

次期赤外線天文衛星SPICA ミッション部冷却システムの開発

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構

研究開発本部 熱グループ

杉田 寛之

SPICAプリプロジェクトチーム

2009年度超流動ヘリウム冷却システム技術調査研究会

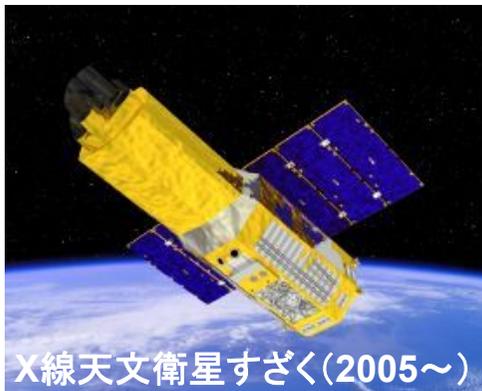
2010年1月29日@東京大学・山上会館

目次

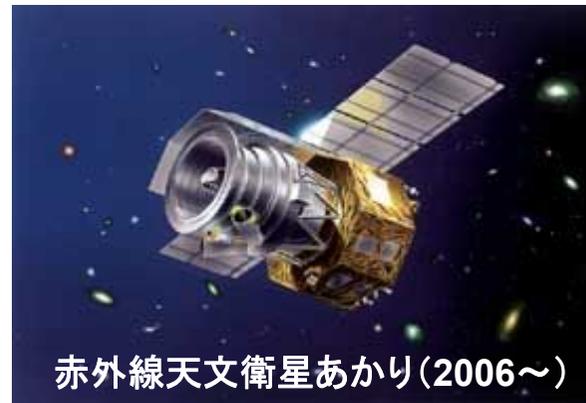
1. 背景と開発実績
2. SPICAミッション部冷却システム
3. 機械式冷凍機の開発

背景

- 1980年代後半からは、高精度な地球観測や天文観測を実現する高感度センサ，赤外線望遠鏡などの搭載ミッション機器の冷却技術が発展
- 現在、超流動液体ヘリウムなどの寒剤利用による受動的冷却から、小型軽量で長寿命の冷凍機による能動的冷却へと多様化と進化



X線天文衛星すざく(2005~)



赤外線天文衛星あかり(2006~)

宇宙用冷凍機のカテゴリー

低温領域 (50~80K; -223~-193°C) ... 液体窒素 地球観測分野

- ・単段スターリング冷凍機: 逆スターリング・サイクル(理論的に高い効率)

JERS-1(ふよう), ADEOS(みどり), ADEOS-II(みどり2号), ASTRO-EII(すざく)

- ・単段パルス管冷凍機: 膨張部に可動機構のない上記の発展型(近年普及)

MTSAT-1R(ひまわり6号), GOSAT(いぶき) 両者とも米国NGST社製

極低温領域 (20K以下; -253°C以下)

... 液体水素・液体ヘリウム 天文分野・超電導機器

- ・20K級2段スターリング冷凍機: 単段機の膨張部を2段化したもの

あかり(Astro-F), JEM/SMILES, SPICA, Astro-H, ASTRO-G

- ・1~4K級ジュール・トムソン(JT)冷凍機: 等エンタルピー膨張

JEM/SMILES, SPICA, Astro-H

- ・1K以下断熱消磁冷凍機(ADR): 常磁性塩と磁石による磁気熱量効果

ASTRO-EII(すざく), Astro-H

機械式冷凍機の開発実績

- あかり (赤外線天文)
 - 2段スターリング (200mW@20 K)
 - 寿命評価試験 5年以上
 - 2006年打上げ



- すざく (X線天文)
 - 単段スターリング (2.5W@100K)
 - 2005年打上げ



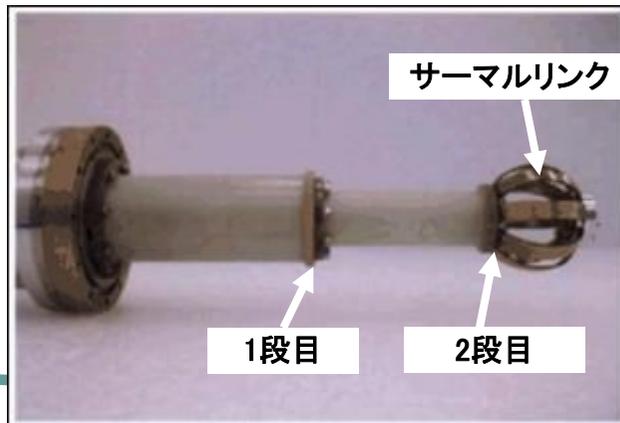
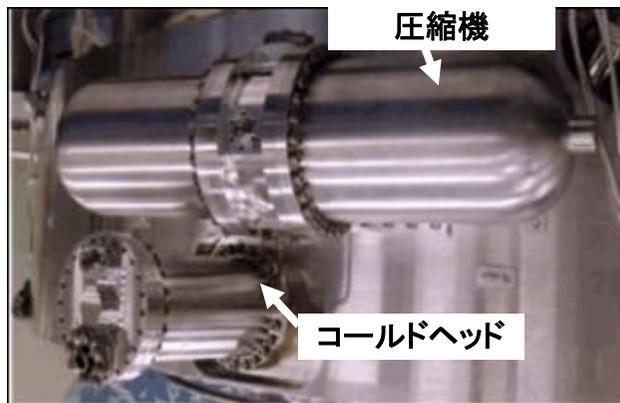
- JEM/SMILES (地球観測)
 - ジュールトムソン (30mW@4.5K)
 - 2009年9月打上げ



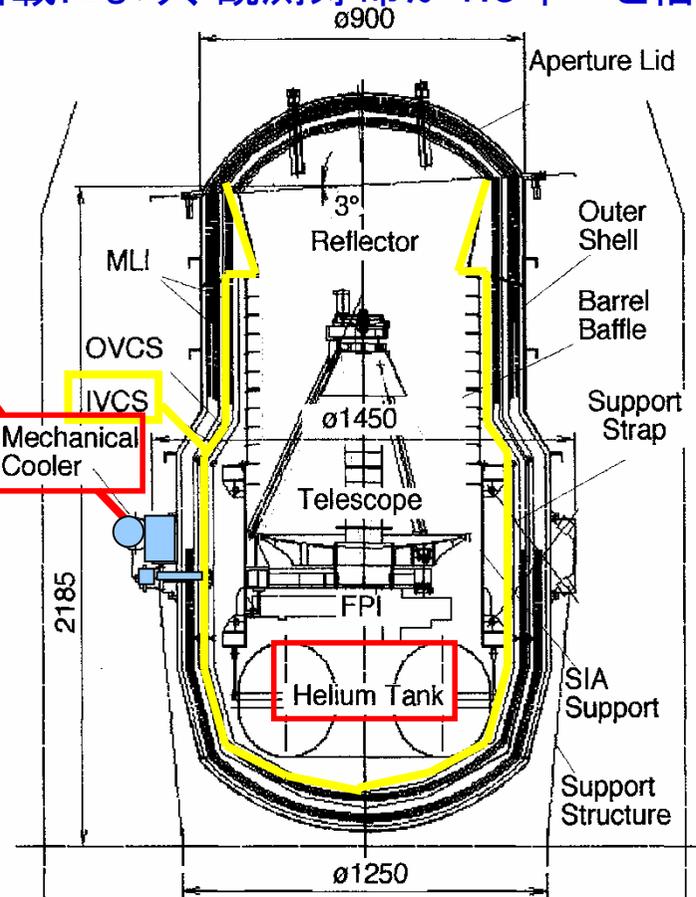
- 現在、日本の機械式冷凍機技術は、世界トップレベル(国内外の評価)。
- 今後の搭載計画(検討中を含む): Planet-C、GCOM-C1、Astro-G、Astro-H、SPICA

あかり冷却系と2ST(第1世代)

- 170 l の超流動ヘリウム(寒剤)と2台のスターリング冷凍機との併用。
- 冷凍機2段ステージは、内側放射冷却シールド (IVCS) に接続され、超流動ヘリウムタンクへの熱侵入を抑制。(冷凍機の搭載により、観測寿命が1.5年へと倍増)



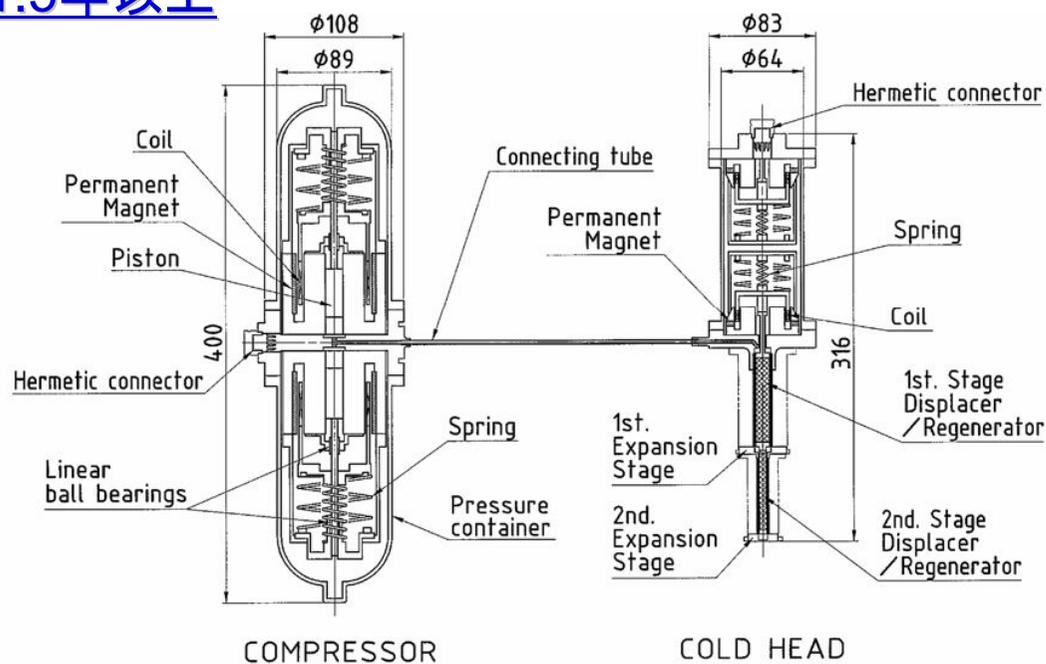
2段スターリング冷凍機



あかり(ASTRO-F)のミッション部

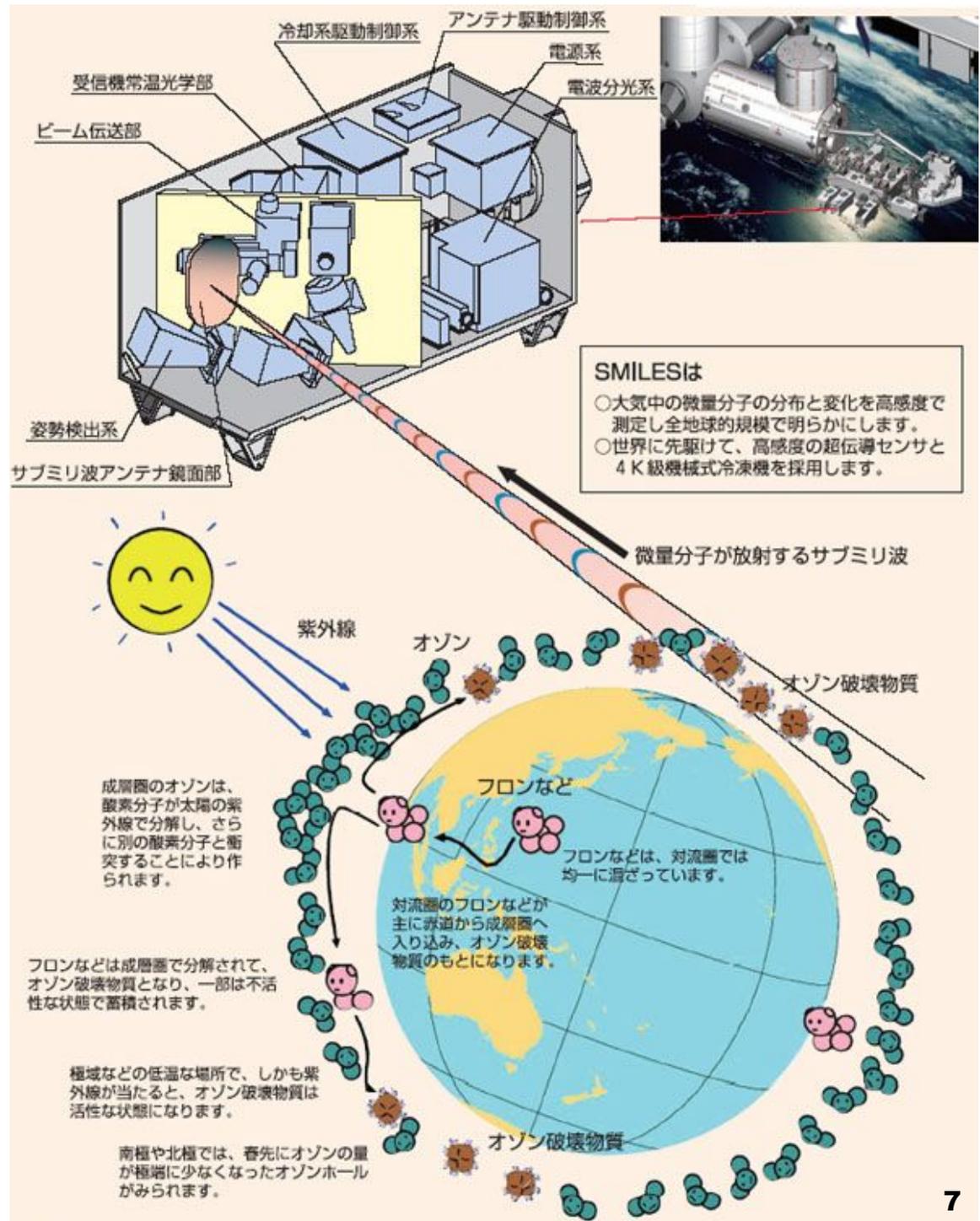
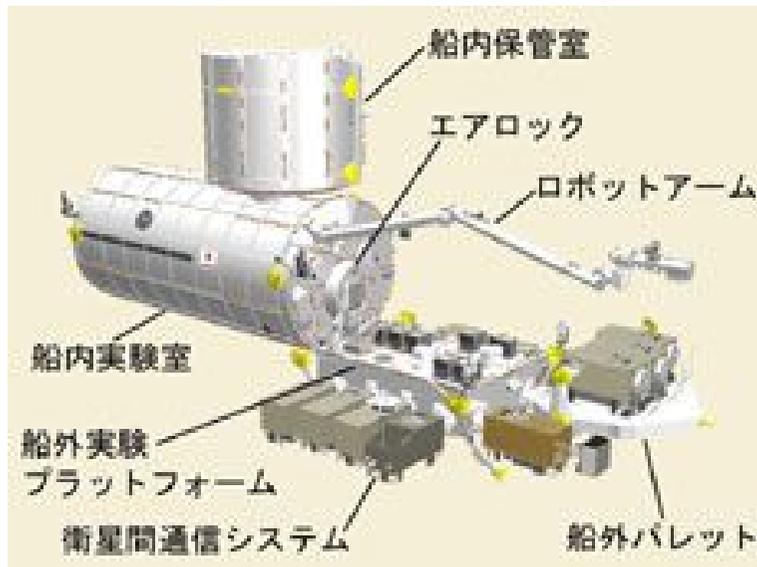
あかり搭載2ST（第1世代）の概要

