

## 高気孔率を有する多孔質金属による高エミッシビティ材料の開発

Development of high emissivity material made of foam metal of high porosity

高田 卓(核融合研); 井上 優貴 (ACADEMIA SINICA/総研大); 都丸 隆行 (高エネ研)  
 TAKADA Suguru (NIFS); INOUE Yuki (ACADEMIA SINICA/Soken U.); TOMARU Takayuki (KEK)  
 E-mail: takada.suguru@LHD.nifs.ac.jp

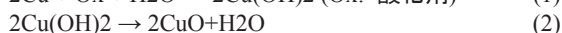
## 1. 研究背景

昨今、極低温を必要とする宇宙機等では極低温においても高エミッシビティ(放射率)、つまり長波長域において黒体とみなせる機能性材料の開発が必要となっている。高い放射率と高い熱伝導率、耐宇宙線性の要素を兼ね備える黒体が求められており、全てを同時に達成することが課題となる。本研究においては、発泡金属やfoam metalと呼ばれる高気孔率を持った多孔体金属の中でも銅を使った黒体開発に臨んだ。

## 2. 発泡銅を用いた黒体の作成

幾何学的に複雑な多重反射を生む多孔体を利用することで、高放射率を達成することが主眼であるが、反射する金属材料を黒化することでより高い効果を狙うものである。最も単純な黒化方法として酸化銅を析出する方法を利用した。酸化銅表面を作ることで、赤外領域において低放射率となることが良く知られており<sup>1)</sup>、効果が期待できる。

水酸化ナトリウムを主な成分とする市販の強アルカリ溶液(エポソールCスペシャル:Meltex社製)を用いて、下記の化学式による反応を90°Cの環境で2, 10分間と浸す時間を変更し製作した。



なお、銅板は空气中に放置するとCu<sub>2</sub>O、Cu<sub>2</sub>Sとも析出する。本製作法であっても変色する程自然酸化したサンプルでは反応後の仕上がりも違う。本研究では明確な自然酸化によって変色する前のサンプルを使用しているが、酸化膜を除去してから酸化する手順は踏んでいない。

## 3. 放射率計による放射率測定

本実験では三菱マテリアル社製の発泡銅(平均孔径150μm, 厚さ0.5mm)気孔率90%以上のものを用いた。比較のために平滑面を持つ銅板を上記の黒化処理したものを用意し、市販の半球放射率計(TSS-5X:日本センサー社製<sup>2)</sup>)を用いて放射率を測定した。使用した放射率計は14~150THz領域に感度を持ち、全放射率を測定する能力を有する。

室温下で測定した結果を下記の表に示した(Table.1)。酸化反応時間を上昇するほど放射率は増加する。酸化銅に形成される棘状の酸化膜の厚みが影響していると考えられる。平滑な表面を持つ銅板を酸化したものと比較すると、多重反射の効果を反映して高い放射率を生んでいると考えられる。

## 4. 極低温下における放射熱伝達測定

極低温下において、平行平板間に伝わる放射熱伝達量を直接測定することを試みた。Fig. 1に測定装置の概念図を示す。G-M冷凍機のコールドヘッドの端部に平行平板上に黒化処理した発泡銅を設置し、ヒータによって温調された上部平板(図中Heater 1)から、下部の平板への放射熱伝達をステンレス製のサポート治具に生まれる温度差を元に通過する熱流量を測定することで、放射率を評価した。僅かな熱流量を測定する為、熱流量の較正用ヒータ(Heater 2)を設置し、本セットアップにおける温度計

の自己発熱、配線による熱リークを含んだ温度差と熱流量の関係別途較正している。また、放射面温度 $T_{\text{rad}}$ と吸収面温度 $T_{\text{abs}}$ の関係を変化させるため、セットアップ全体を覆う銅チャンバーの温度をHeater 3によって制御した。放射面・吸収面はφ50である。

こうして得られた複数の温度差における放射熱伝達量 $Q$ を用いて、下記の等式を元に整理した。

$$\frac{F\sigma(T_{\text{rad}}^4 - T_{\text{abs}}^4)}{Q} = \frac{1}{\alpha_{T_{\text{abs}}}} + \frac{1}{\varepsilon_{T_{\text{rad}}}} - 1 \quad (1)$$

