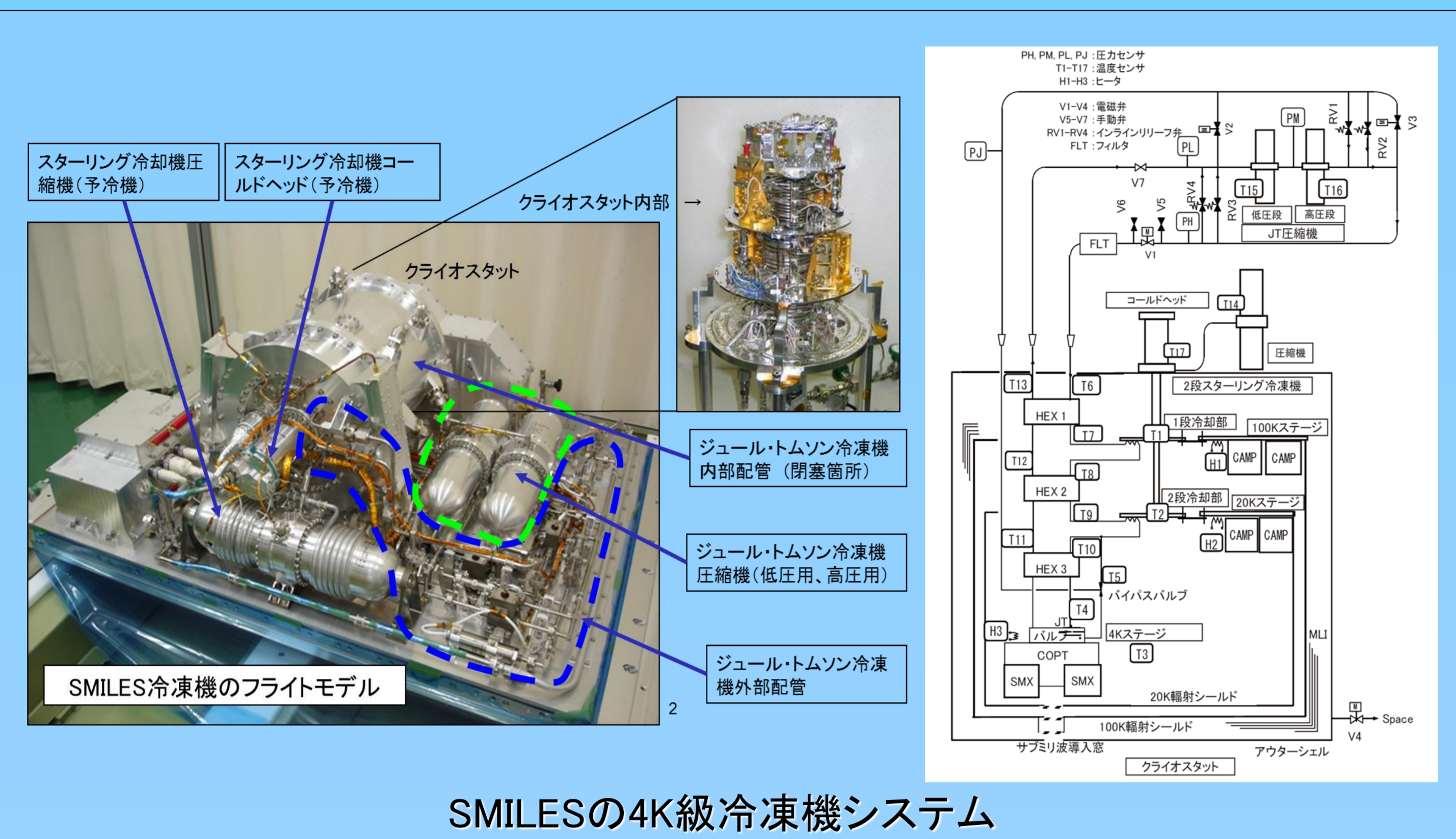


P-234 超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(SMILES)搭載 4K級冷凍機 JT回路内に蓄積したコンタミネーションの推移

西堀 俊幸, 佐藤 洋一, 佐藤亮太, 杉田寛之, 中川貴雄, 竹井洋, 満田和久, 山崎典子(JAXA), 菊池健一(国立天文台), 恒松正二, 檜崎勝弘(住友重機械工業)

