

ASTE 新3カートリッジデューワーの冷却性能試験

○佐藤直久, 稲田素子, 藤井泰範 (国立天文台先端技術センター)
浅山信一郎, 伊王野大介, 奥田武志 (国立天文台チリ観測所)

0. 概要

ASTE (Atacama Submillimeter Telescope Experiment アタカマサブミリ波望遠鏡実験プロジェクト) の新3カートリッジデューワーは、ALMAで使用されたものと同じインターフェイスを持つ外径φ170mmのカートリッジ型受信機を3台まで同時冷却可能なデューワーである(右写真 上:外観、下:内部写真、カートリッジ挿入状態)。このデューワーは2015年9月末に完成し、現在は先端技術センターにおいて冷却性能試験を行なっている。現在までに、無負荷のカートリッジを3台搭載した状態でカートリッジの3段目ステージにおいて冷却温度3Kを達成し、十分な冷却特性を持つことを確認できた。



ASTE新3カートリッジデューワー(以降は「**新ASTEデューワー**」と略す)と同様に、カートリッジ型受信機を3台冷却できるデューワーは過去に2台製作されている。最初の1台は2000年にASTE用として製作されたものであり、2台目は百式と呼ばれ、ATF (ALMA Test Facility) の試作アンテナ搭載用として製作されたものである(以下「**旧ASTEデューワー**」「**ATFデューワー**」と称す)。新ASTEデューワーはこれらの後継機で3台目にあたる。これらのデューワーは基本的な構造は変わらないが細部に変更が加えられてきた。新ASTEデューワーではφ170mmカートリッジ3本搭載のためにデューワーの直径を拡張し、これらを対称位置に配置したことが変更の一つであるが、本シンポジウムでは冷却性能向上を目的として行ったセンターピラー周囲構造の見直しを中心に報告する。



1. 3カートリッジデューワーの内部構造(図1、図2参照)

デューワー内部は、3段式GM冷凍機により3種類の温度ステージを持ち、サーマルリンクによってカートリッジ型受信機と熱的にリンクしてそれを冷却する。1段目と2段目ステージの周囲からはそれぞれの温度の輻射シールドが立ち上がり、外周および上方からの輻射遮りながら上方でセンターピラーに固定される。センターピラーの中心には、デューワーを真空引きした際の構造的補強となるSUS製のセンターシャフトが通っており、デューワーによって構成は異なるが、センターシャフトからの熱輻射を軽減させるためにインシュレーターパイプやセンターパイプを周囲に配置している。各温度ステージは3本の支柱によって一段下の温度ステージから支えられ、かつ中央のセンターピラーにステージ支えを介して固定されている。この「ステージ支え」はセンターピラーを締め付けることで固定されるために、センターパイプと温度ステージは熱的によく接触している状態になる。

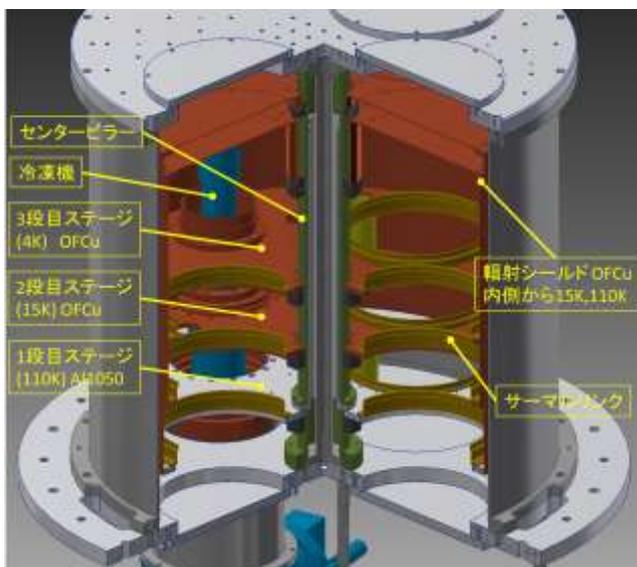


図1 3カートリッジデューワーの内部構造

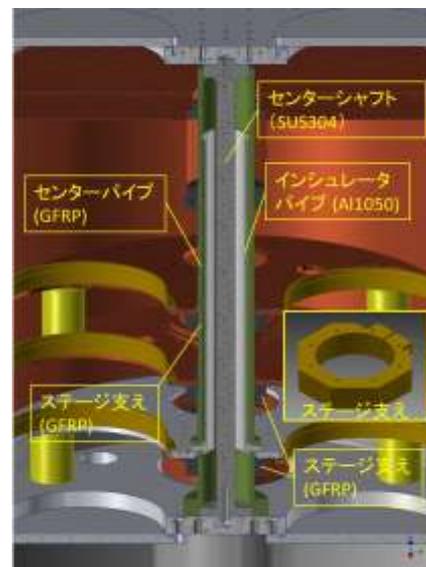


図2 センターピラー詳細(新ASTE)

