

宇宙研 dADR 首都大運搬、冷却試験結果報告

赤松弘規, 辺見香理, 石崎欣尚 (TMU), 篠崎慶亮 (JAXA)

平成 22 年 4 月 27 日

概要

2010 年 3 月 19 日に宇宙科学研究所から首都大宇宙実験研究室に double ADR を運搬した。運搬には、業者 (日本通運) を手配しエアサス付き 2ton トラックを使用した。3 月 29 日から、運搬後の初冷却の為に準備を行ない、AGGHS+CPA 単体で冷却を行なった。LHe tank 減圧下で CPA の励消磁を行ない、最低到達温度 69.7 mK を達成した事を確認した。2010 年 4 月 5 日から 8 日にかけて行なった dADR での AGGHS の動作試験結果をまとめる。本試験では、4K/2K/1K 以下における AGGHS の動作試験、ON/OFF Conductance 確認、Chacoal Box に設置した thermal anchor の性能評価を行なった。

1 dADR 運搬:ISAS to TMU

2010 年 3 月 19 日に宇宙科学研究所から首都大宇宙実験研究室に double ADR を運搬した。運搬には、業者 (日本通運) を手配しエアサス付き 2ton トラックを使用した。付録に宇宙研から首都大へ運搬した物品リストを示す。実験ラック以外の測定機器や配線などは全て、首都大に輸送した。以下に、運搬時の写真を示す。



図 1: 上左:運搬用トラックに組み込んだ状態、上右:ADR の下にダンパーを設置し衝撃を逃した、下左右: 首都大 152 号室に到着した状態

2 実験セットアップ

ここでは、首都大に運搬後に行なった冷却のセットアップを示す。
 首都大に運搬後、4月末までに2回冷却を行なっている。以下に、各々の実験の目的とセットアップを示す。

表 1: 実験日時と目的、セットアップ

日時	セットアップ	冷却目的
2010/3/29-4/10	CPA 単体+AGGHS:ガス有 Thermal anchor Cu 皮膜 NbTi 線 4 本	首都大運搬後初冷却 ガス有 AGGHS 4K 以下での特性評価
2010/4/12-4/18	CPA 単体+AGGHS:ガス有 Thermal anchor Cu 皮膜 NbTi 線 8 本	AGGHS On/OFF Time scale チェック

運搬による影響が無いか確認する為、運搬時のセットアップのまま CPA 単体試験を行なった。CPA 単体試験と共にガス詰後の AGGHS を組み込み、その性能評価を行なった。以下に、組み込み時の模式図を示す。

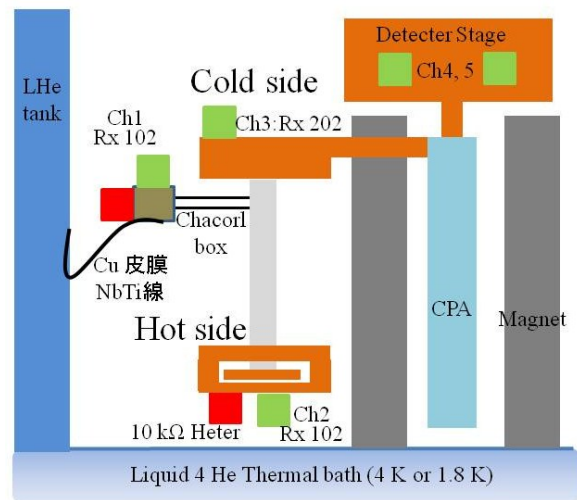
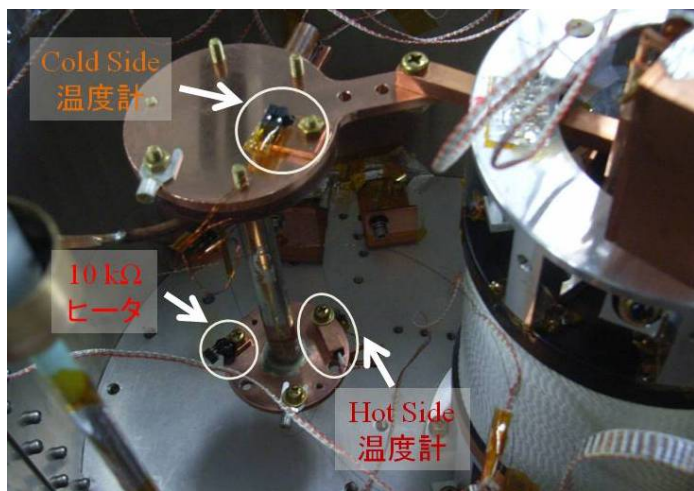


図 2: 実験セットアップ。実写 (左) と模式図 (右)

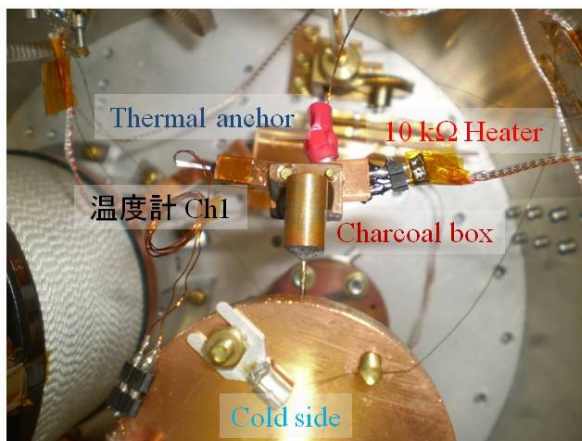


図 3: 温度計の設置箇所と使用温度計

チャンネル	設置箇所	温度計	校正の有無
Ch1	Chacoal box	Rx103	有
Ch2	AGGHS Cold side	Rx102	有
Ch3	AGGHS Hot side	Rx202	有
Ch4	Detector stage	Rx102	有
Ch5	Detector stage	Rx102	無