- ツイン対向型圧縮機、2段ディスプレーサのコールドヘッド、連結パイプから構成される スプリット型スターリング冷凍機
- 作動流体：ヘリウムガス（封入圧力1MPa）
- 開発要求仕様：冷却性能0.2 W @ 20 K（90W入力）、重量10 kg以下、寿命1.5年以上

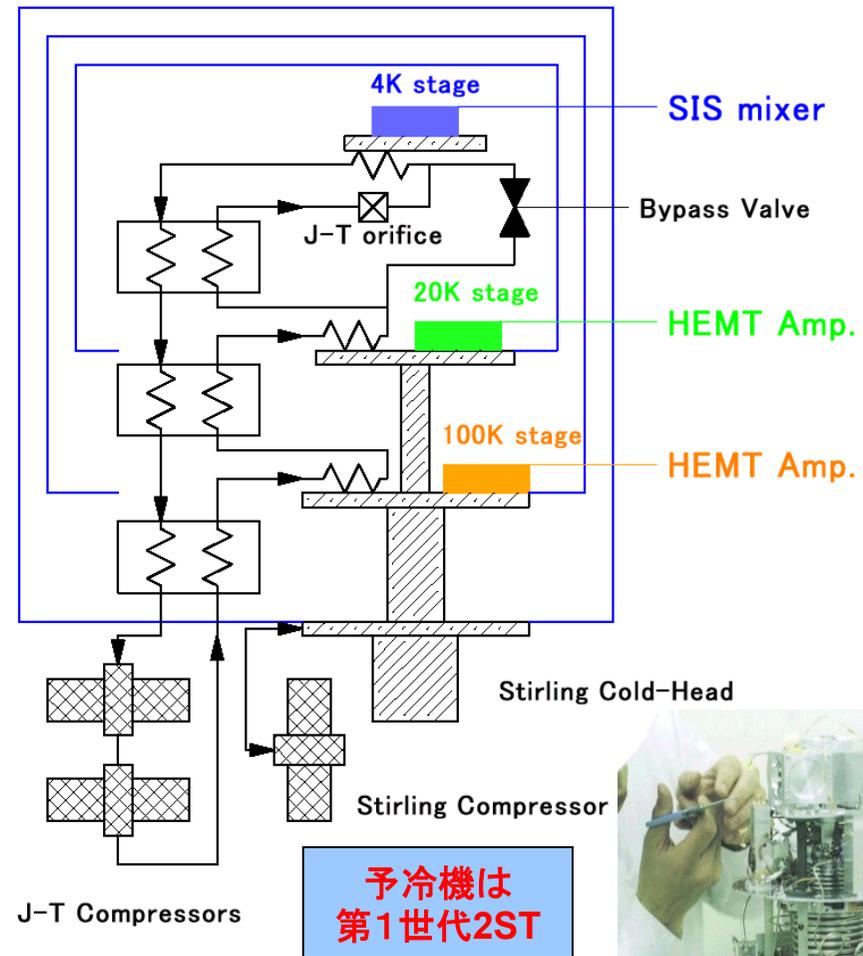
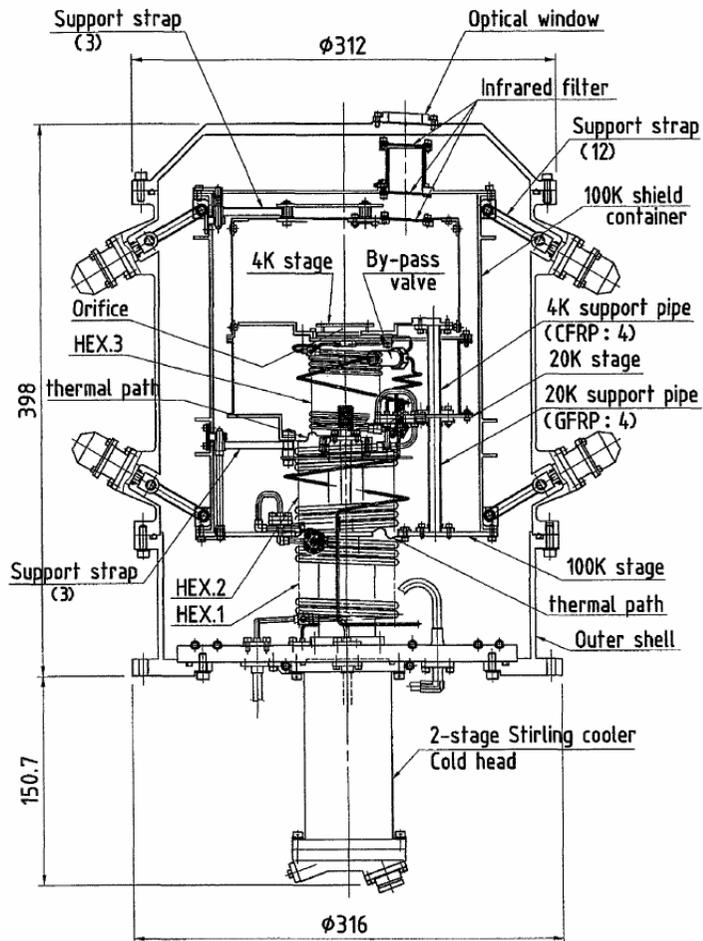


国際宇宙ステーション(ISS)
 日本実験棟きぼう(JEM)
 船外実験プラットフォーム
 超伝導サブミリ波リム放射サウンダ
 (Superconducting
 Submillimeter-Wave Limb-
 Emission Sounder: SMILES)

2009.9.11 H-IIB/HTV打上げ
 2009.11.6 定常運用開始

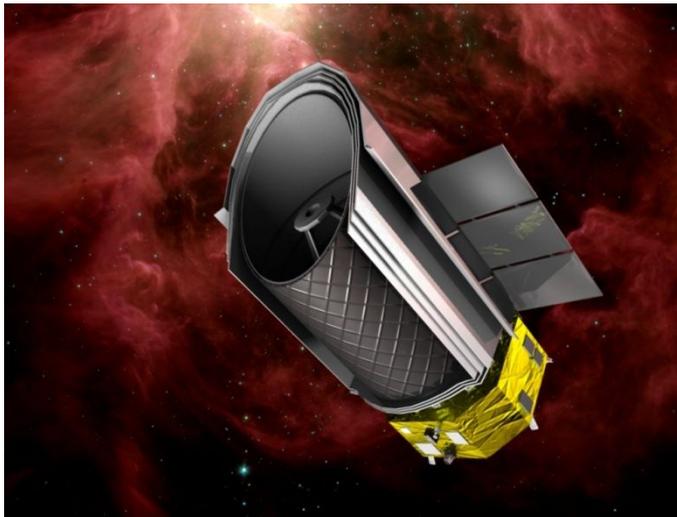


JEM/SMILES用4K級JT冷凍機



次期赤外線天文衛星SPICA

SPICA: the **S**pace **I**nfrared Telescope for **C**osmology and **A**strophysics



SPICAの概念図

科学的目的

- 銀河の誕生と進化
- 星と惑星系の誕生と進化
 - ✓ 太陽系外惑星の直接検出
- 物質の進化

全天サーベイ型 “あかり”(2006)に続く、我が国初の天文台型の赤外線望遠鏡

- 極低温大型鏡: 口径3m級, 温度6K以下
- 打上げ想定: 2018年, 観測期間: 3年(ノミナル)

国際共同ミッションSPICA(1/2)

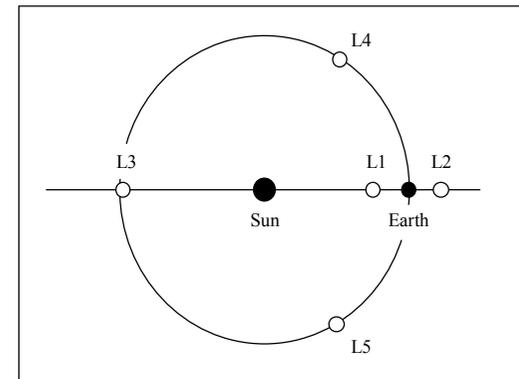
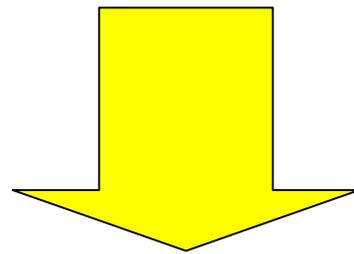
- 欧州: ESA's "Cosmic Vision 2015-2025"
 - The European SPICA Consortium (P.I.: B. Swinyard, RAL, UK) submitted a proposal in June 2007.
 - ① SPICA Telescope Assembly
 - ② European SPICA Ground Segment
 - ③ **SPICA Far-Infrared Instrument System (SAFARI)**
Engineering and Management
 - ④ SPICA Mission support
 - The proposal was selected by ESA in October, 2007, as one of candidates for M-class future missions.
 - ESA and the SAFARI consortium are studying at the assessment phase from Nov. 2007 to August 2009.

