.4　TES の性能評価

TES カロリメータの性質を調べるため、TES の $R-T$ 特性の評価を行った。具体的には、TES の温度 T と抵抗 R の関係を測定値から求め、転移温度、転移幅、転移の振る舞いから TES カロリメータとして動作可能かどうか評価する。$R-T$ 特性の評価方法は、定電流の下で抵抗を直接測定する方法である。抵抗値の測定には Linear Research 社 LR-700 を使用し、4 端子法を用いて約 16Hz の交流電流を流して TES の抵抗値を測定している。本修論では、20μV-20Ω(1μA) のレンジで測定している。

TES の RT 測定の結果から、TES 周辺の磁気遮蔽対策を行っても転移しない結果となった。$R-T$ の振る舞いについては、2010 年 12 月の測定時は転移がゆるやかであり、残留抵抗が 500 mΩ と高めである。また、2011 年の 1 月と 5 月の測定時では一致しており、0.8 − 0.6 K と 0.25 K で抵抗値が下がる結果となった。

表 5.3: TES の RT 測定結果

日時	TES ID	TES の温度 [mK]	TES の抵抗 [mΩ]
2010/11/29	SII182	70	114
2010/12/07	SII182	77	498
2011/01/14	SII182	78	111
2011/05/26	SII182	45	97

図 5.11: SII182 の $R-T$ 特性.

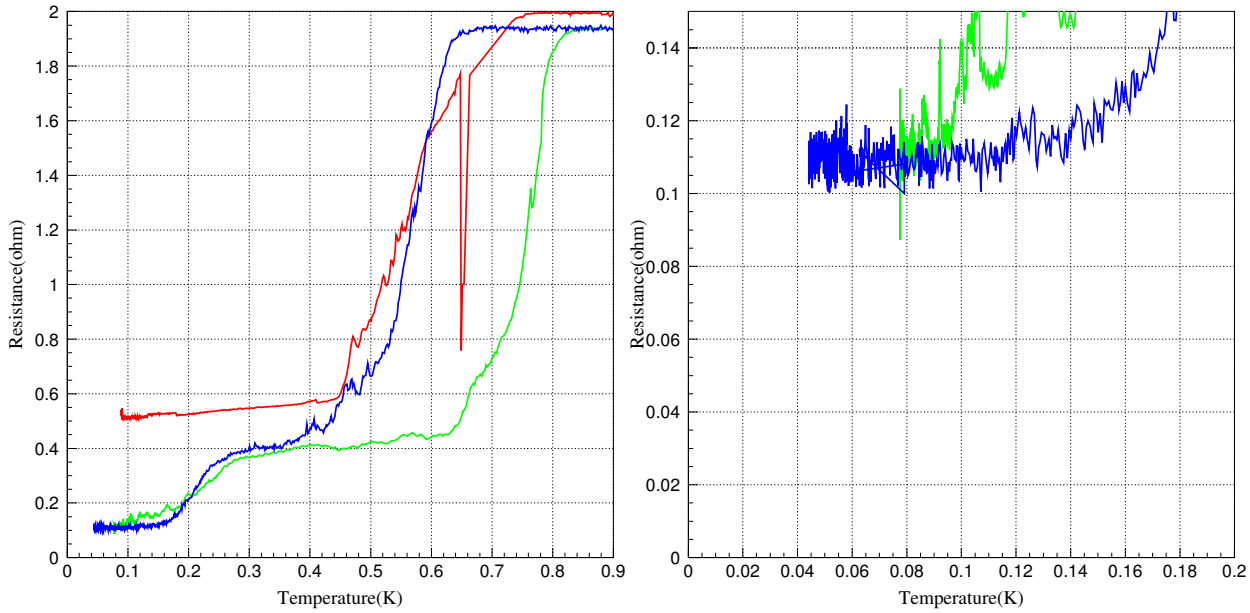

図 5.12: CPA 消磁時 (温度下降時) の SII182 の $R-T$ 特性. 右図は左図の拡大図. 赤: 2010/12/08, 緑: 2011/01/14, 青: 2011/05/26.

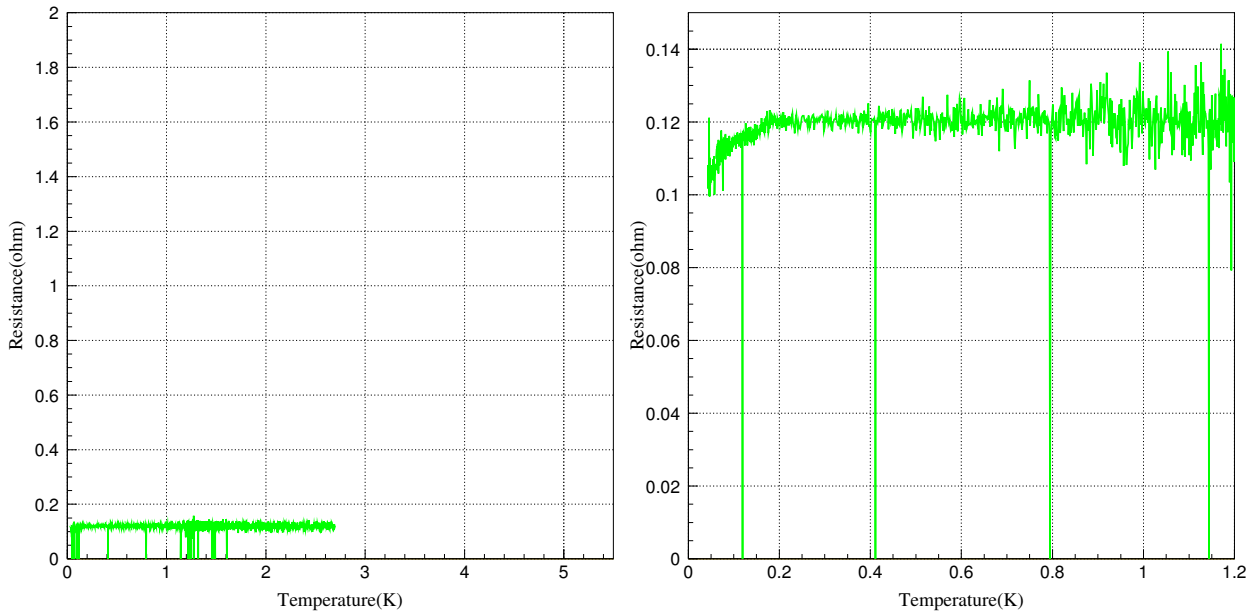

図 5.13: 左: CPA 最大電流後 (温度下降時) の SII210 の RT 図. 右: 拡大図.

5.2 SQUID

TES の微小な電流変化を読み出す装置として SQUID を用いた。今回使用した SQUID は、セイコーインスツル株式会社の 420-SAA(420-Serial SQUID Array) で、420 個の SQUID を直列に並べたものである。

5.2.1 420-SSA の仕様 (パラメータ)

表 5.4: SQUID の仕様

入力コイル自己インダクタンス L_{in}	190 nH
入力コイル相互インダクタンス M_{in}	58 pH
フィードバックコイル相互インダクタンス M_{f}	58 pH
ゲイン $M_{\mathrm{in}}\frac{\partial V}{\partial \Phi}$	1400 V/A
ノイズレベル	6.8 pA / $\sqrt{\mathrm{Hz}}$
カットオフ周波数	150 kHz

5.2.2 dADR への組み込み (写真、図面)

SQUID の組み込み箇所は、CPA 上部、LHe tank 底面の 2 通りあり、それぞれで評価試験を行っている。評価試験の詳細については次節で述べる。

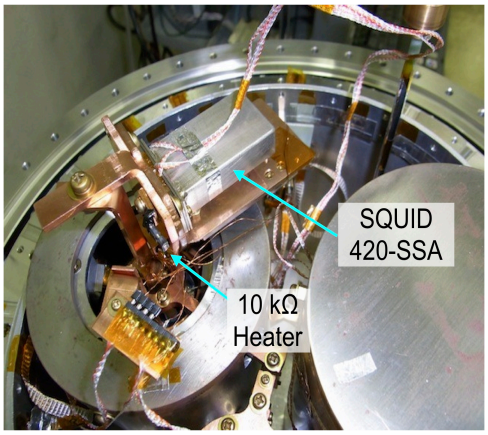

図 5.14: SQUID のセットアップ図. (1) 10kΩ, (2) SQUID(420-SSA).

5.2.3 SQUID の性能評価 1

dADR で初となる SQUID 動作試験を行った。

目的

SQUID の $\Phi - \mathrm{V}$ の確認、noise の評価。

セットアップ

SQUID のセットアップは 図 5.14 の左のように、CPA 上に設置した。また TES(SII139) を SQUID に接続した。

評価結果

液体ヘリウム温度における SQUID の $\Phi - V$ は、図 5.15 のようになった。これより、$\Phi - V$ の形が崩れることなく周期的に変化していることが分かる。よって正常に動作していることが分かった。また、この $\Phi - V$ より電位差は 470 mV であることが分かった。更に断熱消磁冷却時の $\Phi - V$ を確認したところ、GGG の最大磁場 (35000[G]) までは $\Phi - V$ の出力を確認したが、消磁後超伝導マグネットコイルへの電流がゼロになった瞬間に $\Phi - V$ が確認できなくなった。

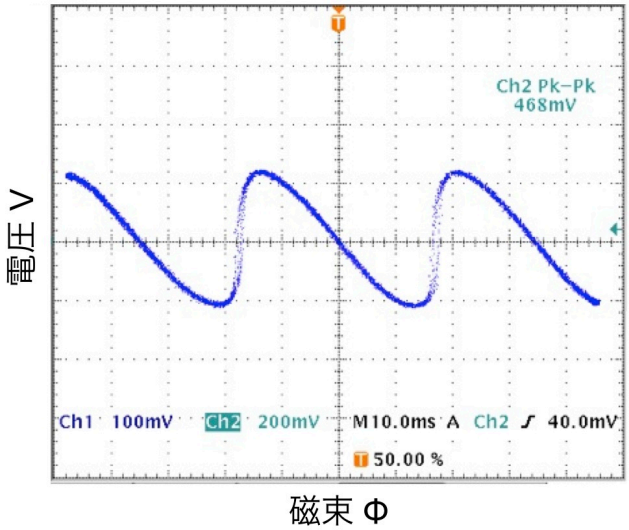

図 5.15: 液体ヘリウム温度での SQUID の $\Phi - V$.

次に noise の評価を行った。結果は 図 5.16 のようになる。黒が今回測定した noise で、赤は本研究室の希釈冷凍機で 130mK において測定した noise の結果になる。この結果から、white noise は表のようになり、希釈冷凍機の時より約 3 倍大きいという結果となった。2000Hz 以下の低周波側では希釈冷凍機の時よりも多く存在しており、GND からの noise と考えられる。また、40000Hz 以上の高周波帯域では測定に用いた横河オシロスコープの noise が見えている。TES で X 線測定を行う際に使用する周波数の帯域は 40000Hz 以下であり、低周波側の noise が問題となる。

表 5.5: dADR と希釈冷凍機での white noise の比較

冷凍機	white noise $[\mu V/\sqrt{Hz}]$
dADR	~ 2
希釈冷凍機	~ 0.7

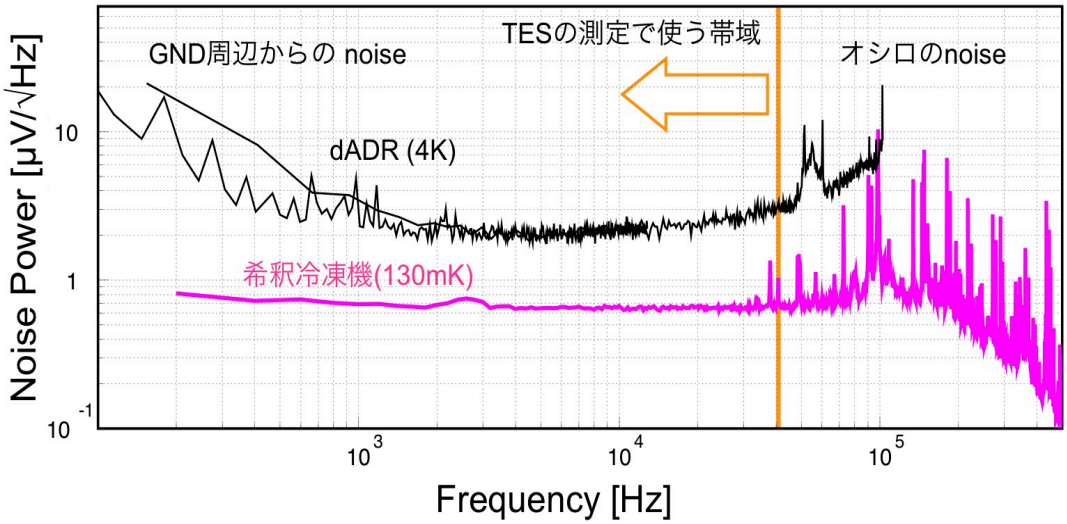

図 5.16:

5.2.4　SQUID の性能評価 2

性能評価 1 では、SQUID が CPA 上にあったため、断熱消磁冷却中の磁場の影響が大きいことから磁場をトラップしてしまい、動作が確認出来なかった。そこで、磁場の影響が低い超伝導マグネットコイルの横に設置し、磁気シールドを導入して SQUID の動作試験を行った。

目的

設置位置変更及び磁気遮蔽対策後の SQUID の $\Phi - V$ の確認、GND に対する noise の評価。

セットアップ

図 5.14 の右のように、SQUID を CPA の超伝導マグネットコイルの横で、LHe tank の底面に設置した。また、Parmalloy の磁気シールドを SQUID に覆うことで磁気遮蔽対策を行った。TES は SQUID と接続せず、SQUID には TES の代わりに 114mΩ の抵抗を接続した。

評価結果

断熱消磁冷却前後の $\Phi - V$ は、図 5.18 のようになる。GGG の最大磁到達時に $\Phi - V$ の形が若干崩れるものの、磁場を trap することなく消磁後も $\Phi - V$ を確認することができた。この結果から、SQUID は断熱消磁冷却を行っても正常に動作することが確認出来た。

次に noise の評価を行った。SQUID の電流源、$\Phi - V$ の測定を行う横河オシロスコープ等の SQUID 測定系の GND と、dADR の冷却性能評価に用いる温度計測定系の GND の取り方を共通、または別にした時の noise を評価した。また、断熱消磁前後の noise の変化も調べた。

図 5.20、5.21 では LHe 温度において GND の取り方が異なり、GND を共通にすることで低周波数側で noise が大きくなっていることが分かる。図 5.22、5.25 では LHe 減圧時での GND の取り方が異

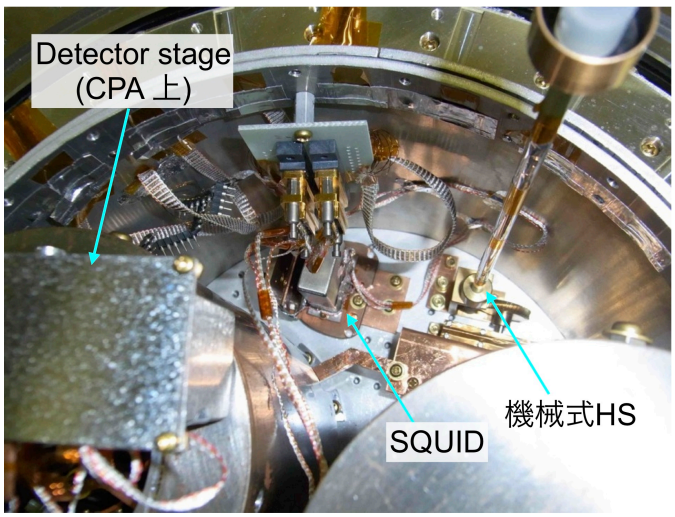

図 5.17: LHe tank 底面に設置した SQUID の様子.

