

国際協力研究による宇宙応用を目指した無冷媒50mK冷却システムの開発

INTERNATIONAL DEVELOPMENT OF DETECTOR COOLING SYSTEM DOWN TO 50 mK IN SPACE WITHOUT CRYOGENS

山崎典子¹, 篠崎慶亮², 東谷千比呂¹, 中川貴雄¹, 羽澄昌史³, 満田和久¹, 南雄人³, 山本亮¹

1:ISAS/JAXA, 2:RDD/JAXA, 3:KEK.



目的

将来の宇宙観測では、雑音を下げるために、極低温検出器が要求されるケースが多く、冷却システムが不可欠である。宇宙用冷却システムでは、信頼性・省電力・無冷媒での長寿命化などが課題である。ESAは2016年にCore Technology Program(CTP)の1つとして、無冷媒50mK冷却システムの公募を行い、CNESを代表とするAthena/X-IFU[1]チームは、X-IFU phase-A studyの一部として受託した。このような開発は、SPICAやLiteBIRDの設計にも寄与するために、ISASではCC-CTP(CryoChain CTP)チームとして協力を行なっている。まずは現状のX-IFU冷却系案[2]の一部のコンポによる、Cryostat#1[3]を製作し、日本の4K級 Joule Thomson(JT)冷凍機、1K級 JT冷凍機[4,5]と、フランスCEAによる3He sortion と断熱消磁冷凍機(ADR)を組み合わせたHybrid Cooler[6]を組み合わせて50mKの達成と冷却サイクルの確立を行なう。

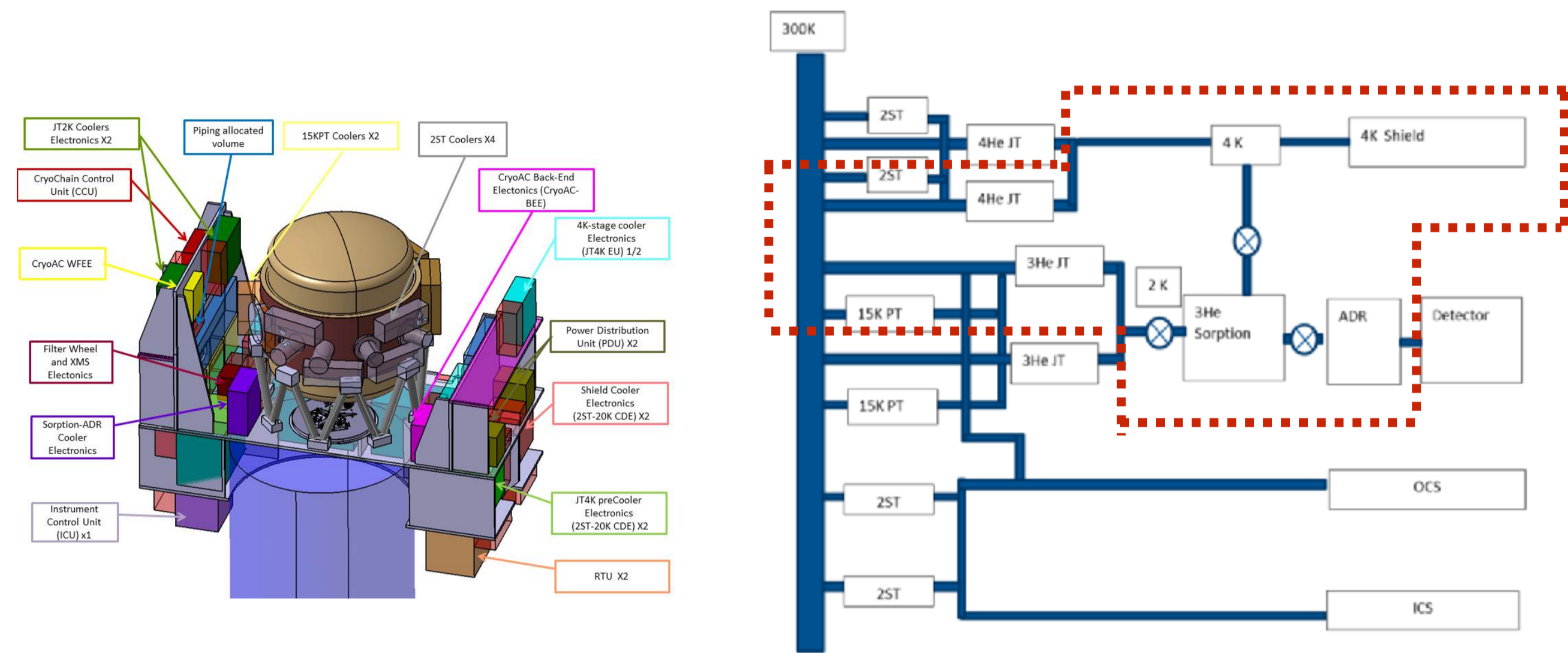


Fig 1. 左: X-IFUの現状設計 [1], 右: 冷却系のブロックダイアグラム [2]. 赤い波線の部分をCryostat#1は模擬する。(X-IFUの設計は、検討中であり最終案ではない)