1. はじめに

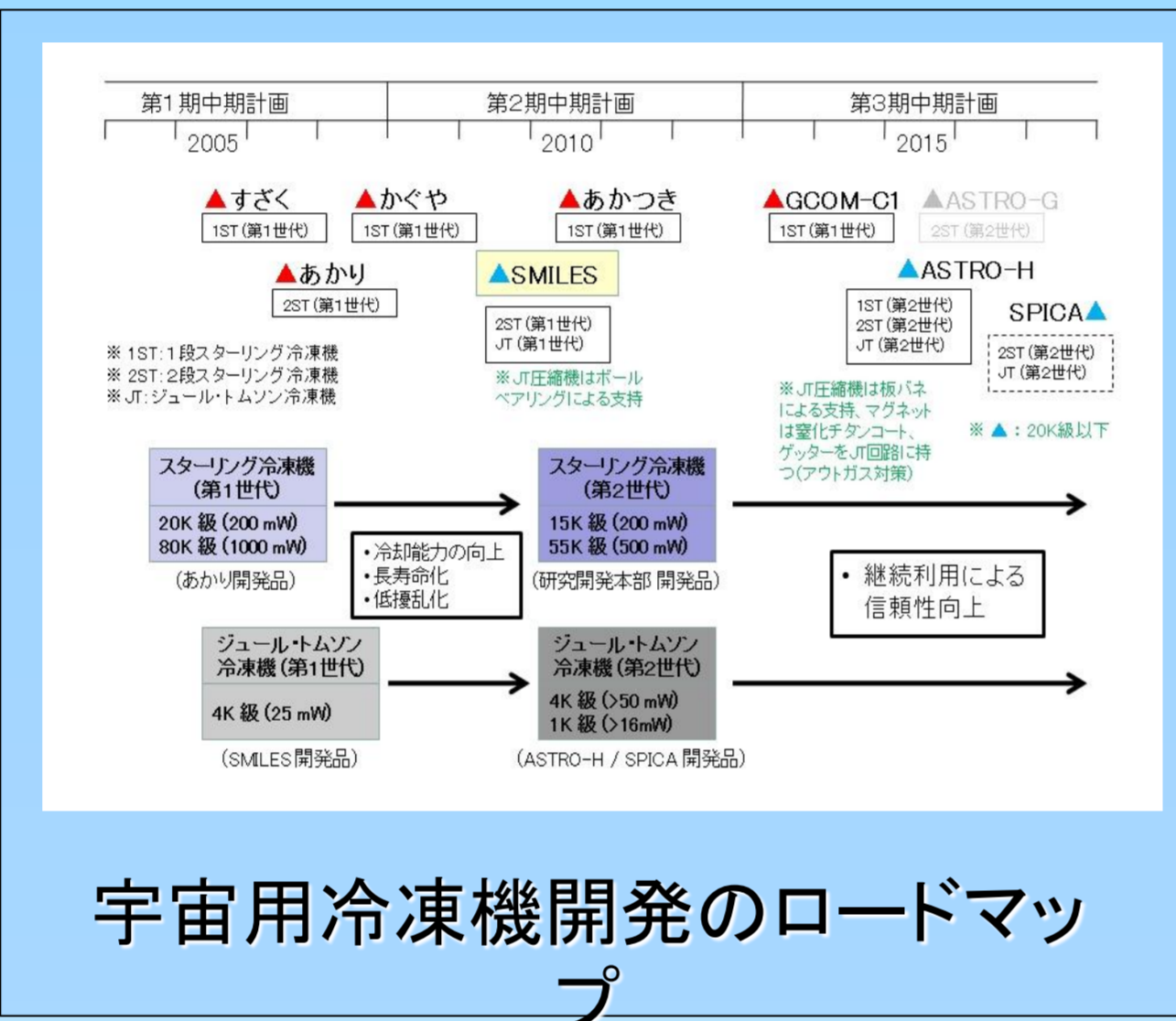
成層圏大気に含まれる微量気体成分の高度分布を国際宇宙ステーションから実験的に高感度で観測するために開発された超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(SMILES: Superconducting Submillimeter-Wave Limb Emission Sounder)は、半年間の観測運用を終えた後、極低温冷凍機の技術実証ミッションとして後期運用を継続し、2014年3月にミッションを終えた。本発表では、超伝導SISミキサを冷却するために搭載されたSMILESの4K級機械式極低温冷凍機の開発結果と冷凍機の軌道上運用により得られた技術的成果を報告する。