図 4: 実験セットアップ。実写 (左) と模式図 (右)

3 Temperature profile: 予冷、断熱消磁冷却

首都大に於ける初めての冷却である。Chamber の真空引きなどのデータが無かったので、初回は chamber の真空引きを2ヶ日間行なった。4K に至るまでの各温度領域での予冷時間と LHe 保持時間をまとめる。本実験では、篠崎 or 石崎立ち会いのもと、首都大 RMP で減圧作業を行なった。減圧を行なう事で、LHe tank は約 1.5 K まで冷却され、4K から tank 温度が安定するまでは約 2 時間を要した。運搬後、初回の冷却では 4 回目の励磁時 (magnet current=8.5A) に LHe が消失し、クエンチを起こした。その際の対応については、にまとめる。

表 2: 各実験での予冷時間と LHe 保持時間、サイクル回数

日時	Chamber 真空引き	LN 予冷	LHe 予冷	LHe 保持時間	サイクル回数	最低到達温度
2010/3/29-4/10	25 h	23 h	12 h	27 h	4(5)* 回	69.7 mK
2010/4/12-4/18	23 h	25 h	13 h	29 h	3 回	89.5 mK

*:4 回目の励磁時に LHe が消失し、LHe tank 温度が上昇したことでクエンチ。その後、4K で 8.5A まで流せることを確認

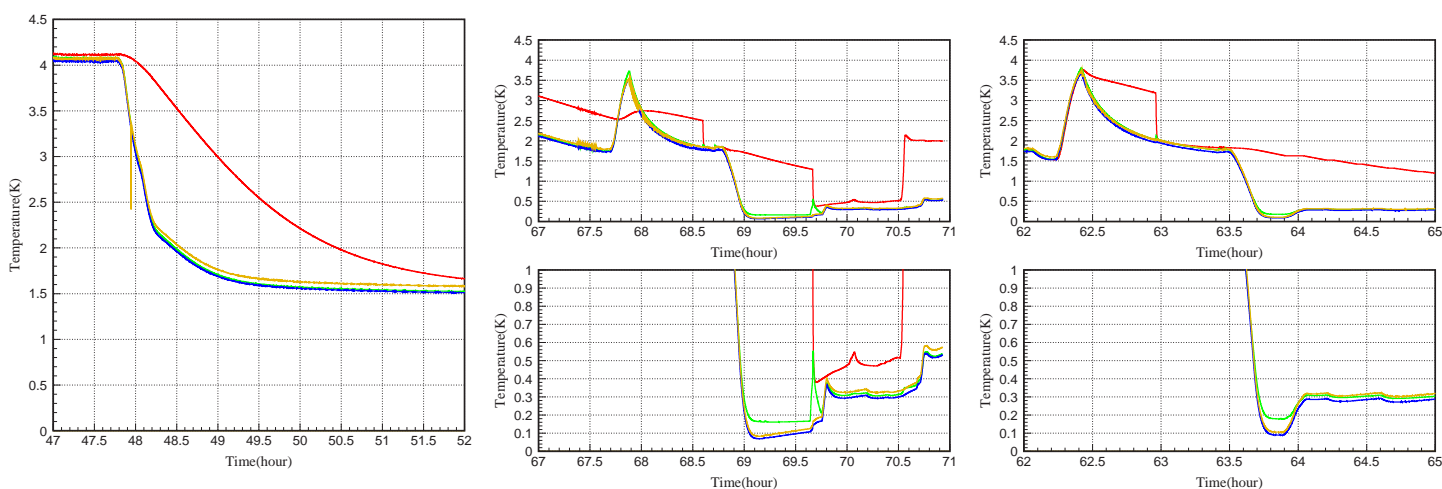


図 5: 左:減圧時の温度 plot(赤:AGGHS HOT side, 緑:Cold side, 青:CPA,), 中:3月29日からの冷却,4月12日からの冷却