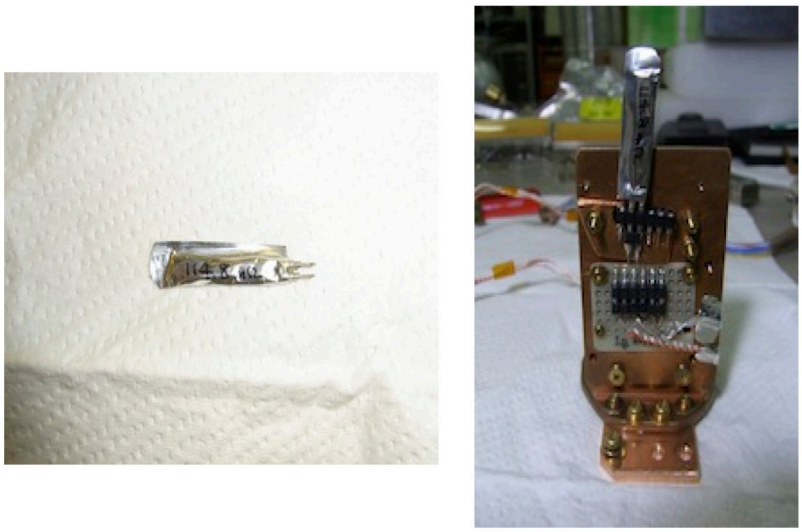

図 5.18: SQUID input に 114mmΩ 抵抗を接続した様子.

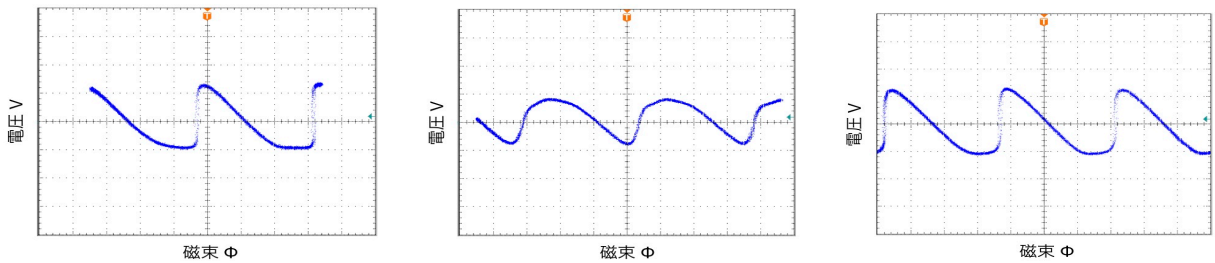

図 5.19: SQUID の $\Phi - V$. 左: GGG 励磁前, 中: GGG 最大磁場到達時, 右: LHe 減圧時の断熱消磁後.

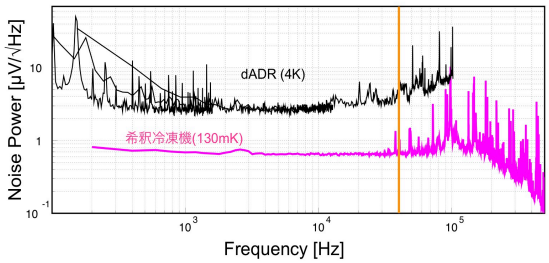

図 5.20: LHe 温度で断熱消磁前, GND は別.

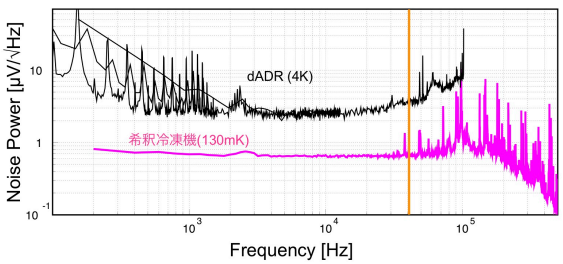

図 5.21: LHe 温度で断熱消磁前, GND は共通.

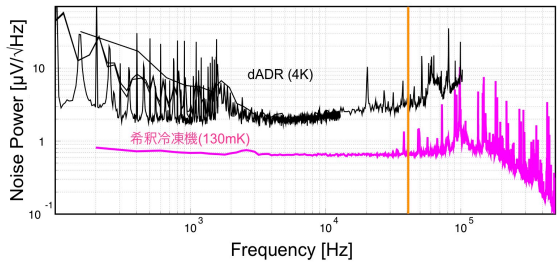

図 5.22: LHe 減圧時で断熱消磁前, GND は共通.

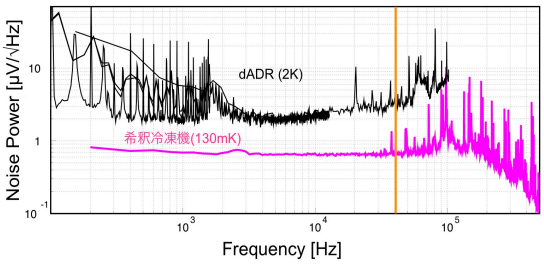

図 5.23: LHe 減圧時で断熱消磁後, GND は別.

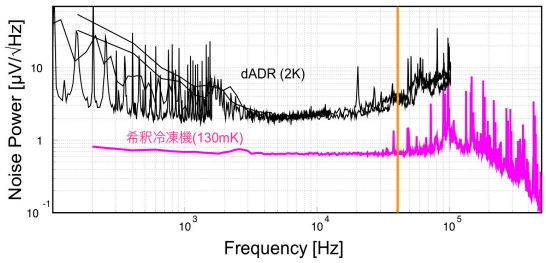

図 5.24: LHe 減圧の停止後. GND は別.

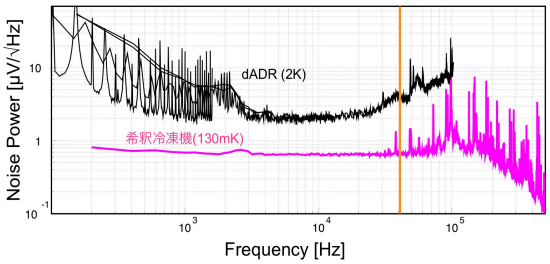

図 5.25: LHe 減圧の停止後. GND は共通.

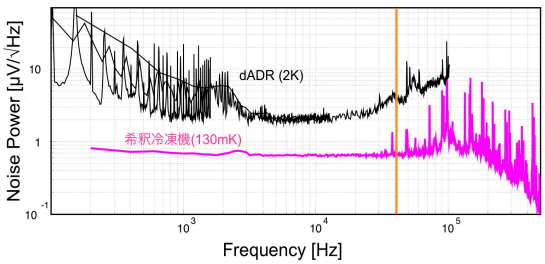

図 5.26: 減圧再開後. GND は共通.

なり、低周波側で noise が大きくなっている。図 5.22、5.26 ではそれぞれ断熱消磁前と後であり、断熱消磁後の方が低周波数側でわずかに noise が多くなっていることが分かる。

第6章　dADR内の磁場測定

TESが転移しない原因として、TESの劣化、残留磁場の影響が考えられるが、2011年1月に希釈冷凍機でSII182のRT測定を行ったところ転移を確認できたため、TESは正常と考えられる。よって、磁場の影響が大きいと考えられるため、TESに対しどの程度磁場が加わっているのか定量的に調べるため、磁場測定を行った。本章ではこの磁場測定について記す。

6.1　測定目的

ホール素子による、TESの動作時の残留磁場の定量的な評価、磁気シールドの磁気遮蔽効果の評価。

6.2　ホール素子とは

ホール素子とは、ホール効果を用いた磁気センサーである。一般的な構造は、数μmの半導体薄膜で形成されており、図 6.2のように、(1)、(3)が入力端子、(2)、(4)が出力端子の4端子になっている。(1)−(3)に電流を流す、又は電圧をかけ、薄膜に垂直に磁場を加えることでローレンツ力により薄膜内の電子の分布が(4)の方に偏る。これにより(2)−(4)間で電圧$V_{\rm out}$が生じ、この現象のことをホール効果と言う。$V_{\rm hall}$はホール素子の出力電圧であり、次式で表される。ただし、$R_{\rm h}$はホール係数と呼ばれるもので、$R_{\rm h} = 1/(en)$ (e: 電子の電荷, n: 半導体のキャリア濃度) と表される。

$$V_{\rm out} = \frac{R_{\rm h} d}{I_{\rm c}} B \tag{6.1}$$

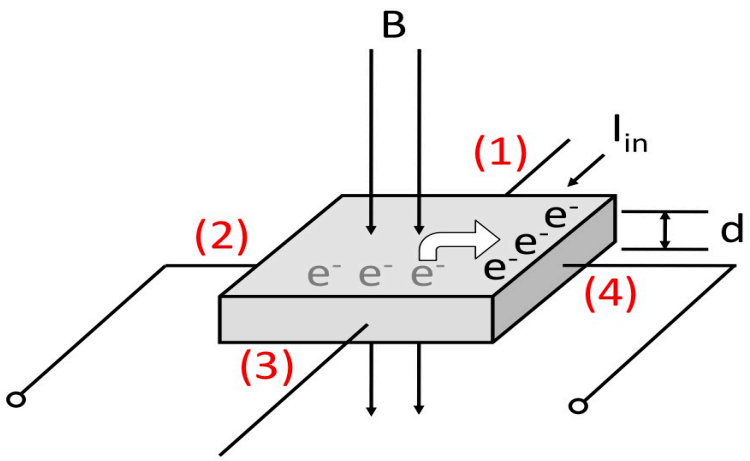

図 6.1: ホール効果の様子.

上式より、出力電圧 V_{out} は、入力電流 I_{c} と磁場 B に比例することが分かる。ホール素子は一般的に電子移動度の高い Ⅲ、V 族化合物を半導体が用いられる。以下の表には、種類ごとのホール素子の特徴をまとめてある。

表 6.1: ホール素子の種類と特徴

半導体の種類	In Sb	In As	In As	Ga As
型番 (例)	HW-101A	HQ-8220	HGCT-3020	HG-106C
電子移動度 [$\mathrm{cm^2V^{-1}S^{-1}}$]	78000	33000	33000	8500
動作温度 [° C]	-40− 110	-40− 125	-269−100	-40− 125
入力電流 [mA]	-	-	100	-
磁気感度 [mV/kG]	-	-	0.55 ∼ 1.05	-

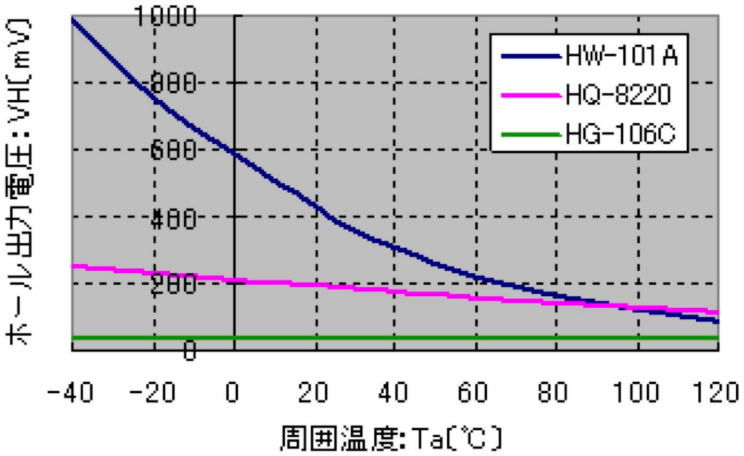

図 6.2: ホール素子の出力電圧の温度依存性.

図より、半導体の種類ごとで出力電圧の温度依存性が異なることが分かる。InSb は電子移動度が高いが温度依存性が大きく、GaAs は電子移動度は InSb は低いが温度依存性がなく、InAs はその中間の特徴を持つ。

またホール素子の特性の 1 つとして、オフセット電圧がある。これは、磁場がゼロの時に、ホール素子に電流を流したり電圧をかけたりするだけで生じる電圧である。この要因として、ホール素子の形成時の不均一性が考えられる。

6.3　ホール素子の校正試験

dADR 内の TES カロリメータ周辺の磁場強度を測定を行うため、磁気センサーであるホール素子を dADR に導入する。ホール素子は 表 6.1 にあるようにいくつか種類があるが、出力電圧の温度依存性が少ない GaAs の素子 (旭化成製の HG シリーズの素子) か、低温用の素子 (HGCT-3020) が候補となる。後者は校正済みの素子である。前者のホール素子には、旭化成製の HG-106A を採用した。この素子は校正されていないため校正試験を行った。また、HG-106A は 表 6.1 にある通り-40° C 以下の低温では動作が保証されていないため、校正と共に低温下での動作の確認も行った。そこで、室

温、液体窒素温度、液体ヘリウム温度の 3 つの温度域で校正を行い、校正関数を求めるとともに各温度での磁気感度を比較した。

6.3.1 実験目的

ホール素子 HG-106A の校正関数と、低温下 (液体窒素温度、液体ヘリウム温度) での磁場分解能の比較。

6.3.2 ホール素子及び測定機器

ホール素子は、旭化成製の HG-106A を用いた。ホール素子への入力電流源に KEITHLEY2400、出力電圧の読み取りに KEITHLEY2001、小型超伝導コイルへの入力電流源に KEITHLEY2400 を用いた。小型超伝導コイルの詳細は表 6.3、PROBE の測定感度は表 6.4 に記してある。

表 6.2: 測定機器

ホール素子	旭化成 GaAs Hall Element HG-106A (図 6.4)
小型超伝導コイル	NbTi 線 超伝導マグネット (図 6.6)
Gauss meter	LakeShore modek 421 Gauss meter
Gauss meter の PROBE	MMT-6J04-VH (図 6.8)
Keithley model 2001	デジタルマルチメータ
Keithley model 2400	1 チャンネル デジタルソースメーター (2 台)
ジャボ付け用配線のついた棒	-