Cryostat #1組立

Cryostat #1は2017年3月から、フランスグルノーブルのCEAにおいて、組立を開始し、9月までに合計22週の実証試験を行なった。JAXAが戦略コンポとして開発してきた1K級冷凍機を、フランスAir Liquid製のパルスチューブ冷凍機(PT)を予冷機として初めて動作させている。事前のCAD図、3Dプリンタモデルの交換により、I/F調整を行なったが、無事機械的、熱的な組み込みが完了した。

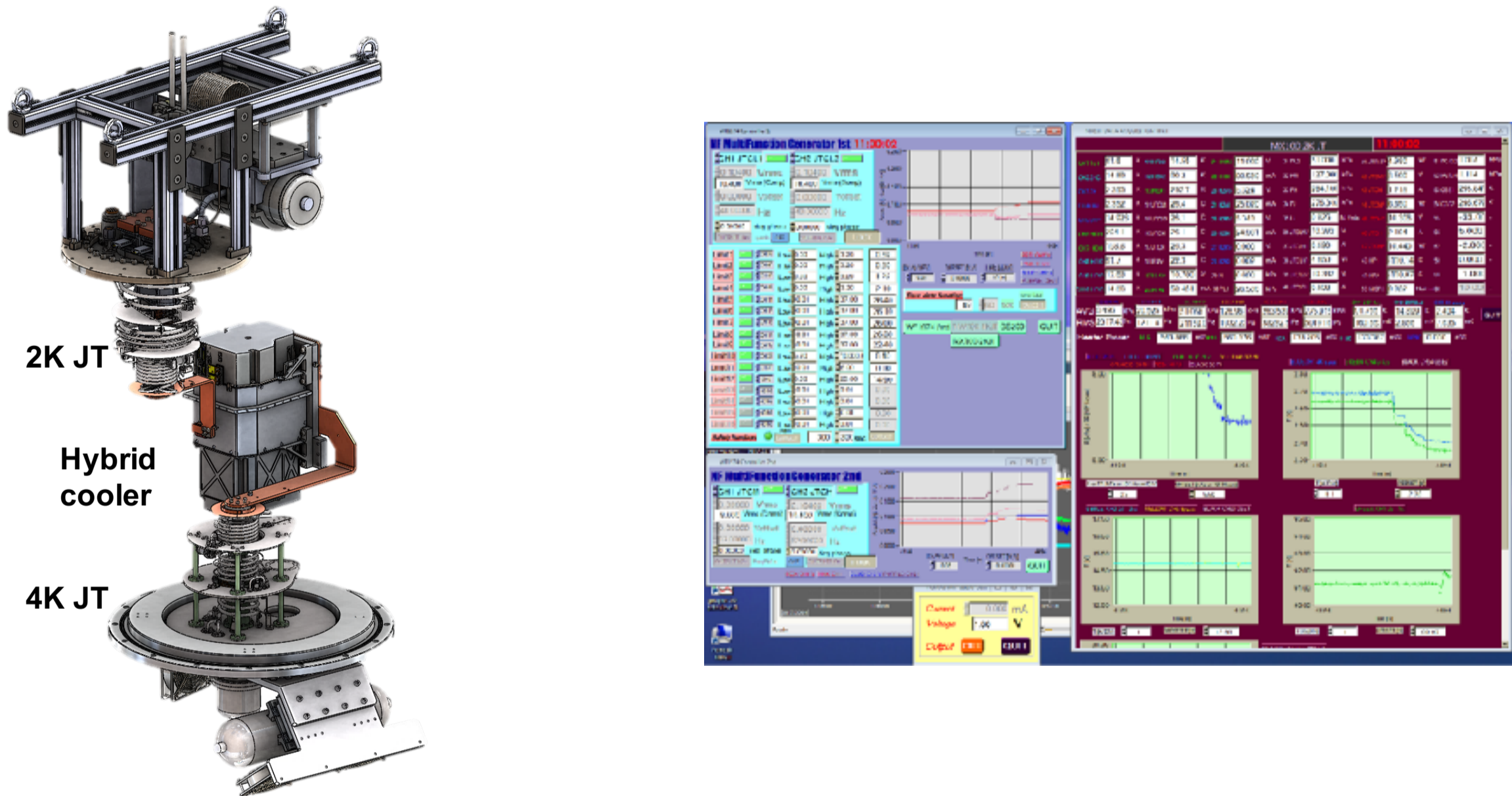


Fig 2. 左: 冷却系の心臓部。下から2段スターリング冷凍機(2ST)を予冷機とする4K JT冷凍機、上から1K JT冷凍機がAir Liquid製のパルスチューブ冷凍機を予冷機として差し込まれている。中心にあるのがSPICA/SAFARI用に開発されたEMのHybrid Cooler。右: モニター画面の例、各点の温度、駆動条件などがモニターし、フランス側の機器ともデータを共有している。