2. 熱解析

新ASTEデュワーの構造を検討するにあたり旧2台のデュワーから改善できることを探したところ、センターピラーから3段目温度ステージへの熱流入が温度ステージの冷え方に影響していることが推測された(図4)。新ASTEデュワーではここを熱的に切り離すことを考え、これを定量的に確認するべく解析ソフトを用いた熱解析を行った。熱解析はカートリッジ型受信機と輻射シールドを省略して簡略化したモデル(図5)に、3種類のセンターピラー構造をそれぞれ表現して行った。3つのデュワーの解析結果として3段目ステージへの総熱流入量を図6に示すが、新ASTEデュワーの3段目ステージへの総熱流入量は旧ASTEデュワーと比較して約220mW減少し、ATFデュワーからも約80mW減少することがわかった。冷凍機の冷却能力が1Wであることから、これは決して小さな変化とは言えない。また、解析結果詳細をまとめて図8(次ページに図と解説を掲載)に示すが、熱流束のコントアマップにおいて冷凍機熱リンクとセンターピラー間の熱流量が、センターピラー構造の変遷によって徐々に減っており、インシュレーターパイプの追加と、熱的切り離しの効果が表れていることが確認できる。

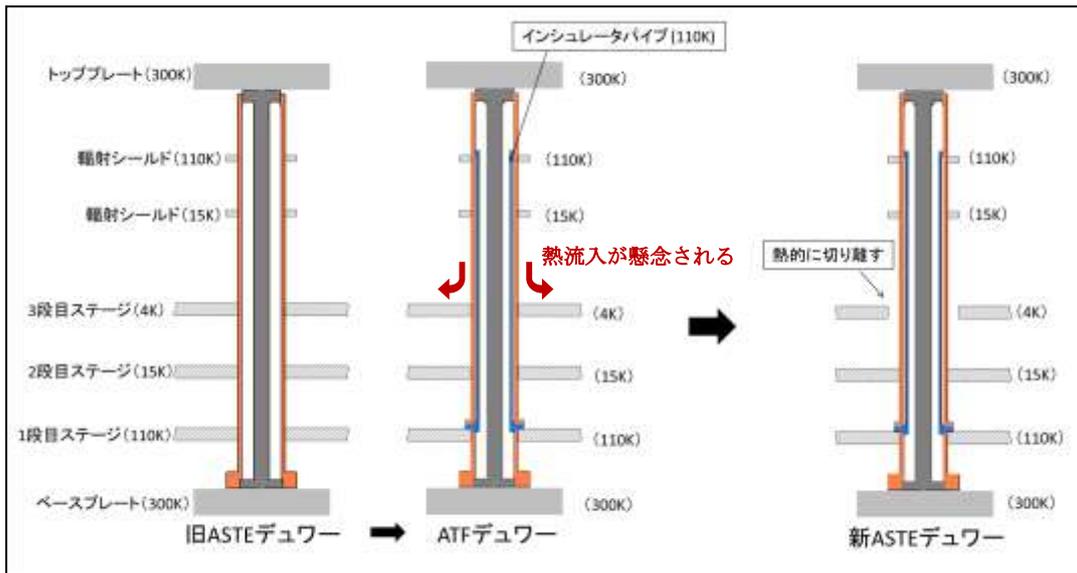


図4 センターピラー構造の変遷



図5 解析モデル

モデル名	3段目ステージへの熱流入量[mW]
旧ASTE	310
ATF	169
新ASTE	84.2

図6 解析結果(最終結果)

以上の解析結果により、新ASTEデュワーではセンターピラーと3段目温度ステージを熱的に切り離す様な構造をとるよう決定した。しかしセンターピラーは温度ステージを固定することによってその水平方向の移動を拘束する役目を持っているため、機械的には固定をして熱的には切り離すことを実現しなくてはならない。このためステージ支え部品の内面に小さな突起を設けて、センターパイプとの接触面積を大幅に減少させて、その効果をねらった(図7)。

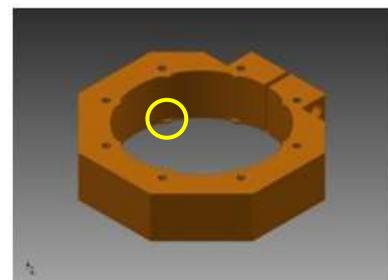


図7 ステージ支えと突起(3段目ステージ)

(図8 コントアマップの解説)