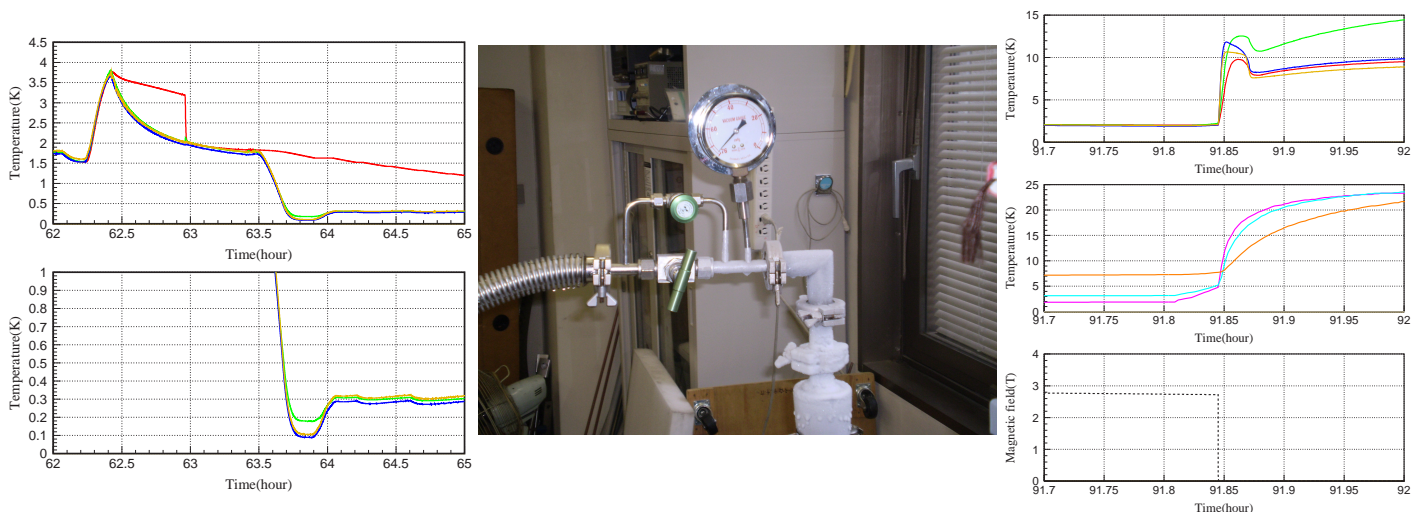


図 6: 左:減圧に用いた RP, 中:ADR 接続部, 右:クエンチ時の温度 plot。LHe tank 底面 (中段マゼンタ) が先に上昇し始めている。

4 AGGHS 性能評価結果

これまでの dADR の冷却で、減圧下 GGG 1.3K の状態で約 $3.1\mu\text{W}$ の熱流入が存在することが指摘されている。現在、この過剰な熱流入によって、2 段サイクル (GGG+CPA) で冷却を行なっても 100 mK を長時間保持することができていない。熱流入の原因を特定し、対策を行なう事が必須である。この熱流入は PGGHS の OFF conductance が設計値通り出していない事に起因していると考えられる。その場合、高温側のステージの熱が HS を伝わって低温側へ影響を与えていると考えられる。この問題を解決する為、OFF conductance が低く、ON/OFF 温度を自由に設定できるという点から AGGHS の開発を行なっている。

本実験では、dADR 運搬に伴う性能劣化の有無の確認と共に AGGHS の性能評価試験も行なった。試験項目は、ON/OFF conductance, 2K から 300 mK への熱流入直接測定、AGGHS OFF に必要な timescale 確認、である。

4.1 AGGHS 設計性能

まず、AGGHS の各部位の名称、設計性能についてまとめる。横田修士論文 (首都大 2010) によると、本 AGGHS は首都大 ADR(減圧下) で使用する事を想定し、以下のような性能を持つように設計されている。

- ON Conductance 5.28 mW/K @ 2K
- OFF Conductance $3.70\ \mu\text{W/K @ 2K}$

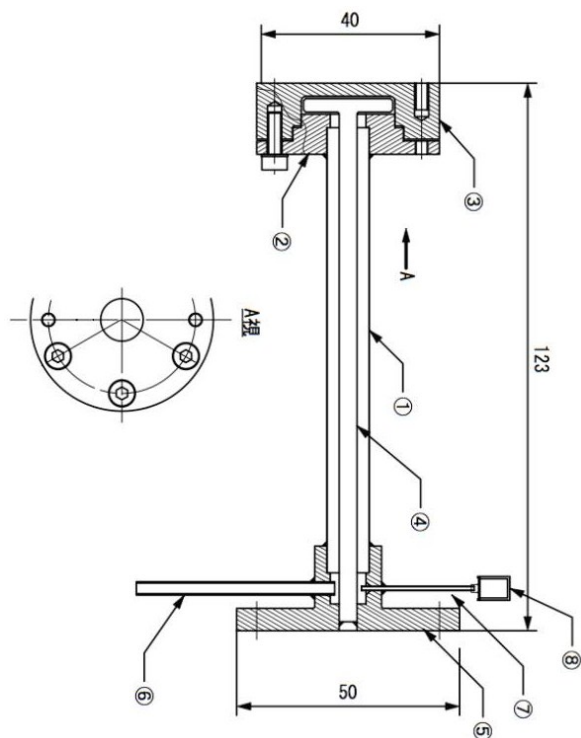


図 7: AGGHS 概略図

図 8: 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

図 9: 1:CYLINDER のパラメータ

長さ [mm]	外形 [mm]	厚み [mm]
100	10	0.08

図 10: 7:NEEDLE のパラメータ

長さ [mm]	外形 [mm]	内径 [mm]
30	0.9	0.6

表 3: SUS304 の熱伝導率

	κ	at 15 K
1:文献値 from NIST database*	$0.104[\text{W/K/m}]$	$1.53 [\text{W/K/m}]$
2:横田修論	$0.74 \times 10^{-4} T [\text{W/K/m}]$	$1.11 [\text{W/K/m}]$

* <http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/304Stainless/304Stainlessrev.htm>