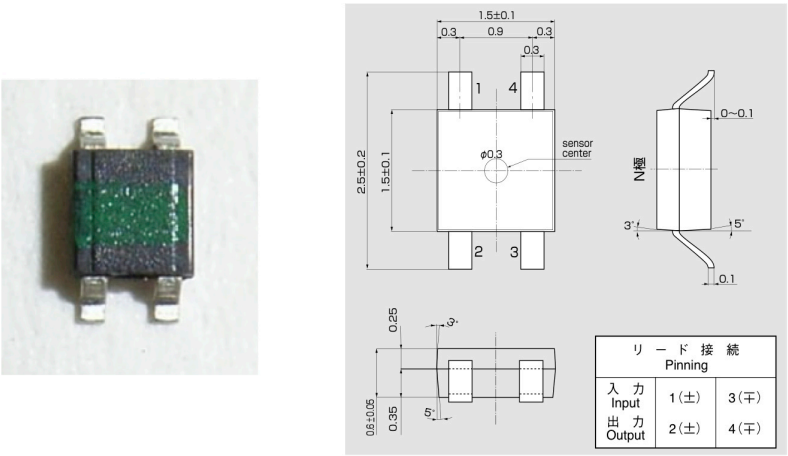

図 6.3: ホール素子 HG-106A

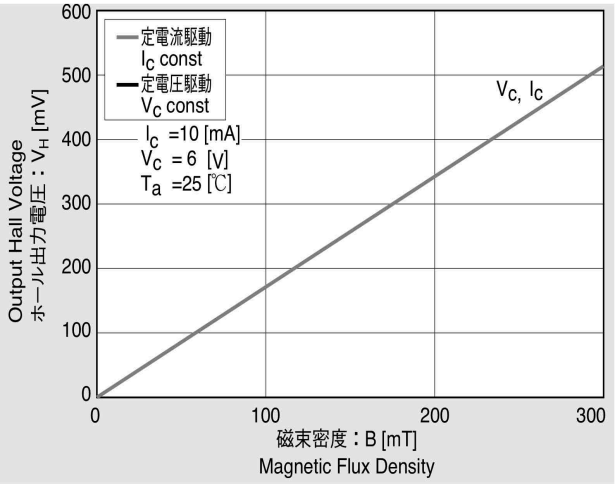

図 6.4: ホール素子 HG-106A の出力電圧と磁束密度の関係

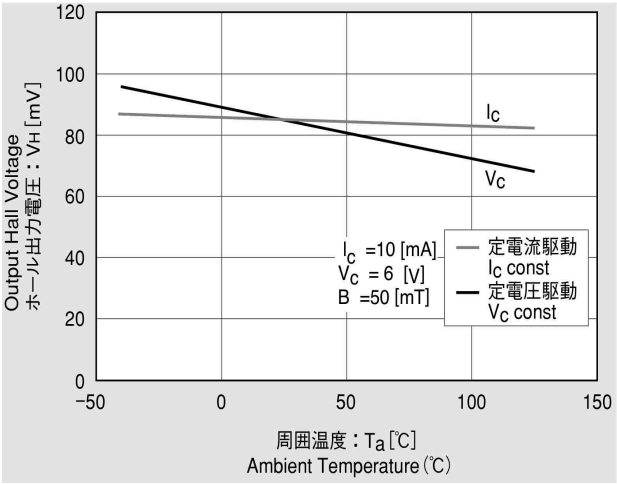

図 6.5: ホール素子 HG-106A の出力電圧の温度依存性

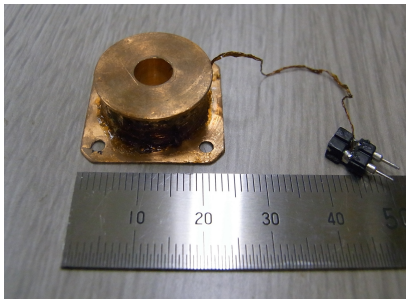

図 6.6: 小型超伝導コイル

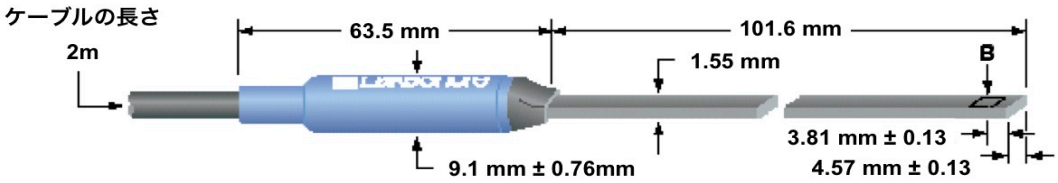

図 6.7: PROBE MMT-6J04-VH

表 6.3: 小型超伝導コイル

線材	NbTi 線	267.9 Ω (2500 巻き相当)
半径	内径/外径	3.2 mm / 10.0 mm

表 6.4: Gauss meter の測定感度 (PROBE: MMT-6J04-VH)

Range	Resolution without filter	Resolution with filter
3kG	0.0001kG	0.001kG
300 G	0.1 G	0.01 G
30 G	0.01 G	0.001 G

6.3.3 実験セットアップ

各素子の実験セットアップは、以下の図及び写真のようになる。各温度での実験セットアップは、図 6.9 - 6.11 である。LN_2 温度、及び LHe 温度では、ジャボ浸け棒用の棒の先にホール素子と小型コイルを取り付け、LN_2、LHe にジャボ浸けして校正試験を行った。ホール素子の固定方法は、まず、ホール素子をシール基盤にハンダ付けし、その周りにカプトンテープを被せる。次に、カプトンテープを小型コイルと作製した治具により挟んで固定する (図 6.12 参照)。最後にジャボ付け棒を作製した治具により小型コイルと固定する (図 6.13 参照)。室温、LN_2、LHe 温度において、ジャボ浸け棒にホール素子とコイルを固定した状態で校正試験を行った。

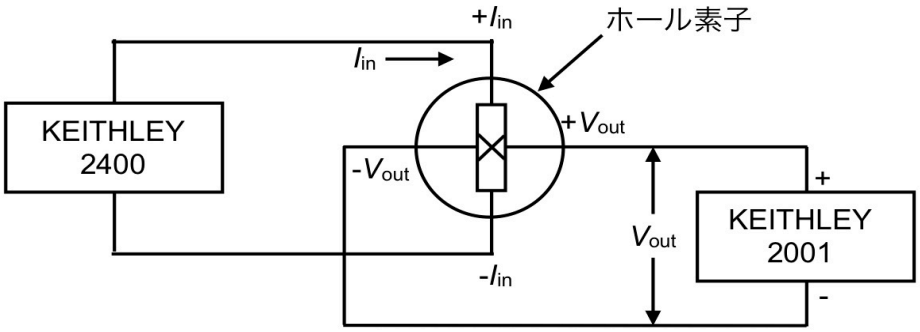

図 6.8: ホール素子と測定機器セットアップ

図 6.9: 室温での校正試験

図 6.10: LN_2 での校正試験

図 6.11: LHe 温度での校正試験

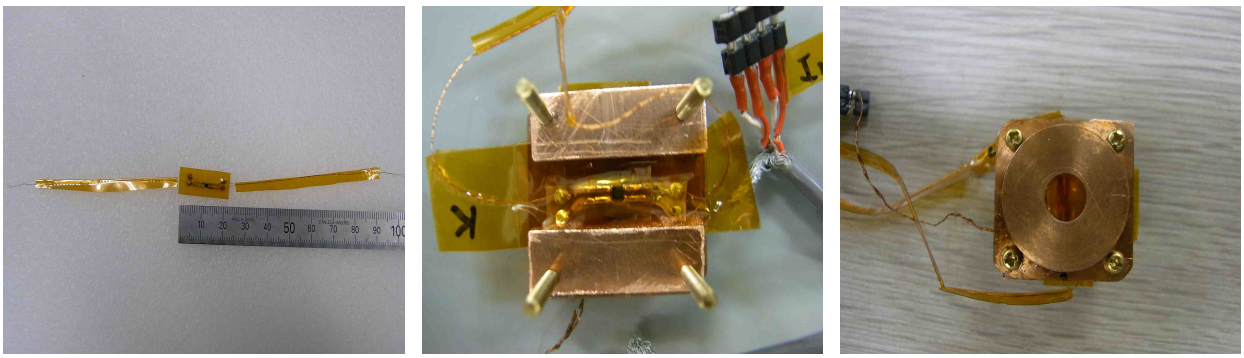

図 6.12: 小型コイルに固定したホール素子

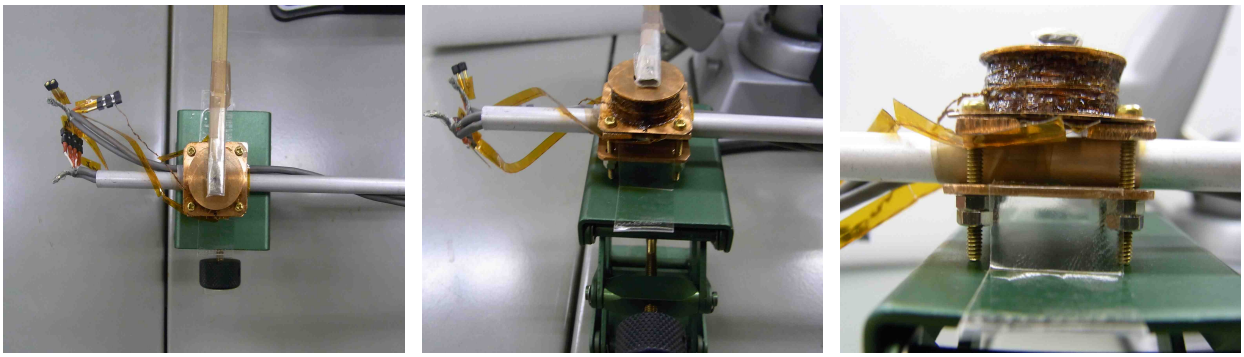

図 6.13: ジャボ浸け棒に固定したホール素子と小型コイル

6.3.4 実験方法

ホール素子の校正試験の方法を記す。始めに室温下でコイルの入力電流と生成磁場の関係 (図 6.14 - 6.16) を求め、この関係を元に室温、LN_2、LHe 温度での校正を行った。図中の Ic は、小型コイルに流す電流値を指す。縦軸がガウスメータの PROBE により測定した小型コイルの生成磁場 G、横軸が小型コイルに流す電流値 mA である。

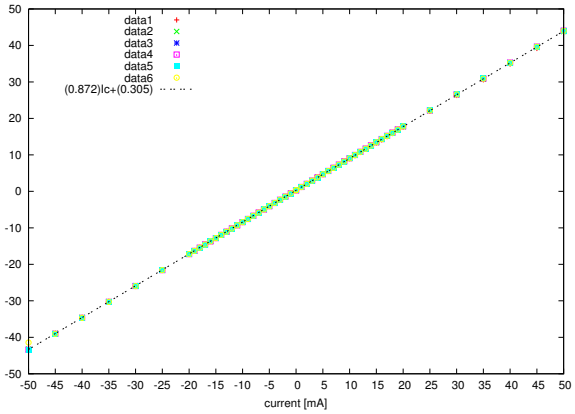

図 6.14: 素子 J の室温下で測定したコイルの入力電流と生成磁場の関係

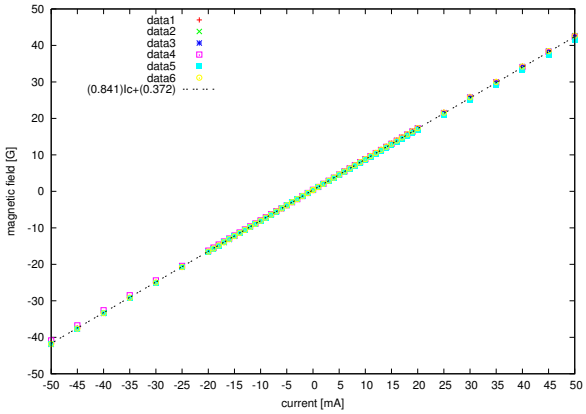

図 6.15: 素子 K の室温下で測定したコイルの入力電流と生成磁場の関係

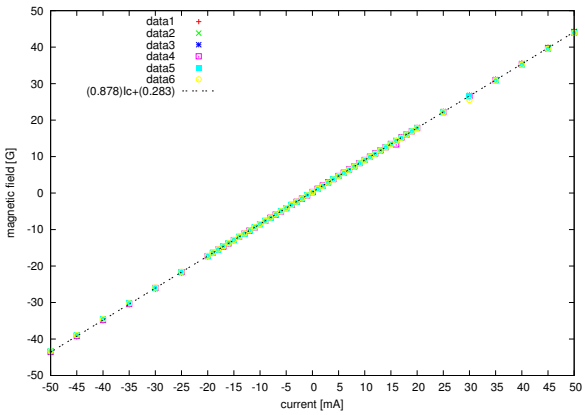

図 6.16: 素子 M の室温下で測定したコイルの入力電流と生成磁場の関係

6.3.5 実験結果

ホール素子の校正試験の結果を記す。小型コイルに流す最大電流は、室温、LN_2 温度では ±50mA、LHe 温度では ±1000mA とした。縦軸はホール素子の出力電圧 mV、横軸は、小型コイルの電流値から図 6.14 - 6.16 を用いて求めた小型コイルの生成磁場 G である。試験はそれぞれ 3 回ずつ行い、それぞれを 1 次関数で fitting している。また fitting した結果の平均を Average と表記している。

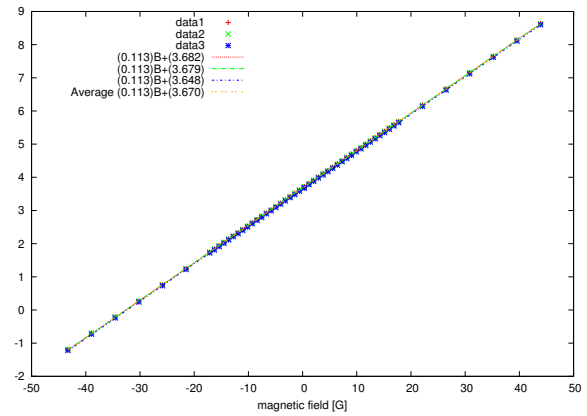

図 6.17: 素子 J の校正結果 (室温, I_{in}=5mA)

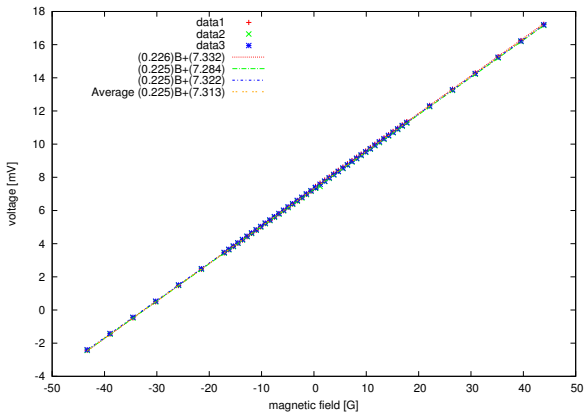

図 6.18: 素子 J の校正結果 (室温, I_{in}=10mA)