ここで $F$ は形状係数、 $\sigma$ はステファン-ボルツマン定数、 $\alpha$ は吸収率、 $\varepsilon$ は放射率である。形状係数は平行平板間のギャップと平板の形状から算出されるもので本実験では0.9である<sup>3)</sup>。透過成分が無い為、吸収率と放射率は等価であると算出できるが、温度依存性を持つ為、厳密には放射率の算出は出来ない。本実験では、Fig. 2に各測定点で $\alpha = \varepsilon$ として放射率を算出してまとめた。横軸のバーは測定された $T_{\text{rad}}$ から $T_{\text{abs}}$ に渡って引かれ、この温度の間の平均化された放射率として示している。この結果、黒化した発泡銅は極低温下40K以下からピーク波長が長くなることに伴って放射率が低下することが判った。

Table.1 Effect to the emissivity of oxidized copper materials

	before	after
oxidized foam copper (2 min)	0.35	0.685
oxidized foam copper (10 min)	0.35	0.825
oxidized copper plate (2min)	0.055	0.295
oxidized copper plate (10min)	0.055	0.595

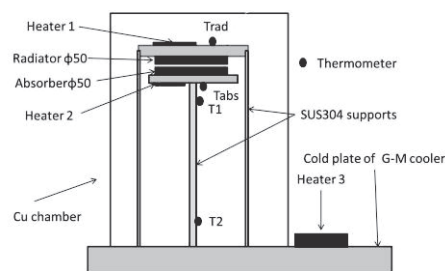


Fig.1 Schematic sketch of measurement setup of radiative heat transfer

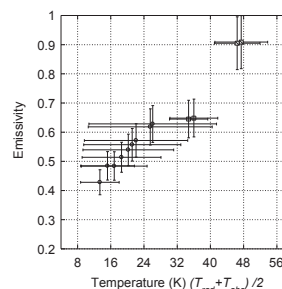


Fig.2 Temperature dependence of averaged emissivity of oxidized copper foam

## 参考文献

- 1) J. Yamamoto, *Cryogenics* 19 (1979) pp. 87-88
- 2) <http://www.japansensor.co.jp/products/TSS-5X.html>
- 3) J.P. Holman, *Heat transfer* (McGraw Hill)

## 住友重機械工業の宇宙用低温機器の 30 年

## 30 years history of space cryogenics in Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

金尾 憲一, 檜崎 勝弘, 恒松 正二, 吉田 誠至, 大塚 清見(住友重機械工業)

KANAO Ken'ichi, NARASAKI Katsuhiko, TSUNEMATSU Shoji, YOSHIDA Seiji, OTSUKA Kiyomi (SHI)

E-mail: kenichi.kanao@shi-g.com

## 1. はじめに

住友重機械工業の低温技術は、1962 年に神奈川県平塚市に低温関連の研究所を設立したことに始まった。その後 1987 年に宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と共同で宇宙用低温機器の開発に着手したことが宇宙との係わりの始まりであった。それ以来 30 年にわたり、人工衛星に搭載する機械式冷凍機、液体、固体寒材のタンクの開発してきている。1987 年頃は宇宙で 4K 以下の温度が必要な場合、液体ヘリウムを使用することが主流であったが、近年では、寒剤と機械式冷凍機を併用するシステムや、機械式冷凍機のみで生成することを実現する要求が主流になってきている。本講演では 4K 以下の冷却機器を中心に、開発の経緯を紹介することで、これまでの宇宙用低温技術の系譜を振り返る。

## 2. 液体寒剤のみで冷却するデューワー

1995 年に多目的の宇宙実験用プラットフォームである SFU (Space Flyer Unit) に搭載されて打ち上げられた IRTS (Infrared Telescope in Space) は、日本の赤外線天体観測機器として初めて軌道に投入されたものである[1]。液体ヘリウムを搭載した日本で初めての機器でもあった。超流動ヘリウムを使って赤外線検出器を冷却し、約 1 ヶ月間観測できた。図 1 は IRTS の外観写真である。SFU は 1996 年にスペースシャトルで回収され、現在は国立科学博物館に展示されている。