4.2 AGGHS ON/OFF Conductance

熱伝導度測定では、AGGHS HOT side に一定の熱流力を行ない、熱浴からの温度差から熱伝導度を求めた。HOT side に組み込んだ 10 kΩ のヒーター抵抗に Kerthry 2400 で定電圧を掛け、入力する熱量を制御した。異なる発熱量で HOT side, COLD side の温度を測定し、その差分を取り熱伝導度を算出した (式 1)。差分を取る事で、熱浴の揺らぎの影響と絶対温度の不定性を排除出来る。ここで、熱伝導度の計算には以下の式を用いた。

$$G = \frac{P_2 - P_1}{\Delta T_{HOT} - \Delta T_{COLD}} \quad (1)$$

P_2, P_1 は各々の測定時に HOT side に入力した熱量。 $\Delta T_{HOT}, \Delta T_{COLD}$ は、HOT, COLD side の温度差である。以下に、得た結果を示す。ON/OFF Conductance 共に、設計値通りの値を示している事が分かる。

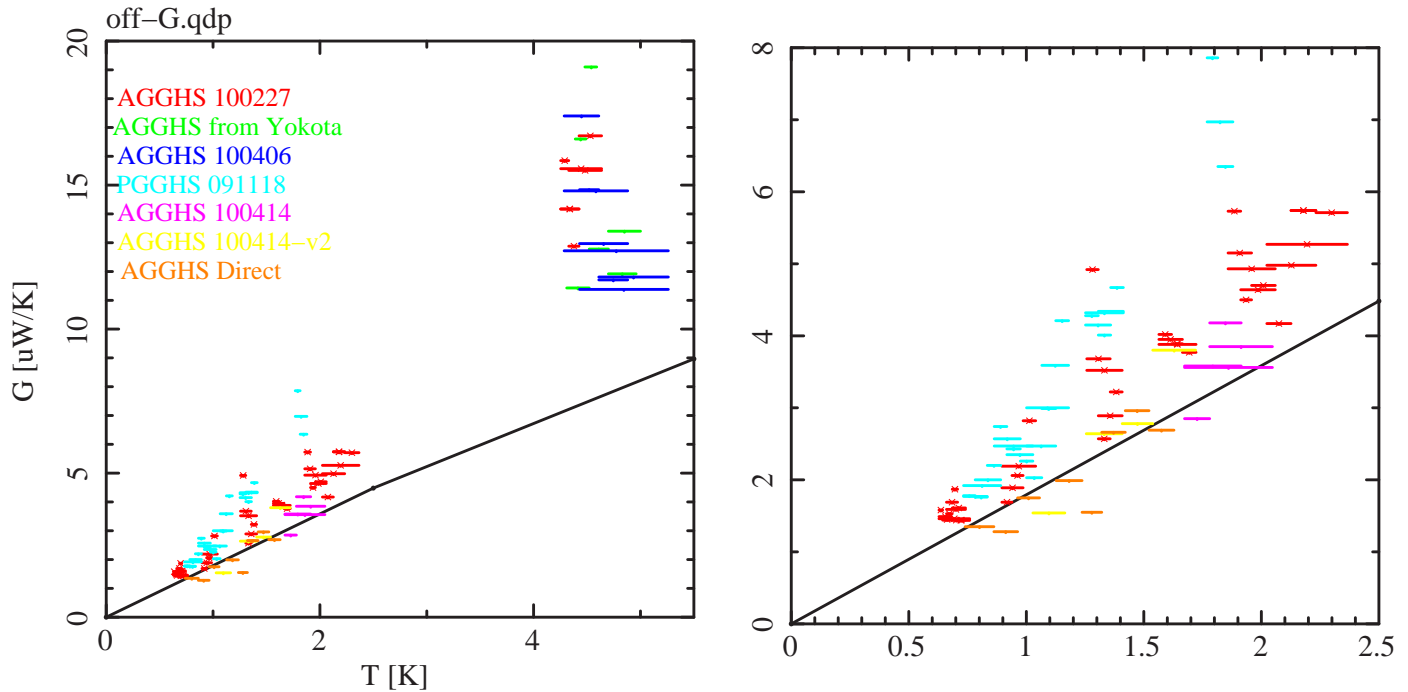


図 11: 左:0-5 K までの AGGHS と PGGHS の OFF conductance、実線は AGGHS の理論値。右:左図を 0-2.5 K で拡大