国際共同ミッションSPICA(2/2)

- アメリカ
 - The Background-Limited Infrared Submillimeter Spectrograph (BLISS) onboard SPICA proposed by NASA/JPL.
- 韓国 (KASI, Seoul National University)
 - Collaboration on MIR Instrument

冷却システムへの要求

- 口径3m級の主鏡および光学ベンチを6K以下に冷却
- 3年以上の軌道上運用を無寒剤冷却方式で実現



◆ 効率的な放射冷却構造

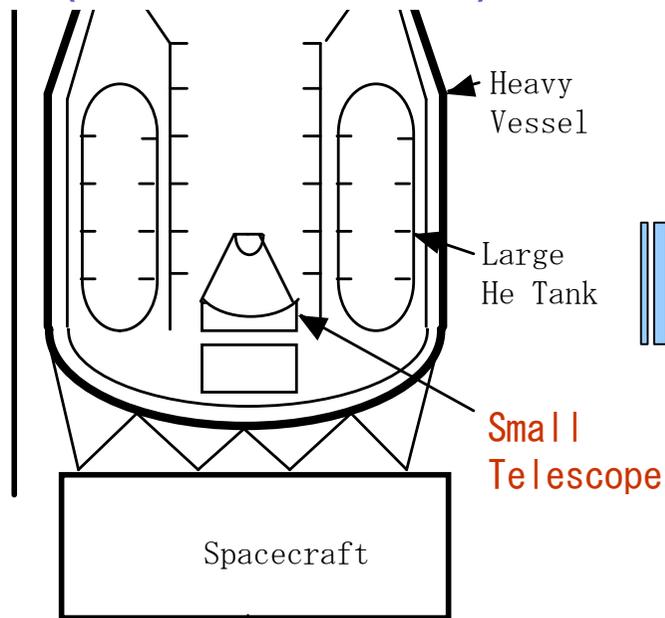
- ✓ 太陽-地球のラグランジュ点(L2)の安定した熱環境

◆ 高効率と高信頼性を有する機械式冷凍機

- ✓ 4K級冷凍機: 主鏡および光学ベンチを冷却
- ✓ 1K級冷凍機: 焦点面検出器を冷却

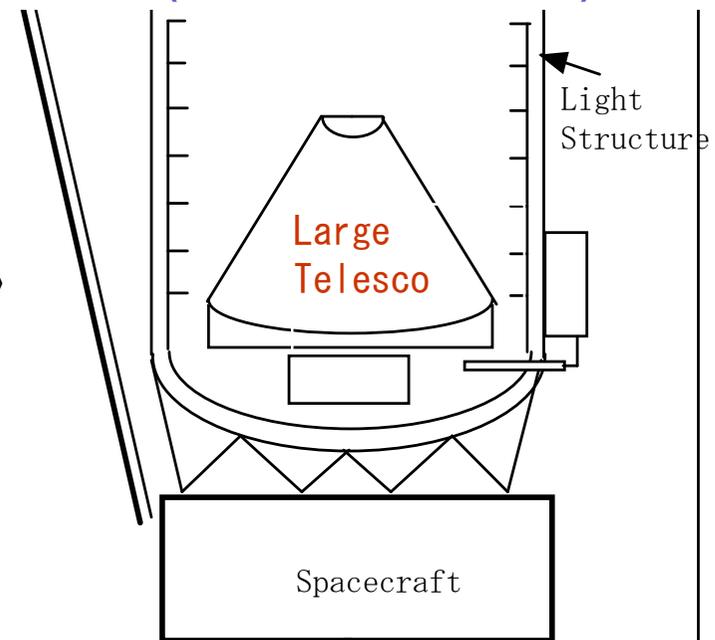
液体ヘリウム冷却から冷凍機へ

赤外線天文衛星あかり
(2006年打上げ)



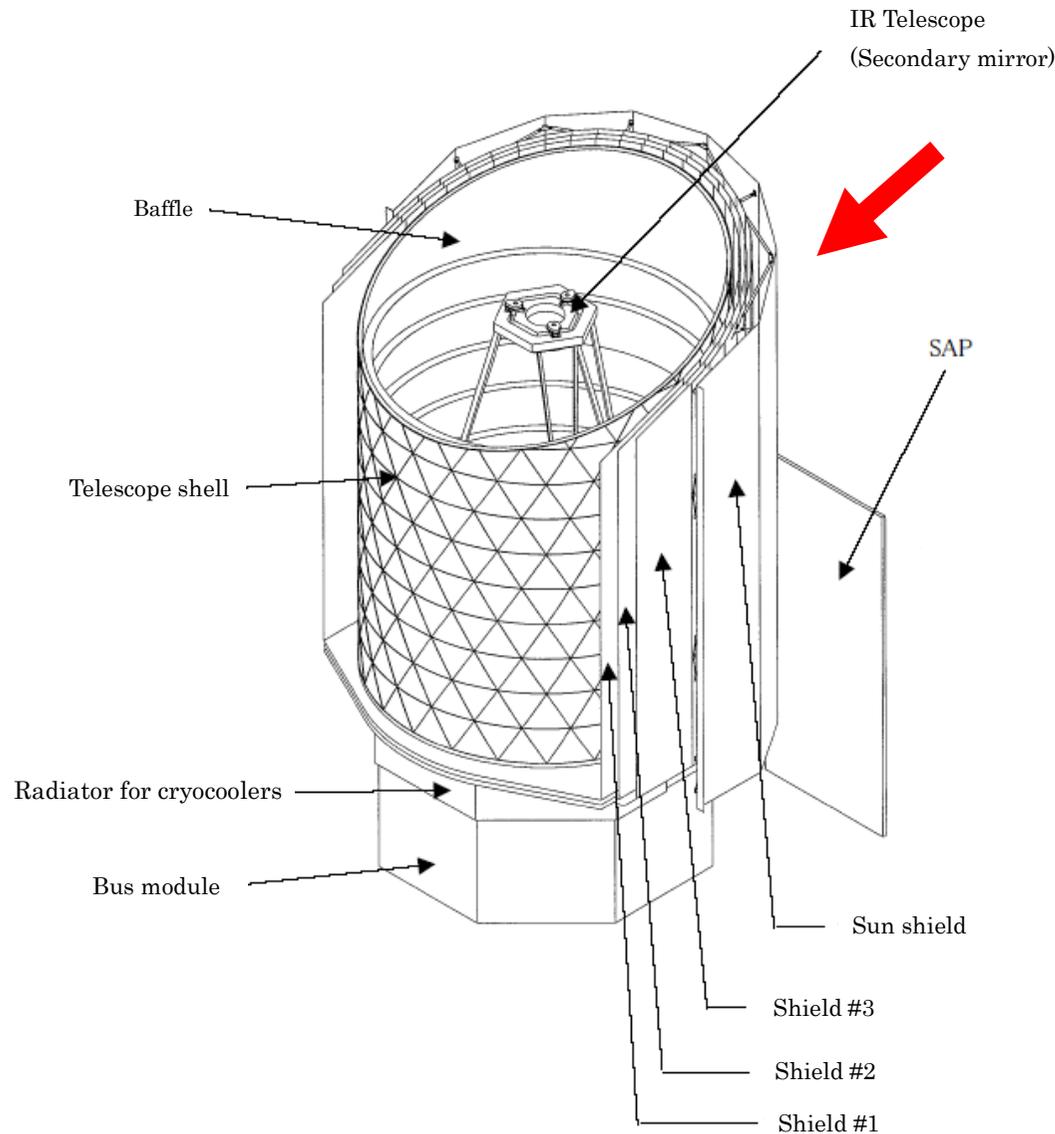
主鏡直径: 0.7m
観測期間: 1.5年

次期赤外線天文衛星SPICA
(2018年計画中)



主鏡直径: 3m級
観測期間: 3年以上(目標5年)

SPICAミッション部冷却システム(CRYO)



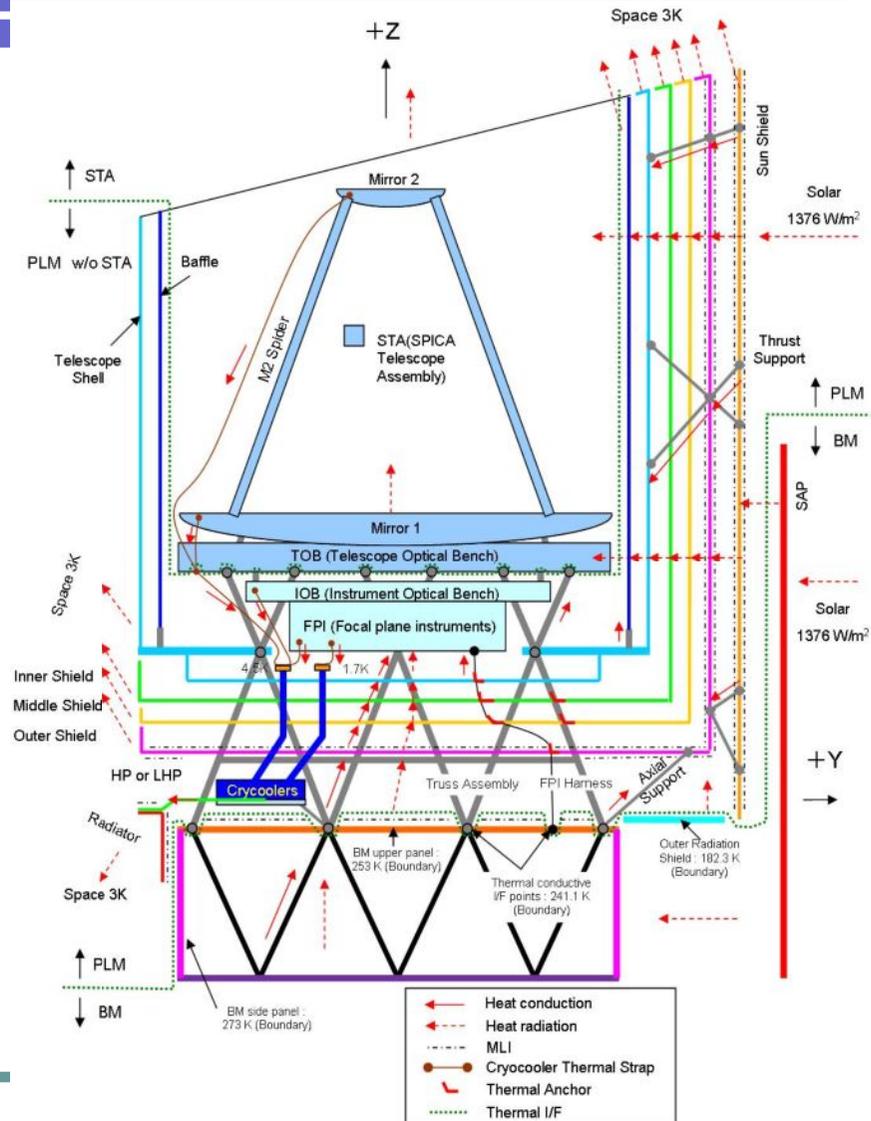
- 望遠鏡主鏡 (口径3m級) と光学ベンチ (観測機器) を 6 K以下 に冷却
- 冷媒 (寒剤) なしのため、3年以上 の軌道上運用を実現
- 効率的な 輻射冷却構造
- 高効率と高信頼性の 機械式冷凍機 が必須
(20K級, 4K級, 1K級)

SPICAミッション部の熱設計

熱設計条件

1. 太陽や高温部から低温部への熱侵入を多層シールド構造により遮断。
2. 深宇宙への放熱面(ラジエータ)の面積および形状の最適設計。
3. 機械式冷凍機および排熱システムの効率的利用。
4. 構造設計の要求(剛性、強度)を満足。

4Kステージへの熱侵入量
 $< 40\text{mW}$
 4K-JT冷凍機の冷却能力(EOL)



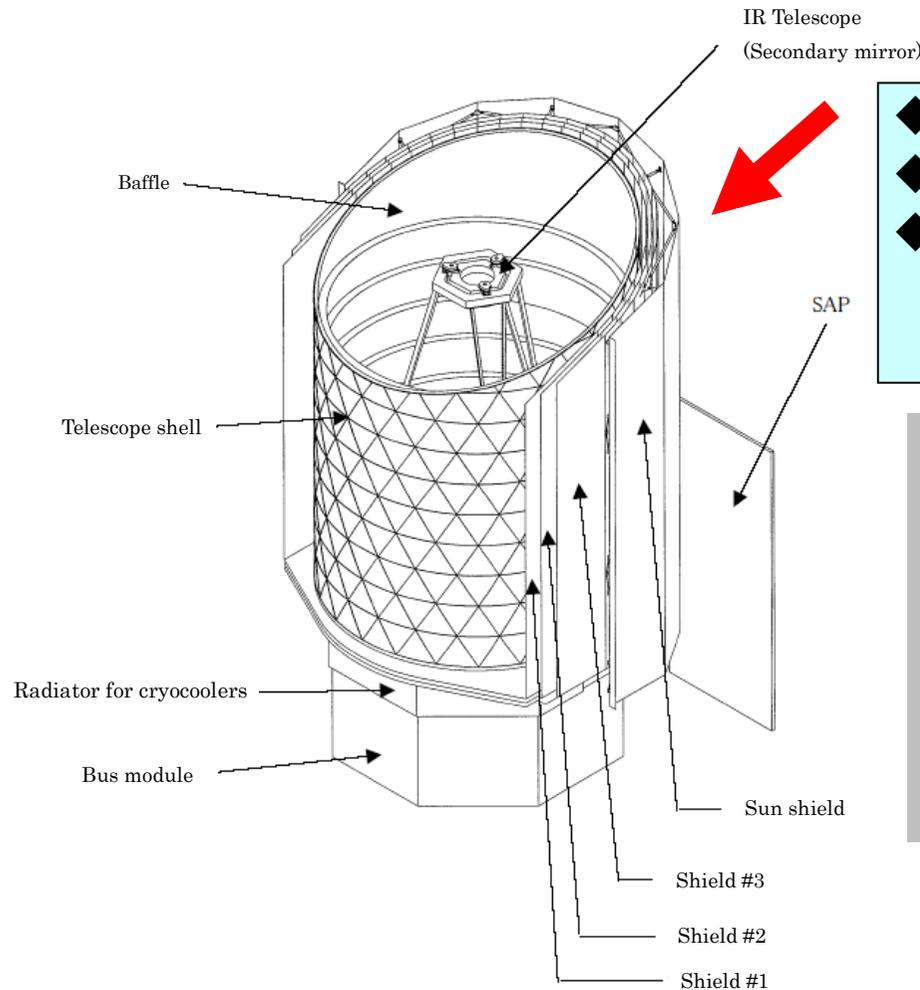
熱設計解析条件

Parameter	Value
Space background	3 K (fixed)
Upper panel of Service Module (SVM)	253 K (fixed)
Solar array paddle (back side)	373 K (fixed)
4.5 K stage (STA, IOB, FPI)	4.5 K (fixed)
Solar heat flux density	1376 W/m ²
Exhausted heat from cryocoolers	600 W@294 K (W_{∞} K)
Heat dissipation from FPI at 4.5 K	< 15 mW
Wire harness	Φ0.1 mm x 1000 wires