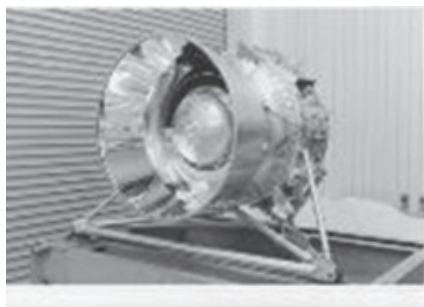


Fig.1 IRTS Cryostat

## 3. 液体寒剤と機械式冷凍機を組み合わせたデューワー

IRTS の後、2006 年に打ち上げられた赤外線天文衛星「あかり」でも検出器は液体ヘリウムで冷却された。「あかり」では観測期間を延ばすため、液体ヘリウムタンクの周囲に設けられた 3 層の輻射シールドを、蒸発したヘリウムガスと「あかり」用に開発した 2 段スターリング冷凍機を併用して冷却するハイブリッド冷却方式が採用された[2]。図 2 は「あかり」のデューワーの断面図である。2 段スターリング冷凍機が 2 台搭載され、170L の液体ヘリウムを 1.5 年保持できた。従来の液体ヘリウムだけの冷却方式に対して、同じ観測期間を 1/7 の液体ヘリウム量で達成できた。液体ヘリウムを消費した後も 2 段スターリング冷凍機のみで近赤外線観測を約 3 年継続した。図 2 は「あかり」に搭載されたデューワーの断面図である。

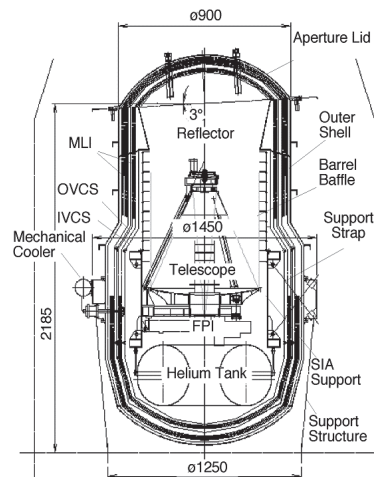


Fig.2 Cross section of AKARI Dewar

## 4. 機械式冷凍機のみで冷却するデューワー

2009 年に打ち上げられ、国際宇宙ステーションで運用された「SMILES」は、機械式冷凍機だけで 4K を生成した。「あかり」に搭載した 2 段スターリング冷凍機を予冷機としたジュールトムソン冷凍機で 4K を生成し、超電導ミキサを冷却した[3]。図 3 は SMILES の冷却システムの外観写真である。

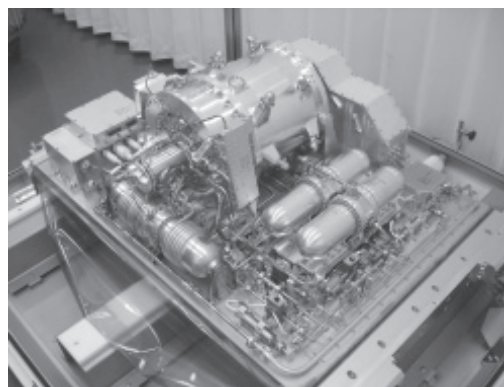


Fig.3 Cryogenic system of SMILES on ISS

## 5. おわりに

住友重機械工業における宇宙用低温機器の歴史を振り返った。本講演に続く 3 講演では、これまでの集大成とも言える X 線天文衛星「ひとみ」搭載軟 X 線スペクトロメータ用デューワーの開発について述べる。

## 参考文献

1. M. Murakami et al. J. Cryo. Soc. Jpn, vol.31 (1996) no.6, p. 297-306
2. H. Murakami et al. Proceedings of SPIE, vol.3356 (1998), 471-477
3. K. Narasaki et al. Adv. Cryo. Eng., 49B (2004), 1785-1796

# X線天文衛星「ASTRO-H」搭載軟X線スペクトロメータ用デュワー開発 その1 設計

## Development of a Dewar for the Soft X-ray Spectrometer on the X-ray astronomy satellite ASTRO-H (1) Design

吉田 誠至, 金尾 憲一, 宮岡 幹夫, 星加 俊二, 檜崎 勝弘, 恒松 正二(住友重機械);  
満田 和久, 山崎 典子, 竹井 洋 (JAXA); 藤本 龍一(金沢大); 江副 祐一郎(首都大)