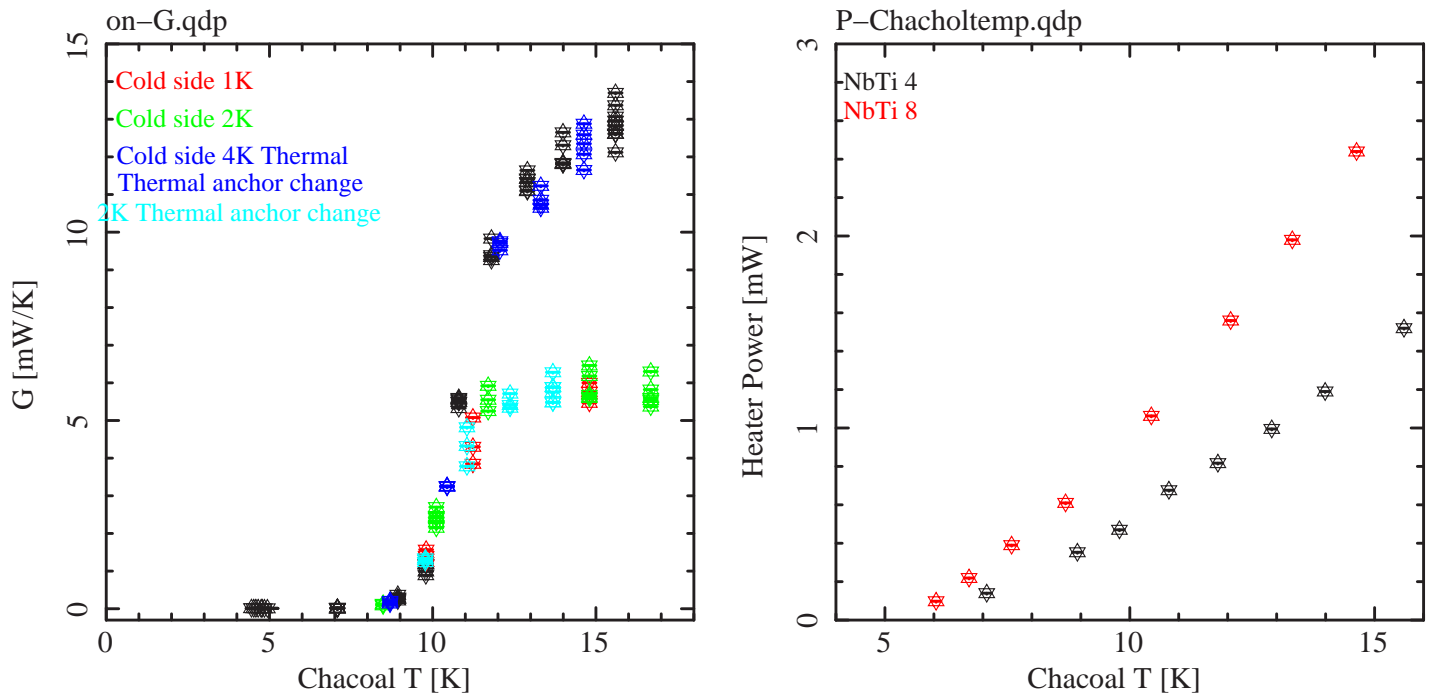
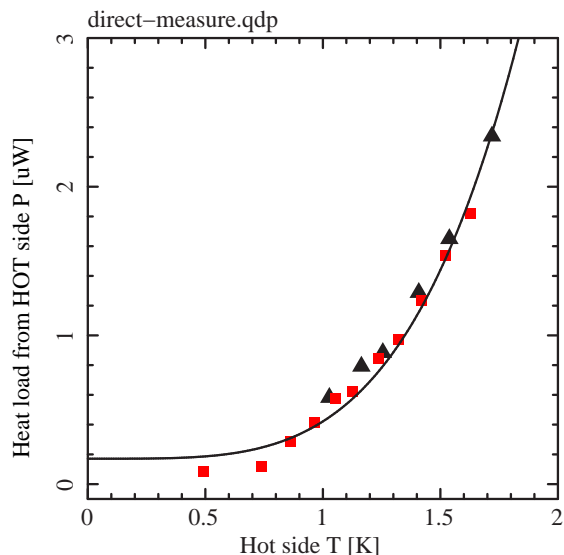


図 12: AGGHS ON Conductance, 右:Chacoal box をある温度まで温めるのに必要な熱量。黒:熱アンカー=NbTi 線 4 本。赤:NbTi 線 8 本

4.3 AGGHS 熱流入直接測定

ここで、これまでに明らかになっている熱流入の値をまとめる。減圧時の CPA の単体試験 (HS 無) の測定から、周囲の輻射、配線からの熱流入と見られる熱流入が、約 $1.3 \mu\text{W}$ 存在する。減圧した状態で、GGG を 1.2K にし PGGHS を使用した際の熱流入は、約 $3.1 \mu\text{W}$ である。PGGHS を使用する事で高温側から入る熱流入は、約 $1.9 \mu\text{W}$ 。AGGHS を使用することで、高温側から入る熱流入は PGGHS を使用した場合に比べ、改善されるかを確認した。測定方法は、AGGHS COLD side を 300mK に固定し、HOT side をある温度に保つのに必要な熱量を測定するという方法を取った。以下に、得た結果を示す。実線は、 $P=A+BT^4$ で fit したものである ($A=0.171, B=0.250$)。

GGG を 1K 付近で温度コントロールできれば、高温側から AGGHS をつたって入る熱流入は約 $0.55\mu\text{W}$ 。固有の熱流入を考えると、総和は約 $1.9\mu\text{W}$ 。この値は、PPGHS を使用した場合の約 60% にあたる。



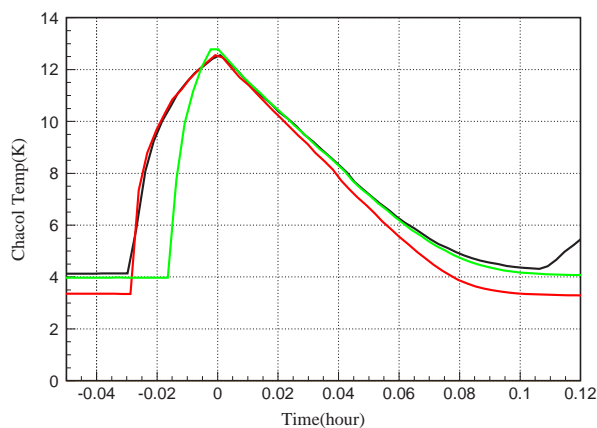
CO=0.1709 , X4=0.2507 , WV=6.0876E-02, N= 11.00