SMILESの4K級冷凍機システム

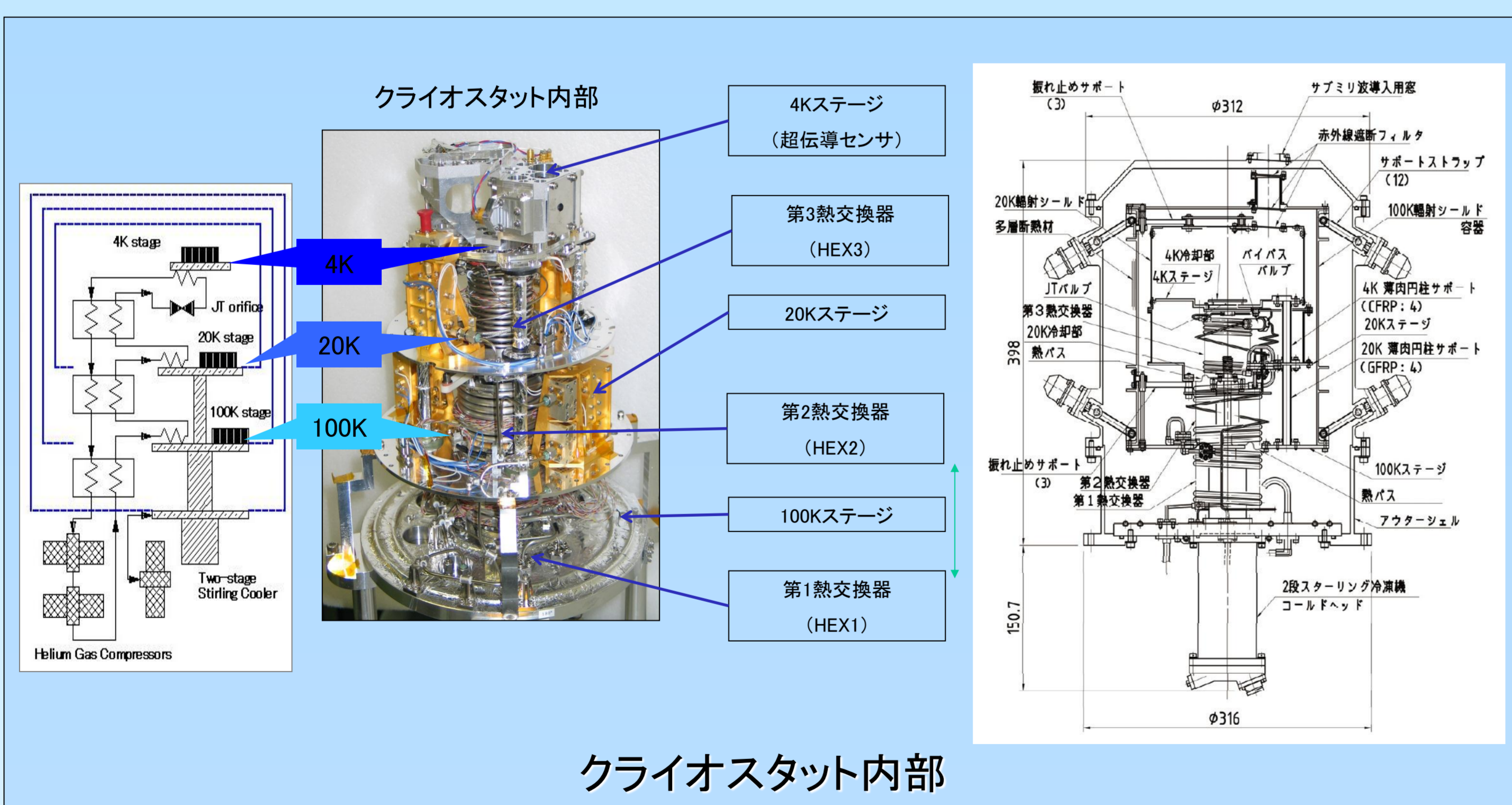
2. SMILES用極低温冷凍機開発のねらい

SMILESは超伝導センサを使用した世界初の地球観測ミッションとして、サブミリ波受信機の超伝導センサ(SISミキサ)^[1]を搭載した。SISミキサを4Kに冷却するため先行的に開発された4K級冷凍機システム(2段スターリング冷凍機+Joule-Thomson(JT回路))^[2]は、後にASTRO-Hの軟X線分光検出器(SXS)と軟X線撮像検出器(SXI)で採用されるものと同様^[3]であったため、SMILESは宇宙用4K級機械式冷凍機の技術実証としても非常に重要な任務を担った冷凍機システム