4 K-Mechanical cooler (2ST + 4K-JT): 40mW (EOL) x 2 sets

断熱放射冷却構造 : Thermal Insulation and Radiative Cooling System (TIRCS)

Results of thermal and structural analyses



- ◆ Heat flow to the 4.5 K stage: < 25 mW
- ◆ Heat dissipation from FPI: < 15 mW
- ◆ 4K mechanical cooler: 40mW(EOL) x 2
 - Failure mode analysis
 - Cooling-down time analysis

Main truss:

ALFRP (hot) and CFRP (cold) with low thermal conductivity

Baffle and Shell:

CFRP with high thermal conductivity

Sun shield and shield #1-#3:

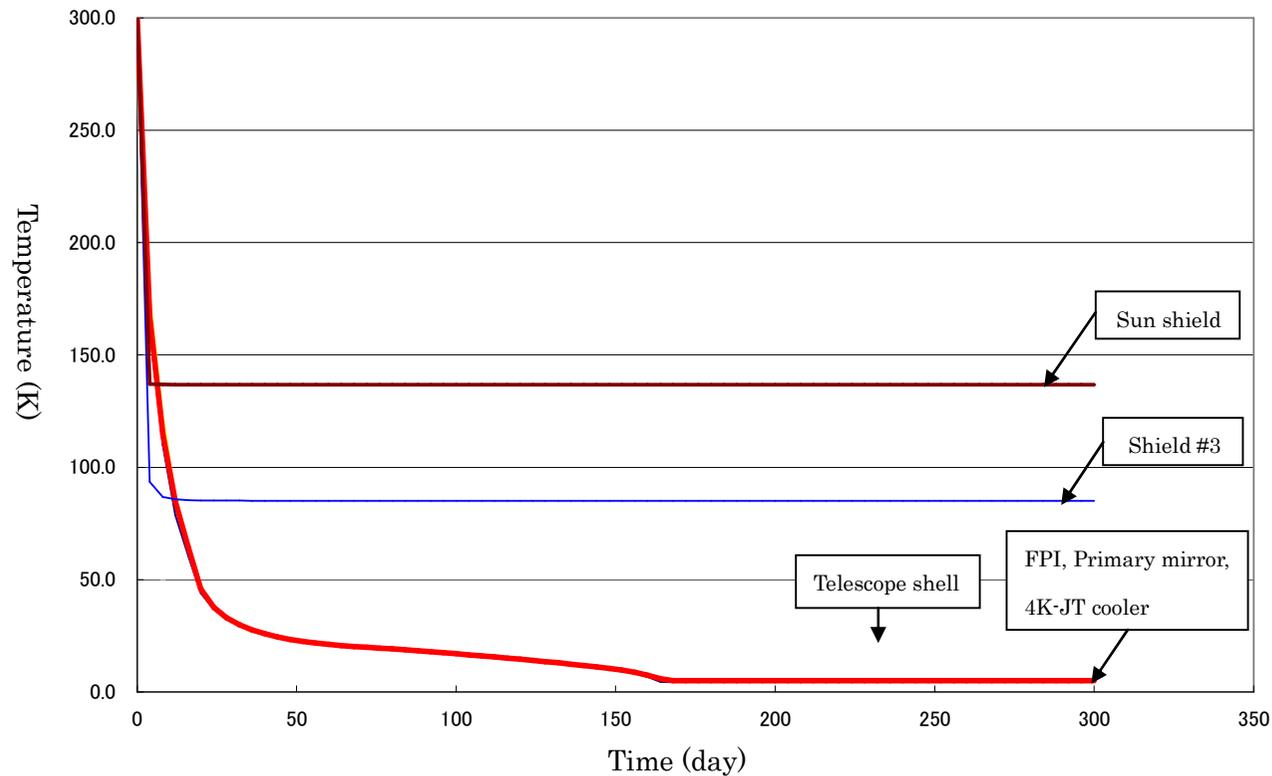
Aluminum

Average temperatures

- ✓ Sun shield: 158 K
- ✓ Shield #1-#3: 50 K, 75 K, 110 K
- ✓ Telescope shell: < 30 K
- ✓ Baffle: < 14 K

軌道上での初期冷却プロファイル(1/2)

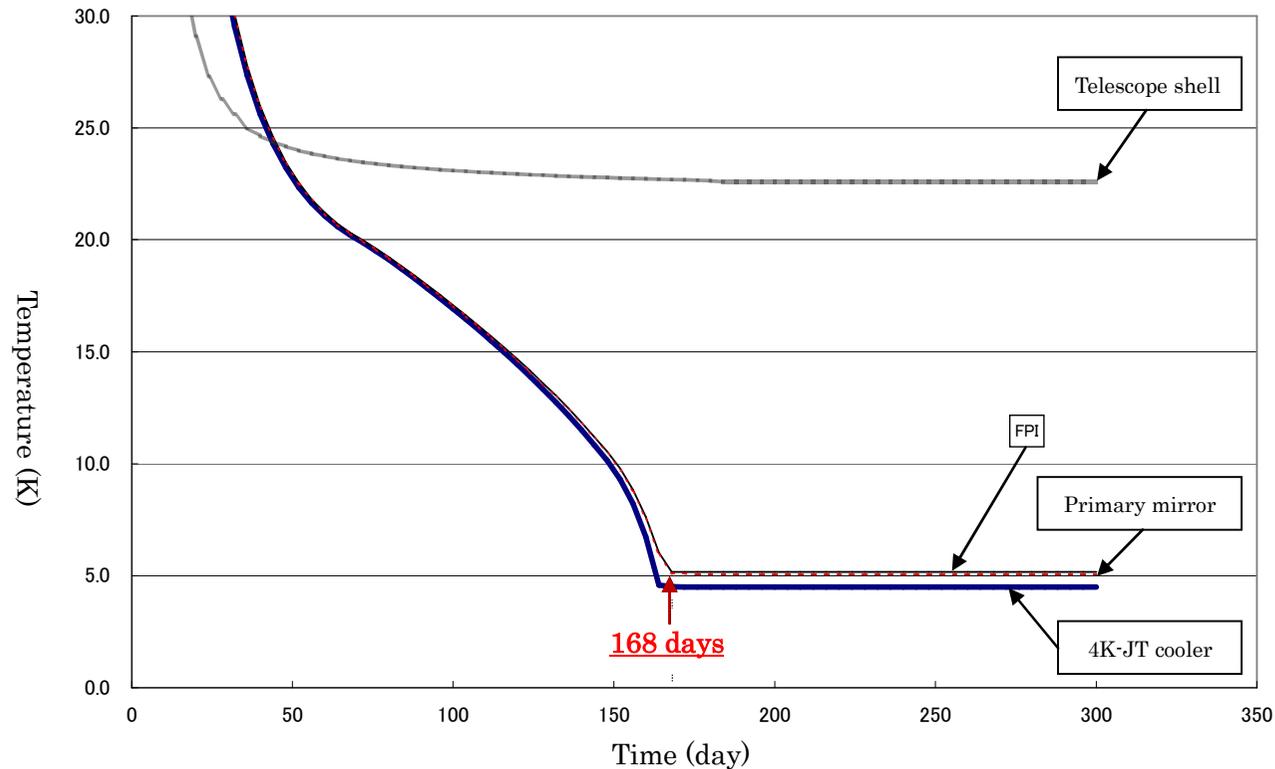
2 sets of 4K-mechanical coolers are used for cooling down the 4.5 K stage as soon as possible.



(a) Cooling profile in the overall temperature range

軌道上での初期冷却プロファイル(2/2)

168 days by 2 sets of 4K-MC, 284 days by 1set of 4K-MC

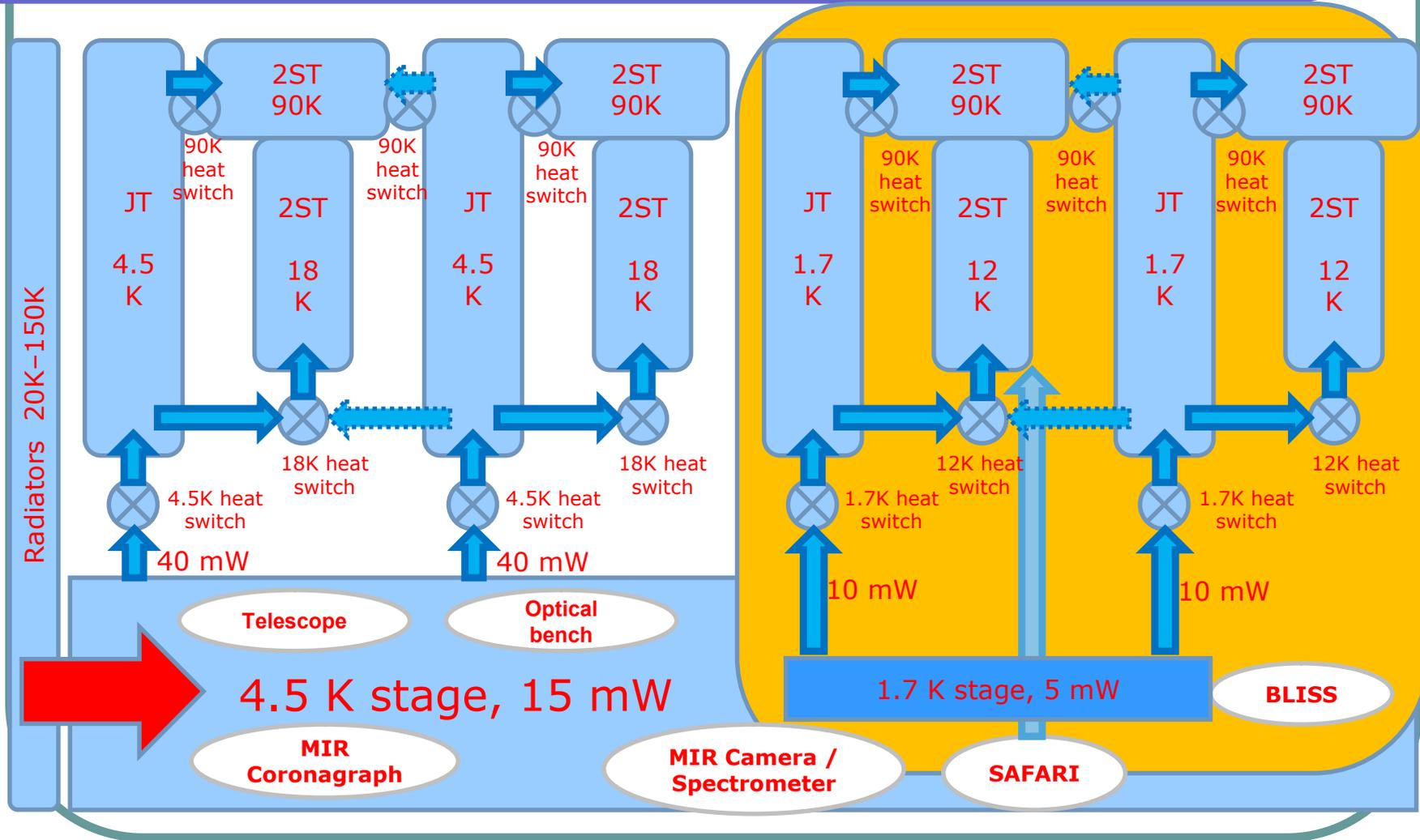


(b) Cooling profile in the less than 30 K range

SPICA搭載冷凍機の基本仕様

冷却温度	20Kステージ	4.5 K ステージ	1.7 K ステージ
冷却対象	JT予冷用	望遠鏡 光学ベンチ	遠赤外線検出器 中間赤外線検出器
冷凍機構成	2-stage Stirling	2ST + ⁴He-JT	2ST + ³He-JT
冷却能力	200mW以上 @15K	40mW以上 @4.5K	10mW以上 @1.7K
駆動電力	90W以下	160W以下	180W以下
運用期間	3年以上 (目標5年)	3年以上 (目標5年)	3年以上 (目標5年)
開発ステータス	ASTRO-F(あかり) PFM (寿命1.5年) 改良中(EM)	ISS/JEM/SMILES PFM (寿命1年) 改良中(EM)	新規開発中 (EM)