T_{HOT} [K]	Heater power [μW]	T_{HOT} [K]	Heater power [μW]
1.720	2.340	1.628	1.822
1.538	1.645	1.522	1.537
1.408	1.288	1.421	1.238
1.255	0.884	1.321	0.972
1.164	0.792	1.237	0.842
1.027	0.582	1.127	0.622
—	—	1.055	0.576
—	—	0.963	0.414
—	—	0.862	0.285
—	—	0.740	0.120

4.4 AGGHS ON/OFF timescale

AGGHS の ON/OFF timescale は、chacoal box と熱浴をつなぐ Thermal strap(今回は、Cu 皮膜付き NbTi 線 4 本 or 8 本) によって決められる。Thermal strap の熱伝導度に関しては、次節で扱う。ここでは、各々の Thermal strap を用いた際の AGGHS の OFF timescale についてのみ述べる。

下図は、Cu 皮膜付き NbTi 線 4 本を用いた際の AGGHS の OFF timescale である。熱浴温度、ON にかかる時間によらず、約 6min 程度で完全に熱浴温度まで戻っている。図 12 左をみると分かるように、AGGHS の ON/OFF 切り替え温度は約 10K 付近であるので、実際に OFF になるまでの時間はもう少し短いと考えられる。

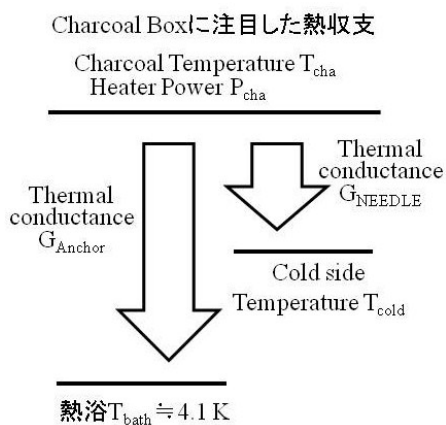


T_{HOT} [K]	Heater power [μW]	T_{HOT} [K]	Heater power [μW]
1.720	2.340	1.628	1.822
1.538	1.645	1.522	1.537
1.408	1.288	1.421	1.238
1.255	0.884	1.321	0.972
1.164	0.792	1.237	0.842
1.027	0.582	1.127	0.622
—	—	1.055	0.576
—	—	0.963	0.414
—	—	0.862	0.285
—	—	0.740	0.120

4.5 Thermal strap, NEEDLE の熱伝導度

ここでは、見積もった NEEDLE の熱伝導度と AGGHS ON 性能評価時の温度データを使用し、NbTi 線 (Cu 皮膜) 8cm, 4 本分の熱伝導度を見積もる。まず、各パラメータを以下の図のように定義する。すると、Thermal anchor の熱伝導度 G_{Anchor} は (4) 式のようにして求められる。今回求められた Thermal anchor の熱伝導度は、約 97.1 ± 13 (101 ± 15) $\mu\text{W/K}$ である。

ここで、Cu 皮膜 NbTi 線から熱伝導度を算出してみる。石崎さんのメールに添付された鈴木商館の FAX をもとに使用した NbTi 線がどの程度の Cu 膜を持つか評価した。SWU-7A であれば、NbTi 径 0.067 mm, Cu 径 0.097 mm より、同じ断面積を持つ銅線は $r = \sqrt{(0.097/2)^2 - (0.067/2)^2} = 0.035\text{mm}$ である。NIST-database(<http://cryogenics.nist.gov/MP>) によれば、Cu の 15K における熱伝導率 κ は $\kappa = 1133(\text{RRR} = 50), 2152(\text{RRR} = 100), 7566(\text{RRR} = 500) [\mu\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ である。これらの条件で各々熱伝導度を算出すると $G(\text{NbTi 線 4 本分}) = 237(\text{RRR}=50), 450(\text{RRR}=100), 1583(\text{RRR}=500) [\mu\text{W/K}]$ となる。銅皮膜で測定した熱伝導度を説明するには、RRR=25 程度の銅である必要がある。



$$P_{cha} = G_{anchor}(T_{cha} - T_{bath}) + G_{NEEDLE}(T_{cha} - T_{cold}) \quad (2)$$

図 13: Chacoal 温度と Heater power、見積った熱伝導度

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

4.6 実測データからの NEEDLE, Thermal anchor の熱伝導度見積もり

Therma anchor の本数を 4 本から 8 本に増やした測定データから、NEEDLE, Thermal anchor の熱伝導度見積もりを行う。2 回目の測定では、Thermal anchor を 4 本から 8 本、8.0cm から 7.5 cm へと変更した。測定温度の違いによる熱伝導度の違いは、熱伝導率が温度の 1 乗に依存するとして考慮した。熱浴温度は 4.2 K で一定と考え、Thermal anchor のパラメータと (4) 式で熱伝導度を算出した。この見積もりで算出した NEEDLE の熱伝導度は、1 で物性値から導出した NEEDLE の熱伝導度とよく一致する。また、その NEEDLE の熱伝導度を仮定して求めた Tharma starap (4 本) の熱伝導度 (2 章) ともよく一致している事がわかる。

