

第1回 超流動ヘリウム冷却システム技術調査研究会 (10.01.29)

---

# 連続型ADR(断熱消磁冷凍機)の構築と 試験結果

物質・材料研究機構  
沼澤健則、(神谷宏治、高橋健太)

NASA/Goddard宇宙飛行センター  
Peter Shirron

JAXA宇宙科学研究本部  
満田和久

写真: パラボリックフライト中のMU-300 (DAS提供)



## 講演の概要

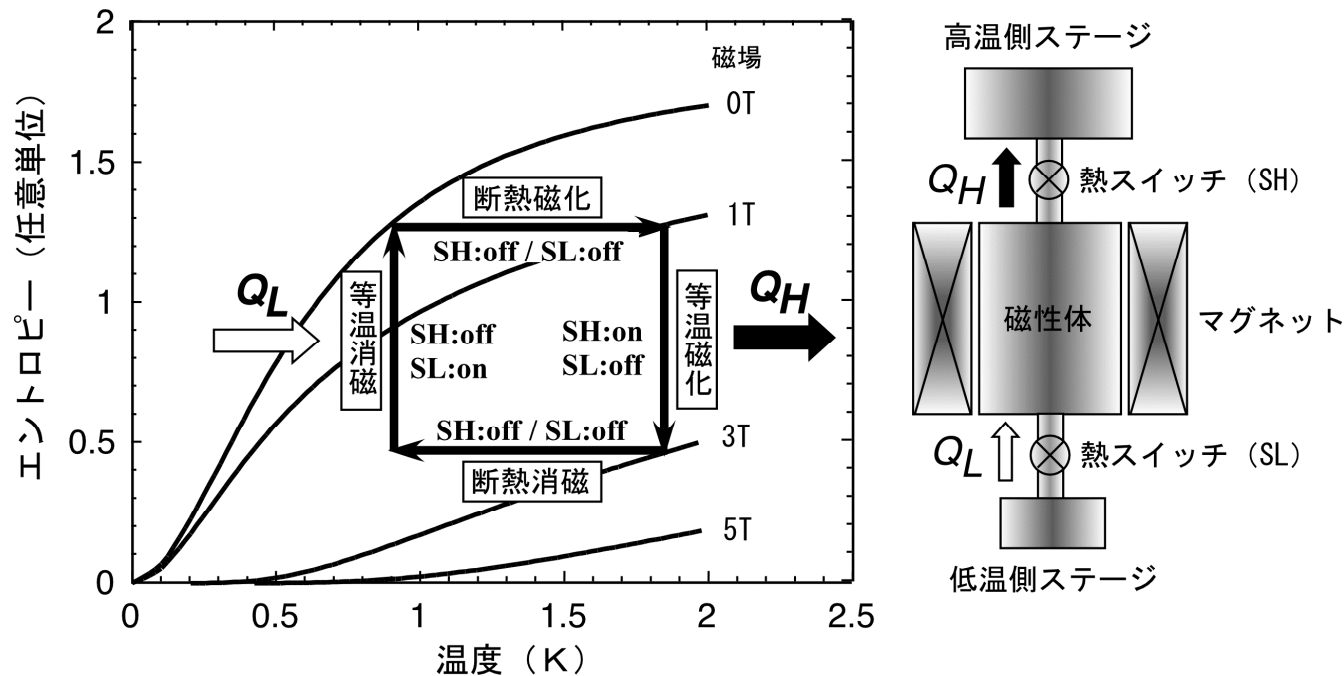
1. プロジェクトについて
2. 微小重力実験用ADRシステムの開発
3. 実験の概要
4. 総括・展望

# 超低温・極低温環境が必要な宇宙実験

日本における研究			
研究分野	研究テーマ	ミッション名	必要な冷却条件
宇宙科学	X線	Astro-E2 (マイクロカロリメータアレイ) NeXT DIOS XEUS (ESA 主体の国際協力ミッション) <u>(TES型X線マイクロカロリメータアレイ)</u>	0.4 $\mu$ W at 60mK(熱スイッチ ロスを含まず) 2 $\mu$ W at 50mK 2 $\mu$ W at 50mK
	遠赤外及びサブミリ	SPICA (TES型赤外線ボロメータアレイ)	2 $\mu$ W at 50mK
	紫外線		< 10 $\mu$ W at 50-100mK
微小重力基礎 物理	固体ヘリウム	<u>奥田プロジェクト</u>	100 $\mu$ W at 0.1K
	He3/He4 相分離	水崎プロジェクト	< 1mW at 0.1-0.87K
	超流動ヘリウム物性	村上プロジェクト	2K
	一般相対論	重力波プロジェクト	700mW at 7-9K
実験支援装置	無重力下強磁場	小型無冷媒超伝導マグネットの冷却	100mW at 数 K
米国における研究			
宇宙科学	X線	MBE (X線マイクロカロリメータ) Constellation-X (TES型X線マイクロ カロリメータアレイ)、MAXIM	4 $\mu$ W at 50mK
	遠赤外及びサブミリ	SPIRIT, SPECS, FAIR	< 10 $\mu$ W at 50 - 100mK
	紫外線	SUVO, EUV Solar	<10 $\mu$ W at 50-100mK
HEDS (微小重力基 礎物理)	液体ヘリウムの超流動転移	DYNAMX, MISTE, SUE, BEST	2-3mW at 2K
	固体ヘリウムと超流動液滴	KISHT, SHE	0.5mW at 0.4-0.6K
	He3/He4 の3重点	EXACT	1mW@0.5-0.8K, 2-3mW@2K
	一般相対論	SUMO	2-3mW at 1-4K

# 宇宙実験に対するADRの必要性

- ・ 超低温の高効率な発生手段
- ・ 重力に依存しない冷却方法 ➡ 長期信頼性と小型化を達成可能
- ・ 冷媒が不要、電力供給のみで作動可能

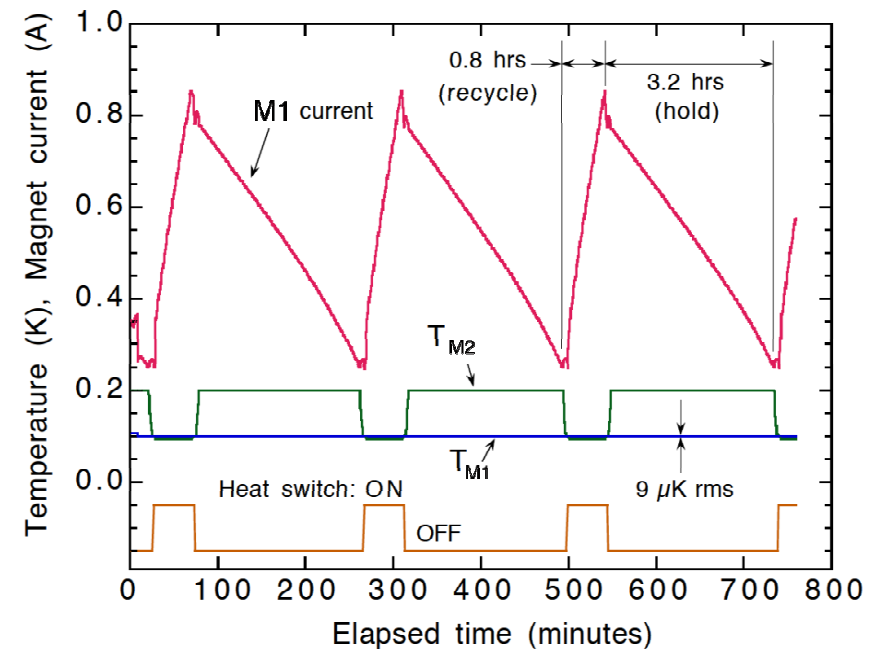
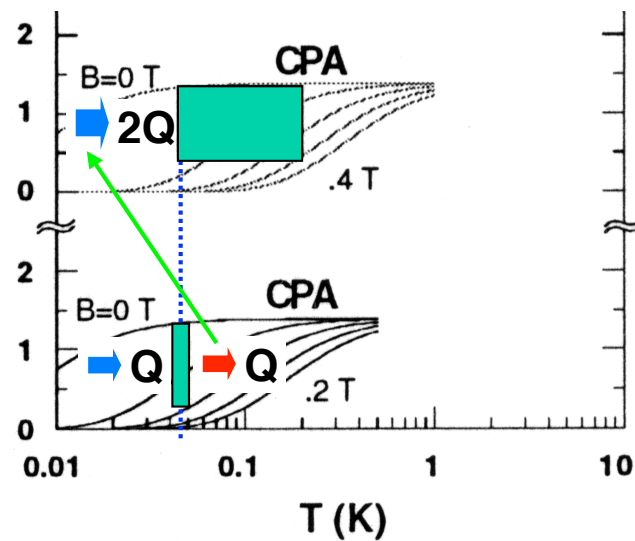
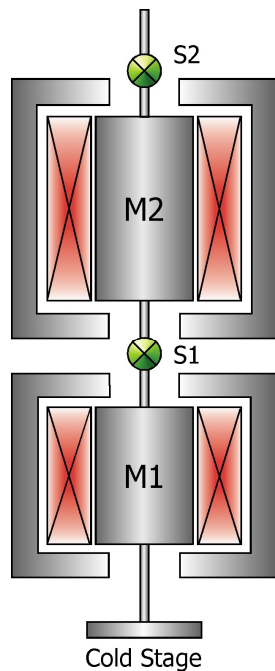