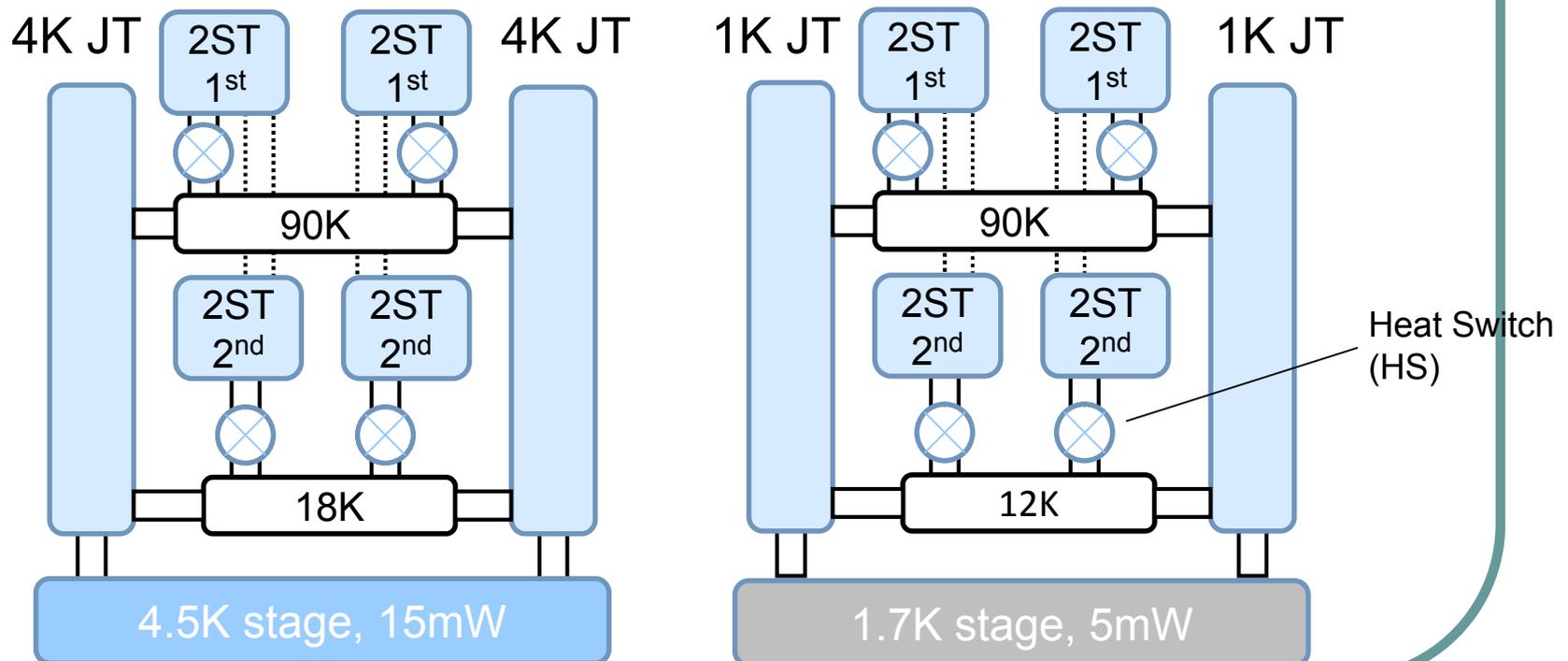
SPICA冷凍機の基本構成



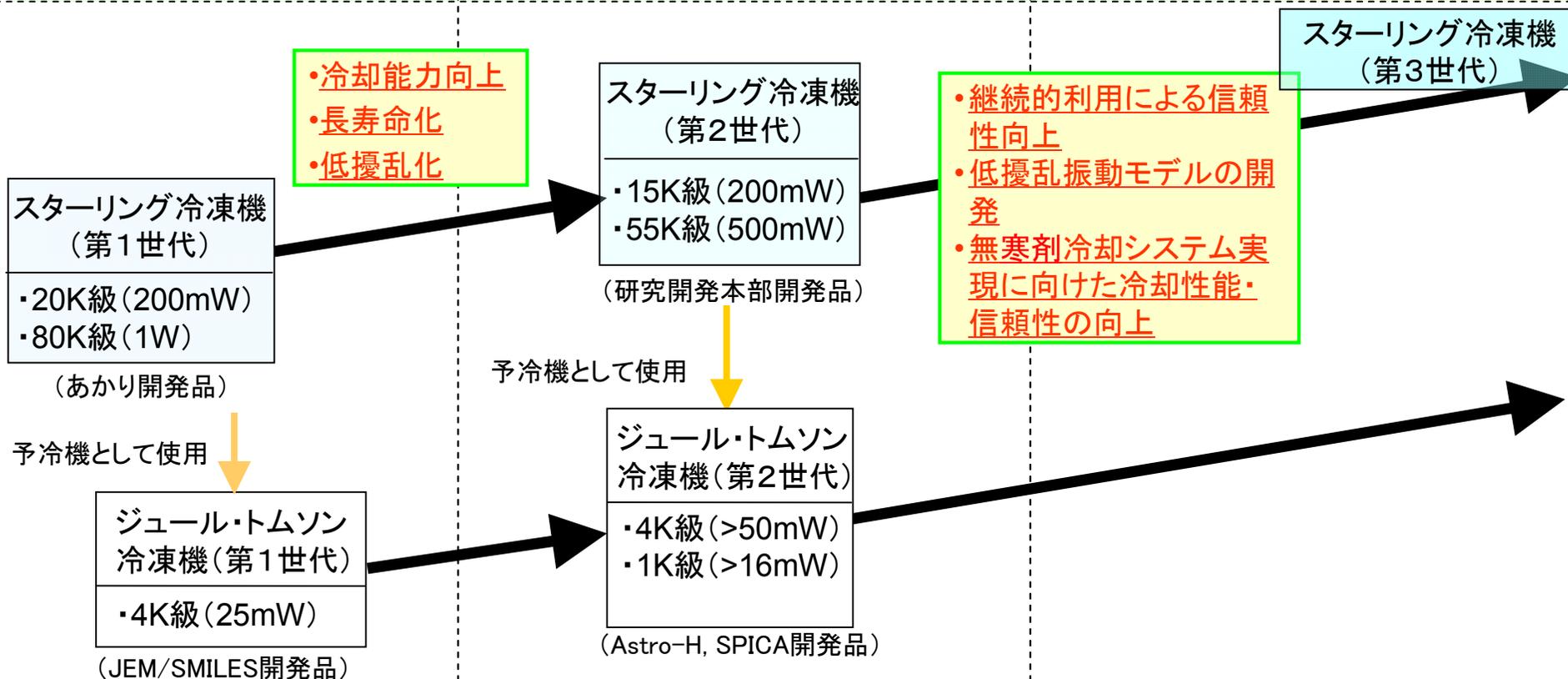
SPICA冷凍機の冗長設計

● 冷却系構成・機能の設計

- 冷凍機、ヒートスイッチの組み合わせを検討、4K系と1K系で切り分け
- 故障した2STの20K, 100K冷却ステージを切り離すヒートスイッチの検討
- JT配管のコンダクタンスが十分に大きいため、JT冷却部(1.7、4.5K)のヒートスイッチは不要。

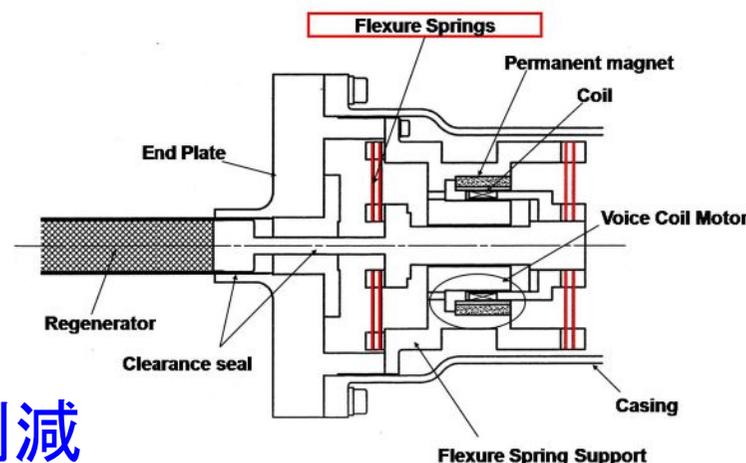


第1期中期計画		第2期中期計画		第3期中期計画	
2005		2010		2015	
1段スターリング 冷凍機	▲すざく ▲かぐや	▲PLANET-C	▲GCOM-C1/SGLI ▲ASTRO-H/SXI		
2段スターリング 冷凍機(第1世代)	▲あかり	▲JEM/SMILES(*1)			
2段スターリング 冷凍機(第2世代)	(*1) スターリング冷凍機は4K-JT予冷機として使用 (*2) スターリング冷凍機は1K-JT予冷機として使用 (*3) スターリング冷凍機は1, 4K-JT予冷機として使用		▲ASTRO-G ▲ASTRO-H/SXS(*2)	SPICA(*3) IXO	



第2世代2段スターリング冷凍機

- 冷却能力と信頼性の向上
 - 2段目ディスプレイサ直径の拡大
 - 7mmφ ⇒ 8mmφ ;
200mW ⇒ 325 mW @ 20K
 - ディスプレーサ支持構造の改良
 - 板バネによる非接触シール化
 - 冷凍機内部のアウトガス分析と削減
 - 冷凍機作動ガスの汚染による性能低下を回避

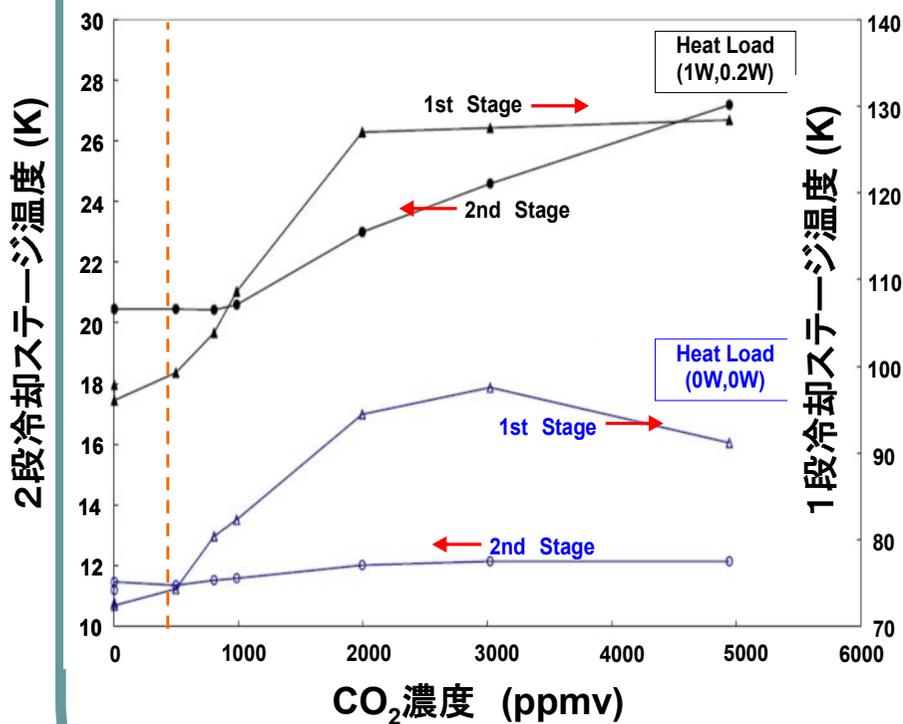


2ST BBMを最適条件で駆動した場合の最大冷却能力
200 mW at 16.0 K : 2段目冷却ステージ
1 W at 83.6 K : 1段目冷却ステージ

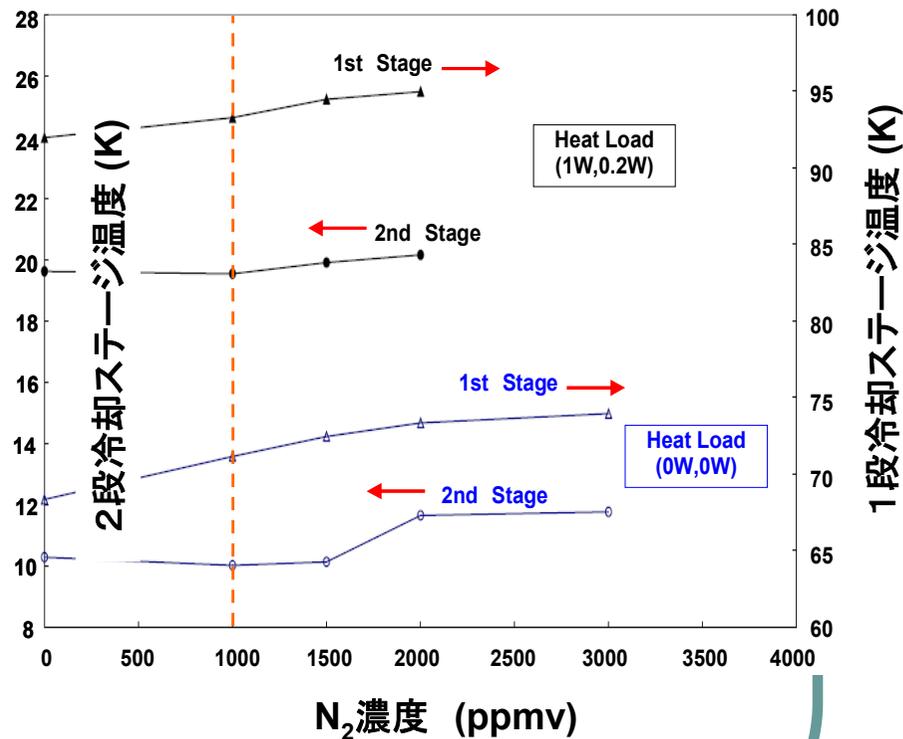
第2世代2ST(EM)の製作と評価を実施

2ST長寿命化のための評価試験(1/2)

■ 不純ガス(CO₂、N₂)による作動流体汚染を模擬し、軌道上長期運用時の冷凍機の性能劣化を評価。



(a) CO₂ ガスによる汚染



(b) N₂ ガスによる汚染

冷凍機2段ステージ温度は、不純ガスCO₂、N₂濃度がそれぞれ500, 1000 ppmv以下であれば、安定した冷却能力を発揮することができる。(長寿命化の指針)