表 4: 異なる Thermal strap における Chacoal 温度と Heater power、見積った熱伝導度

T_{cha} (K)	P_{cha} (μW)	T_{cha} (K)	P_{cha} (μW)	G_{NEEDLE}^* ($\mu\text{W/K}$)	$G_{Thermalstarap(4 本)}$ ($\mu\text{W/K}$)	$G_{Thermalstarap(8 本)}$ ($\mu\text{W/K}$)
15.60	1520	14.63	2440	17.39 (17.8)	113.64	212.15
13.99	1190	13.32	1980	18.19 (16.2)	100.93	194.26
12.90	995	12.06	1560	16.03 (14.8)	95.77	177.52
11.80	817	10.44	1063	12.55 (13.2)	92.19	152.51
8.93	353	8.69	610	13.93 (9.3)	57.67	116.13

*() 内、物性値からの予想値

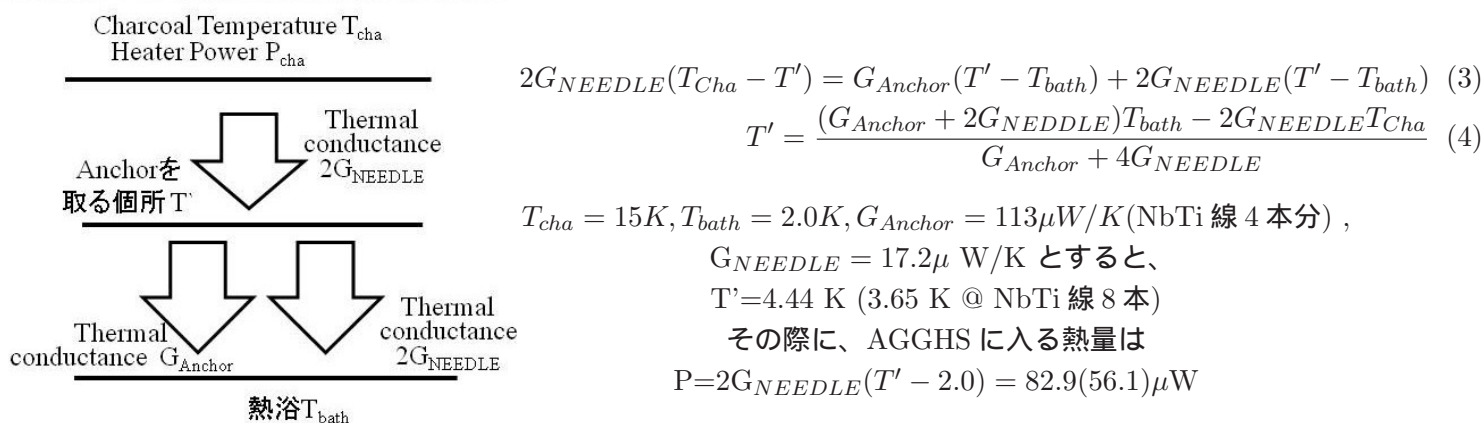
4.7 現状の Thermal strap の問題点と対策

4.7.1 問題点 1:AGGHS ON 時に Chacoal box から入る熱流入

4.6 で求めたように、Chacoal box が 15K であった時の NEEDLE の熱伝導度は約 $17\mu\text{W}/\text{W}$ である。2K で使用していると考えると、AGGHS が ON である時に NEEDLE から本体へ流れ込む熱量は、 $P_0=17\times(15-2)=221\mu\text{W}$ である。CPA の励磁+熱浴温度 (GGG 温度) まで冷却するのに約 1 時間と仮定すると、その間に AGGHS の入り込む熱量は、 $P=P_0 \times 3600 = 0.7956\text{J}$ となる。これまでの冷却結果から GGG の吸熱量を約 4J とすると (実際にはもう少し小さい)、CPA サイクルで AGGHS から入ってくる熱量は、約 20 % に当たる。

現状の Thermal strap の設置方法では、NEEDLE から入る熱量が大きく、2 段サイクルに影響が大きい。よって、Thermal strap を NEEDLE の中央に設置した場合の熱収支を考える。この場合の系の熱収支は図のようになり、各温度域を流れる熱量が一定 (AGGHS が ON の状態) だとすると系全体の熱収支は式で表せる。

NEEDLE の中央で Thermal anchor を取った場合



以上の考察では、NEEDLE と Anchor の接触部以降の NEEDLE の熱伝導度も 15K の時のものとしているが、実際には接触部の温度に近い値になると考えられる。ここで、NEEDLE のパラメータを用いて接触部の温度における接触部から AGGHS 本体までの熱伝導度を算出すると、 $G=10.06(8.27)\mu\text{W}/\text{K}$ となる。AGGHS 本体への熱流入は、 $P=G(T'-2)=24.4(13.7)\mu\text{W}$ である。この値で CPA サイクル時に AGGHS に入る熱流入を計算すると、 $P=0.088(0.049)\text{J}$ となり、各々 GGG の吸熱量の 2.2(1.2)% となる。

4.7.2 問題点 2:AGGHS OFF 時に Chacoal box から入る熱流入

この問題は、CPA から GGG へ熱のやり取りが終了した後、AGGHS が OFF になった際に発生すると考えられる。C 現在使用している NbTi 線を用いた場合、Chacoal box の温度は常に熱浴温度と等しくなる。その場合に、box から AGGHS に入る熱量を算出する。