- ・ 従来のADRは間欠的な冷却器
- ・ 冷凍時間と冷凍能力が制約 ➡ 制約の少ない、連続作動ADRが必要
- ・ 用途が限定



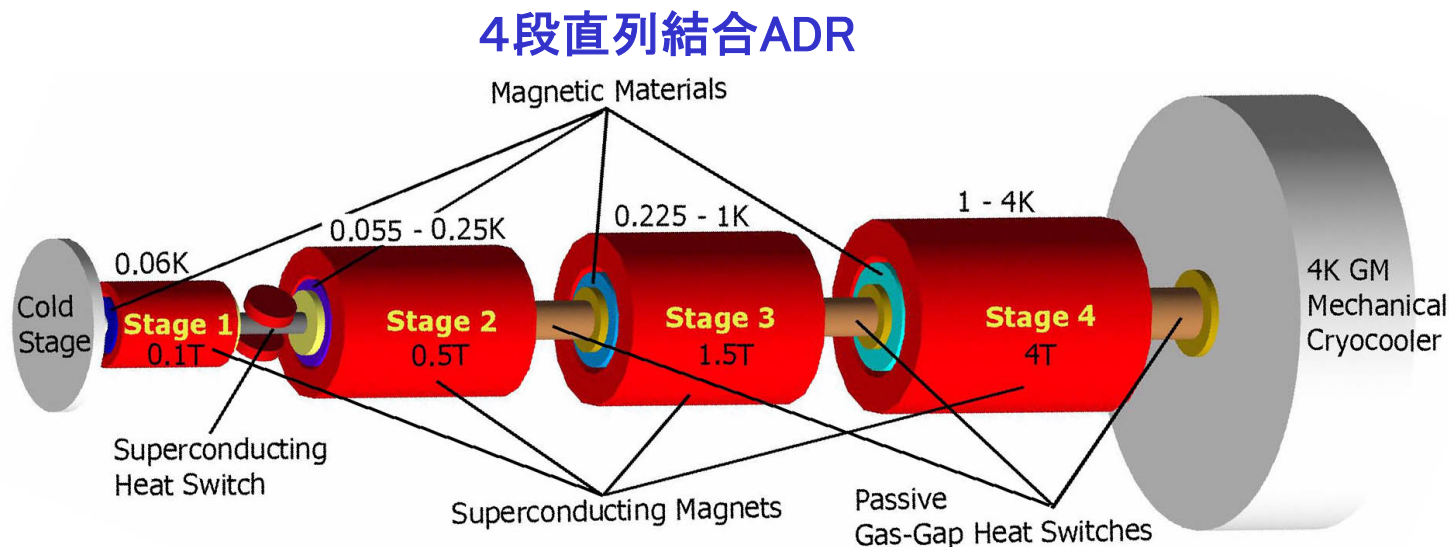
# 連続型ADRの実証 (NASA/Goddard)

- ・2つのカルノーサイクルを位相をずらして結合
- ・バッファユニットM1が一定温度を保持
- ・0.1K以下を $\pm 9 \mu\text{K}$ で連続して維持可能  
(NIMSは材料開発で2000年から参加)

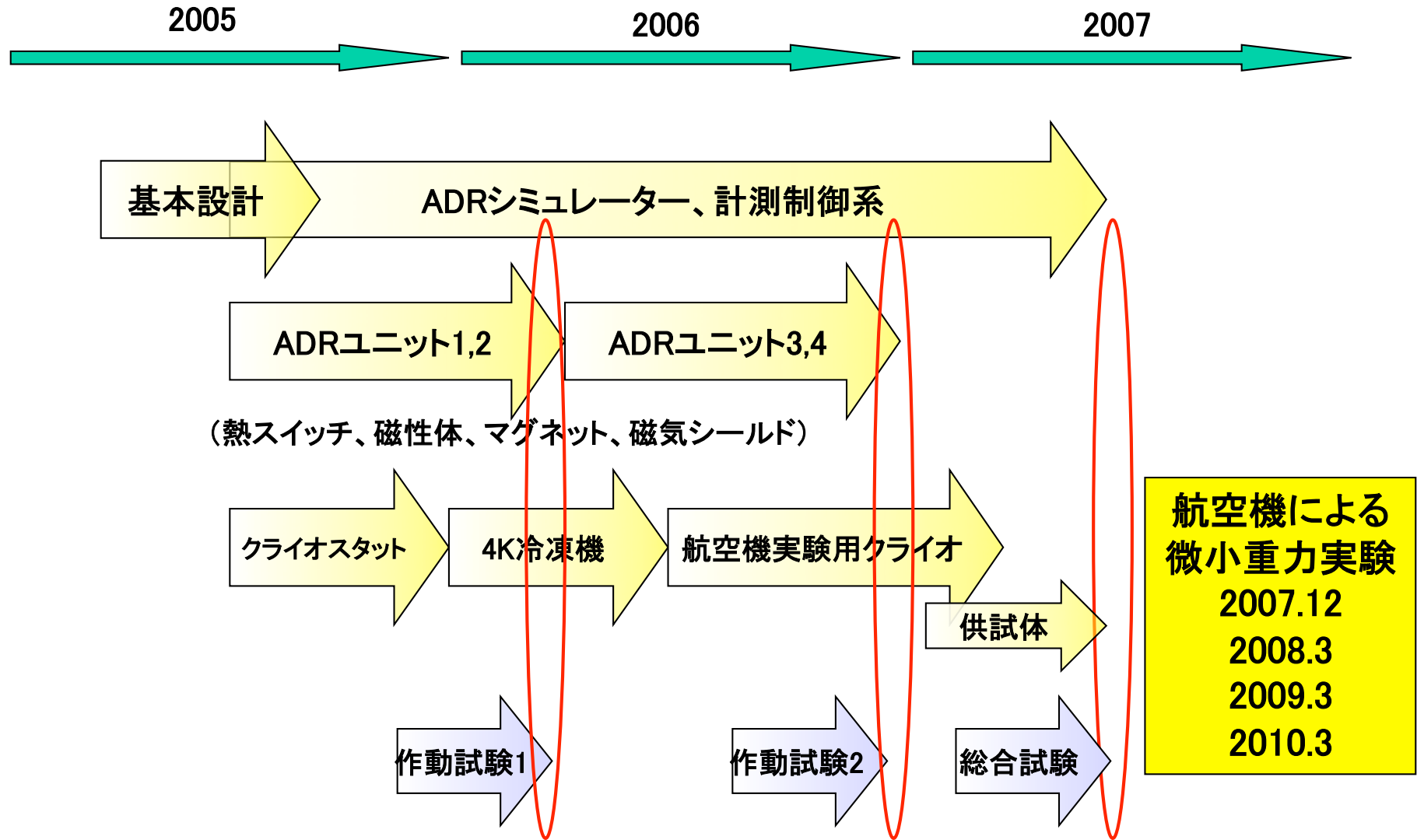


# 宇宙環境利用公募地上研究(2005-2007)

- ・ 連続型ADRの微小重力環境での作動実証
  - ・ 冷凍負荷を用いた連続作動の実証
  - ・ 宇宙用・航空機実験用冷却システムへの課題を抽出
- ・ 大きな冷凍能力:  $100 \mu W$ 、 $100mK$  → 冷凍サイクル高速化、磁性体性能増強
  - ・ 小型・軽量化 → 熱設計の見直し、アルミ材料の多用
  - ・ 汎用試料空間 → 直径 $15cm$  × 高さ $20cm$ 、窓付クライオスタットも使用可
  - ・ 自動化・省電力化 → 計測・制御ユニットを一体化、高度な制御プログラム
  - ・ 液体ヘリウムを使用しない無冷媒冷凍システム → 4K-GM冷凍機の採用