2ST長寿命化のための評価試験(2/2)

- コールドヘッドおよび圧縮機の構成部品の材料についてアウトガス成分、ベーキング効果に関するデータを調査。
- 磁気回路および駆動コイルのテストピースを用いて、アウトガス成分およびその変化量の測定を行い、その総量を推定。

アウトガス推定量

テストピース	ガス量 (g)
磁気回路	1.26
駆動コイル	1.98
接着剤、その他	0.25
Total	3.49

- ◆ 冷凍機内部で発生する不純ガスは磁気回路、駆動コイル、接着剤からのものが大部分を占め、その総量は3.5 g程度と推定。(長寿命化の指標)
- ◆ 接着剤を削減したアウトガス低減対策品の評価を完了。

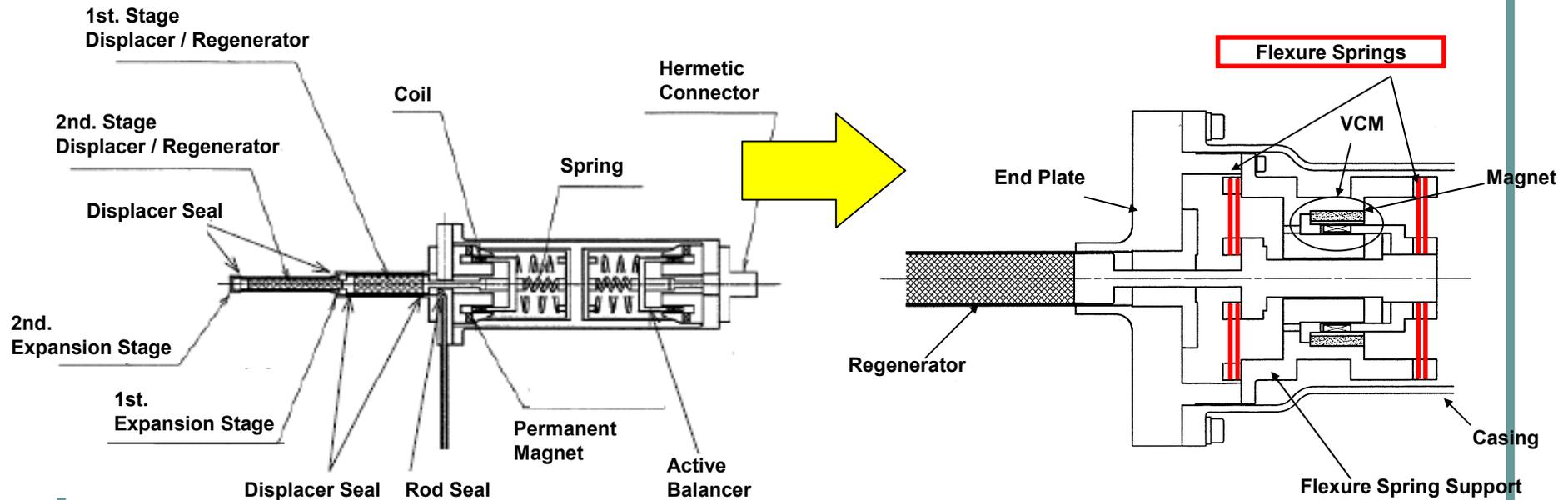
2STの改良(1/3)

- 2段目ディスプレイサ直径の最適化:
 - 7 mm ⇒ 8 mm
 - 冷却能力向上: FY20にEMにより詳細検証実施予定
 - 200mW ⇒ 325mW@20K (1W@90K, AC90W入力)
- 信頼性: 1.5年 ⇒ 5年以上
 - 作動ガス品質 (ガス精製、アウトガス低減、ベーキング)
 - アウトガス発生源の分析: 永久磁石、磁気回路、接着剤
 - テストピースにより、H₂O, CO₂, CO, CH₄などの量を分析評価
 - ◆ Atmospheric pressure ionization mass spectrometric (API-MS) method
 - ◆ Gas chromatograph mass spectrometric (GC-MS) method
 - 発生擾乱の低減 (能動制御: 駆動電力制御、減衰ダンパ)
 - 寿命評価試験 (実施中)

2STの改良(2/3)

旧設計: 1段目ディスプレイサをコンタクトシールによって支持

新設計: 1段目ディスプレイサを板バネによって支持



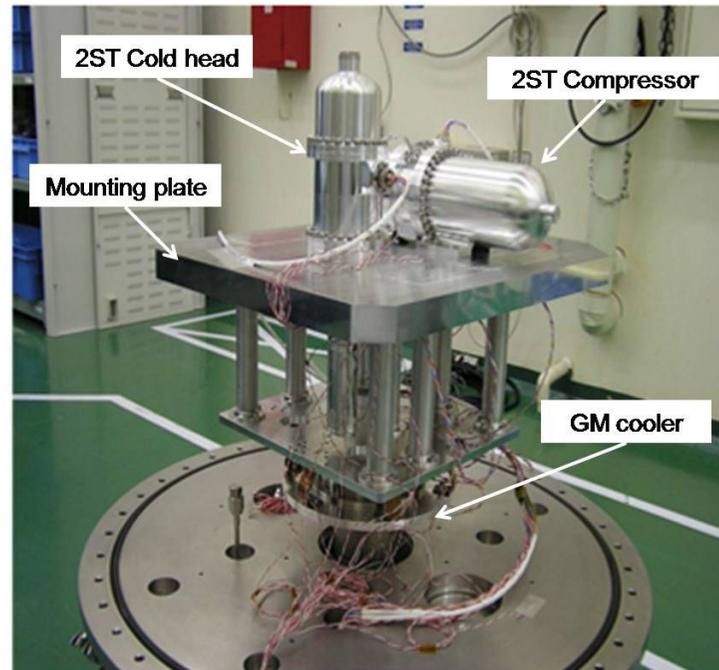
さらに、2段目ディスプレイサのクリアランスを2.5倍に拡大しても同等の冷却能力が得られることを確認し、より高い信頼性設計が可能となる。

2STの改良 (3/3)

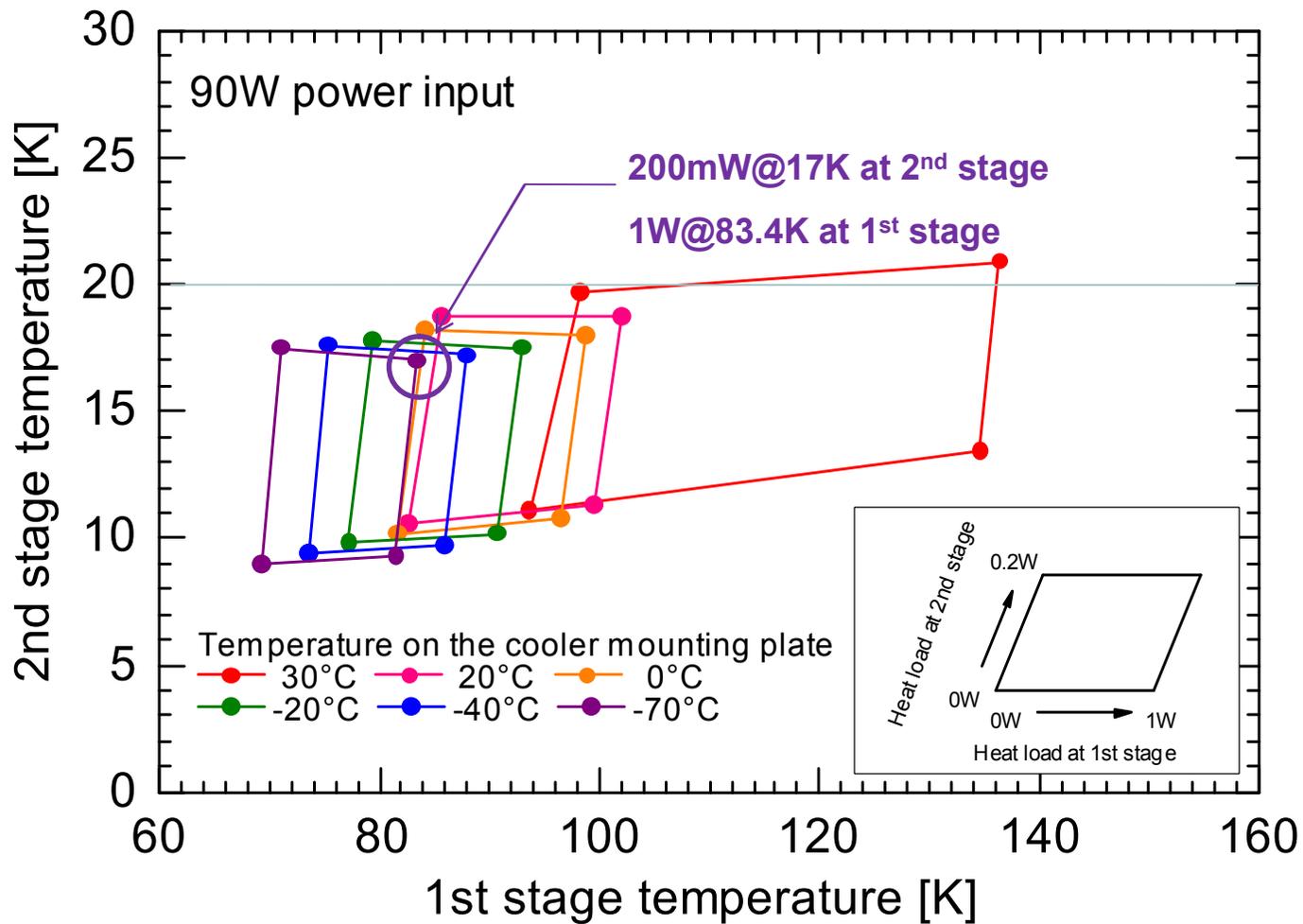
- 2段目冷却ステージ: 200 mW at 16.0 K (実測)
- 1段目冷却ステージ: 1 W at 83.6 K
- 2段スターリング冷凍機の駆動条件
 - ◆ 入力電力: **90 W AC**
 - ◆ 作動ガス封入圧: **0.9 MPa** (ノミナル 1.0 MPa)
 - ◆ 駆動周波数: **15 Hz**
 - ◆ 圧縮機とコールドヘッドの駆動電圧の位相差: **170°** (ノミナル 180°).

第2世代2ST EMの冷却性能(1/2)

- 環境温度に対する冷却性能評価試験
 - 動作温度：-70℃～30℃
 - 作動ガス封入圧：1.4 MPa(室温)
 - 駆動入力電力：50W、90W



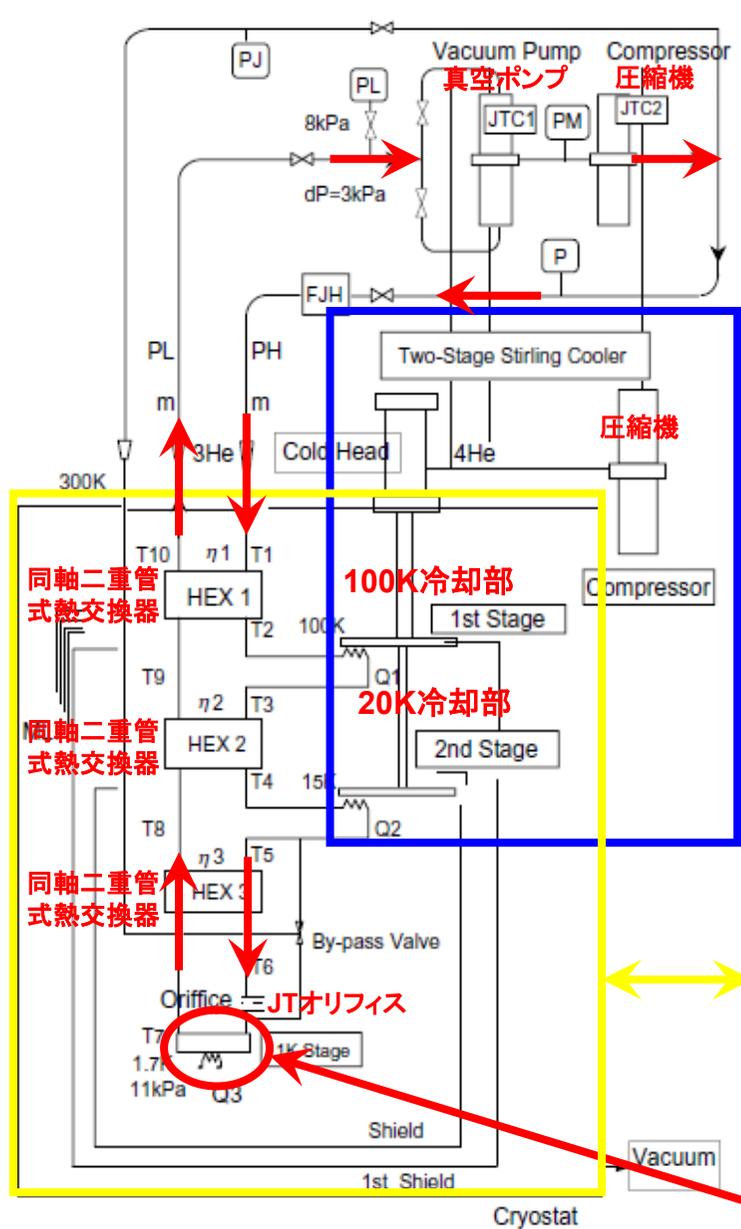
第2世代2ST EMの冷却性能(2/2)