宇宙用冷凍機開発のロードマップ

SMILESの4K級冷却システムは2段スターリング(Double-Stage Stirling)冷凍機と4Kの冷却を受け持つJT回路から構成される。JT回路は作動ガスであるヘリウムガスを逆転温度以下に冷却する予冷機、熱交換器、JT効果を作り出すオリフィス、ガスを循環させるための圧縮機、予冷のためのガス循環とオリフィスラインとの切り替えを行うバイパス弁から構成される。



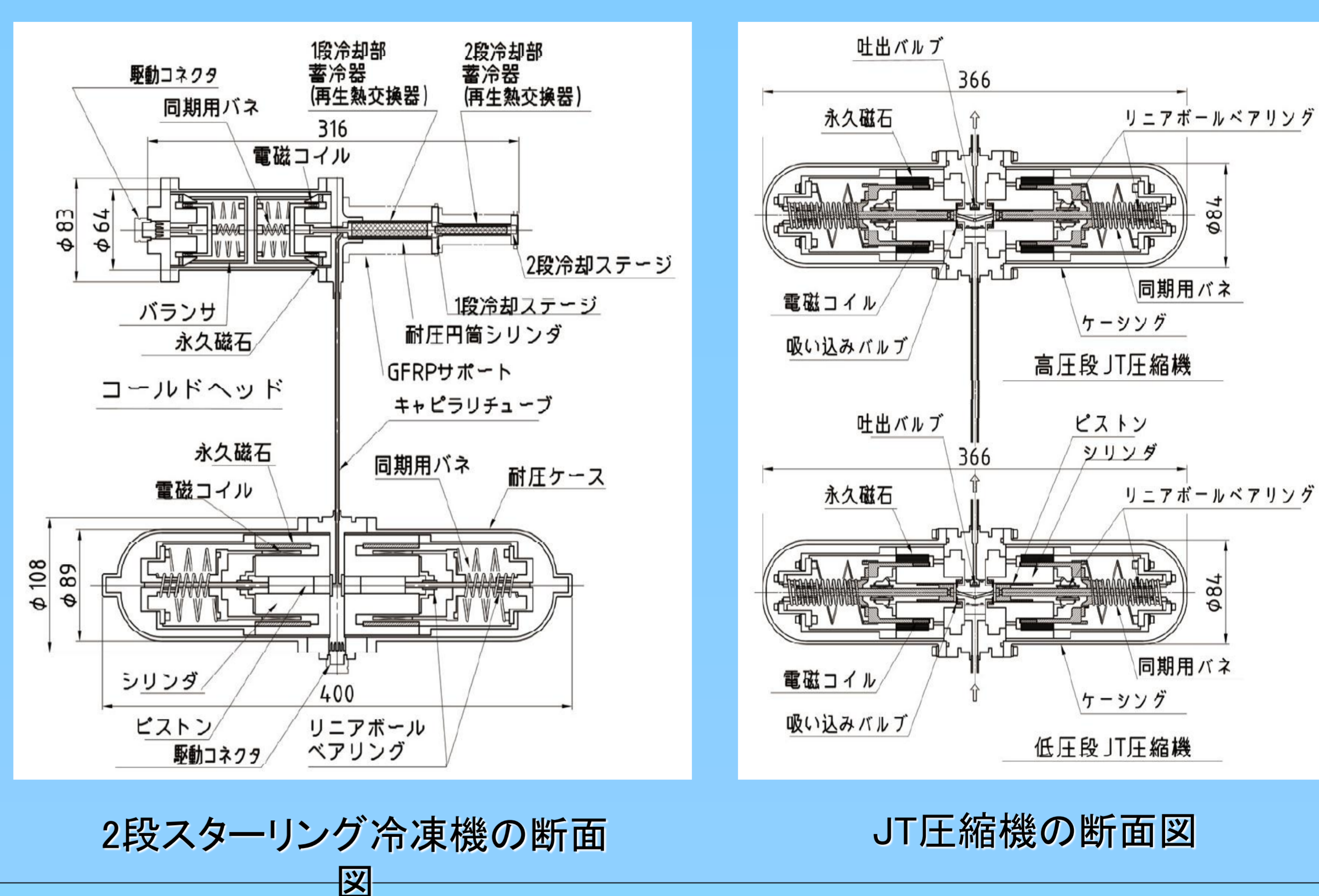
クライオスタット内部

冷凍機システムにより、クライオスタット内の2台のSIS(Superconductor-Insulator-Superconductor)ミキサを4K台に、異なる温度ステージに搭載された計4台のHEMT(High Electron Mobility Transistor)アンプを各々20K、100K以下に冷却する。排熱能力は4Kステージが1mW、20Kステージが20mW、100Kステージが30mWである。