図8は、センターピラーの構造が異なる3タイプのデュワーについて、冷却時の熱流束の大きさをコントアマップで示したものである。3段目ステージ上で冷凍機とセンターパイプの間の熱流束に注目すると、ほぼ同じ形状と大きさの熱流束が見られる。しかし、このコントアマップは見易さのために、ある数値以上の熱流束のみを表示している（旧ASTEデュワーでは $300\text{W}/\text{m}^2$ 以上、ATFデュワーでは $80\text{W}/\text{m}^2$ 以上、新ASTEデュワーでは $30\text{W}/\text{m}^2$ 以上を表示、冷凍機からセンターパイプへの熱流束がほぼ同じ大きさに表示されるように調整）モデルが進化するにつれて熱流束が減少している事がわかる。またこの解析結果によって、3段ステージに流入する熱流量を積算しまとめたものが図6である。

3. 冷却性能試験

このデュワーで使用するカートリッジ型受信機の熱負荷がどの程度許容できるか、判断材料となる基礎的なデータを得るために冷却性能試験を行った。3本のカートリッジ型受信機が挿入された運用時の熱的負荷が高い状態を再現するために、熱伝導の負荷としてカートリッジ型受信機の一つであるALMA BAND8 受信機を2台挿入し、残りのポートに負荷用のヒーターと温度センサーを搭載した測定用カートリッジを挿入した（図9）。2段目および3段目のヒーター通電量を段階的に変化させて得られた測定結果（例として1段目ステージが無負荷の場合）を図10に示す。図10の横軸は3段目ステージ（4K）の温度、縦軸は2段目ステージ（15K）の温度を示し、グラフ中の赤字は3段目ステージに対するヒーター負荷、緑字は2段目ステージに対するヒーター負荷を表す。これによりそれぞれの熱負荷に対する各ステージの到達温度を得ることができた。また、カートリッジが3本挿入されていて負荷の無い状態で3段目ステージが3Kまで冷却でき、このデュワーが十分な冷却特性を持つことを確認できた。