YOSHIDA Seiji, KANAO Ken'ichi, MIYAOKA Mikio, HOSHIKA Shunji, NARASAKI Katsuhiko, TSUNEMATSU Shoji (SHI);  
MITSUDA Kazuhisa, YAMASAKI Noriko, TAKEI Yoh (JAXA); FUJIMOTO Ryuichi (Kanazawa University);  
EZOE Yuichiro (TMU)  
E-mail: seiji.yoshida@shi-g.com

### 1. はじめに

2016年2月17日に打ち上げられたX線天文衛星「ASTRO-H」に搭載される観測装置の一つである軟X線スペクトロメータは、検出器を、断熱消磁冷凍機(ADR)を用いて50mKまで冷却する。ADRが稼働できる極低温環境を実現するための冷却システム(デュワー)の開発を行った。本稿では、この冷却システムの設計について述べる。

### 2. 冷却システム設計

冷却システムへの主要な要求事項は、ADR とのインタフェースを1.3K以下に冷却し、かつその温度を3年以上保持することである。この要求を満たすために、液体ヘリウムと冷凍機を用いたハイブリッドな冷却システム<sup>1)</sup>の開発を行った。

図1に冷却システムの概念図を、図2に断面図を示す。この冷却システム内にはヘリウムタンクがあり、ヘリウムタンク内を減圧することにより液体ヘリウムの温度を下げ、1.3K以下を実現している。ヘリウムタンクには、軌道上の無重量状態で蒸発ガスのみを排気するポラスプラグ(PP)を搭載している。さらに、PPからの微量の液体ヘリウムの漏れをヘリウムタンクに戻すフィルムフロー抑制システム<sup>2)</sup>が搭載されている。ヘリウムタンクから蒸発したガスヘリウムの顕熱で冷却する4層の熱シールド(JTシールド、IVCS、MVCSおよびOVCS)があり、寒剤である液体ヘリウムを有効に使用する手立てがなされている。

ヘリウムタンクへの伝導入熱を低減するために、ヘリウムタンクは、強度が高く、熱伝導率が低い炭素繊維強化プラスチック(CFRP)をベルト状にしたストラップ12本でIVCSから吊り構造で支えられており、さらに、IVCSはガラス繊維強化プラスチック(GFRP)をベルト状にしたストラップ12本でメインシェル(MS)から支えられている2段の吊り構造となっている。

IVCSとOVCSを冷却するシールドクーラ(SC)は、2台の2段スターリング冷凍機を使用し、それぞれを30K以下、150K以下に冷却する。JTシールドを冷却するJT冷凍機(JT)は、そのシールドを4.5K以下に冷却する。JTの予冷冷凍機(PC)としても、2台の2段スターリング冷凍機を使用している。

この冷却システムは液体ヘリウム枯渇後も、観測効率は落ちるが、冷凍機のみで冷却する「Cryogen-free」モードがある。JTの運転電力を上げて、ヘリウムタンクとJTシールドとの間に設置されたADRの運転による発熱を含めて、JTシールドを4.5K以下に冷却することにより、センサを50mKに冷却することができる。

### 3. おわりに

「ASTRO-H」に搭載される軟X線スペクトロメータ用デュワーの設計を行った。要求を満たす設計結果が得られている。

### 参考文献

1. S. Yoshida, et al., Flight model performance test results of a helium dewar for the soft X-ray spectrometer onboard ASTRO-H, Cryogenics 74 (2016) 10-16.
2. Y.Ezoe, et al., Flight model measurements of the porous plug and film flow suppression system for the ASTRO-H Soft X-ray Spectrometer dewar, Cryogenics 74 (2016) 17-23.