熱浴温度を 1.5 K、AGGHS 本体を 1 K (GGG 温度と同等) とすると、NEEDLE の熱伝導度は、 $G = \int_{1.0}^{2.0} \kappa(T) dT = 0.54\mu\text{W}/\text{K}$ となる。この場合、box から AGGHS 本体に入る熱量は、 $P = \int_{1.0}^{2.0} \kappa(T) T dT = 0.69\mu\text{W}$ となる。これまでに述べた様に NEEDLE の中央で Anchor を取った場合は、サイクル中の熱流入は改善するが、OFF 時の極低温への熱流入は倍増する。しかし、GGG がこの熱量を全て吸収するとすれば、サイクル自体に大きな影響は与えないと考えられる (GGG に入る熱量は最低でも $10\mu\text{W}$)。

この問題の解決には、Thermal strap を超電導体にするので温度で完全に熱浴から切り離してしまうか、NEEDLE の熱伝導度をもう一桁下げよう設計の AGGHS を再度製作することが必要だと考えられる。Thermal strap に適した超電導体は、AGGHS が吸熱する熱量を少なくする為、出来る限り熱浴温度に近い転移温度を持つ物が好ましい。また、再設計を行なう場合には、2K の熱浴からの熱流入が $0.1\mu\text{W}$ 以下 (その影響が無視できるような値) になるような設計にすべきである。

表 5: PGGHS の熱伝導度

品名	詳細	個数	ISAS	TMU
ADR 本体関係				
2 段式 ADR デュワー	B10163675	1		
GGG magnet		1		
CPA magnet		1		
CPA salt pill		1		
GGG pill		1		
detector stage(table+shield)		1		
PGGHS		1		
magnetic shield (SiFe)		2		
1K cylinder	B10163675/B10182598(構成品 (管理番号))	1		
IVCS		1		
OVCS		1		
外筒		1		
Cryoperm shield	detector stage 用	1		
IVCS MLI		1		
OVCS MLI		1		
機械式 HS		1		
機械式 HS 室温操作部		1		
固定用ラック	本体	1		
	支持材 (アーム)	2		
	支持材 (横棒)	2		
	支持材 (dADR-横棒取り付け治具)	2		
回転用治具	支持材 (アーム)	2		
	支持材 (横棒)	1		
	ADR 固定用治具	2		
LHe 注入口バツフル	3/17 現在 ADR に組み込まれている	1		
窒素転送用銅チューブ		1		
除振動ダンパー		5		
各種配線				
温度計切替 box2	デュワー側	1		
温度計切替 box1	ラック側	1		
マグネット配線切替 box		1		
温度計配線	切替 box 間	1		
	切替 box-DA100	1		
	Cryocon-切替 box(シールド配線)	1		
	LTC21-切替 box(シールド配線)	1		
	切替 box-DA100	1		
Magnet 配線	PSF 400-切替 box	2		
	PSF 400-DA100	1		
	48pin-切替 box	1		
RT 配線	RT ポート-LR720 間	1		
48 pin	温度計ポート用	1		
	MDM ポート用	1		
	Magnet ポート用	1		
	未使用	4		
赤白バナナ配線	9	1		
1 ダミー抵抗配線	magnet 制御 (LabWindows) テスト用	1		
9pin Dsub-紅白配線	Cryocon,LTC21 配線テスト用	1		
Dsub (Space quarified)		多数		

表 6: PGGHS の熱伝導度

品名	詳細	個数	ISAS	TMU
測定機器関連				
Kethley 2400	首都大所有物	1		
Cryocon 62	首都大所有物	1		
Note PC (Thinkpad T60)	篠崎所有物	1		
PSF 400	B10222546/B10222547	1		
Advantest		1		
LTC-21	200912 050000015	1		
NoizeCutTrans		1		
横河 DA100	B10185665	1		
NI社 EthernetGPIB	B10185663	1		
ラック内小物				
実験ラック本体		1		
冷凍機台(木製)		1		
冷凍機台治具		1		
実験ノート		2		
checksheet 入れ		1		
reference sheet	T-Heat load	1		
	温度計設置場所一覧	1		
Kinggim (ファイリングケース)	実験データ log 用	1		
	dADR 設計データ集	2		
取り扱い説明書	PSF(+マニュアル)	1(+1)		
	Cryocon	1		
	LTC21	1		
	PW-A	1		
	DA100	1		
	magnet	2		
未導入温度計	DT670-Cu	1		
	RX102A-br	2		
デュワー検査証明書	SHI 発行	1		
GPIB ケーブル	PSF-LTC21	1		
	LTC21-Cryocon	1		
	Keithley-Cryocon	1		
	Cryocon-GPIB Ethernet	1		
ドライバ	長い x1, 中 x1, 小 x1	3		
ピンセット	大 x1, 直角 x1, プラスチック x1	3		
SUS 用半田フラックス		2		
6角レンチセット(7本)	オレンジ、1.6-6.0	1		
ペンライト		1		
手持ち鏡	歯医者にあるようなもの	1		
電源タップ	7口 x1、4口 x2	1		
ゲートパルプ(NW40)	首都大所有物	1		
絶縁 O-ring(NW16)	首都大所有物	1		
絶縁 O-ring(NW25)	首都大所有物	1		
絶縁 O-ring(NW40)	首都大所有物	1		
Kevlar 糸	10	3		
電流導入端子	feed through	1		
ネジ一式	真鍮ネジ(M3-M6)	—		
TEXIO PSF400 小物		1箱		