# 開発のスキーム

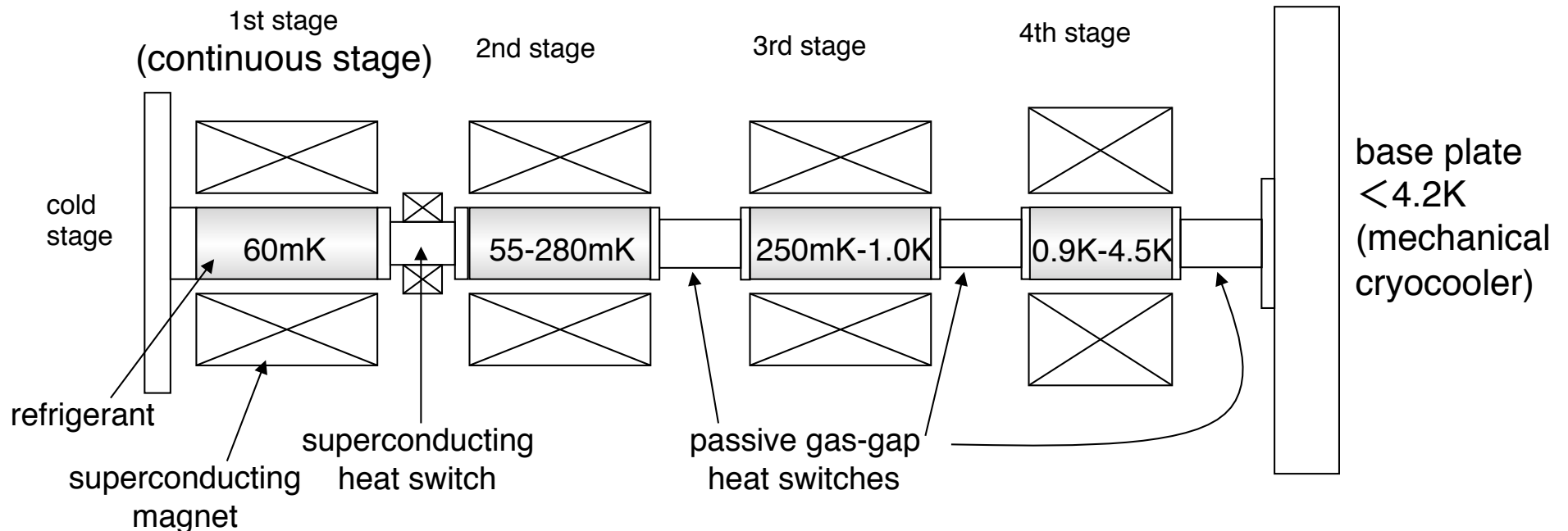


# Continuous ADR

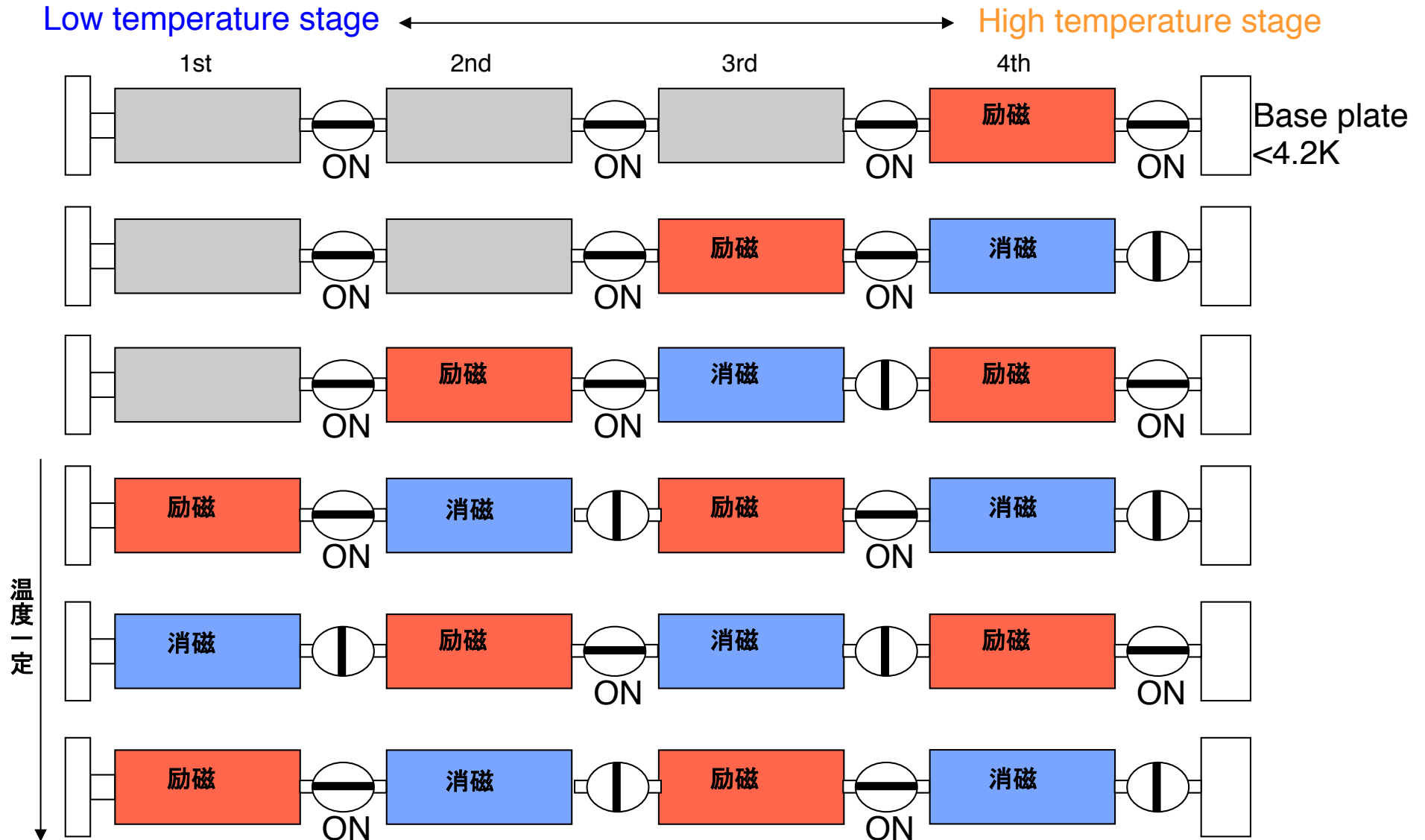
- ・4段のユニット(磁性体+マグネット)を直列に接続
- ・各ステージ間には熱スイッチがあり、そのON-OFFによりステージ間の熱流を制御
- ・ADRからの排熱は0.1W型4K-GM冷凍機によって吸熱される

Stage	Refrigerant	Mass	Field
1	CPA	90g	0.2T
2	CPA	90g	0.8T
3	CPA	90g	1.6T
4	GLF	66g	4T

\* CPA=クロムカリウムミョウバン    GLF=GdLiF<sub>4</sub>



# Continuous ADR サイクル



# 熱スイッチ

## 自己吸着型ガス伝導熱スイッチ (PGGHS=Passive gas-gap heat switch)

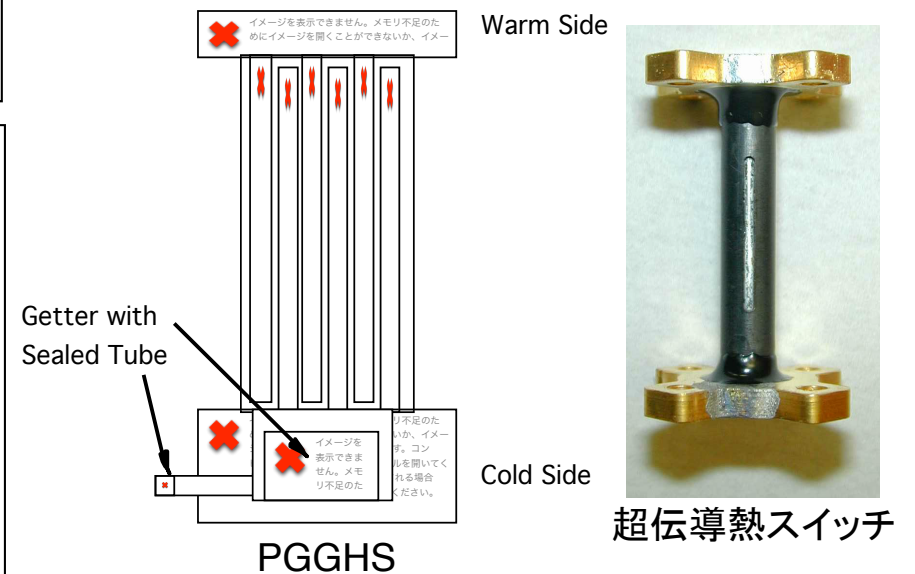
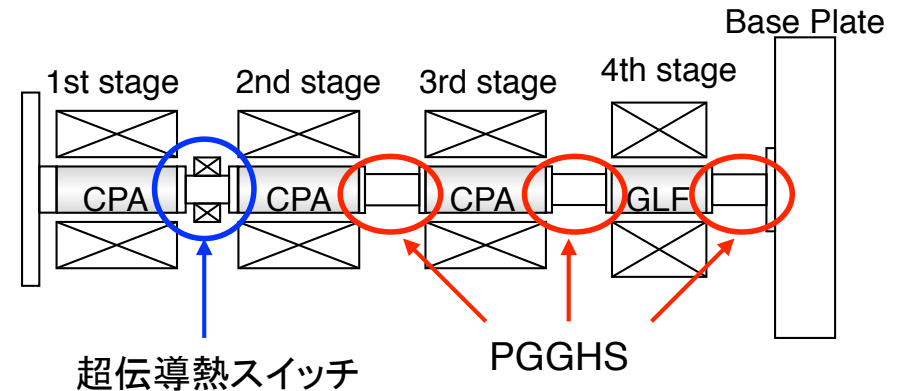
伝導ガスの吸着・放出によって熱スイッチのON-OFFが制御される  
ON-OFFの切り替えは低温端の温度に依存

低温端温度 > ON-OFF温度 : 熱スイッチON  
低温端温度 < ON-OFF温度 : 熱スイッチOFF

## 超伝導熱スイッチ (Pb, or Sn)

超伝導と常伝導状態の熱伝導率の差を利用した熱スイッチ  
超伝導コイルによる磁場操作でON-OFFを制御

磁場印加 → 常伝導状態になる : 熱スイッチON  
磁場消磁 → 超伝導状態になる : 熱スイッチOFF



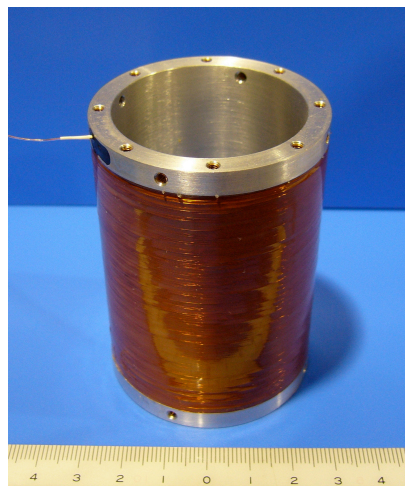


# CADRの構成部品

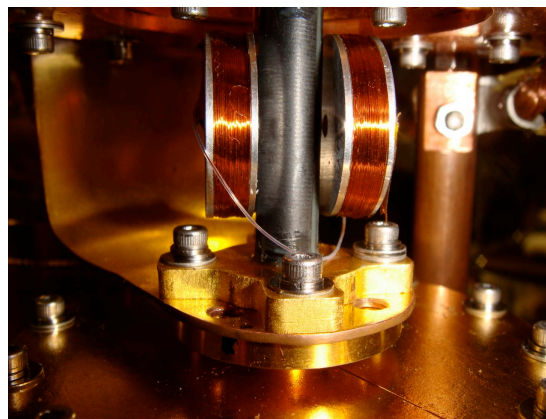
- ・ 主要部品はNASA (Goddard)に出張し、作製、テストを行った  
マグネット、熱スイッチ、CPA磁性体(マグネットは1台破損)
- ・ クライオスタットを含めた熱設計とADRの組み込み製作は日本側
- ・ ADRコントローラのカスタマイズ(LakeShore社)→電源+温調
- ・ パソコンによるデータ収集、サイクルの手動操作