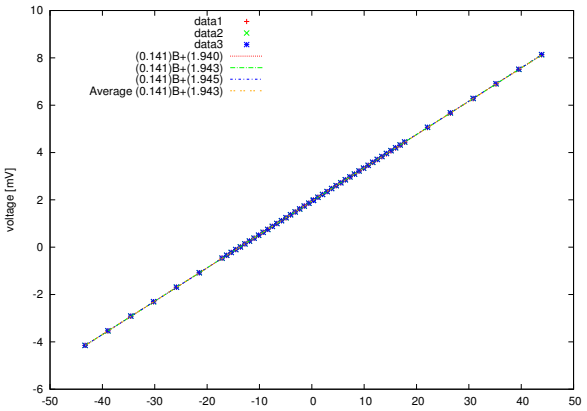

図 6.19: 素子 J の校正結果 (LN_2 温度, I_{in}=5mA)

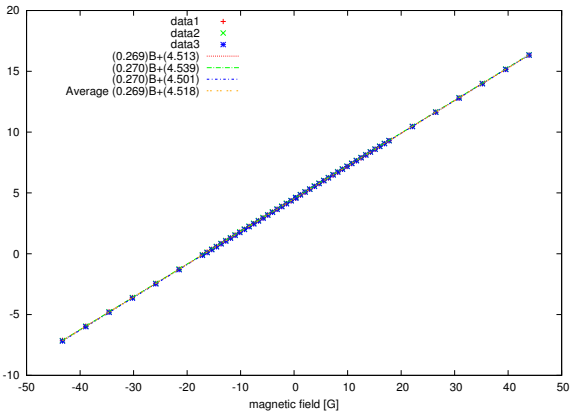

図 6.20: 素子 J の校正結果 (LN_2 温度, I_{in}=10mA)

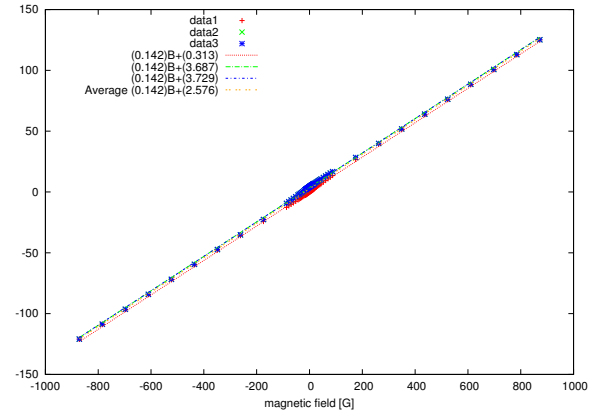

図 6.21: 素子 J の校正結果 (LHe 温度, I_{in}=5mA)

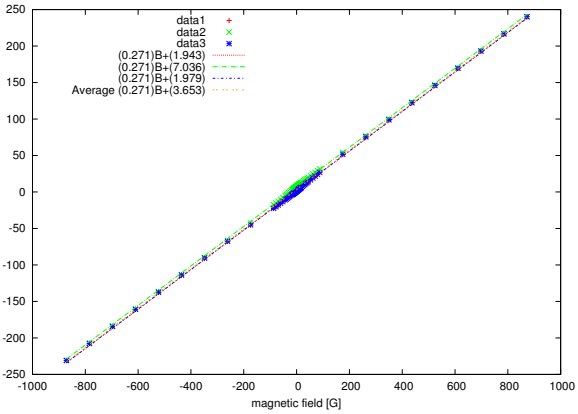

図 6.22: 素子 J の校正結果 (LHe 温度, I_{in}=10mA)

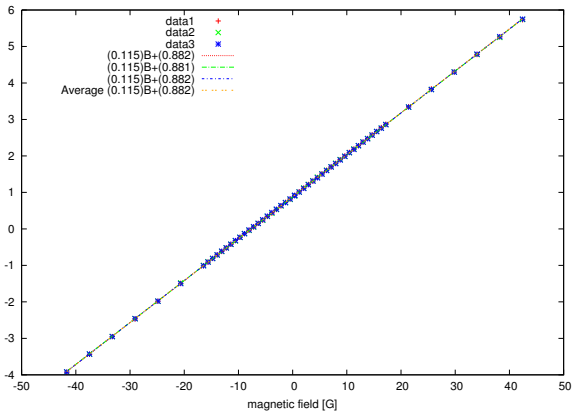

図 6.23: 素子 K の校正結果 (室温, I_{in}=5mA)

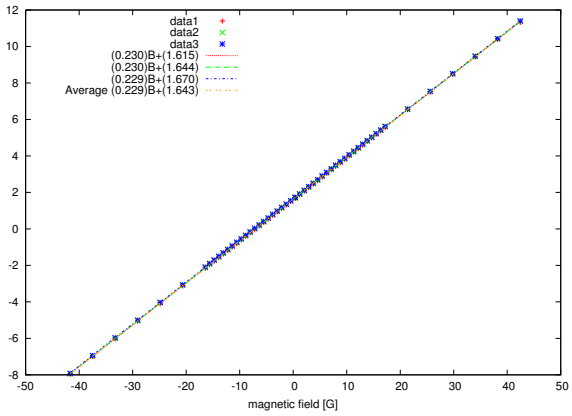

図 6.24: 素子 K の校正結果 (室温, I_{in}=10mA)

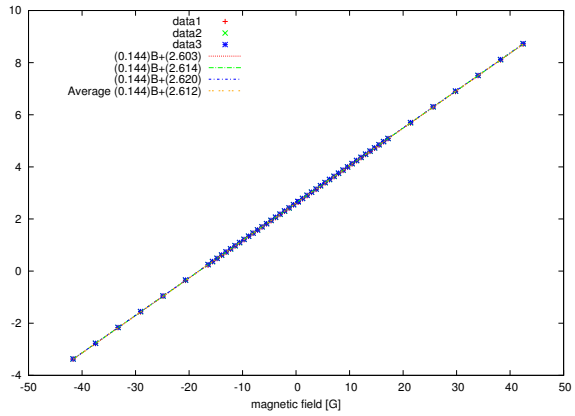

図 6.25: 素子 K の校正結果 (LN_2 温度, I_{in}=5mA)

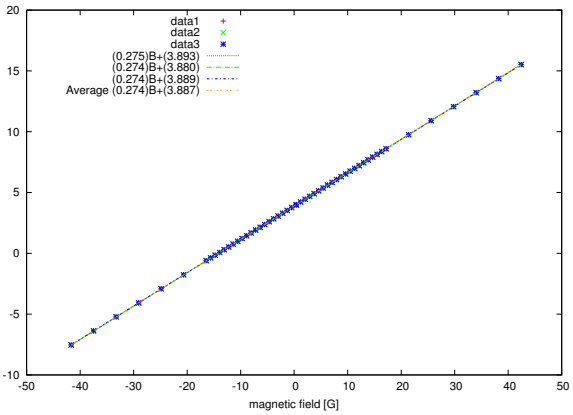

図 6.26: 素子 K の校正結果 (LN_2 温度, I_{in}=10mA)

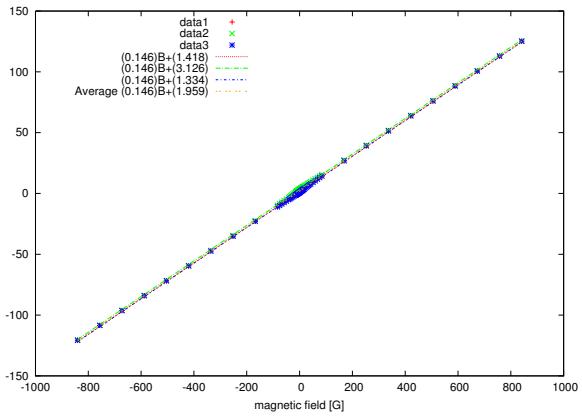

図 6.27: 素子 K の校正結果 (LHe 温度, I_{in}=5mA)

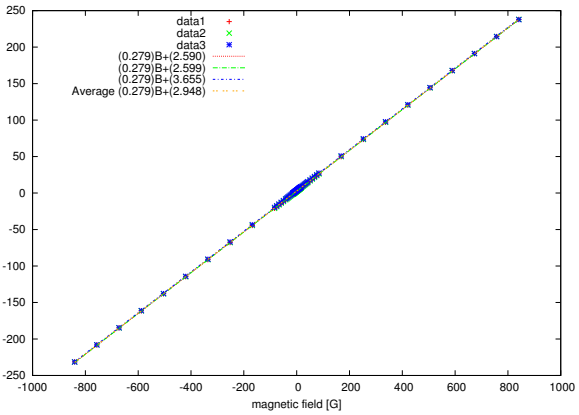

図 6.28: 素子 K の校正結果 (LHe 温度, I_{in}=10mA)

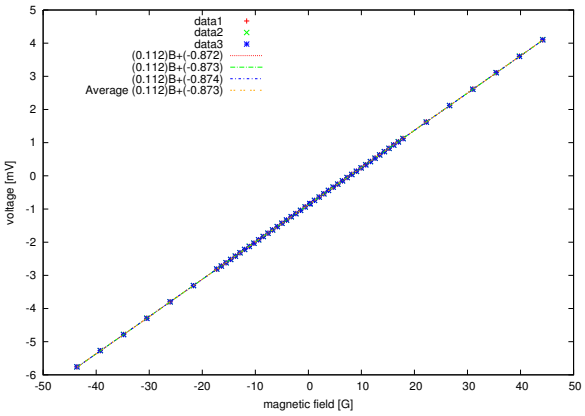

図 6.29: 素子 M の校正結果 (室温, I_{in}=5mA)

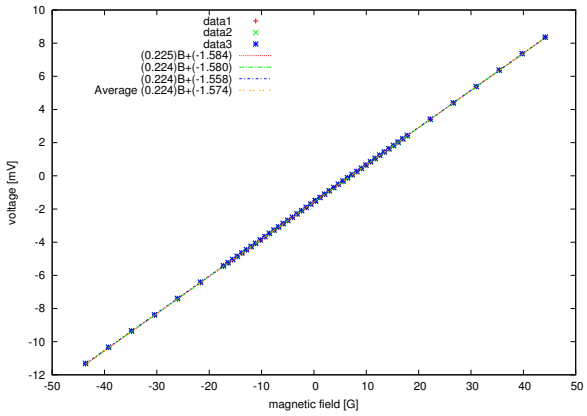

図 6.30: 素子 M の校正結果 (室温, I_{in}=10mA)

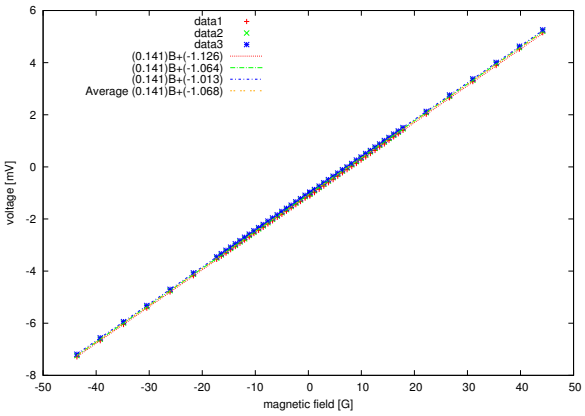

図 6.31: 素子 M の校正結果 (LN_2 温度, I_{in}=5mA)

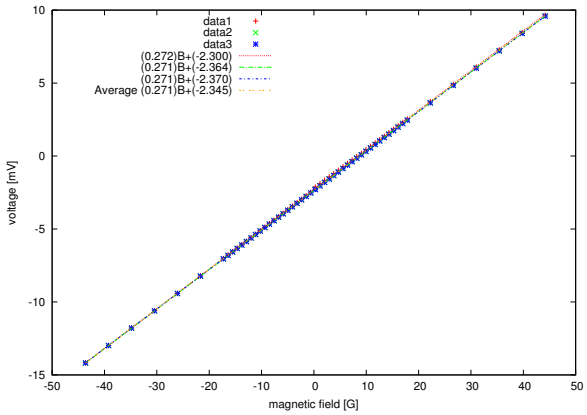

図 6.32: 素子 M の校正結果 (LN_2 温度, I_{in}=10mA)

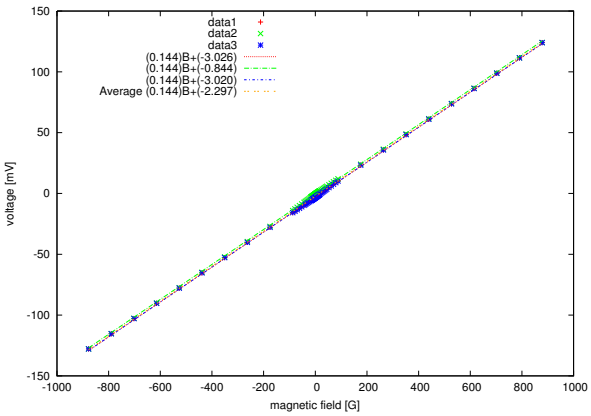

図 6.33: 素子 M の校正結果 (LHe 温度, I_{in}=5mA)

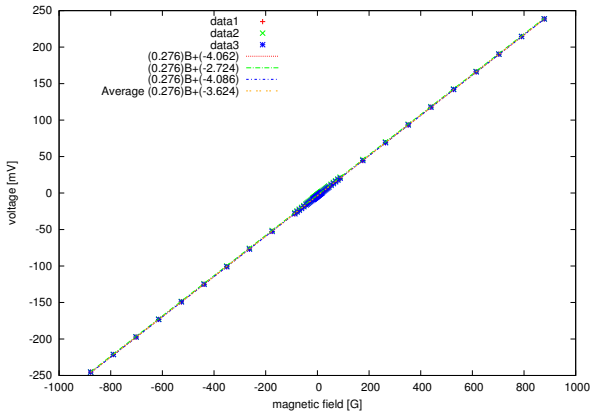

図 6.34: 素子 M の校正結果 (LHe 温度, I_{in}=10mA)

表 6.5: ホール素子の磁場感度

電流 $I_{\rm in}[mA]$	温度	素子 J [mV/kG]	素子 K [mV/kG]	素子 M [mV/kG]
5	室温	113	115	112
	LN_2 温度	141	144	141
	LHe 温度	142	146	144
10	室温	225	229	224
	LN_2 温度	269	274	271
	LHe 温度	271	279	276

表 6.5 には、校正試験で得られた各温度でのホール素子の磁気感度がまとめてある。この結果から、3 温度で最大 20% 程度のずれはあるものの、大きなずれではないと判断した。また、磁気感度の誤差を 表 6.6 にまとめた。ホール素子の出力電圧を KEITHLEY2001 で測定しており、その値を目視で確認してデータを取っているが、この電圧値の振れは小さい時で $\pm 0.01mV$、大きい時で $\pm 0.1mV$ であるため、多めに見積もって 1mV の振れとすると、1 mV を磁気感度で割ることで表のような誤差が求まる。ただし、この誤差以外に、ホール素子が CPA の真上に位置するかどうかという位置の不定性や、3 軸が完全に直交しているかどうかという方向の不定性があるため、より大きな誤差が存在する。表 6.6 の結果から、3 温度において誤差がほぼ一定であることが分かる。よって、磁気感度とその誤差を 3 温度で比較した結果から、ホール素子 HG-106A は液体ヘリウム温度下の動作に信頼性がある事を確認できた。ホール素子の候補として、旭化成製の HG-106A と低温用の HGCT-3020 の 2 つがあったが、表 6.1 と 表 6.5 を比較すると、HG-106A の磁気感度の方が磁気感度が高いことが分かる。よって、今回は HG-106A を磁場測定用の素子として採用した。

表 6.6: ホール素子の磁気感度の誤差

電流 $I_{\rm in}[mA]$	温度	素子 J [G]	素子 K [G]	素子 M [G]
5	室温	±8.84	±8.69	±8.92
	LN_2 温度	±8.77	±6.94	±7.09
	LHe 温度	±7.04	±6.84	±6.94
10	室温	±4.44	±4.36	±4.46
	LN_2 温度	±3.71	±3.64	±3.69
	LHe 温度	±3.69	±3.58	±3.62

6.4 dADR 内の磁場測定試験

ホール素子の校正試験から得られた校正関数を元に、GGG、CPA の断熱消磁における磁場測定を行った。ホール素子は、CPA の真上に固定し、3 軸方向に設置した。ホール素子に流す電流 $I_{\rm in}$ は、5mA より 10mA の方が磁気感度が高いため、10mA で磁場測定を行った。

6.4.1　実験目的

TES 周辺の磁場測定、SiFe shield の磁気遮蔽能力の評価。

6.4.2　実験方法

LHe 温度においてホール素子 (HG-106A) を用いた GGG、CPA の励消磁中の 3 軸磁場測定を行った。

6.4.3　実験セットアップ

実験セットアップは、図 6.35- 6.37 のようになる。今回のセットアップは、Detector stage を取り外し、magnet shield は SiFe のみとした。ホール素子を固定する銅部品を作製し、その銅部品にホール素子を市販の両面テープで固定した。

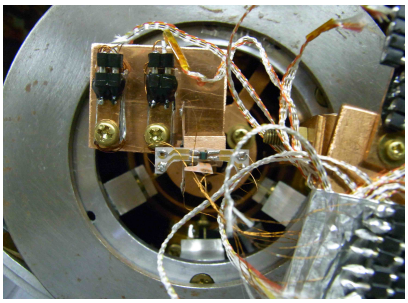

図 6.35: ホール素子 J. CPA 中心軸方向 (磁束方向).