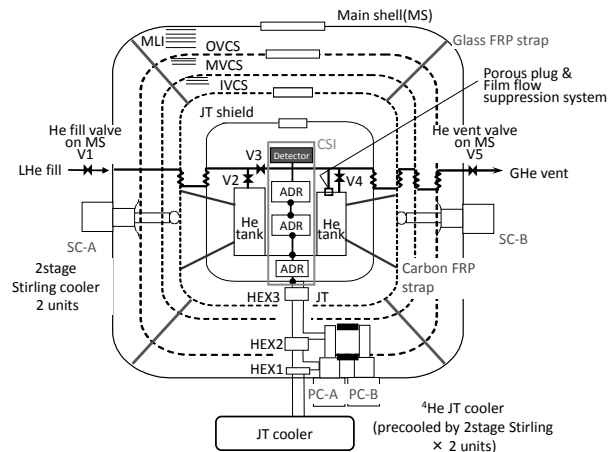


Fig.1 Schematic of the cooling system

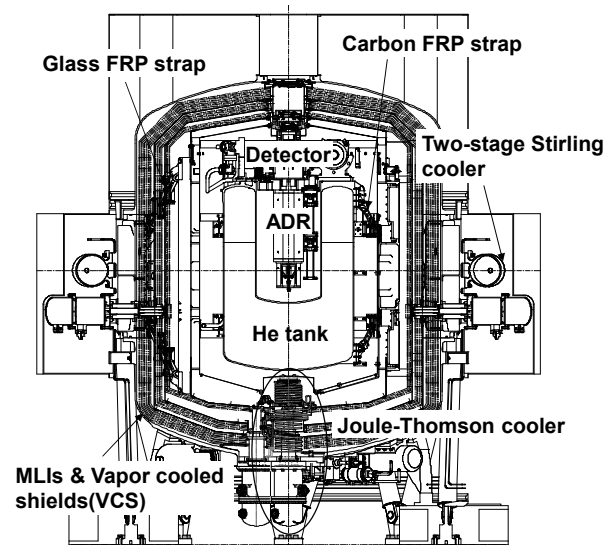


Fig.2 Cross-sectional view of the cooling system

## X線天文衛星「ASTRO-H」搭載軟X線スペクトロメータ用デュワー開発 その2 地上試験と射場オペレーション

### Development of a Dewar for the Soft X-ray Spectrometer on the X-ray astronomy satellite ASTRO-H (2) Tests on ground and launch operation

吉田 誠至, 金尾 憲一, 恒松 正二(住友重機械);  
満田 和久, 山崎 典子, 竹井 洋 (JAXA); 藤本 龍一(金沢大); 江副 祐一郎(首都大)  
YOSHIDA Seiji, KANAO Ken'ichi, TSUNEMATSU Shoji (SHI);  
MITSUDA Kazuhisa, YAMASAKI Noriko, TAKEI Yoh (JAXA); FUJIMOTO Ryuichi (Kanazawa University);  
EZOE Yuichiro (TMU)  
E-mail: seiji.yoshida@shi-g.com

#### 1. はじめに

2016年2月17日に打ち上げられたX線天文衛星「ASTRO-H」に搭載される観測装置の一つである軟X線スペクトロメータは、検出器を、断熱消磁冷凍機(ADR)を用いて50mKまで冷却する。ADRが稼働できる極低温環境を実現するための冷却システム(デュワー)の開発を行った。本稿では、この冷却システムの地上試験及び打ち上げ前の冷却作業について述べる。

#### 2. 冷却性能試験

冷却システムの冷却性能試験<sup>1)</sup>を実施した。冷却システムは横転台車上に固定し、42.5°傾斜させて試験を実施した。これは、軌道上の無重量下で、ヘリウムタンク内の液体ヘリウムがポーラスプラグに接している状態を模擬するためであって、42.5°は液体ヘリウムの液面(液体と気体の境界面)がちょうどPPに触れる角度である。このほか、熱解析モデルの検証を目的として、より安定した温度状態を作り出すために、間欠的に発熱するADRを意図的に停止した試験も行った。

試験結果は、ヘリウムタンクの温度は1.16K、ヘリウムタンクへの侵入熱量は0.73mWとなった。この侵入熱量であれば、30Lの液体ヘリウムを4.0年間保持でき、冷凍機の劣化を考慮しても要求である3年以上を満足する。表1に、事前解析予測と試験結果の比較を示す。各部の温度はよく一致した。ヘリウムタンクへの侵入熱量は僅か0.02mWの誤差であり、精度の高い設計ができていることを確認した。

#### 3. 打ち上げ前冷却作業

2015年11月末に衛星は種子島宇宙センターに輸送された。打ち上げ前の2016年2月2日から、大型ロケット組立棟で、衛星がロケットと結合した状態で最終冷却作業を実施した。