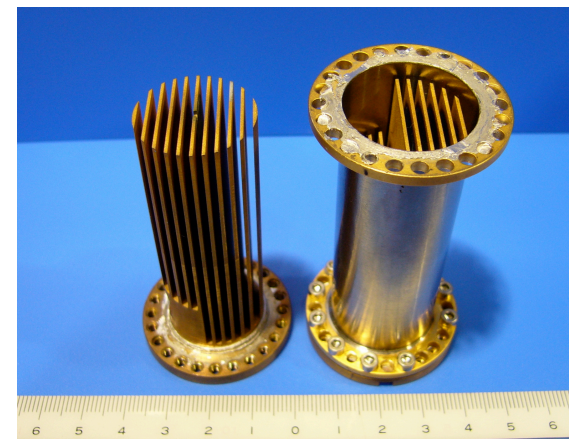
磁性体ユニット



超伝導マグネット

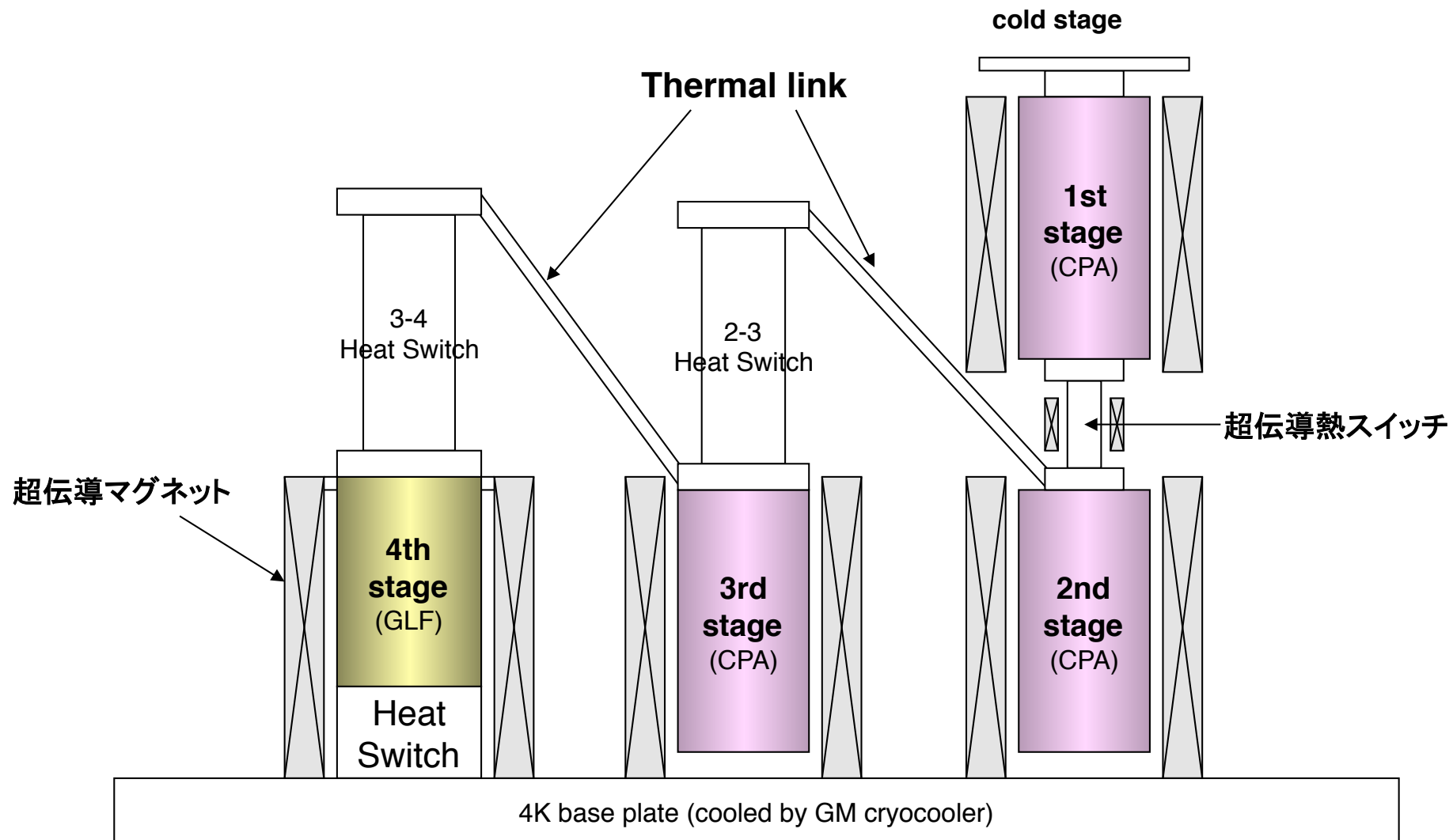


超伝導熱スイッチ



自己吸着型ガス伝導熱スイッチ

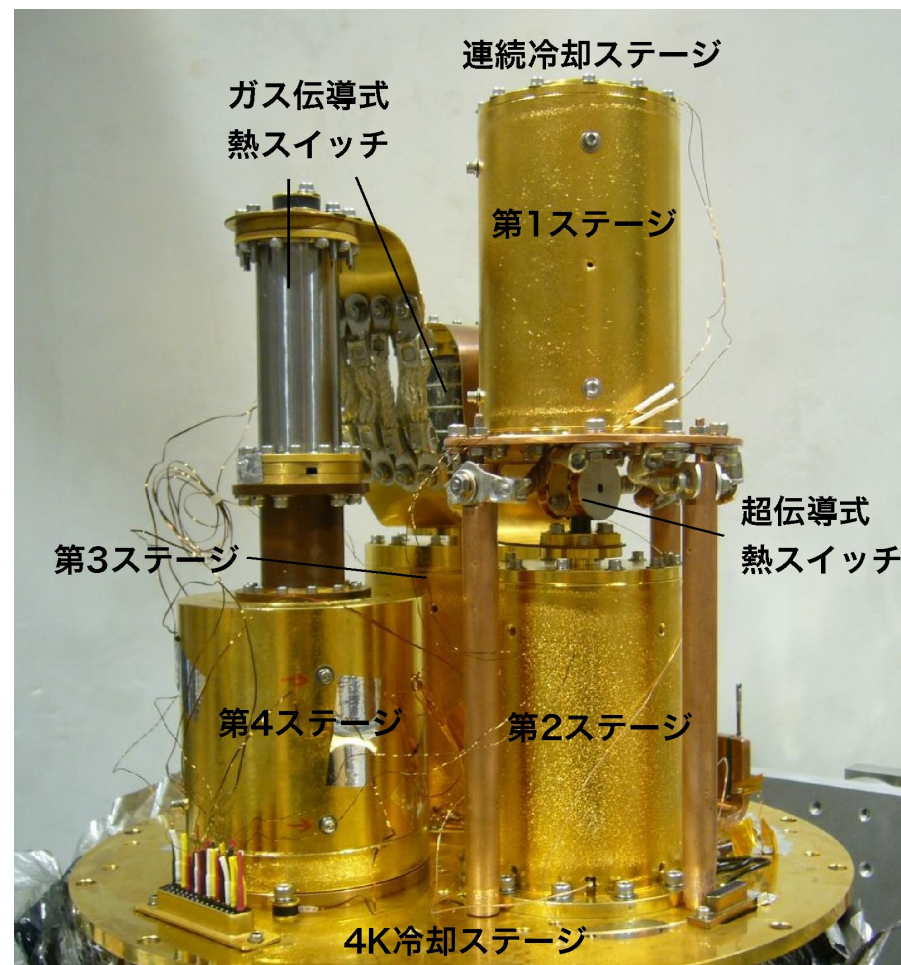
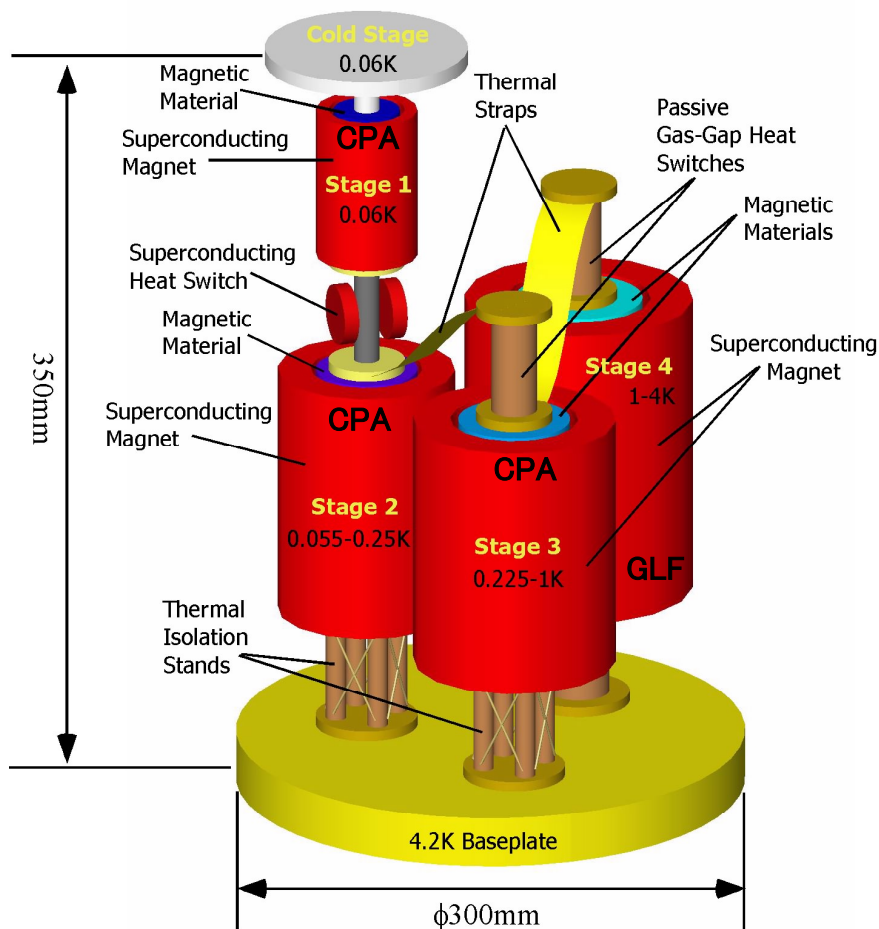
# 実験装置の熱リンク



\* 4th stageとBase plate間の熱スイッチは4th stageとの一体型

# 連続型ADR冷凍システム主要部

磁性体 (CPA、GLF)、熱スイッチ (Gas-Gap、超伝導)、マグネット、磁気シールド

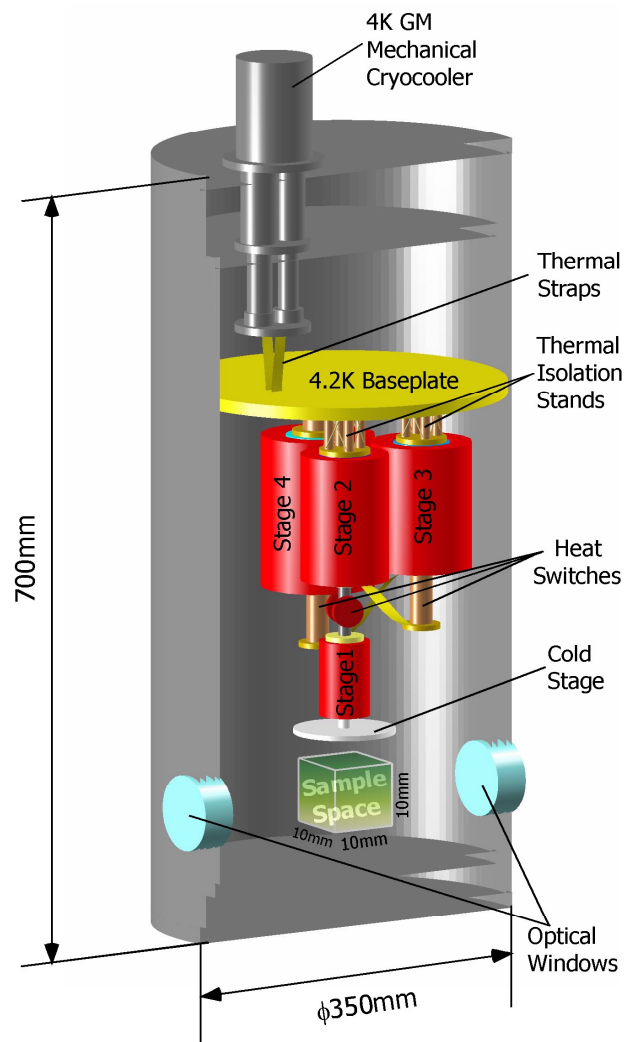


磁性体: CPA= $\text{CrK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , GLF= $\text{GdLiF}_4$