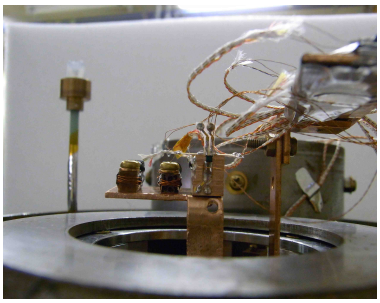

図 6.36: ホール素子 K. 磁束と垂直な方向.

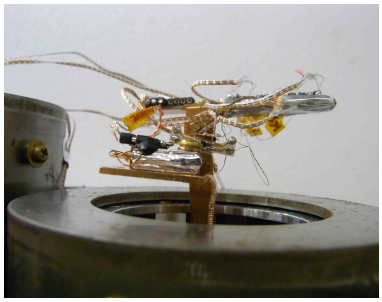

図 6.37: ホール素子 M. 磁束と垂直な方向.

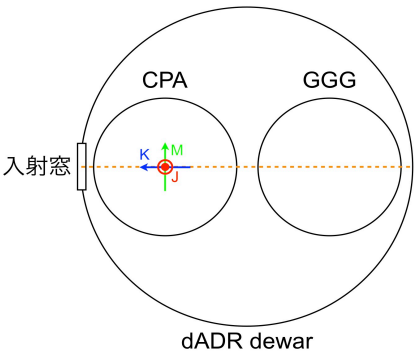

図 6.38: 3 軸方向の概略図.

6.4.4　実験結果

図 6.39 – 6.44 に校正前の結果、図 6.45 – 6.53 に校正後の結果を示す。ただし、I_{in} はホール素子に流す電流値である。校正試験については、次のようにホール素子の電圧を磁場に変換した。ホー

ル素子の電圧を V、磁場を B、ホール素子の磁気感度を a、磁場がゼロの時のホール素子の電圧を b とすると、次式が成り立つ。

$$V = \mathrm{a} \times \mathrm{B} + \mathrm{b} \tag{6.2}$$

測定から得られた定数 a の値は、表 **??**にまとめてある。上式を変形した以下の式を用いて、電圧から磁場への変換を行った。

$$B = \frac{V - b}{a} \tag{6.3}$$

校正後の 図 6.45 − 6.53 の結果から、CPA 励消磁の J 方向での磁場は 1000mA のところで曲線の折れ曲がりがあり、磁場強度が大きくなっていることが分かる。この結果は FEMM による磁場解析結果と比較すると、よく一致していることが分かる。ただし、1000mA 以上のところでは、解析結果の方が磁場が大きい結果となった。最大磁場到達時の TES の磁場強度に関しては、J 方向では GGG より CPA の時の方が約 10 倍強度が強く、K 方向では CPA より GGG の方が約 2 倍強度が強く、M 方向では CPA より GGG の方が約 3 倍強度が強いことが分かる。また、M 方向は、5 章の TES の RT 測定を行った際の TES に対して垂直な方向であるが、CPA の励磁前と消磁後で約 2G の差が生じることが分かった (表 6.7)。これは消磁後の残留磁場と考えられ得る。気になる点としては、GGG 励消磁の J 方向での磁場は、5000mA 以上で一定になっていることで、解析結果と振る舞いが異なっている。

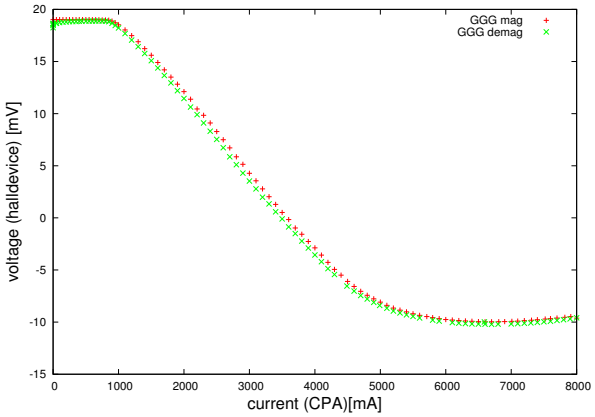

図 6.39: LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 J, I_{in}=10mA).

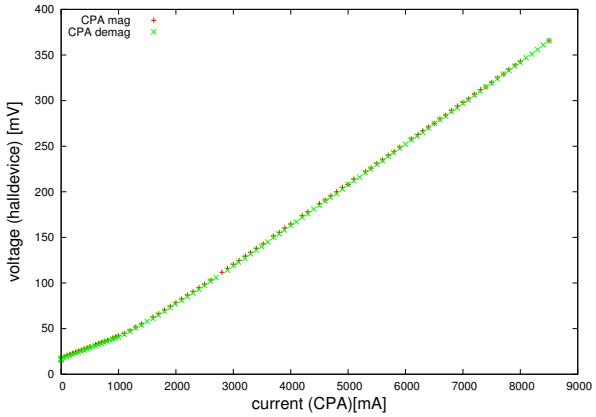

図 6.40: LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 J, I_{in}=10mA).

表 6.7: 残留磁場

測定方向	GGG[G]		CPA[G]	
	試験 1	試験 2	試験 1	試験 2
J	-1	-0.7	-3	0.3
K	-0.5	0.1	0.1	-0.1
M	53	-0.2	-1	0

以上の結果から、3 軸方向を足し合わせた場合で実測値と解析結果を比較した図が次のようになる。

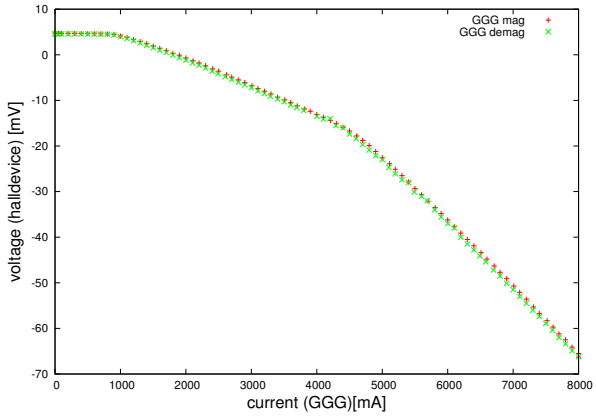

図 6.41: LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 K, I_{in}=10mA).

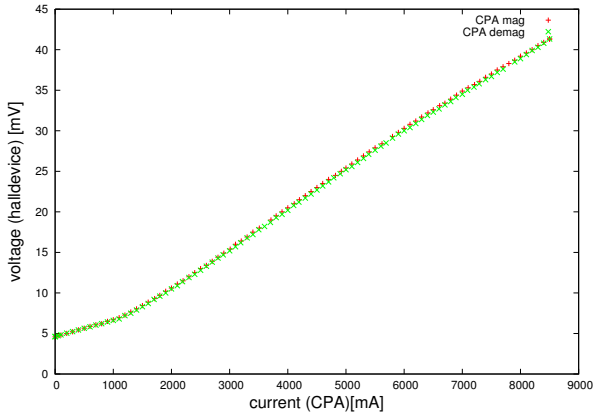

図 6.42: LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 K, I_{in}=10mA).

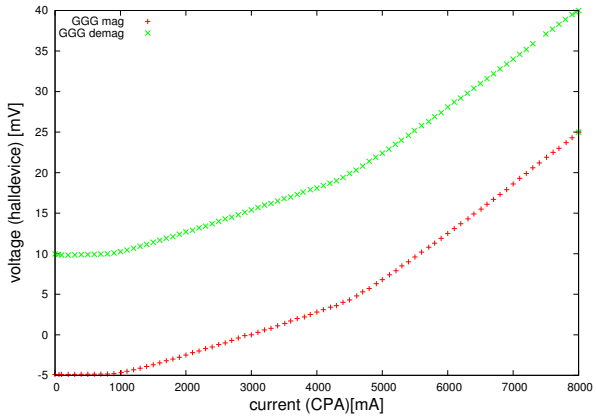

図 6.43: LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 M, I_{in}=10mA). 励消磁の offset のずれは, Max current の測定時に offset がずれたために生じた.

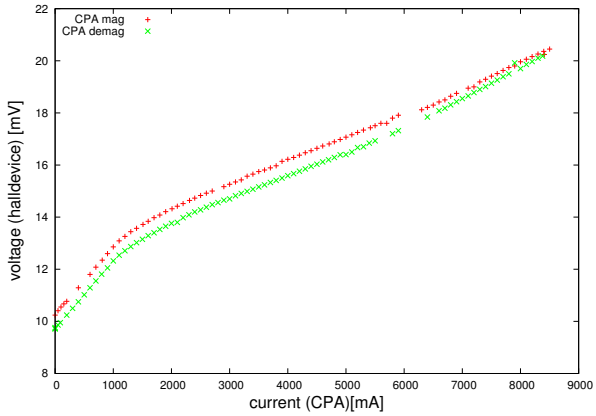

図 6.44: LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 M, I_{in}=10mA).

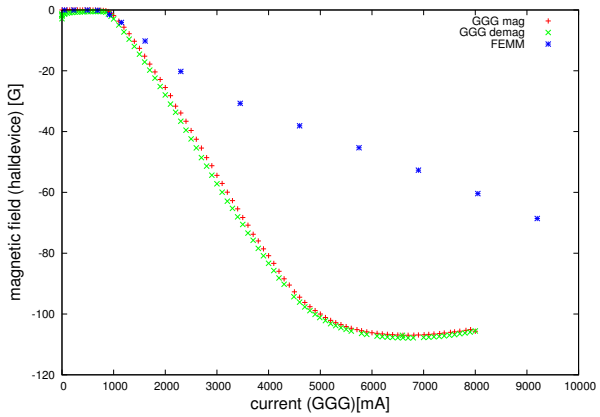

図 6.45: LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 J, I_{in}=10mA) と、FEMM による磁場解析結果 (青).

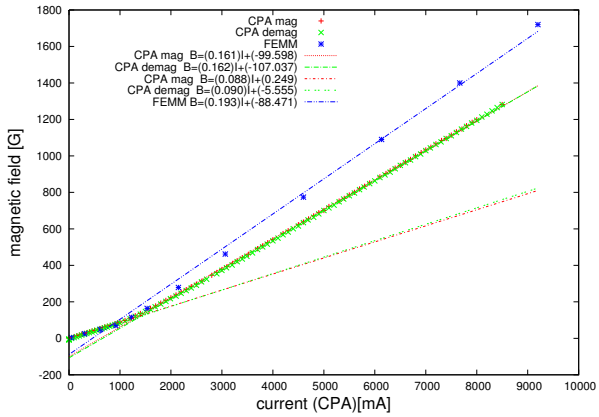

図 6.46: LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 J, I_{in}=10mA) と、FEMM による磁場解析結果 (青).

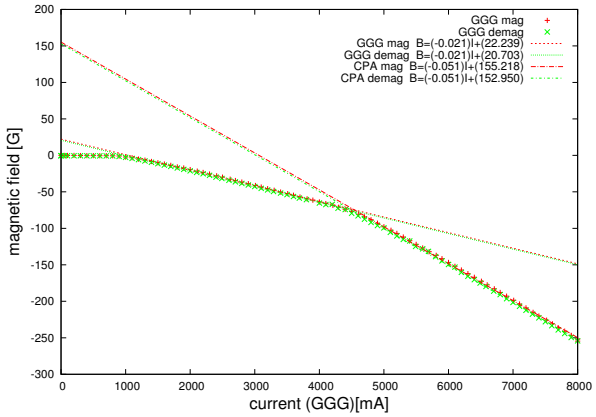

図 6.47: LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 K, I_{in}=10mA).

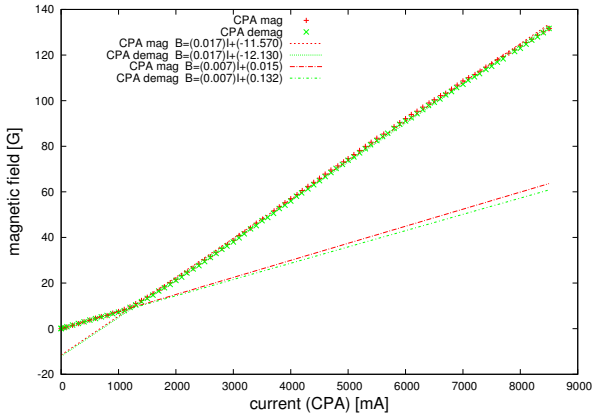

図 6.48: LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 K, I_{in}=10mA).