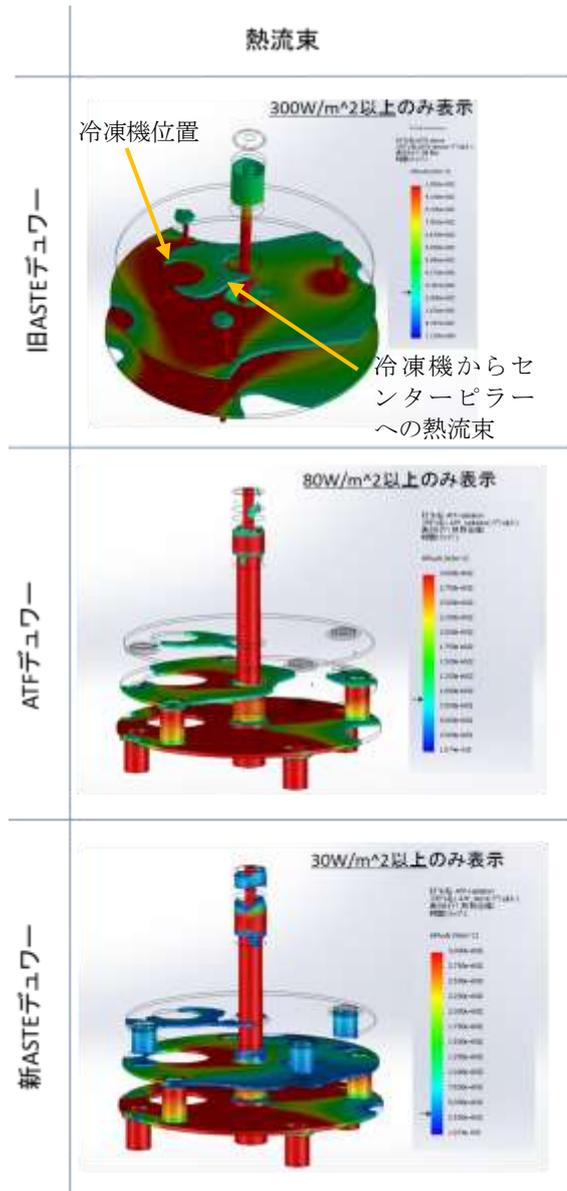


図8 解析結果（コントアマップ）

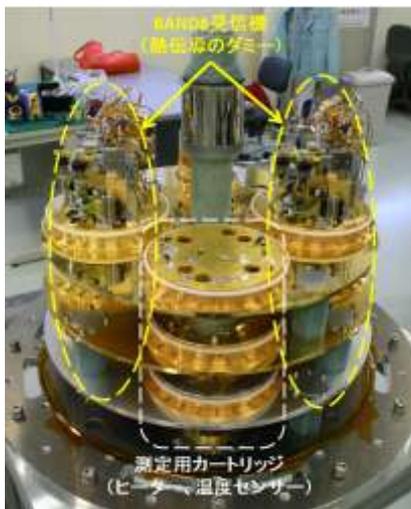


図9 測定セット

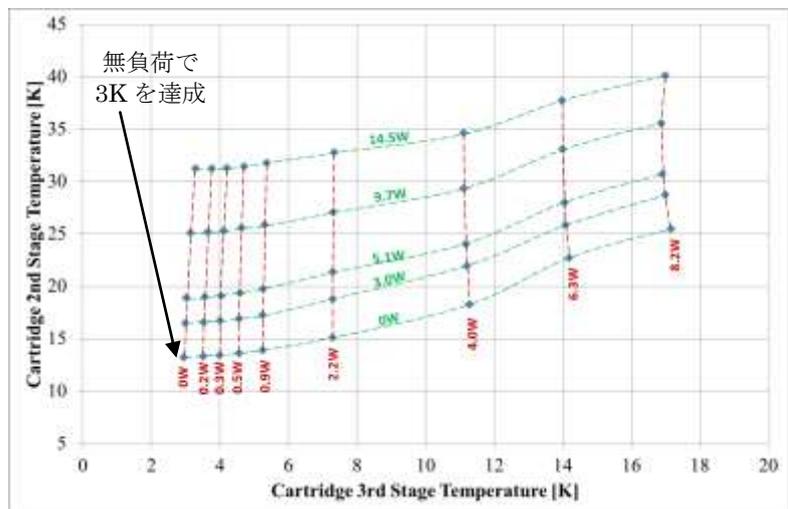


図10 冷却性能曲線例（1段目ステージ無負荷）

4. 解析結果と試験結果との比較

2の解析計算がどの程度実態を正しく表現しているか大まかに確認するために、3段目温度ステージに流入する熱量について解析結果と試験結果との比較を行った。

2の解析モデルでは15K 輻射シールドとカートリッジ型受信機が表現されておらず、これによる熱流入量を手計算で求めて解析結果と合算したところ熱流入量は合計で約160mW となった(図11)。

一方で冷却性能試験の測定結果から熱流入量を導いてみる。

- ・冷凍機1W 負荷時 の Cold Head 温度は4.27K (冷凍機出荷時試験結果より)
- ・Cold Head とデュワー側ステージ温度差 0.2K (推測値)
- ・カートリッジ側とデュワー側ステージの温度差 0.6K (図12より)

上記の3条件と、図10の冷却性能曲線を補間することにより、ヒーター出力が800mW 程度になると、冷凍機が1Wの負荷を受けた場合の温度まで上昇することがわかる。よって $1W - 800mW = 200mW$ が試験結果から得られた3段目ステージ(4K)への熱流量となり、解析計算の結果160mWと比較して近い値を得ることができた。

5. まとめ

- ・既存する3カートリッジデュワーの一部構造を変更し、冷却性能を向上させた。また熱解析を行ってその効果を確認した。
- ・冷却性能試験を行い、このデュワーで使用するカートリッジ型受信機の熱的仕様を検討するための基礎的なデータを得た。
- ・熱解析の妥当性を見るために解析結果と測定結果を比較検討した。その結果完全な一致は得られなかったが近い値を得た。

今回、解析と測定を比較して近い値を得ることができたが、熱解析ではモデルに輻射シールドが表現されてなく、測定においてもまだ改善していく余地がある。今後は熱解析、測定とも強化をして、より精度の高い検討ができるようにしていきたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15H02074 の助成を受けたものです。

inflow discharge to 4K stage		
GFRP of Cartridge	conductive heat	63.6
	radiation heat	1.23E-02
IF Cable	conductive heat	5.7
		0
Wiring	conductive heat	0.6
		0
Waveguide	conductive heat	7.5
		0
15K shield		0
	radiation heat	6.15E-02
15K stage		
Centre pipe	From FEM result	84.2
Stage support		
total		161.6

図11 解析と手計算結果を合算した3段目ステージへの熱流入量(単位[mW])

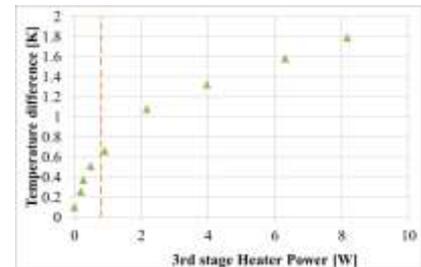


図12 ヒーター負荷(X軸)に対するカートリッジ側とデュワー側の温度差(Y軸)の実測値