温度安定度は、4Kステージが0.05K/分以下、20Kと100Kステージが0.2K/分以下である。冷却システム全消費電力は160W以下(運用実績: 67.9W)であり、圧縮機とドライバの排熱は「きぼう」船外プラットフォームの冷媒システム(フロリナート)により、国際宇宙ステーションのラジエータまで導かれる。

2段スターリング冷凍機は赤外線天文衛星「あかり」で開発されたものを流用しており、コールドヘッド、ピストンをリニアボールベアリングで支持するツイン対向型リニア駆動圧縮機、キャピラリチューブから構成される。コールドヘッドはバランス内蔵タイプで、蓄冷器を圧縮機と90度の位相差で駆動することにより、逆スターリングサイクルを実現している。圧縮機の駆動電圧は15Hzの正弦波であり、冷却能力は17Kで26.4mW、76.6Kで35.4mW、消費電力は約50Wであった。

JT圧縮機は2段スターリング冷凍機の圧縮機と同じタイプの圧縮機を逆止弁を介して多段に結合され、6mg/secの流速でヘリウムガスを循環させる。JT圧縮機は30Hzの正弦波で駆動し、4.53Kで1mWの排熱能力を約18Wの消費電力であった。



2段スターリング冷凍機の断面図

JT圧縮機の断面図

JT回路の熱交換器はクライオスタット中心部に位置する全長約2mになるコイル型二重配管により構成され、外管を通る高圧ガスと内管を通る低圧ガス間で97%以上の高効率なヘリウムガスの熱交換を実現した。

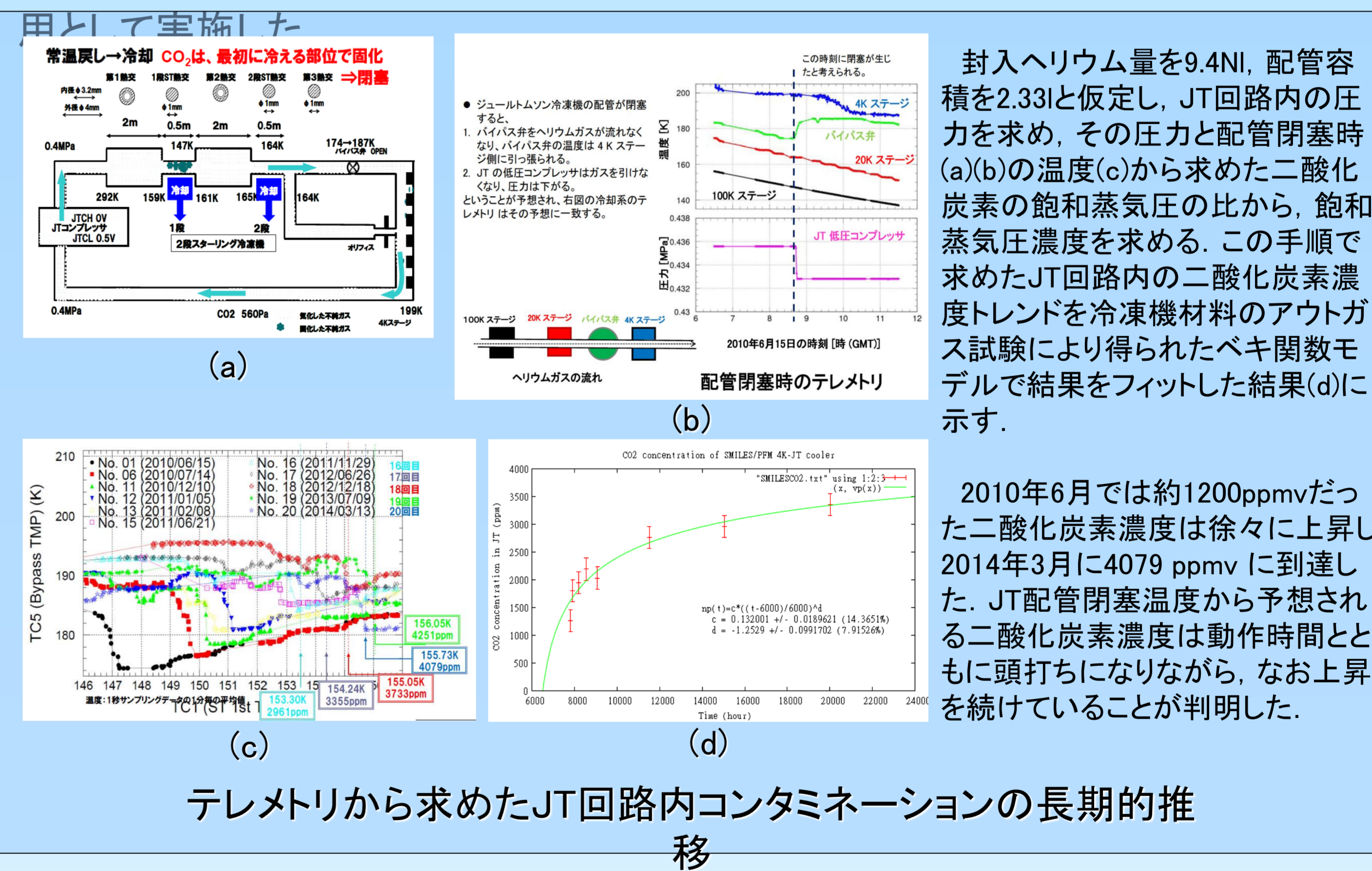
4Kステージ下部に位置するJTオリフィスは、長期運用と冷却能力をバランスさせることにより、24μm径に設定した。ガス循環ラインとオリフィスラインを切り替えるJTバルブの開閉は、圧縮機の圧力によるガス圧駆動とし、信頼性と断熱性を確保した。