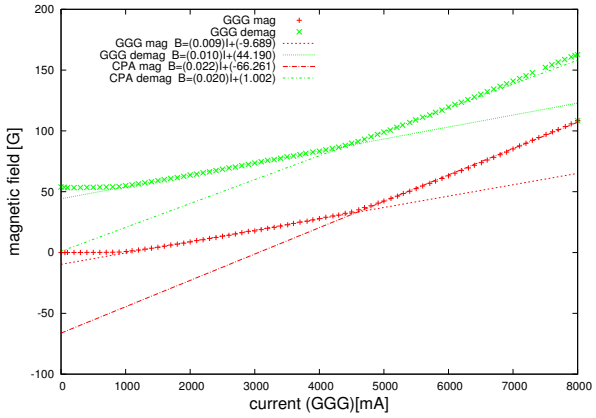

図 6.49: LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 M, I_{in}=10mA). 励消磁の offset のずれは, 最大磁場到達時に offset がずれたために生じた.

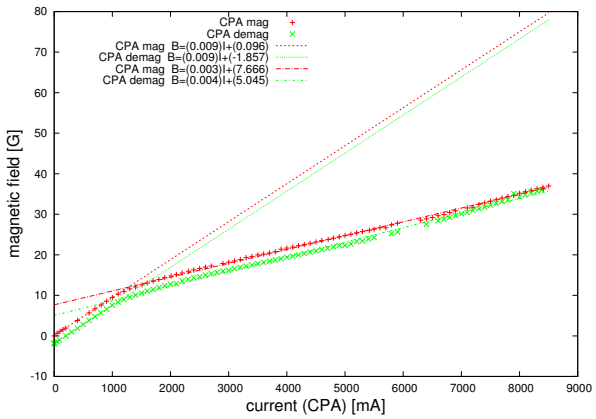

図 6.50: LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 M, I_{in}=10mA).

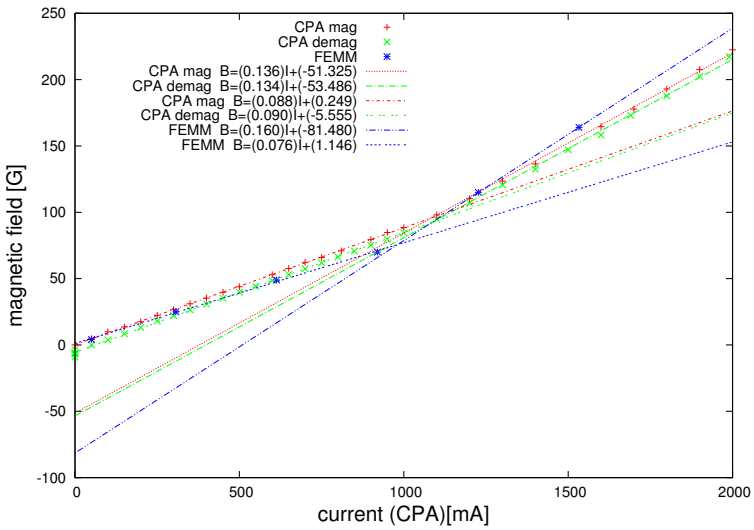

図 6.51: 図 6.46 の拡大図. LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 J, I_{in}=10mA) と、FEMM による磁場解析結果 (青).

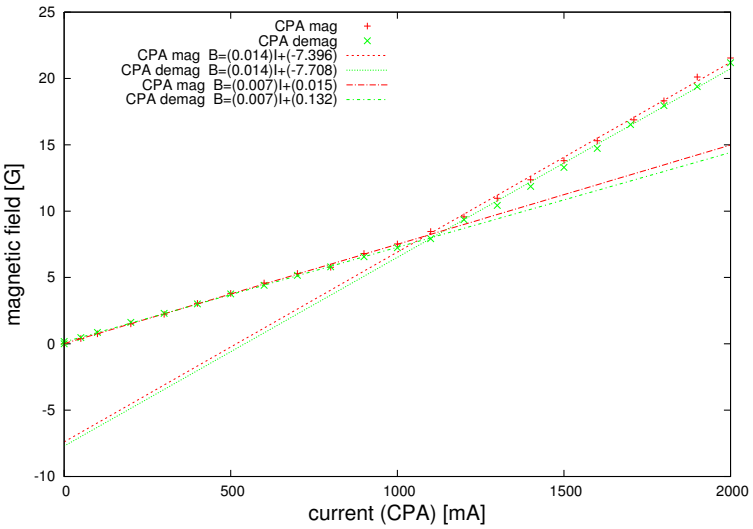

図 6.52: 図 6.48 の拡大図. LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 K, I_{in}=10mA).

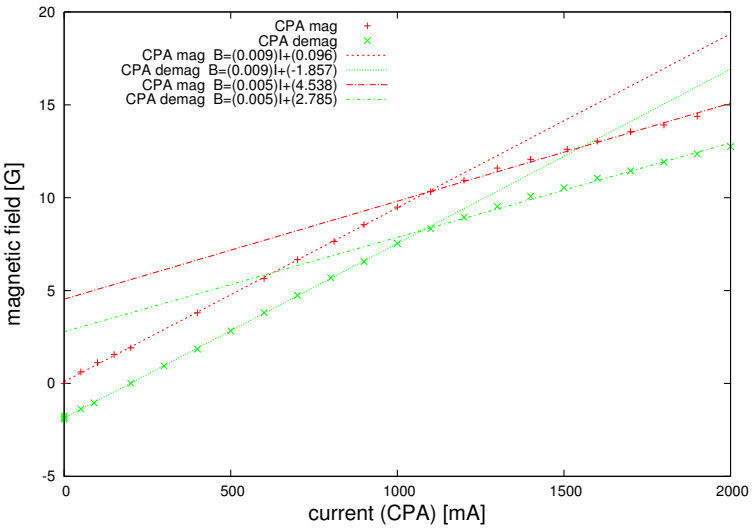

図 6.53: 図 6.49 の拡大図. LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 M, I_{in}=10mA).

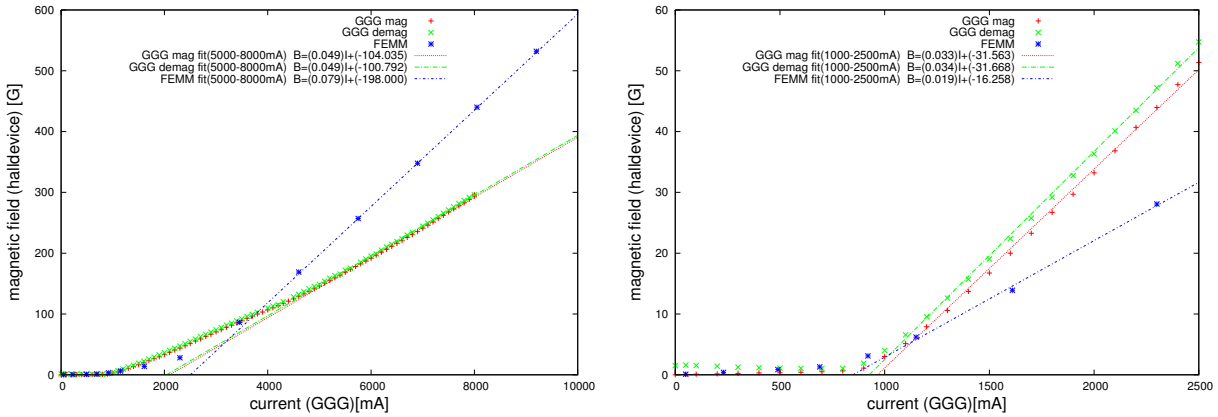

図 6.54: GGG 断熱消磁中の 3 軸方向を足し合わせた結果. 実測値と解析結果で比較. 右図は左図の拡大図.

6.5 dADR 内の磁場測定試験 2

次にホール素子の位置を図のような位置に設置して磁場測定を行った。前節の結果から、TES に垂直な方向である M 方向は、CPA 励消磁時より GGG 励消磁の方が TES 周辺への磁場の影響が大きいことが分かったので、TES に影響の少ない GGG から離れた場所に設置した。

6.5.1 目的

TES に最も磁場の影響が少ないと考えられる位置での磁場強度の測定。

6.5.2 セットアップ

ホール素子は、CPA 中心軸上から GGG と反対の方向へ 24mm ずらした位置に固定した。また、この試験とは関係がないが、写真下の Detector stage 内には RT 測定を行うための TES が設置してある。

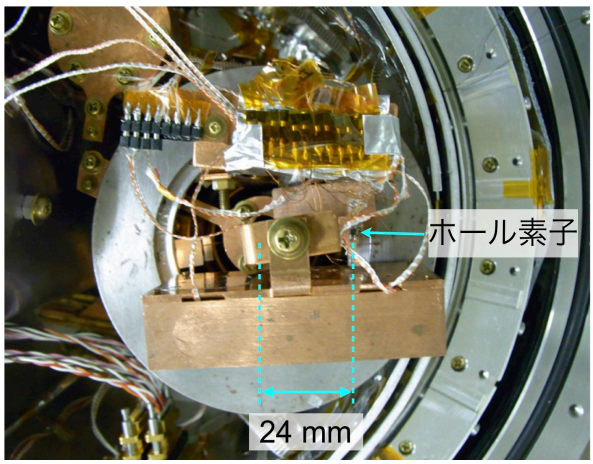

図 6.55: ホール素子のセットアップ. CPA 中心軸上から GGG と反対の方向へ 24[mm] ずらした位置。

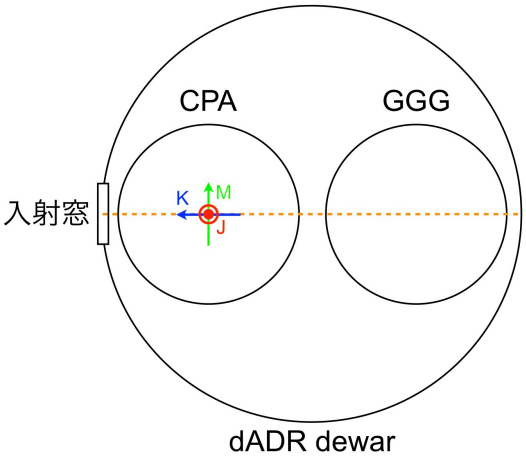

図 6.56: 3 軸方向の概略図.

6.5.3 実験結果

図 7.1 – 6.62 に校正前の結果、図 6.63 – 6.68 に校正後の結果を示す。ただし、I_{in} はホール素子に流す電流値である。また、磁場測定試験 1 と磁場測定試験 2(今回) との絶対値を比較した結果が以下の表のようになる。ただし、磁場方向の違いを明示するため、符号はつけたままである。また、M 方向では最大磁場到達時に測定値が変化したため消磁時の値を括弧内に記している。

ホール素子の位置をずらしたことで絶対値が大きくなったのは、GGG 励消磁時は J 方向、CPA 励消磁時は K 方向であり、その他は小さいという結果になった。

表 6.8: 7000[mA] 到達時の TES 周辺の磁場強度の絶対値

測定方向	GGG 最大磁場 [G]		CPA 最大磁場 [G]	
	試験 1	試験 2	試験 1	試験 2
J	-106	-125	1032	768
K	-198	-88	108	-414
M	85(140)	25	31	26

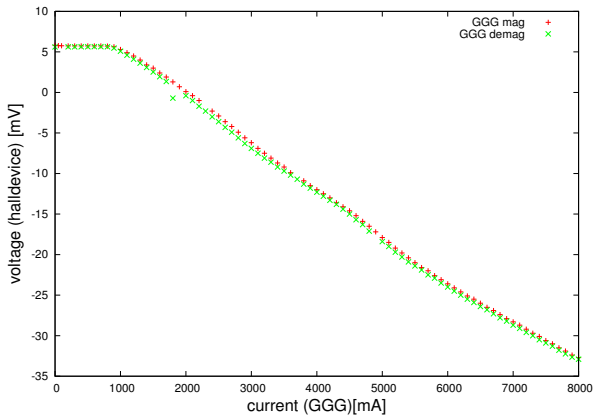

図 6.57: LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 J, I_{in}=10mA).

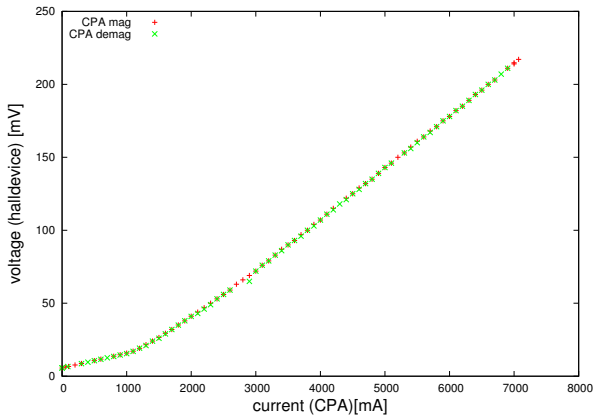

図 6.58: LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 J, I_{in}=10mA).

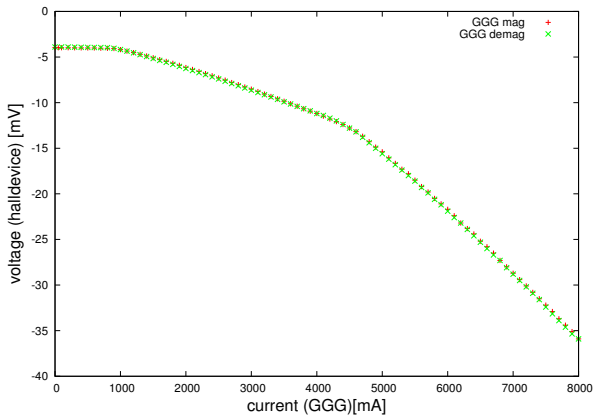

図 6.59: LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 K, I_{in}=10mA).

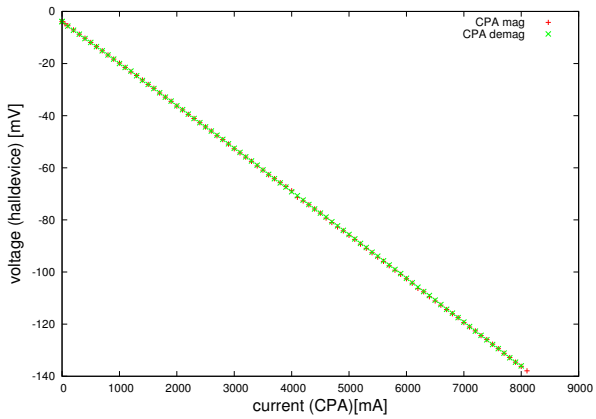

図 6.60: LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 K, I_{in}=10mA).

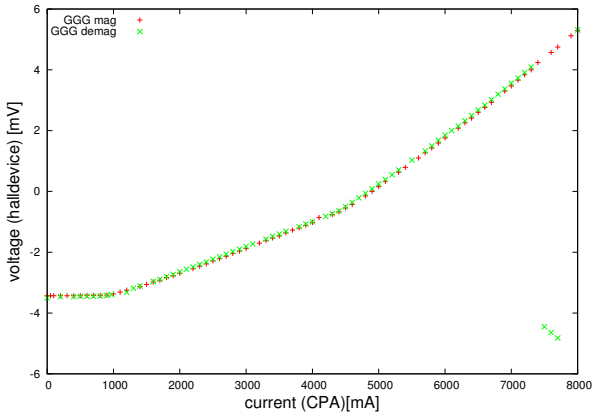

図 6.61: LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 M, I_{in}=10mA). 励消磁の offset のずれは, Max current の測定時に offset がずれたために生じた.