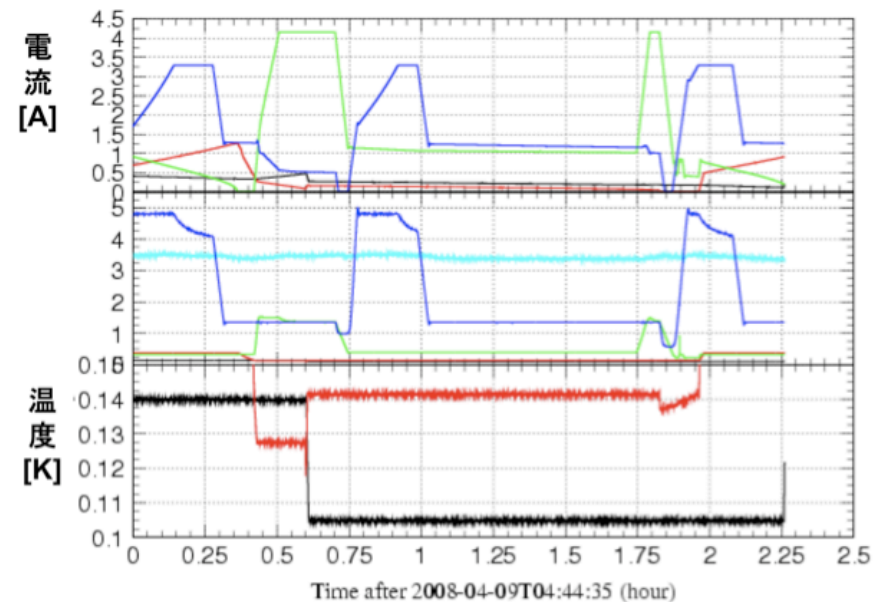
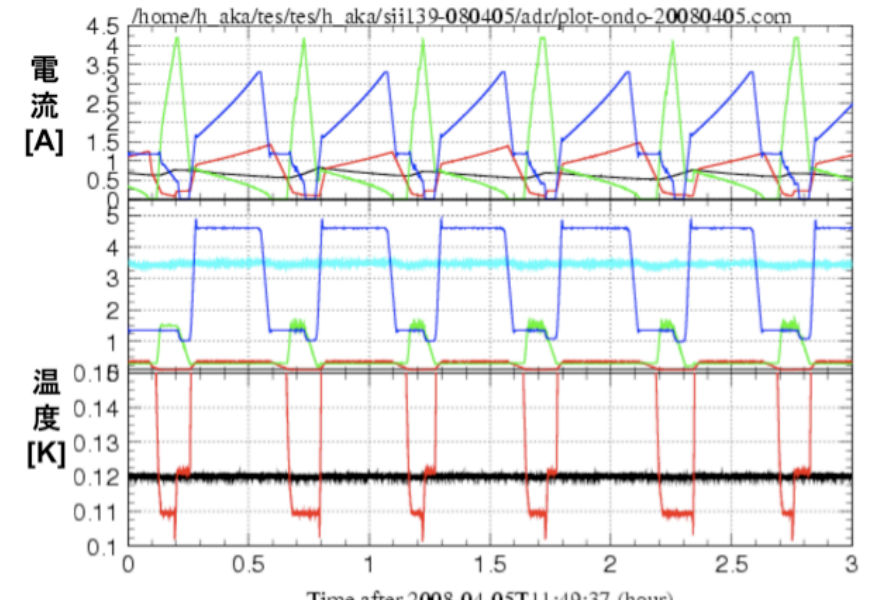
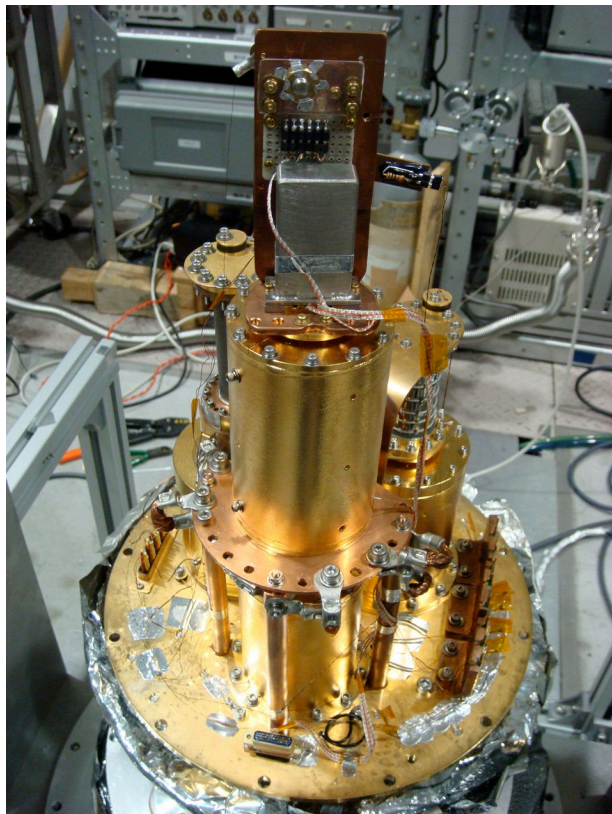
# 連続型ADRクライオスタット部

Nb<sub>3</sub>Al超伝導線使用による低熱侵入化、アルミ材料の多用による軽量化



# 地上での冷却試験

- 安定した連続型ADRサイクルの駆動に成功
- 冷却ステージを105~120mKでPIDコントロール(rms 235~596 $\mu$ K)
- TES型X線カロリメータの作動を確認

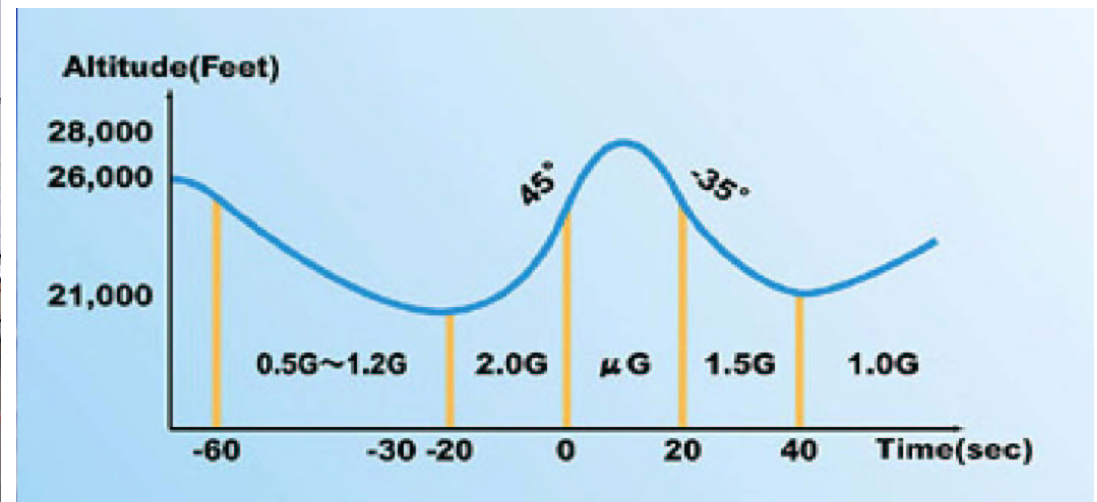




# 航空機実験の概要

県営名古屋飛行場(旧小牧空港 ダイヤモンド・エア・サービス)にて実施

- ADRシステム作動条件のチェック
  - 予冷用4K-GM冷凍機(特に圧縮機)
  - クライオスタット、ADR本体(振動)
- 発生温度はどのくらいか
- TES型X線センサー: ISAS・首都大学・金沢大学グループ
- 固体ヘリウムの冷却: 東工大・奥田研究室





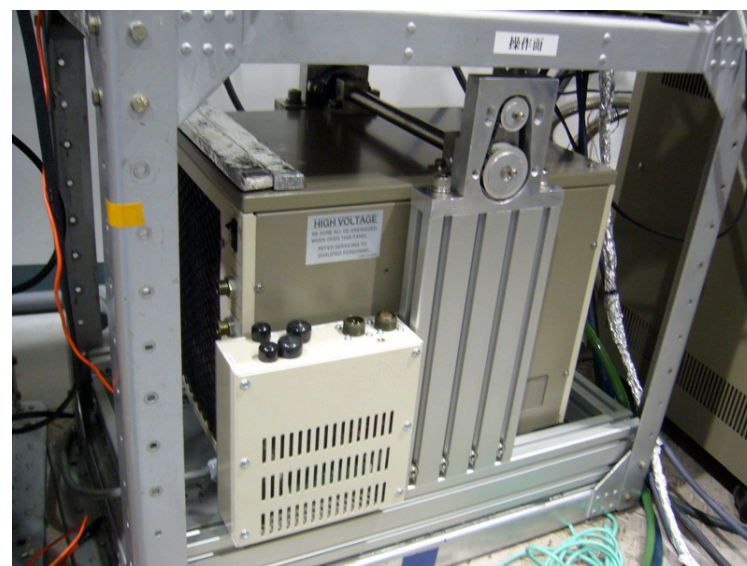
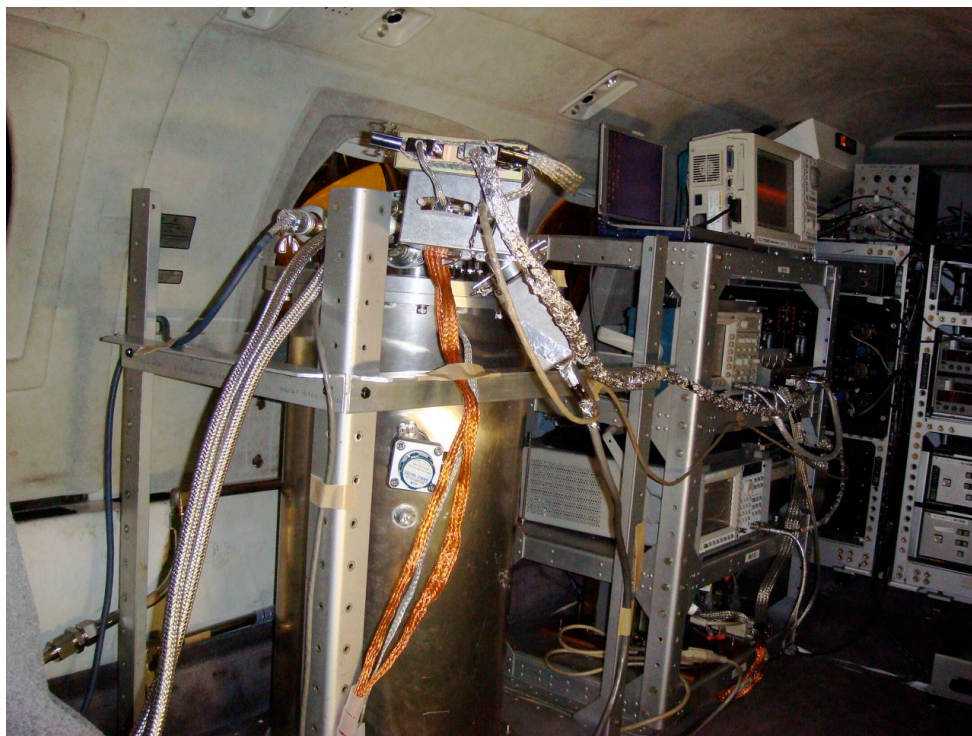
# 航空機実験準備における問題点