1K級JT冷凍機の開発

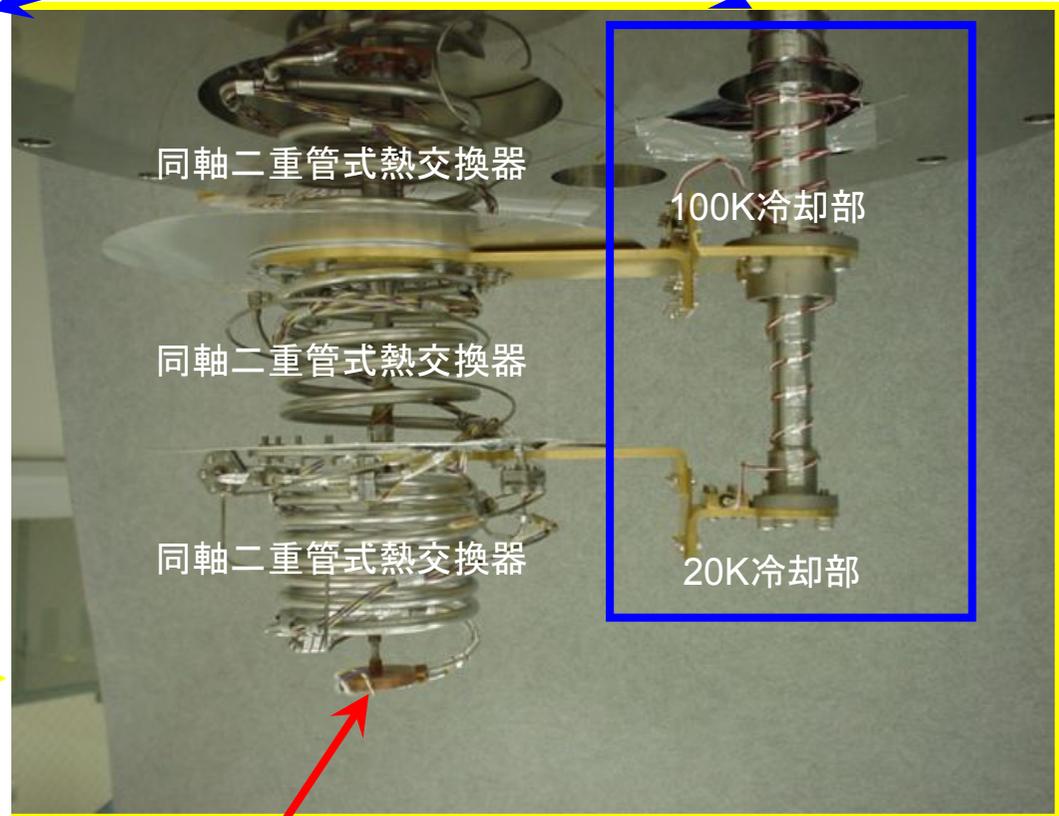
- 次期赤外線天文衛星SPICAで検出器の1.7K冷却要求に対し、1K級冷凍機(冷却能力: **10mW以上@1.7K**)を新規開発。
- ISS/JEM/SMILES (2009)搭載用に開発された4K級JT冷凍機(実績能力: **30mW@4.5K**)と基本原理は同じ。
- JT冷凍機の作動ガスとして、1.7Kでの飽和蒸気圧が一般的な ^4He よりも高い ^3He を使用(少しでも圧縮比を小さくしたい)。
- 信頼性: **3年以上**(連続運転による検証が必要)
 - 作動ガス品質(ガス精製、アウトガス低減)
 - 圧縮機や駆動バルブの低温環境下での安定動作
 - 発生擾乱
 - 寿命評価試験

2段スターリング冷凍機とジュール・トムソン冷凍機



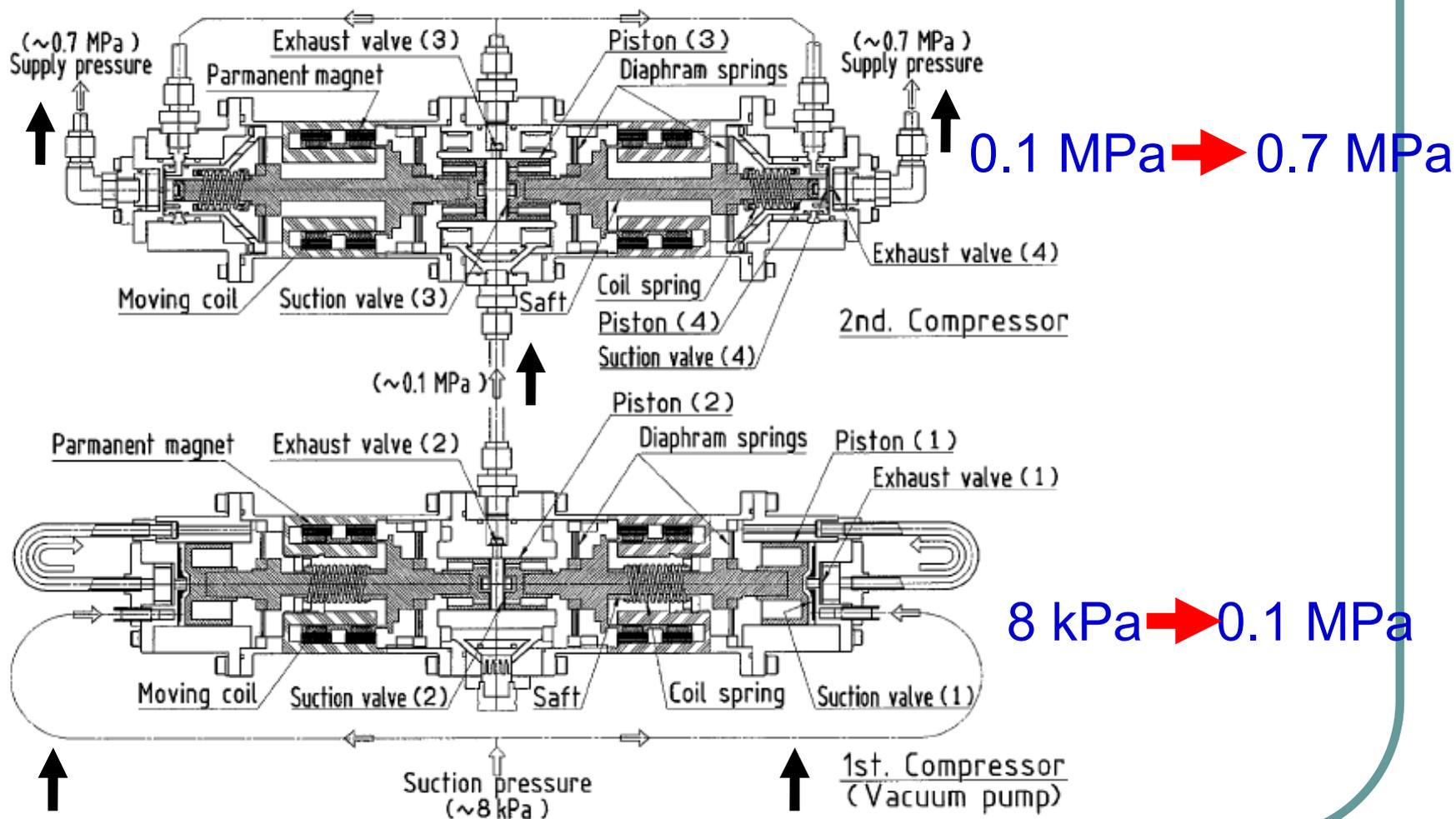
20K級2段スターリング冷凍機は、ジュール・トムソン(JT)冷凍機の予冷機として必須(1K級JTと4K級JTは同様の構成)

20K級2段スターリング冷凍機



1.7K冷却部

1K級JT冷凍機の4段圧縮 (BBM)



4K級JT冷凍機(BBM)

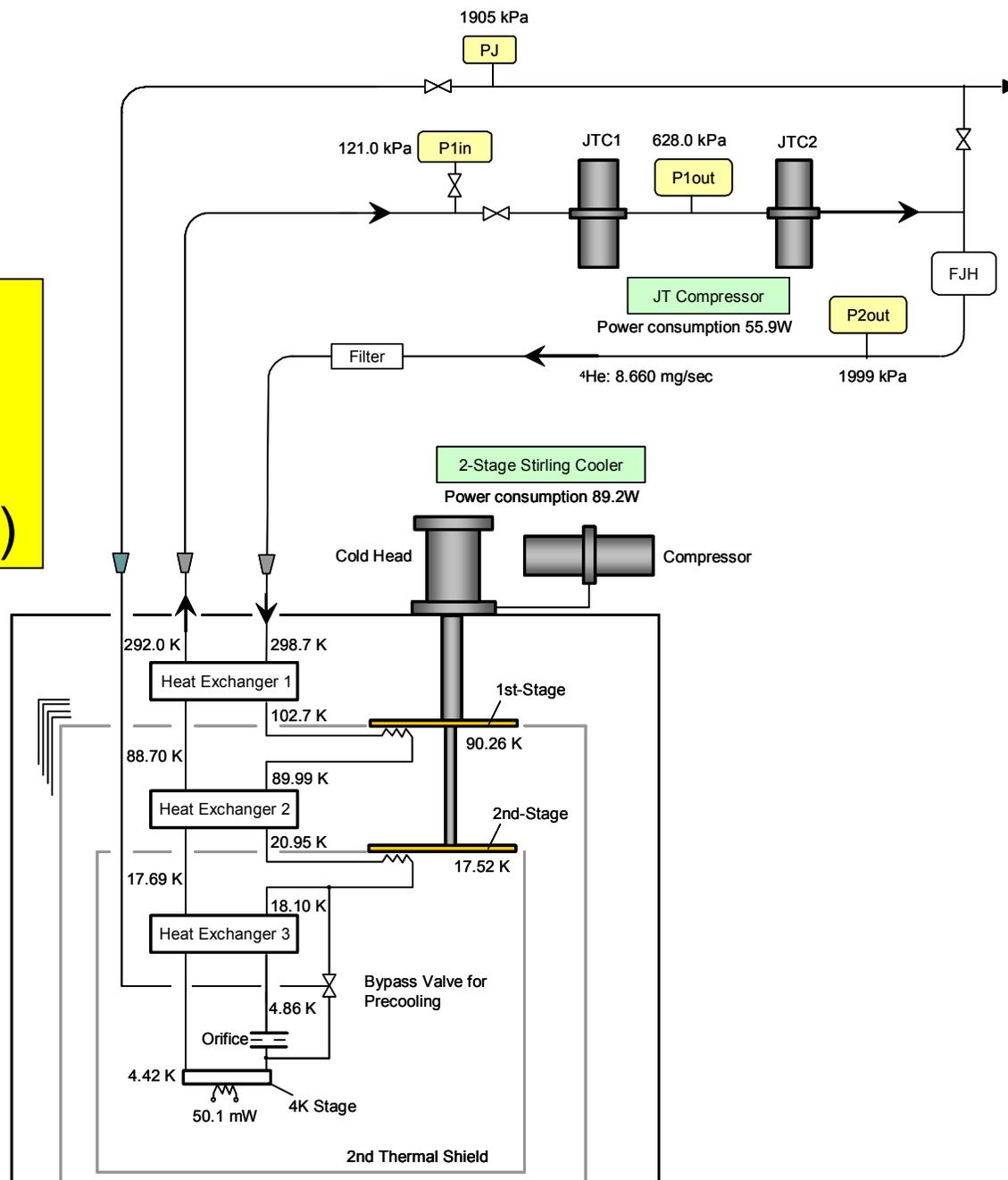
4K級JT冷凍機＋部分改良型2段スターリング冷凍機(φ8mm)

冷却能力:
50.1mW@4.4K
電気入力 AC145.1W
(2ST: 89.2 W, JT: 55.9 W)

世界最高効率!

信頼性: 5年以上(検証要)

- ✓ 作動ガス品質(ガス精製、アウトガス低減)
- ✓ 圧縮機や駆動バルブの低温環境下での安定動作
- ✓ 発生擾乱
- ✓ 寿命評価試験



JEM/SMILES用4K-JTの冷却能力のほぼ倍増に成功!