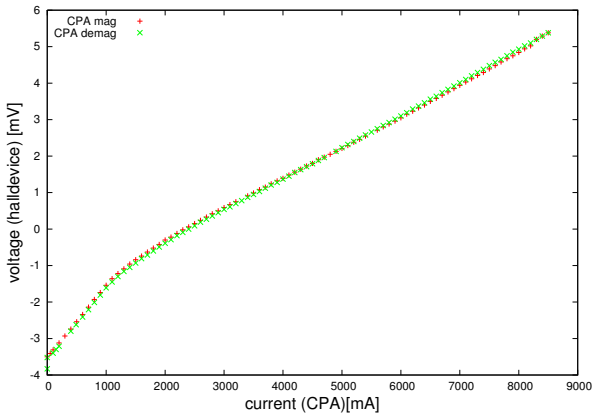

図 6.62: LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子の電圧の関係 (素子 M, I_{in}=10mA).

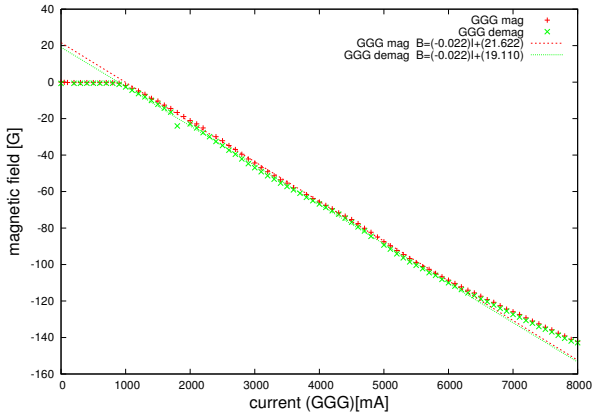

図 6.63: LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 J, I_{in}=10mA).

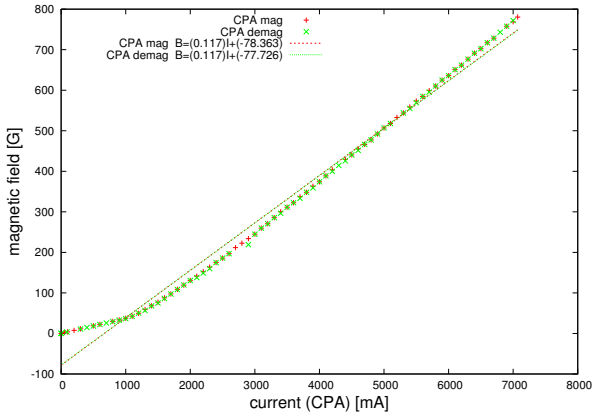

図 6.64: LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 J, I_{in}=10mA) と、FEMM による磁場解析結果 (青).

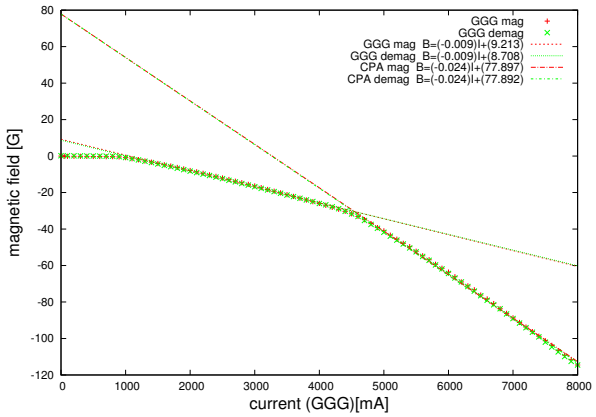

図 6.65: LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 K, I_{in}=10mA).

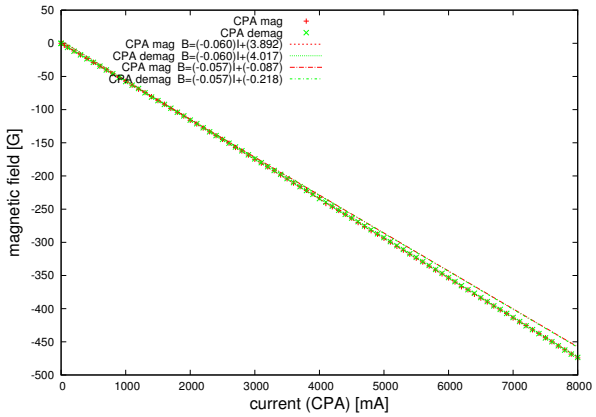

図 6.66: LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 K, I_{in}=10mA).

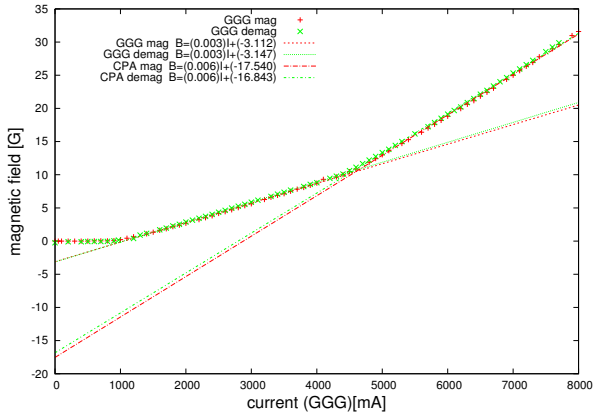

図 6.67: LHe 温度での GGG マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 M, I_{in}=10mA). 励消磁の offset のずれは, 最大磁場到達時に offset がずれたために生じた.

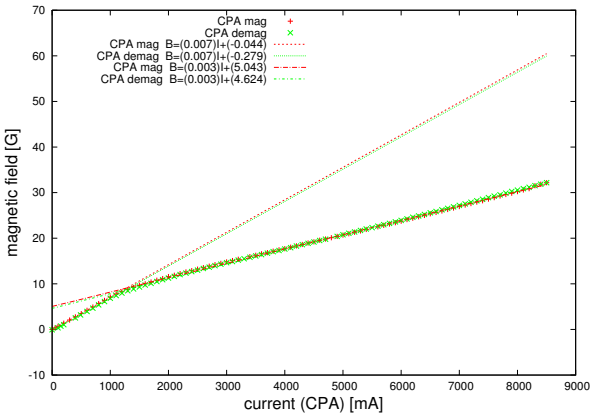

図 6.68: LHe 温度での CPA マグネットコイルの電流とホール素子により測定した磁場の関係 (素子 M, I_{in}=10mA).

第7章　まとめ

本修論の結果は次のようになる。dADR に AGGHS を導入し、GGG、CPA の 2 段での冷却に成功した。冷却性能は、最低到達温度が 45mK、TES 動作温度 (100 mK) の保持時間が 2.6 時間、LHe が消失するまでの保持時間は 48 時間程度であることを確認している。続いて、TES の抵抗 R と温度 T による変化の測定 (RT 測定)、SQUID の動作試験、noise の評価を行った。SQUID は Parmalloy と Pb で磁気遮蔽を行い、4.2K ステージ上の磁場の影響の少ない場所に設置することで、正常に動作することを確認した。ただし、white noise が希釈冷凍機に設置した場合と比較して約 2 倍、2kHz 以下で noise の増加が見られ、改善が必要である。TES の性能は磁場により劣化するため、TES 周辺を高透磁率の SiFe や Cryoperm、超伝導体の Pb、Al 等で磁気遮蔽を行ったが、現状では 45mK まで下げても超伝導転移しない結果となった。TES の抵抗値が一定値 (97mΩ) まで下がる時の RT の振る舞いについては、0.8K と 0.2K で抵抗が下がっているのが見えている。TES が転移しない原因として、TES の劣化、もしくは磁場の影響が考えられるが、希釈冷凍機で TES を冷却すると超伝導転移することが分かったため、ホール素子により周辺の磁場測定を行った。低温でのホール素子の感度は液体ヘリウム中で小型超伝導コイルにより校正することで確認した。これを用いて磁気シールドを SIFe のみとした場合の TES 周辺の磁場を測定したところ約 2G という結果が得られた。本 TES 素子は希釈冷凍機で 3G まで超伝導転移した実績があるため、測定された磁場と磁気シールドの効果を考えると転移するはずである。

本章では、各測定の考察、TES が超伝導転移しない原因についての考察、そして今後の展望について記す。

7.1　TES の RT 測定結果の考察

TES(SII182) の RT 測定の結果から $0.8 - 0.6$ K で抵抗が下がっていることを確認出来るが、これは TES の配線、及びボンディングワイヤーに用いている Al の転移が見えていると考えられる。また、0.2 K 付近で転移が見られるが、TES の Ti の転移かどうかはこの結果からでは特定は難しいと考えられる。RT 測定に用いた素子 SII182、SII139 は磁場を加えた時の動作実績のある素子 (5) で、SII182 に関しては 3[G] まで動作実績がある。実際に TES を動作させる際は、dADR は 100mK 前後で温度制御を行うため、その際に磁場が CPA 中心で 2300[G] 程度となるが、Cryoperm、FEMM の磁場解析結果

7.2　ホール素子による磁場測定結果の考察

7.2.1　CPA 励消磁時の 1000[mA] の折れ曲がりについて

測定結果から、ソレノイドコイルが生成する磁場とホール素子の位置での磁場が非線形であることが分かる。ここでは図 6.46 の 1000mA でのグラフの折れ曲がりについて考察する。
SiFe shield は高透磁率なため、ソレノイドコイルの半径より内側の磁束密度と SiFe 内部の磁束密度が同じであることを仮定する (図 7.1 参照)。

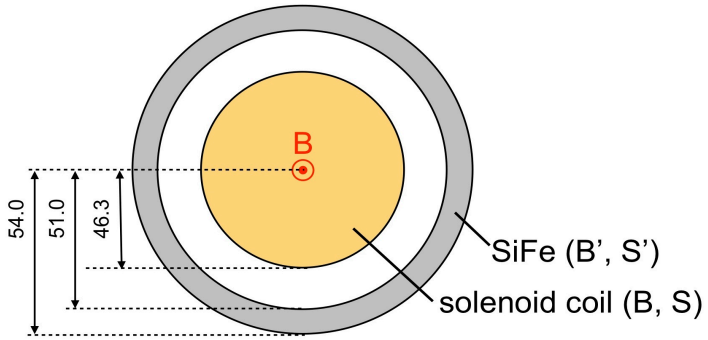

図 7.1: CPA のソレノイドコイルと SiFe shield.

図 7.1 のように、磁束が通るソレノイドコイルの面積を S、中心の磁束密度を B、磁束が通る SiFe の面積を S'、磁束密度を B' とする。それぞれの磁束は、BS、B'S' と表せるので、$BS = B'S'$ が成り立つと仮定すると、$B' = \frac{BS}{S'}$ より B' が求まる。以下ではこの計算方法を元に、ソレノイドコイルに流す電流値に対する B' を求めた。ただし、図 7.1 の寸法から $S = 2144\pi[\mathrm{mm}^2]$、$S' = 315\pi[\mathrm{mm}^2]$ の値を計算に用いる。

表 7.1: ソレノイドコイルの電流値と SiFe 内の磁束密度の関係

ソレノイドコイルの電流値 [mA]	ソレノイドコイル中心の磁束密度 B [Tesla]	SiFe 内の磁束密度 B' [Tesla]
900	0.29	1.99
1000	0.32	2.22
1100	0.35	2.44
8500	2.77	18.91

表 7.2: Fe と SiFe の磁性

	比透磁率	飽和磁束密度 [Tesla]
Fe	5000	2.15
SiFe	7000	1.97

図 6.46 の 1000mA の時、SiFe 内の磁束密度は表 7.1 より 2.22Tesla である。これは、表 7.2 より Fe もしくは SiFe の飽和磁束密度に近い値である。よって表 7.1 及び表 7.2 の値が正しいことを仮定すると、CPA ソレノイドコイルに流す電流値が 1000mA の時に SiFe 内の磁束密度が飽和磁束密度に達したため、磁気遮蔽能力が落ちて、1000mA 以降はホール素子の位置での磁場強度が大きくなったと考えられる。

7.2.2 ホール素子による実測値と磁場解析による予想値との比較

dADR の磁気遮蔽設計は FEMM を用いた磁場解析を元に行っているが、この解析結果がどこまで正しいか、特に磁気シールドの遮蔽精度についてはこれまで検証されていない。そこで今回、シミュレーションの精度を検証するため、解析結果と実測値の比較を行った。図 7.2.2、図 7.2.2 は CPA の励消磁時の TES 周辺の磁場強度で、図 7.2.2、図 7.2.2 は GGG の励消磁時の TES 周辺の磁場強度である。

拡大した 図 7.2.2 を見ると曲線の折れ曲がり位置が 1000[mA] でほぼ一致することが分かった。

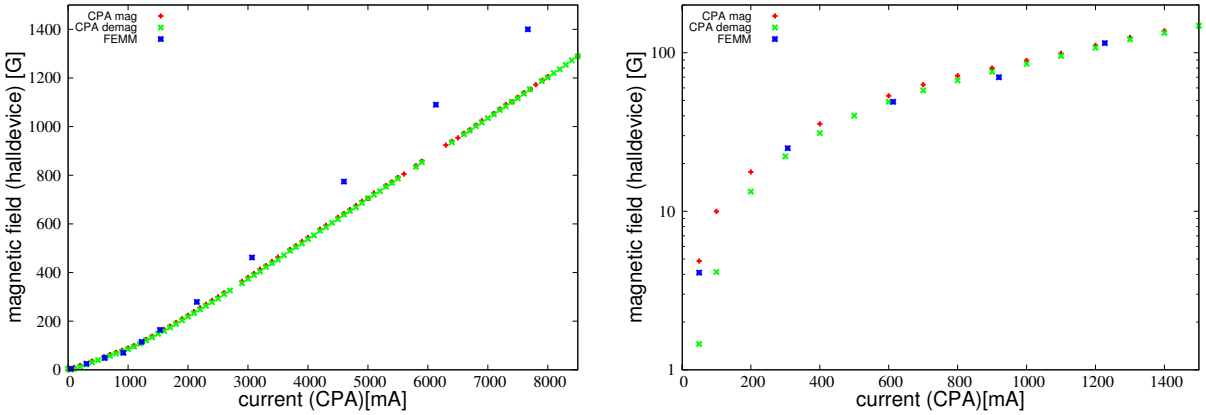

図 7.2: CPA 断熱消磁中の 3 軸方向を足し合わせた結果と FEMM による予想値. 右図は左図の拡大図.