まず、3日間かけ、液体ヘリウムを注入し、ヘリウムタンクを常温から4.2Kまで冷却した。このあと液体ヘリウムの温度を1.3Kまで下げるために、ヘリウムタンク内を減圧するが、減圧すると、液体ヘリウムの蒸気圧が下がり蒸発して液量が減る。ヘリウムタンク内をより低温の液体ヘリウムで満液にするため、ヘリウムが超流動状態になる2.17Kに近い温度で液体ヘリウムを衛星外部の供給源からヘリウムタンクへ転送するトップオフ充填作業を行った。図1にトップオフ充填作業から打ち上げまでのヘリウムタンクの温度変化を示す。ヘリウムの転送作業は3回行い、最終的に1.80Kの液体ヘリウムでヘリウムタンクを満

たすことができた。その後、打ち上げ日の悪天候による延期を乗り越え、打ち上げ前の液体ヘリウム充填量は、打ち上げ後1.3Kまで冷却することによる減少量を考慮した33L以上を上回る35L以上とすることができた。

#### 4. おわりに

「ASTRO-H」に搭載される軟X線スペクトロメータ用デュワーの地上試験を実施し、所期の性能を満足していることを確認した。また、打ち上げ前に、液体ヘリウムの充填作業を行い、予定通りに作業を実施することができた。

#### 参考文献

- S. Yoshida, et al., Flight model performance test results of a helium dewar for the soft X-ray spectrometer onboard ASTRO-H, Cryogenics 74 (2016) 10-16.

Table 1 Temperatures in prediction and measurement

	Prediction	Measurement	Error
He tank	1.3K	1.16K	-0.14K
JT shield	4.31 K	4.28K	-0.03K
IVCS	24.5 K	27.0K	2.5K
MVCS	93.9 K	102.7K	8.8K
OVCS	138.5 K	139.6K	1.1K
MS	293 K	293K	0.0K
Heat load to the He tank	0.75mW	0.73mW	-0.02mW

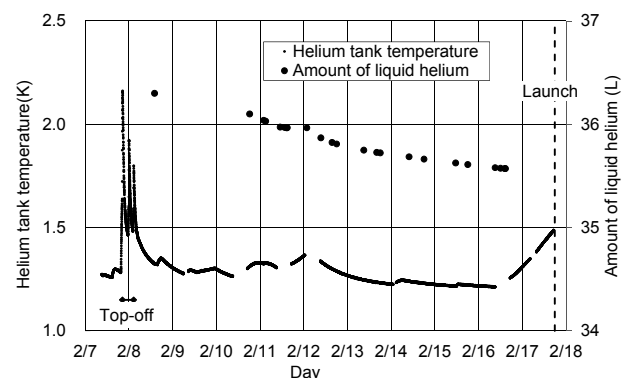


Fig.1 Helium tank temperature profile in launch campaign

# X線天文衛星「ASTRO-H」搭載軟X線スペクトロメータ用デューワー開発 その3 冷凍機開発

## Development of a Dewar for the Soft X-ray Spectrometer on the X-ray astronomy satellite ASTRO-H(3) Cryocoolers

恒松 正二, 金尾 憲一, 檜崎 勝弘, 吉田 誠至, 大塚 清見(住友重機械);  
満田 和久, 山崎 典子, 中川 貴雄, 佐藤 洋一, 竹井 洋, 杉田 寛之(JAXA)

TSUNEMATSU Shoji, KANAO Ken'ichi, NARASAKI Katsuhiko, YOSHIDA Seiji, OTSUKA Kiyomi (SHI);  
MITSUDA Kazuhisa, YAMASAKI Noriko, NAKAGAWA Takao, SATO Yoichi, TAKEI Yoh, SUGITA Hiroyuki (JAXA)  
E-mail: shoji.tsunematsu@shi-g.com

### 1. はじめに

2016年2月17日に種子島宇宙センターからH-IIA ロケット30号機で打ち上げられたX線天文衛星「ASTRO-H」に搭載された軟X線スペクトロメータ用デューワーに使用している2段スターリング冷凍機および4K-JT冷凍機に関して設計、地上での試験結果について述べる。