- ・ 予冷時間の事前調整: 室温から4Kまで36時間(月曜日の実験)
- ・ 電源供給の中断
  - ・ 実験当日に航空機へ搭載しなくてはならない(15分)
  - ・ 格納庫から駐機場への移動(10分): 4K→10K
  - ・ 機内温度の上昇(圧縮機性能の低下)
  - ・ 対処策  
駐機場での準備時間を増やすことで(2.5時間以上)  
連続作動条件をクリア



# 航空機実験用ADR

- 3ラック構成 (MU-300占有)
- クライオスタット65kg、TES計測88kg
- 圧縮機・ADRコントローラ90kg
- 電力: 14A+4A (100V, 60Hz)
- EMI試験を含め、条件を全てクリア





# 航空機実験の概要

## MU-300



巡航高度

13000ft

室内温度

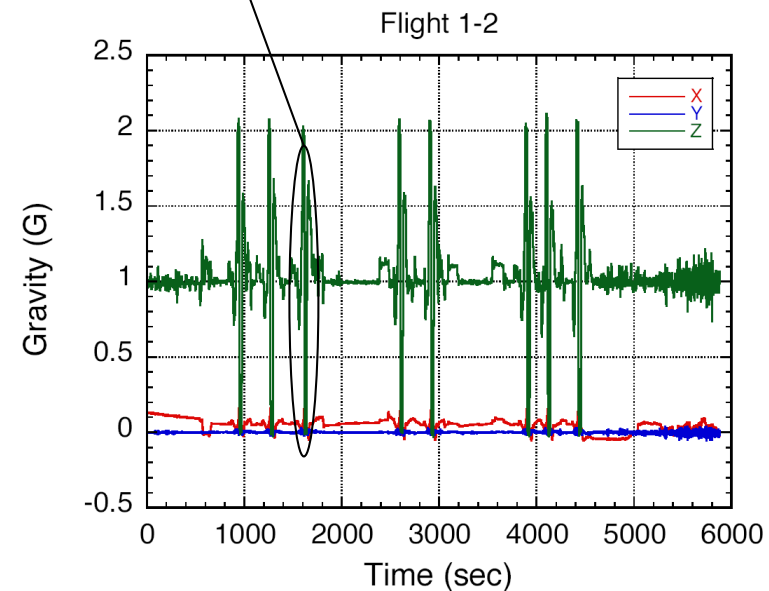
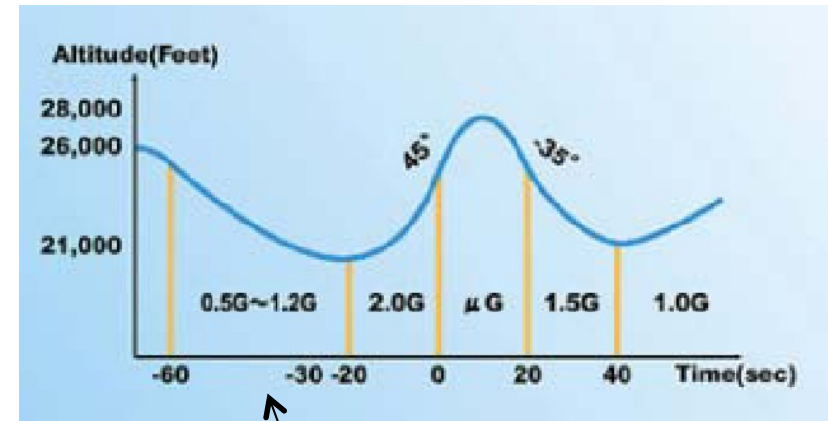
25°C程度

パラボリックフライト

微小重力時間20-30秒

数回~10回程度

## 1パラボリックフライトにおける飛行軌跡



全飛行期間中、3軸のGレベルの変化

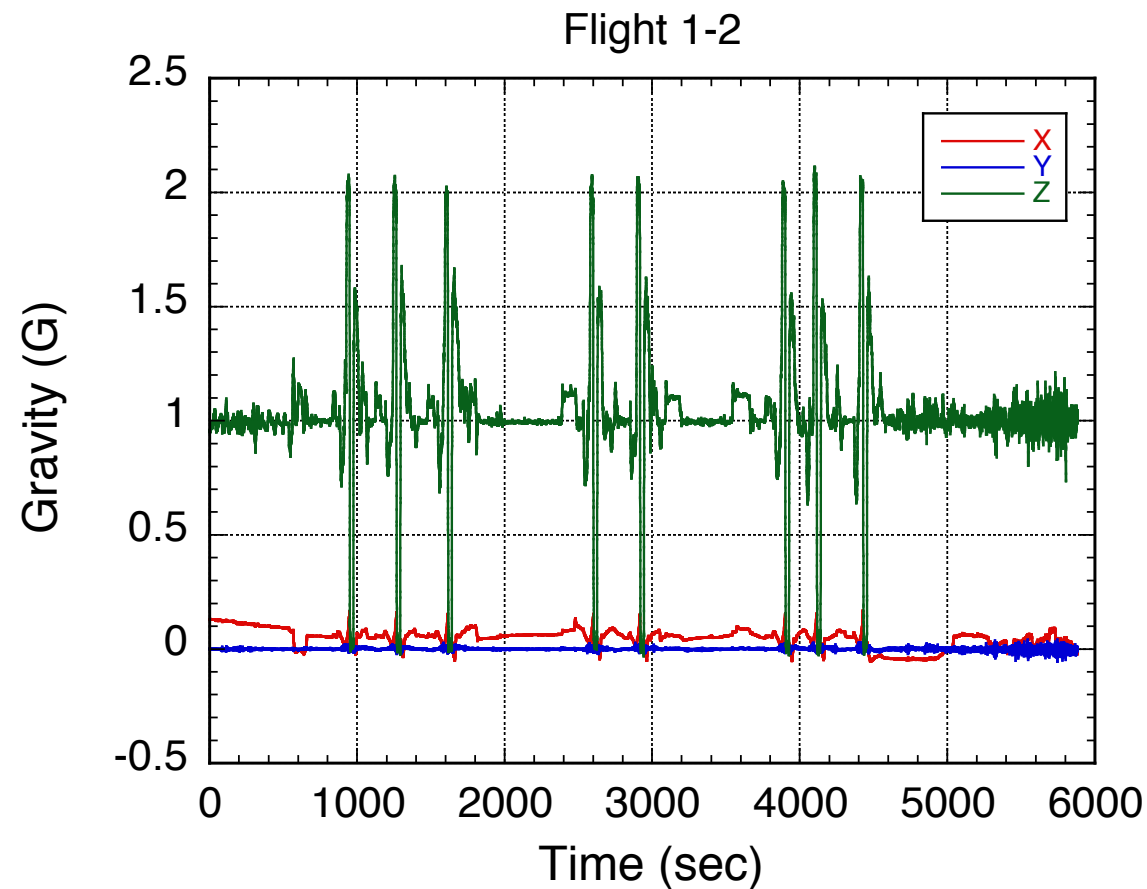
# 機内の振動ノイズ

## ・航空機内における振動ノイズ

・低周波(数10Hz):Taxing、離陸時、乱気流(振幅大)

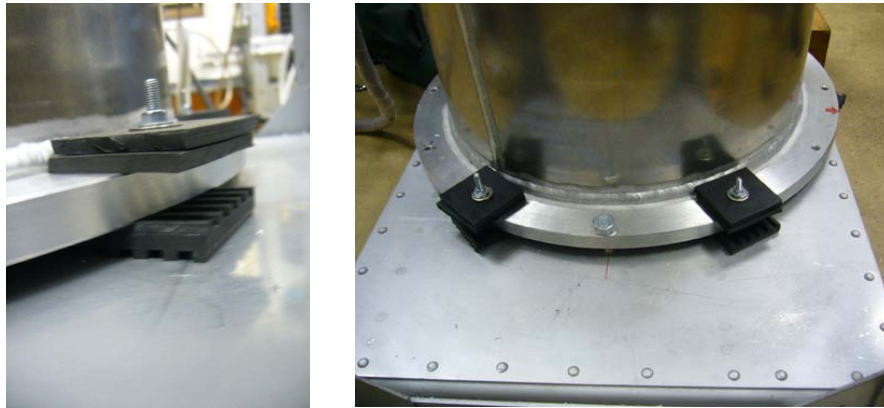
→熱スイッチのショート(連続サイクルのやり直し)