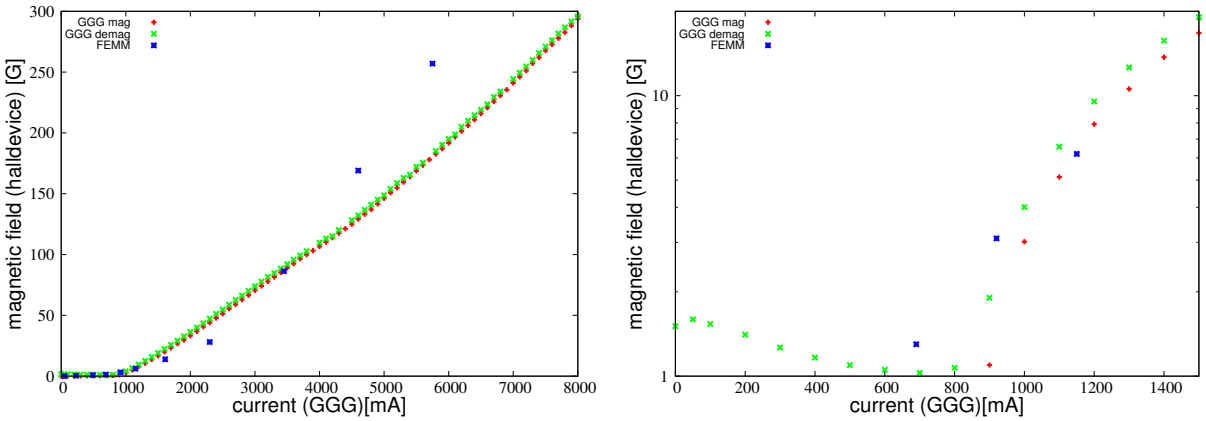

図 7.3: GGG 断熱消磁中の 3 軸方向を足し合わせた結果と FEMM による予想値. 右図は左図の拡大図.

ただし、図 7.2.2 を見ると曲線の形状が異なっていることが分かる。この違いについて検証する。現在使用している超伝導マグネットコイルは、ボア半径や外径、コイル長、最大磁場の仕様は既知であるが、巻数/単位コイル長 (N) などは公開されておらす未知であるため、FEMM による解析では N は推定値を用いている。この N の不定性が絶対値に影響すると考えられる。そこで、最大磁場 (8000mA) 到達時の実測値と絶対値が一致するように 3 軸方向を足し合わせた解析結果を 0.68 倍にして、振る舞いを比較した。以上より、曲線の形状が異なることが分かる。よって、N の不定性が問題ではなく、SiFe の磁気遮蔽特性が解析のモデルと実際で異なると言える。

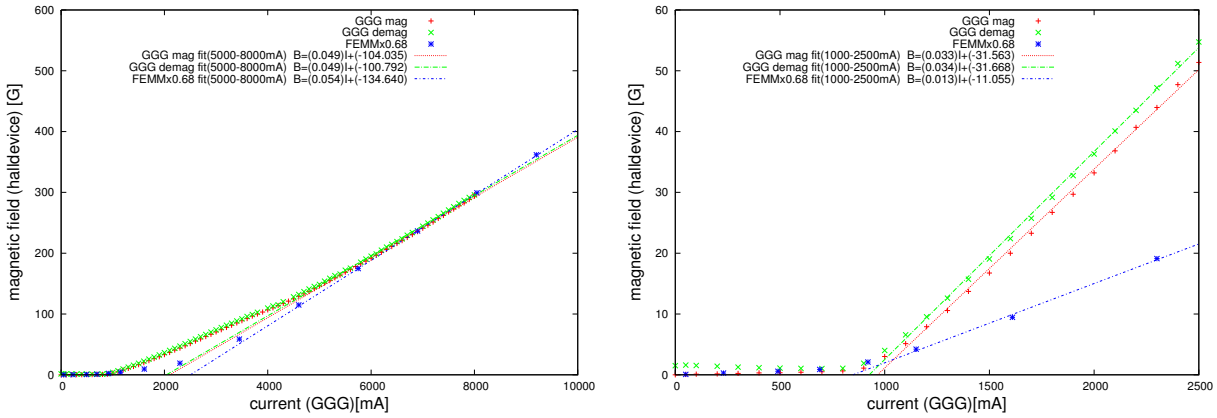

図 7.4: GGG 断熱消磁中の 3 軸方向を足し合わせた結果. 実測値と解析結果で比較. 右図は左図の拡大図. ただし, 解析結果の絶対値は最大電流 8000[mA] 時の実測値の絶対値に合わせるため 0.68 倍にする補正をしている。

7.3　TES が転移しない原因について

7.3.1　TES が転移温度に到達していることの確認

TES が転移温度に達していなかった場合、当然転移しないことになる。このことについて考察する。TES の温度は、TES と同じ銅板に設置してある温度計で読んでおり、TES と接触しないように隣接して設置している。ここで TES と温度計の温度差が生じる要因として、その間の熱伝導度が考えられるが、45mK まで冷えた状態で 50mK 以上の温度差が生じることは考えにくい。また、温度計には Lake Shore 社の RX102-A を用いているが、誤差は 1.4K で ±16mK であるので、45mK まで表示されていることから、この誤差により転移温度に達することは考えられない。また、dADR の冷却能力から考えて 100mK 以下にまで冷えていると言える。よって、温度計と dADR が両方壊れていない限り、TES は転移温度に達していると言える。

7.3.2　TES の劣化

3[G] が TES に垂直に貫く磁場環境で動作実績のある TES を用いて RT 測定を行ったが、その測定から 3 年以上経過していることもあり、TES が磁場に弱くなっている可能性がある。2010 年から 2011 年 1 月にかけて dADR で RT 測定を行い、TES 周辺に磁気シールドを導入しても超伝導転移しないことから、2011 年 1 月に希釈冷凍機で RT 測定をしたところ、超伝導転移を確認した。よって、TES が超伝導転移することは分かったが、磁場の耐性については評価出来ていない。

7.3.3　磁場の漏れ込み

磁気シールドを TES 周辺に導入しても、配線口から磁場が漏れ込んでいる可能性がある。CPA 消磁後の残留磁場が 4G であったことから、

よって、磁場の漏れ込みが超伝導転移しない原因にはならないと言える。

7.3.4 TES(SII182) が元々磁場に弱い可能性

TES(SII182) を使用する前提として、磁場耐性があることであったが、もし元々磁場に弱かった場合、超伝導転移しないことが考えられる。金沢大学の ADR では SII210 は転移したものの、SII182 は転移しなかった。SII210 に関しては ADR と dADR のセットアップの違いが原因と考えられるが、SII182 に関しては、超伝導転移しない原因が磁場の場合、SII210 よりも磁場耐性がないということになる。すなわち、SII182 は磁場に弱いということになる。しかし、*Ishisaki et al.*2007 の結果と矛盾するという問題がある。

7.3.5 冷却手順による磁気シールドの有効性

磁気シールドには高透磁率物質、及び超伝導体を用いており、前者を外側、後者を内側にして Detector Box を覆うセットアップを行ってきた。ただし高透磁率及び超伝導体の磁気シールドについては、dADR の冷却手順によっては磁気遮蔽されないことが考え得る。第一種超伝導体は超伝導状態になることで完全に磁場が透過しなくなる。よって、磁気シールドが有効に働く条件は、1 つ目は高透磁率の物質で囲んで低磁場環境を作ること、2 つ目は低磁場環境で超伝導状態にすること、3 つ目は断熱消磁中に臨界磁場及び転移温度以下を保持することが挙げられる。もし、サイクル中に臨界磁場を超えて常伝導状態になり、磁場が TES 周辺で下がり切っていない時に転移温度に達した場合、超伝導体の磁気シールド内に磁場が閉じ込められてしまう。この評価については実際にホール素子を TES と同じ磁気シールド内に設置して、磁場測定を行う必要がある。

7.4 今後の展望

本修論の結果及び考察から、課題は以下のようになる。

- 超伝導転移の原因の追及
  - TES と同様に磁気シールド内にホール素子を設置して磁場測定
  - シミュレーションを元に SiFe 以外の磁気シールドの磁気遮蔽能力の評価と磁気シールドの最適化
  - Detector stage にコイルを設置し、能動的に磁場をキャンセルする機構を整備する
  - TES(SII182) の磁場耐性を希釈冷凍機により再度測定
  - 別の TES で RT 測定
- TES の超伝導転移を確認後、X 線を照射してエネルギー分解能の評価
- dADR と多価イオン衝突装置の接続を確認後、CX の観測

謝辞

この2年間、研究に対するアドバイスを下さった皆様、心から感謝します。研究室に来たばかりの頃は、研究だけでなく本学のことも分からない私を皆が暖かく迎えて下さり、また、研究が上手く行かなくて悩んでいる時も励ましの言葉を下さり、その何気ない気遣いのできる人ばかりで、とても大人な方が多いという印象を受けてきました。ここに拙い文章ではありますが、ここに感謝の思いを込め、文章にまとめさせて頂きます。

大橋先生は、いつも学生に対して気を配って下さって、研究の相談相手になって下さりました。相談する中で、研究に対して見直すべきことや、改善した方が良いことに気付かせて頂きました。論文紹介や研究について質問しに行った時も、忙しい中、忙しい表情も見せずに時間を作って下さり、真摯に対応して下さいました。しかし、優しさだけでなく、その中に威厳があり、科学者としてだけでなく、人としてとても尊敬できる先生でした。

石崎先生は、私の研究に最も関わってくださった先生であり、多くのご迷惑をおかけしたことと思います。研究の事で私が電話をすると、忙しい中でもいつも真摯に対応して下さりました。基礎的な物理についても、私が分からない時は丁寧に教えて下さり、アドバイスをして下さりました。特にLTDの論文を執筆する際は、改訂のために多くの時間を費やして下さいました。また、本論文を見て頂くために、昨年の10月頃から毎週打ち合わせを開いて下さり、とても助かりました。

江副先生は、学会の発表資料の作り方や論文の書き方について、自分の研究のことだけ主張するのではなく先行研究についても触れる等、表現の公平さが大切であることや、まとめ方について事細かに教えて下さりました。研究室にいる時や食事をする際には、自然と会話も弾み、とても楽しい時間を過ごす事ができました。

篠崎さんは、知識の少ない私に合わせて的確な、そして丁寧なアドバイスを下さりました。実験も思うように進まない中、本当に多くのご迷惑をおかけしたことと思います。筑波からの出張のついでに首都大にも寄って下さって、実験を共にして下さりもしました。忙しい中、dADR及びAGGHS関連の研究に気を配って下さって、私が報告すべきところを、篠崎さんの方からよく電話で進捗を確認してきて下さいました。

星野さんは、AGGHSの製作でよく相談等させて頂き、またご迷惑もおかけしたことと思います。私が手が回らないばかりに、製作の担当をして頂くことになりました。LTDでは共に出席し、半日の遠足では同じバードウォッチングをしたことを覚えています。

河原さんは、銀河団について自分が勉強していた時、打ち合わせの時間を作って下さって、私の物理の知識に対する未熟さを分かりながらも、丁寧に説明して下さりました。また、研究に対する探究心の強さは、とても印象的で、研究の楽しさを改めて振り返るきっかけを下さりました。

赤松さんは、ひたむきに努力する精神と、面倒見の良いところが印象的であり、私にとって見習うべきところでした。私が修士になって初めの1年間は実験を共にし、時には優しく、時には厳しくもためになるアドバイスを下さりました。本当に多くのご迷惑をおかけしたことと思いますが、それでも研究に対して気を配って下さって、本修論の修正の願いにもすぐ対応して下さりました。研究にひたむきな反面、体調を崩される時が多かったので、どうか人に気を配る以上に自分の体調にも気を配るようにして下さい。

林さん、佐藤さん、結局、XRT の具体的な研究内容のことはよくわからないままでしたが、林さん、JAXA に行っても頑張って下さい。佐藤さん、次は D3 で忙しくなるかと思いますが、体調には気をつけて下さい。

石川さんは、論文紹介が誰よりも分かりやすく、勉強になりました。忙しそうな、大変そうな様子を見せず、着実に仕事をこなしている姿が印象的です。

榎島くんは、実験の手伝いをしてもらい、とても助かりました。木村くんは、私が言ったことを忠実に行い、信頼できる後輩でした。私の知識不足で、研究に対する適切なアドバイスができていなかったところもあり、ご迷惑をおかけしたことと思います。

最後に同期の森山くん、大石さん、この 2 年間共にできたこと、心から感謝します。研究室で雑談する中で、研究について励まし、励まされるなかで、多くの勇気をもらうことができました。2 人の研究に対するまじめや、ON と OFF の切り替えが上手いこと等、同期を見て見習うべきことが多いことが、私自身の成長にも繋がりました。

研究室の方に支えられた 2 年間でした。心から感謝します。ありがとうございました。

参考文献

[1] E. Silver, H. Schnopper, S. Bandler, N. Brickhouse and S. Murray, M. Barbera, E, Takacs, J. D. Gillaspy, J. V. Porto and I. Kink, J. M. Laming, N. Madden, D. Landis, J. Beeman and E. E. Haller, Laboratory Astriphysics Survey Of Key X-Ray Diagnostic Lines Using A Microcalorimeter On An Electron Beam Ion Trap,

[2] T. E. Cravens, X-ray Emission from Comets, *Sience*(2002)

[3] P. Beiersdorfer, K. R. Boyce, G. V. Brown, H. Chen, S. M. Kahn, R. L. Kelley, M. May, R. E. Olson, F. S. Porter, C. K. Stahle, W. A. Tillotson, Laboratory Simulation of Charge Exchange-Produced X-ray Emission from Comets, *Sience*(2003)

[4] J. B. Greenwood, I. D. Wiliams, S. J. Smith and A. Chutjian, X-ray Emission from Charge Exchange of Highly-Charged Ions in Atoms and Molecules, *PhyscaScripta* (2001)

[5] Y. Ishisaki, Effect of on-chip magnetic shielding for TES, *Journal of Low Temperature Physics (2007)*

[6] Y. Ishisaki Performance test of Ti/Au bilayer TES microcalorimeter in combination with continuous ADR, *Low Temperature Detector LTD* − 13

[7] Ishisaki et al. *in these conferences*, (2011)

[8] T. Yoshino The noise and energy resolution of the Ti/Au bilayer X-ray TES calorimeter with an Au absorber, *Journal of Low Temperature Physics* 2007

[9] K. Shinozaki Soft x-ray mearsurement of the toroidal pinch experiment RX revwesed field pinch plasma using transition edge sensor calorimeter, *REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS*

[10] Akamatsu et al. *LTD-13 AIP Conference Proc*, (2009)

[11] T. Kanda, H. Ohashi, S. Maeno, T. Ishida, H. Tanuma, H. Akamatsu, Y. Abe, W. Yokota, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda, *Physica Scripta*, (2011)

[12] 篠崎慶亮, 断熱消磁冷凍機を用いた極低温 X 線検出器動作環境の構築, 東京都立大学, (2002)

[13] 吉武宏, TES 型 X 線マイクロカロリメータのアレイ化と分光性能向上に関する研究, 東京大学, (2009)

[14] 辺見香理, 極低温 X 線検出器用ガスギャップ式ヒートスイッチの開発と性能, (2011)

[15] 田沼 静一, 「低温」, 共立出版, (1988)

[16] 小林俊一 · 大塚洋一, 「低温技術」, 東京大学出版会, (1987)

[17] X 線マイクロカロリメータ開発グループのページ, http://www.astro.isas.ac.jp/∼tes/