JTオリフィスやバイパス弁への異物付着は冷却性能に与えるインパクトが大きいため、配管等のクリーニングは過去の冷凍機モデルの製造検査工程より厳しく管理を行った。また、4K以下では作動ガスであるヘリウム以外のコンタミガスは固化することから、ガスラインに使用する材料の選定とベーキングも見直し、作動ガスも超高純度ヘリウムガスを一度4Kレベルを通過させることにより、コンタミガスを固化させてトラップしたのちに充填した。

4. 軌道上運用

2009年9月よりSMILESの4K級冷却システムの運用を「きぼう」で開始した。2010年6月、「きぼう」の冷媒系がトラブルにより停止し、その影響を受け、SMILESの冷却システムのドライバが自律的制御により圧縮機を緊急遮断した。その後、「きぼう」冷媒系の復旧後に冷凍機の再立ち上げを実施したが、予冷段階でヘリウムガス内のコンタミネーションが固化して配管が閉塞し4K冷却が不能となる不具合が生じた。

同タイプの冷凍機を搭載する予定であるISASのASTRO-HやSPICAのチーム、JAXA研究開発本部からなる原因究明チームを発足させ、本事象の材料のアウトガス試験を含めた原因究明と対策に取り組んだ。大気観測が出来なくなったSMILESは、その後、軌道上でJT回路のコンタミネーションの濃度を推定する手順を確立させ、2014年3月まで年2回の濃度推定運用を行う技術実証実験を後期運



テレメトリから求めたJT回路内コンタミネーションの長期的推移

5. まとめ

ASTRO-Hが設定する4K-JT冷凍機の寿命3年分を超える30428時間に亘りSMILESのJT圧縮機を軌道上運用し、圧縮機の圧縮性能低下(20%)の確認と共に、JT回路内のコンタミネーション(二酸化炭素)の増加を確認した。2段スターリング冷凍機の圧縮機については、軌道上16124時間に亘り運用を行い、大きな圧縮性能の劣化は確認されなかった。

ASTRO-HはSMILESで発生したアウトガスの事象を教訓としてワーストケースと仮定し、設計の段階から更なるアウトガス対策(マグネットのコーティング、ゲッター装着、冷凍機の部品・材料の大気曝露時間管理の徹底)を実施するに至った。

参考文献:

- [1] K. Kikuchi et al., "Overview and early results of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES)", Journal of Geophysical Research Atmospheres 115, D23306 [doi:10.1029/2010JD014379]
- [2] 恒松, 他: "宇宙ステーション搭載型超伝導サブミリ波リム放射サウンダ用冷却システム", 低温工学, 49巻6号, (2014).
- [3] Y. Sato et al., "Development status of the mechanical cryocoolers for the Soft X-ray Spectrometer on board Astro-H", Cryogenics, Vol. 64, pp.182-188 (2014).