・高周波(kHzオーダー):ジェットエンジン→ADR冷却部の発熱



# 除振装置の変遷

## DAY 3(自作除振装置)

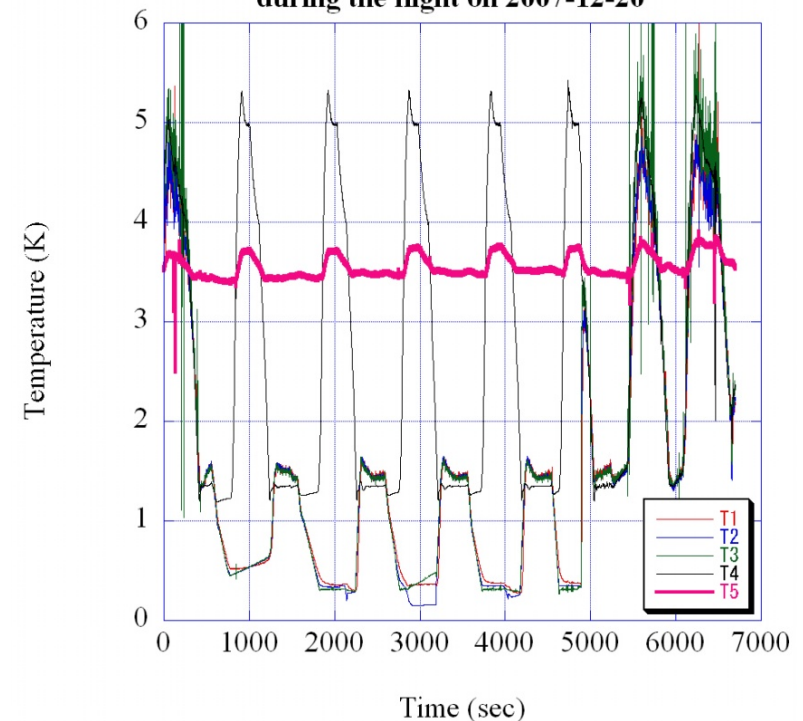


## DAY 4(市販空気ダンパーと耐震君)



## DAY 4における結果 (S2で150mKを得る)

CADR trying to start the cycle  
during the flight on 2007-12-20

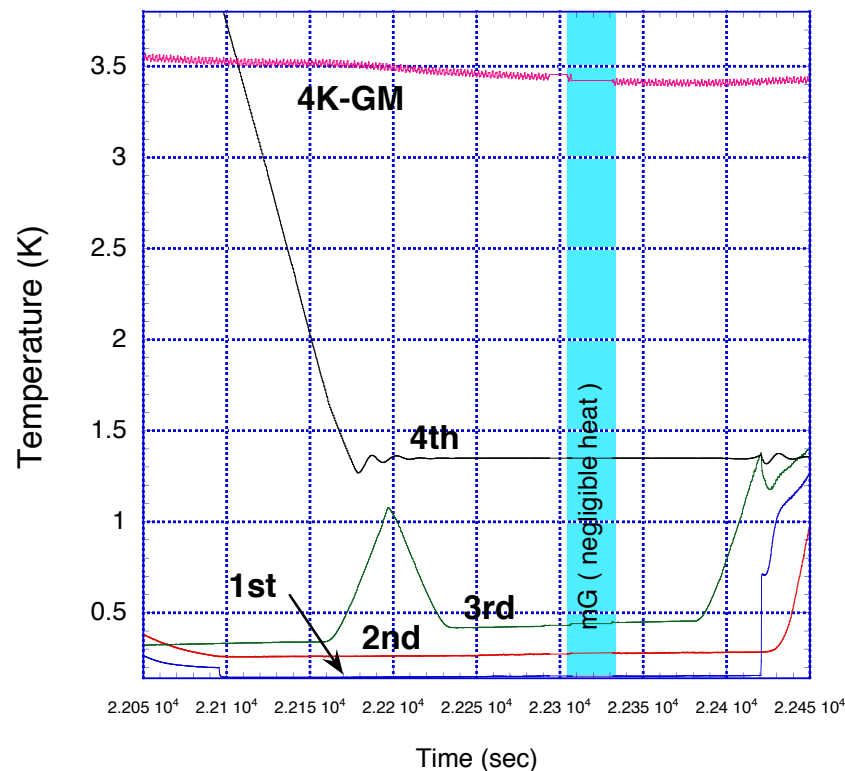


- ★航空機振動の定量的解析に基づいた除振システムの必要性
- ★GMの周波数による地域差問題の考察が必要

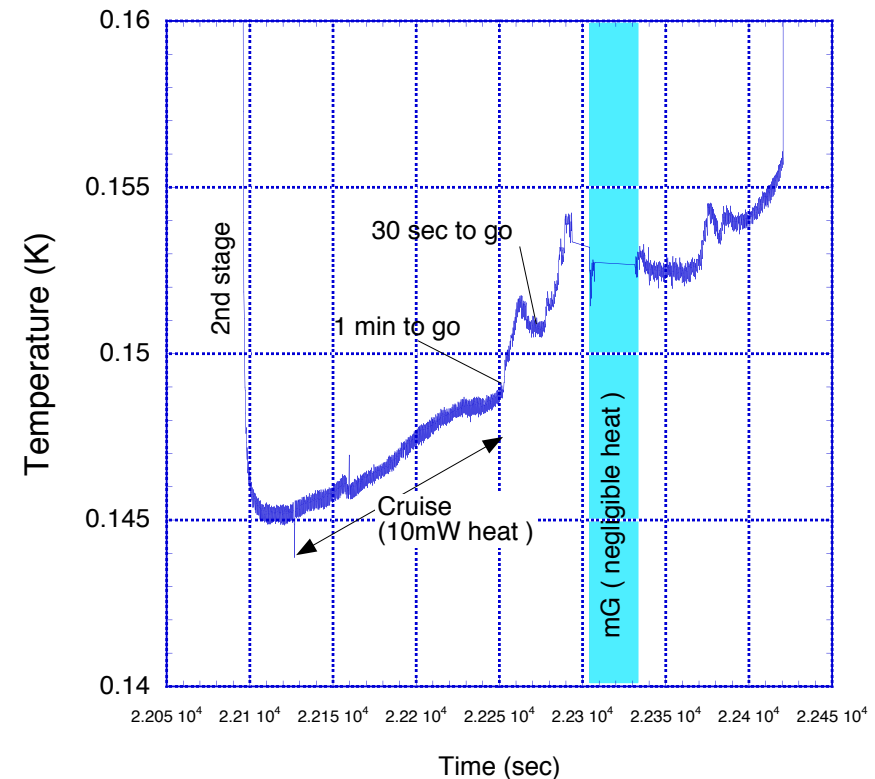
# 航空機実験結果

- ・ 機械式4K-GM冷凍機の作動 → ほぼ問題なし(3.3K~3.7K)
- ・ 微小重力発生時におけるADRの運転特性 → 安定化
- ・ クライオスタット、ADRの2Gに対する運転強度 → 問題なし
- ・ Taxing時、離陸時、巡航時の乱気流による揺れ → 熱スイッチのショート
- ・ 新開発の除振装置は効果あり → 巡航時の熱ショートはほぼ抑制

Comparison of all stages  
(2008-03-21)



Comparison of heat leak to 2nd stage  
(2008-03-21)

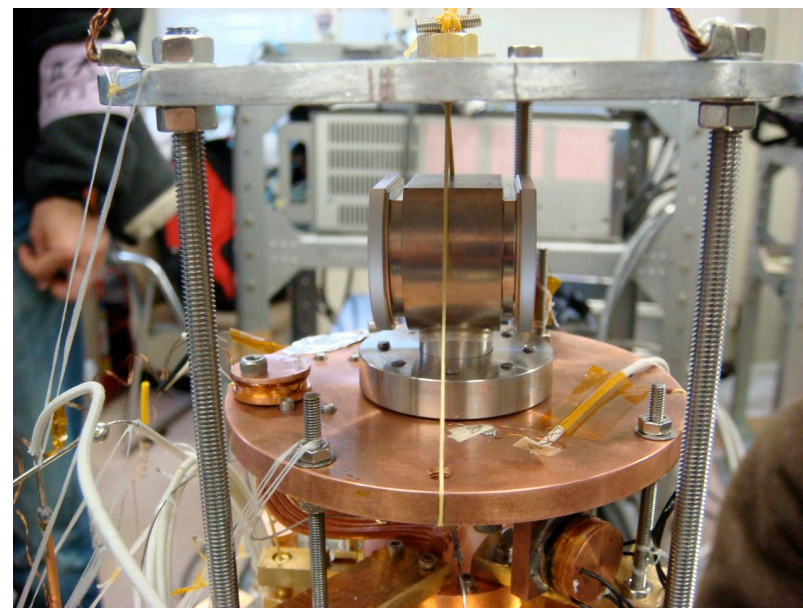
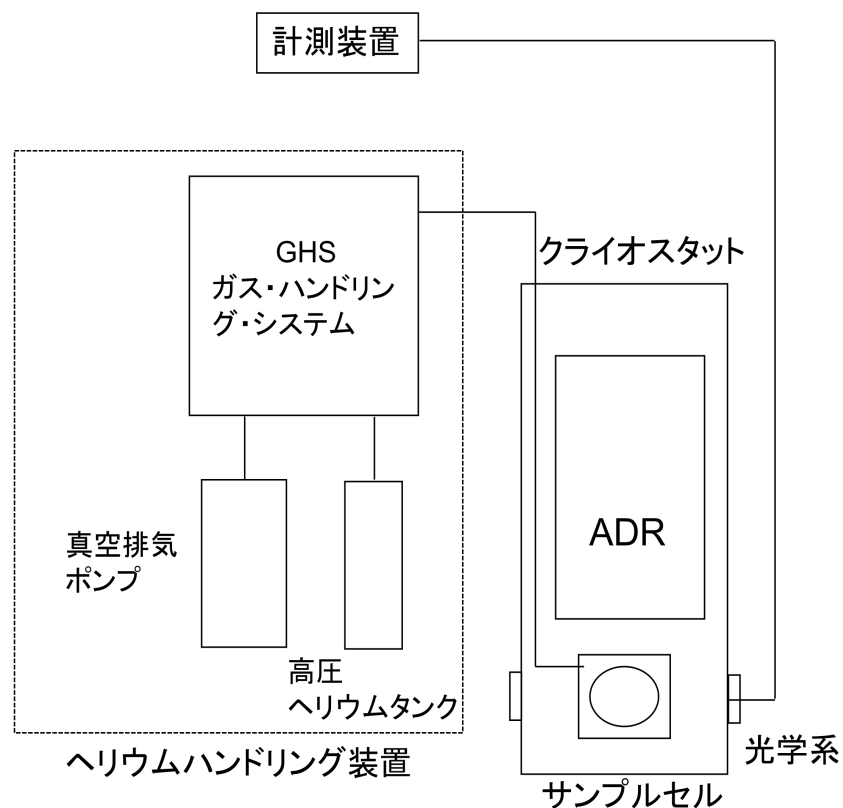