Evacuated vessel

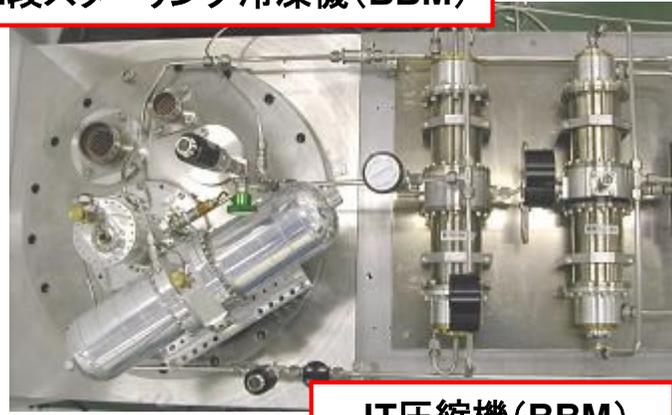
1K級JT冷凍機 (BBM)

1K級JT冷凍機 + 部分改良型2段スターリング冷凍機 (φ8mm)

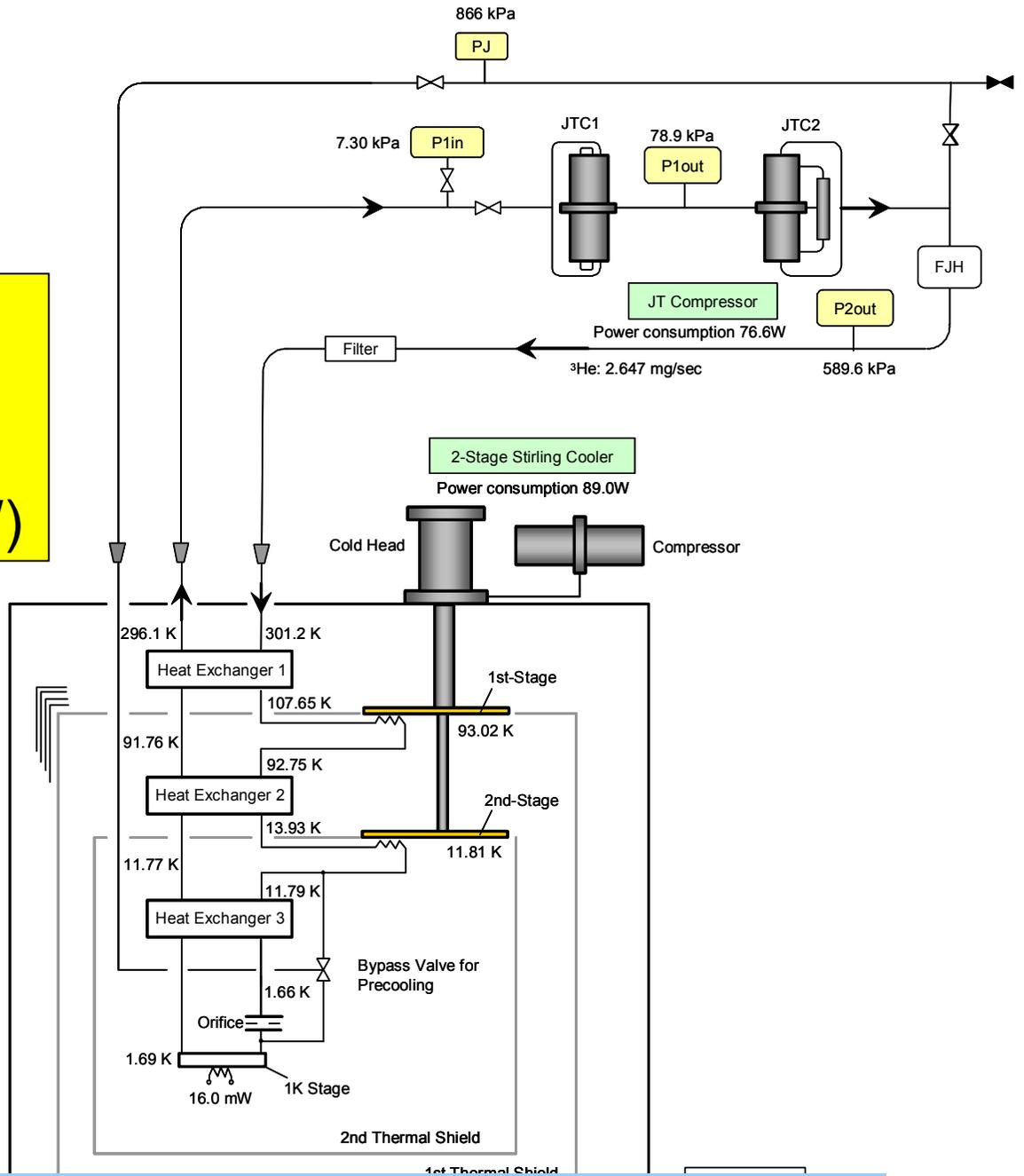
冷却能力:
16.0mW@1.69K
電気入力 AC165.6W
(2ST: 89.0 W, JT: 76.6 W)

世界最高効率!

2段スターリング冷凍機 (BBM)



JT圧縮機 (BBM)



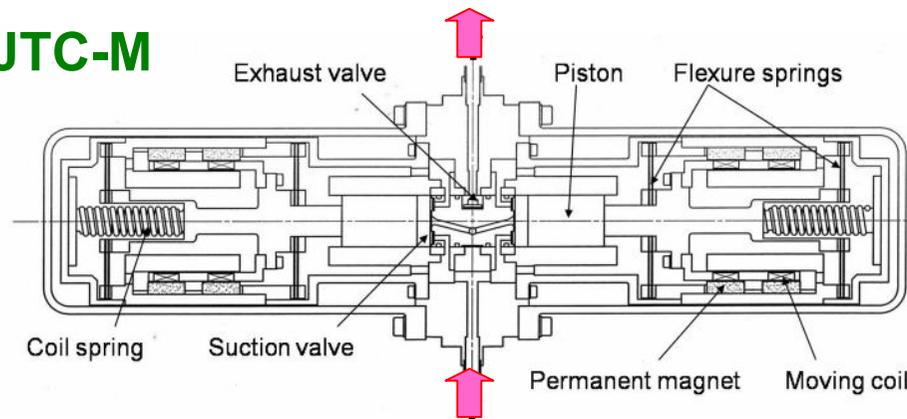
“Space Cryogenics Workshop 2003” 最優秀論文賞受賞

1K級JT冷凍機EMの開発状況

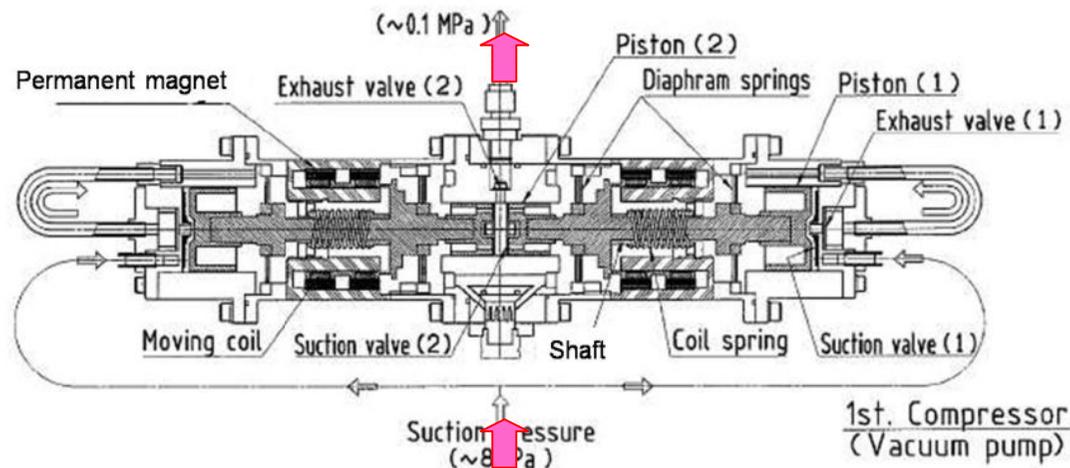
● JTコンプレッサ (JTC)

- 3 台のコンプレッサを直列接続し、4段圧縮 (7kPa→600kPa)。
- Flexure springs and coil springs are used in combination

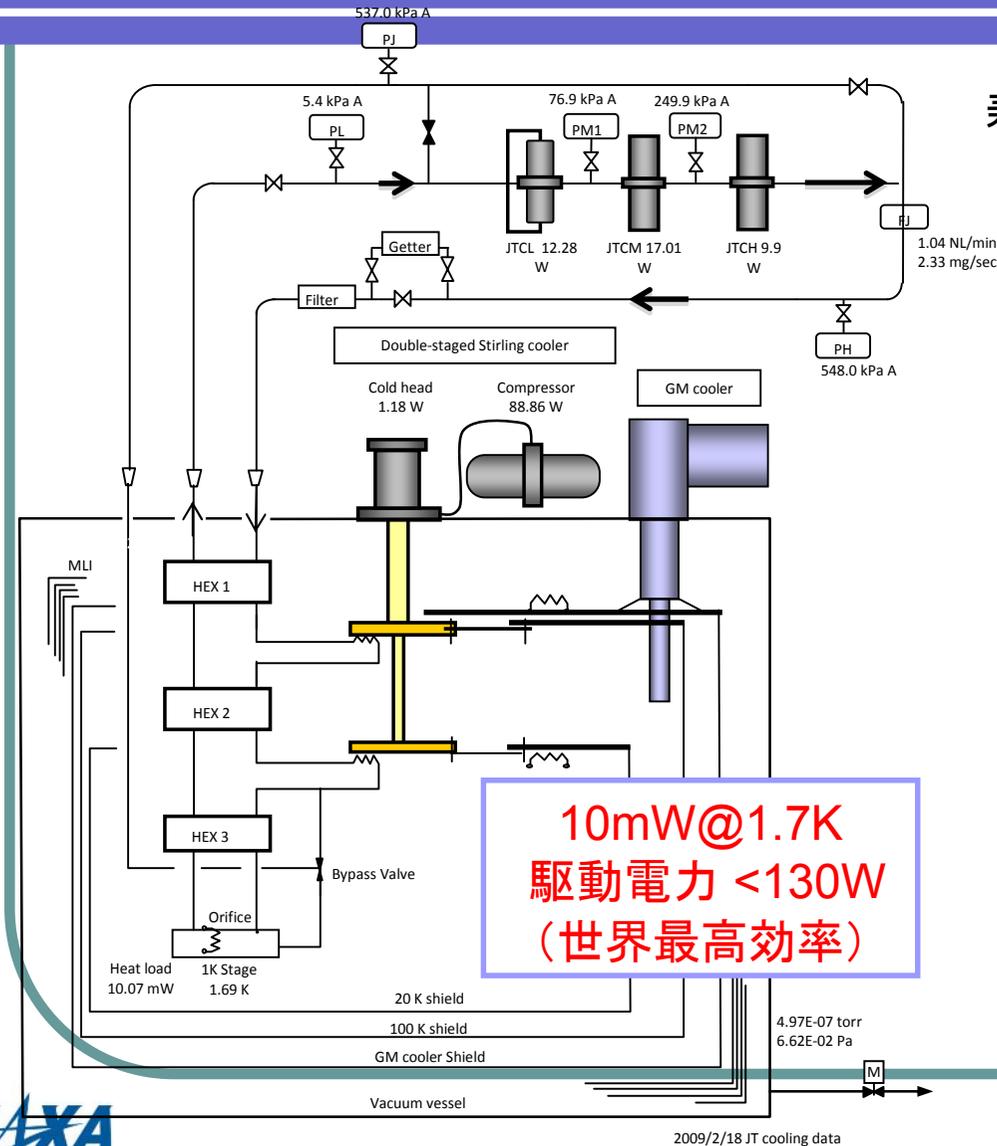
JTC-H, JTC-M



JTC-L

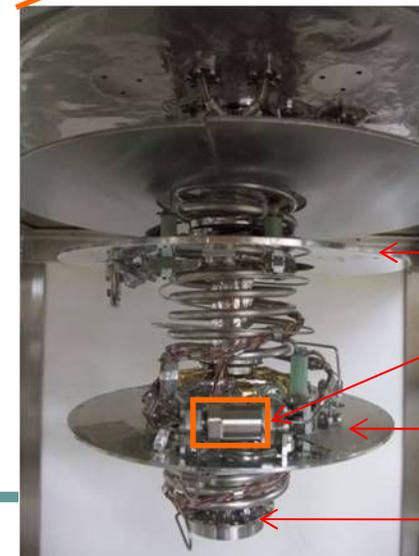


1K級JT冷凍機EMの開発状況



**10mW@1.7K
駆動電力 <130W
(世界最高効率)**

寿命評価試験 (@筑波宇宙センター)



- ← 100K stage
- ← Bypass valve
- ← 20K stage
- ← 1K stage

1K stage of JT cooler in the vacuum vessel

まとめ

- 次期赤外線天文衛星**SPICA**(2018年計画中)は、日本が主導する国際共同ミッションとしてESA等との協力のもとで概念設計を進めている。(現在、プリプロジェクト)
- **ミッション部冷却システム(CRYO)**は、SPICAのミッションサクセスにおけるコア技術。
- L2での放射冷却は必須。**断熱放射冷却構造(TIRCS)**には、打上げ時の耐機械環境性、ロケットフェアリングの収納性、重量制約に対する軽量性、軌道上長期運用に対する信頼性が求められる。(現在の成立解→システム要求審査)
- 高い冷却効率と信頼性を有する**機械式冷凍機(2段スターリング冷凍機、4K級JT冷凍機、1K級JT冷凍機)**が必須。
- 2STと4K-JTは次期X線天文衛星**Astro-H(2013年)**で軌道上実証される予定。(プロジェクト横断的な取組み)