### 2. 冷凍機概要

軟X線スペクトロメータ用デューワーは、検出器を50mKまで冷却する断熱消磁冷凍機(ADR)とのインタフェースを1.3K以下の冷却し、かつその温度を3年以上保持するため、超流動ヘリウムと冷凍機を用いたハイブリッドな冷却システムである。

冷凍機は、超流動ヘリウムへの侵入熱を低減する熱シールドを冷却するために、4台の2段スターリング冷凍機と1台の4K-JT冷凍機を使用している。

図1にデューワー搭載状態の2段スターリング冷凍機を、図2に4K-JT冷凍機を示す。

2台の2段スターリング冷凍機は、シールドクーラー(SC)として、4層の熱シールド(JTS、IVCS、MVCS、およびOVCS)のうち、IVCSおよびOVCSを冷却しており、4K-JT冷凍機は、2台の2段スターリング冷凍機を予冷機に使用して、JTSを4K台に冷却している。この冷却システムは、超流動ヘリウム枯渇後もADRとのインタフェースを4K台に冷却し、観測が継続できるようにしており、かつ、どの冷凍機が故障した場合にも観測が継続できるような構成が採用されている。

各冷凍機に対する要求仕様を表1に示す。

2段スターリング冷凍機や4K-JT冷凍機は、2006年に打ち上げられた赤外線天文衛星「あかり」や、2009年に打ち上げられたJEM/SMILESに搭載された冷凍機の冷却性能及び長寿命化に関する改良点が反映されたものである。

### 3. 評価試験

各冷凍機は、エンジニアリングモデル(EM)、フライトモデル(FM)に対し、(1)冷却性能試験、(2)ランダム・正弦波振動試験、(3)衝撃試験(EMのみ)、(3)熱真空試験(EMのみ)、(4)振動レベル測定試験、(5)寿命評価試験を実施し、目標開発仕様を満足していることが確認された。

デューワーに搭載されたFMは、各種システム試験において性能が確認され、打ち上げられた。

### 4. おわりに

2段スターリング冷凍機、および4K-JT冷凍機を組み込んだ軟X線スペクトロメータ用デューワーは、地上試験において、所定の性能を満足していることが確認された。射場においては、各冷凍機運用を伴う超流動ヘリウムの注液作業が予定通り実施された。

### 参考文献

1. S. Yoshida, et al., Flight model performance test results of a helium dewar for the soft X-ray spectrometer onboard ASTRO-H, Cryogenics 74 (2016) 10-16.
2. K. Narasaki et al. Adv. Cryo. Eng., 49B (2004), 1785-1796

Table.1 Specifications of Cryocoolers

Item	Two-stage Stirling cooler	4K-JT cooler
Cooling Capacity	$\geq 0.2\text{W}$ at 20 K $\geq 1\text{W}$ at 100 K	$\geq 40\text{mW}$ at 4.5K
Power Consumption	$\leq 90\text{ W}$	$\leq 90\text{W}$
Lifetime	$\geq 3\text{ years}$	$\geq 3\text{ years}$
Drive Frequency	15 Hz (13.933~16.261Hz)	52Hz (50.43~53.83Hz)

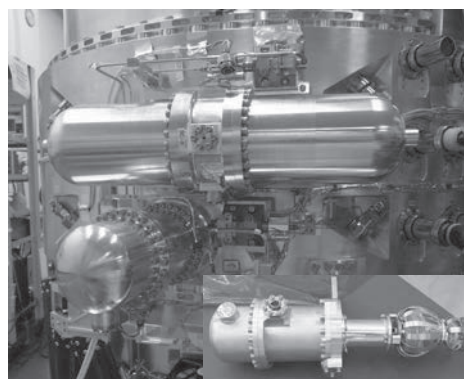


Fig.1 Two stage Stirling cooler

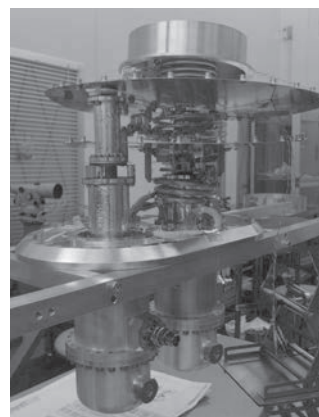


Fig.2 Heat exchangers and Pre-coolers of 4K-JT cooler