# 固体ヘリウムの生成

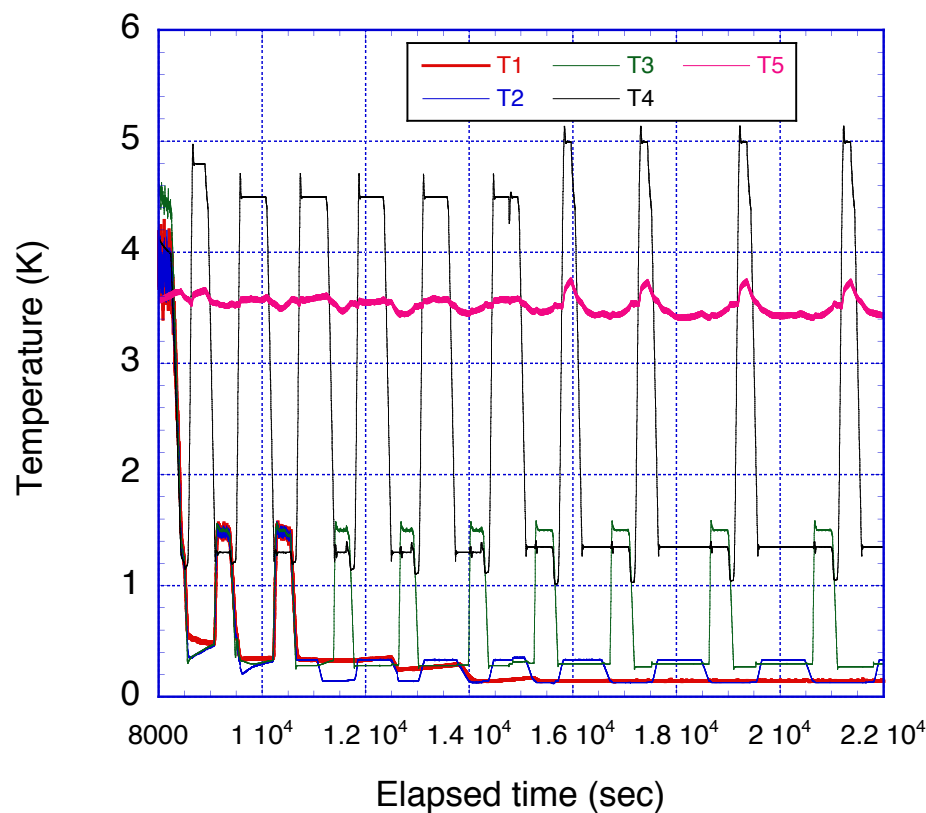
固体ヘリウムの冷却(東工大・奥田研究室)

- 冷凍能力仕様: 0.1K, 0.1mW
- セル容積: 3.5cc程度(当初)、17cc(実際)

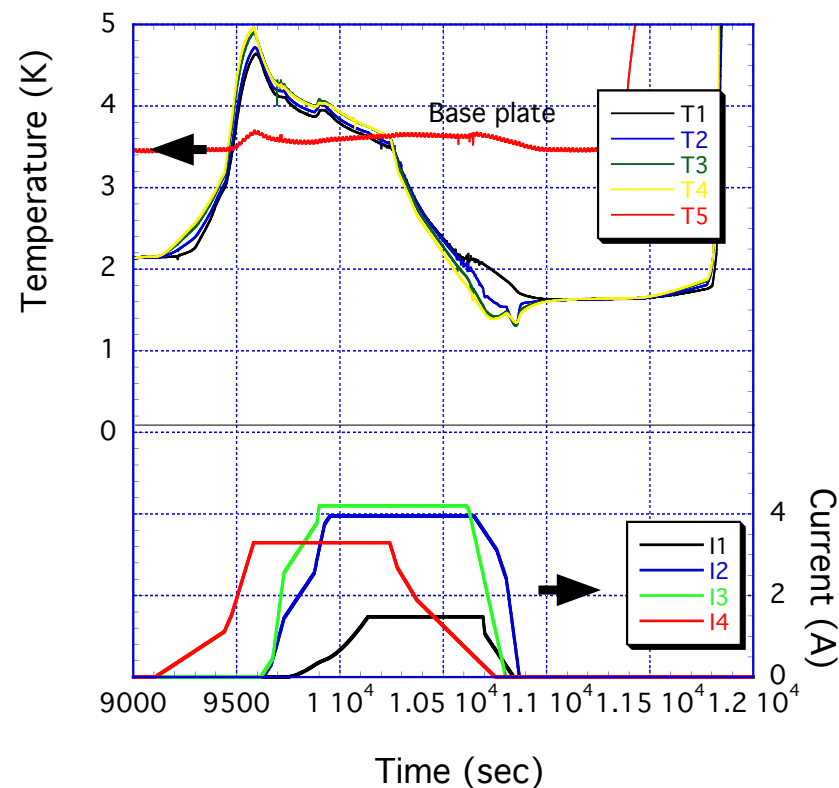


# 実験結果(地上)

## 希薄ヘリウムガス連続運転



## 2気圧ヘリウムガスワンショット運転



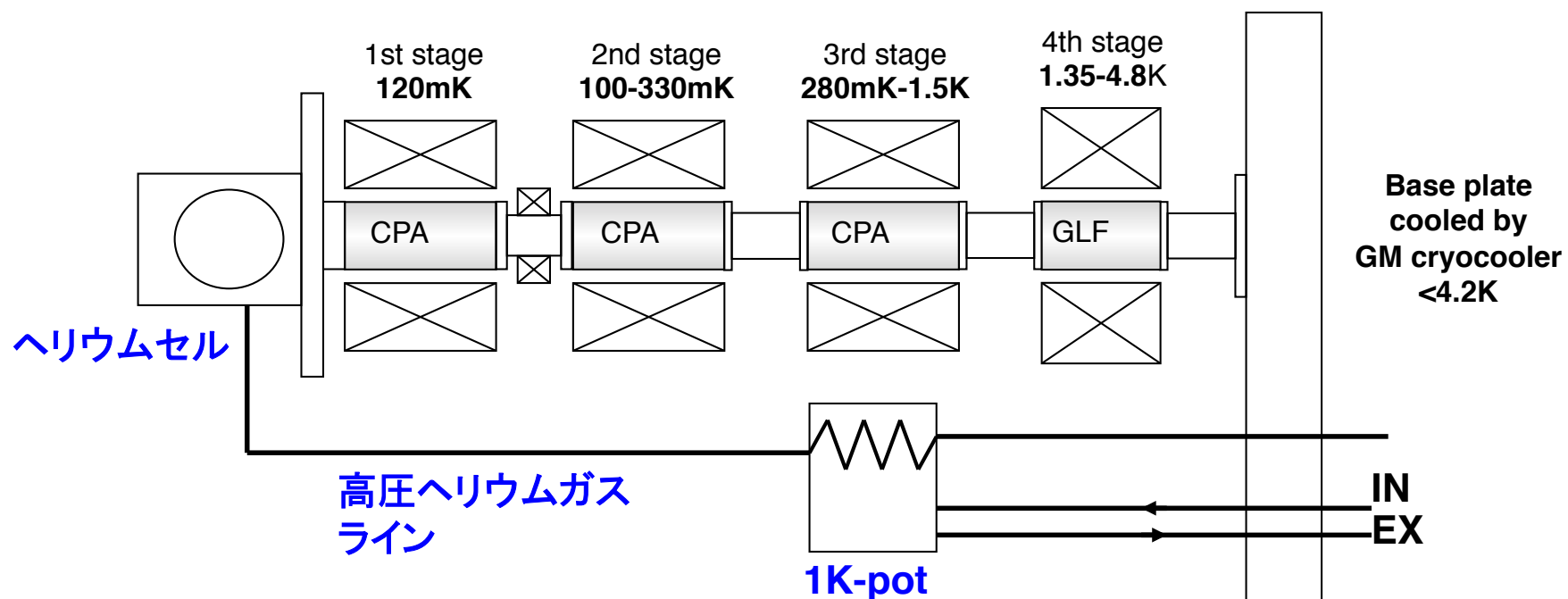
固体ヘリウム生成温度1K以下まで到達できなかった

- 熱容量・熱侵入が設計値の5倍以上
- 設計値: 1日程度で0.3K以下に到達 → 実際のセルでは1週間以上かかる計算
- 中間ステージ(1K)冷却が4段ADRでは不可能 → 1Kポットを設置すれば現状でも可能

# ヘリウム予冷用1K-potとの併用

## ヘリウム予冷のために1K-potを設置

- ・1K-potにおいてヘリウム4を減圧して予冷する
- ・サンプル用ヘリウムを1~2Kまで予冷したのちヘリウムセルへと直接導く
- ・1Kから300mK以下へはCADRによって冷却する



# 総括と展望

---

- ・ 汎用連続型ADR
  - 連続カルノーサイクル駆動を達成した
  - 連続型として初めてTES型X線カロリメータの駆動を実証した
- ・ 航空機実験(微小重力環境)
  - ADRの特性は安定化し、微小重力での作動は問題なし
  - より一層の振動対策が必要
- ・ 固体ヘリウムの生成実験
  - 現状のADR装置の改良には時間的猶予がなかった
  - 1Kポットを設置すれば、最小限の改良で運転は可能(現在、進行中)
  - 本来は、1K冷却用にADRユニットを増設することが望ましい(Active熱スイッチ使用)
- ・ より汎用なADRを目指して
  - 中間ステージにサーマルアンカーが必要→5段方式
  - より簡便なコントローラ開発



# Acknowledgement

本研究は宇宙環境利用公募地上研究によって実施されました。

JSF、JAXA、ダイヤモンド・エア・サービス

東工大・物理 奥田研究室、首都大学東京・物理 石崎研究室、

金沢大学・物理 藤本、松本(宏)研究室、NASA/Goddard D. Wegel, M. Dippiro

東北大学 佐藤名誉教授、JAXA宇宙用冷凍機WG