Fig 3. 左: 9月のHybrid Cooler組み込み後のCryostat #1と関係者の集合写真。右: Cryostat #3(X-IFU DM)試験用に作られた新しいクリーンルームに設置されている。一番左にある黒いラック2台が日本から輸送したGSE。

実験結果

4K級JT, 1K級JTはCryostat#1に組み込み後、動作確認試験を行い、1K級JTは3Heを封入後1.7Kを予定通り達成し、また冷却能力もスペックの>10mW@1.7Kを満たした。

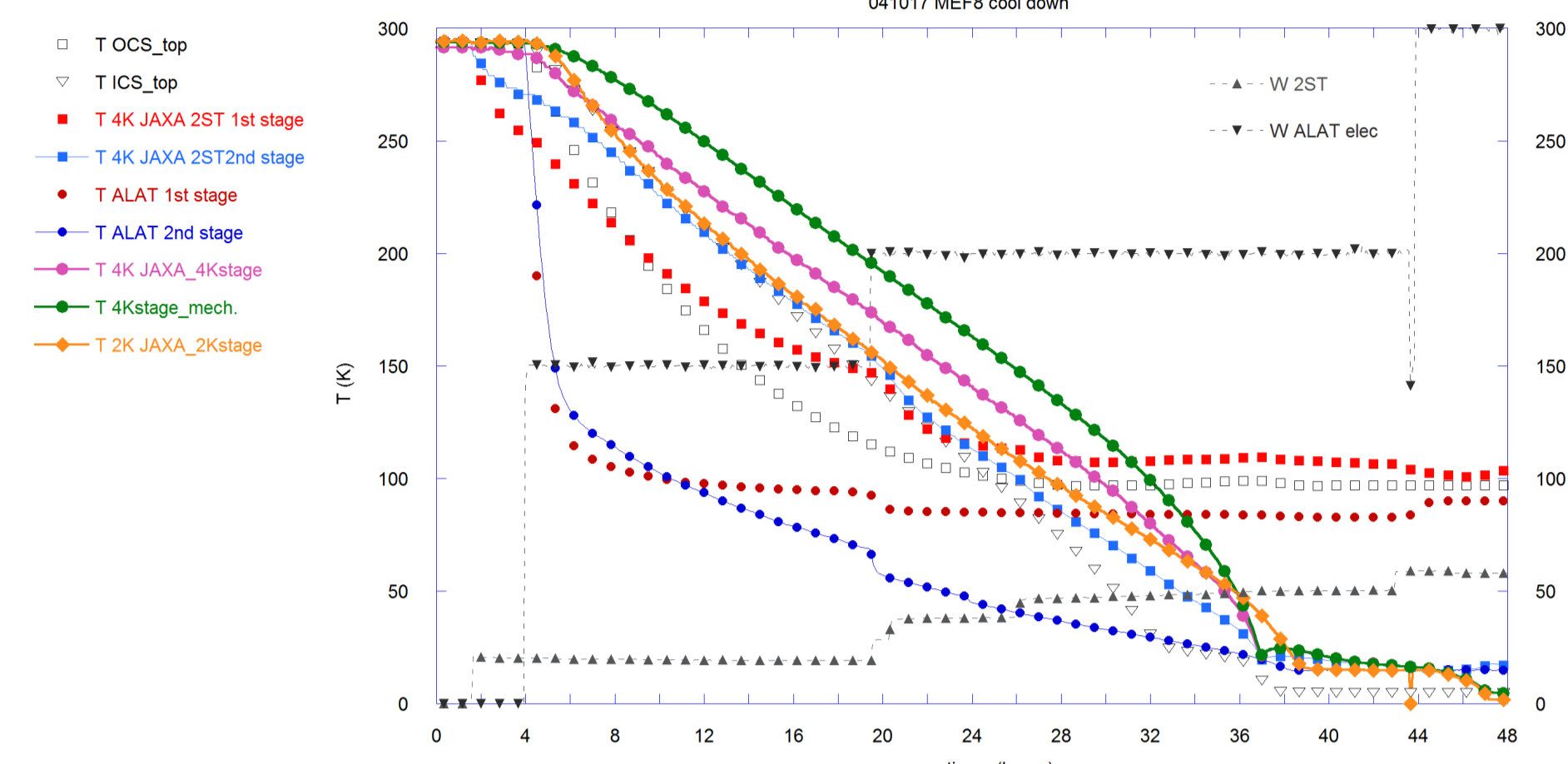


Fig 4. 室温からの冷却例、4種(2ST, 4K級JT, 1K級JT, PT)の冷凍機により、冷却が進行する。

Hybrid coolerにより50mKに冷却するリサイクル時には、JT冷凍機はその排熱を受けて温度を保たねばならない。排熱パターンをいくつか想定し、実際の冷却で安定したリサイクルができるかの実証を行なった。

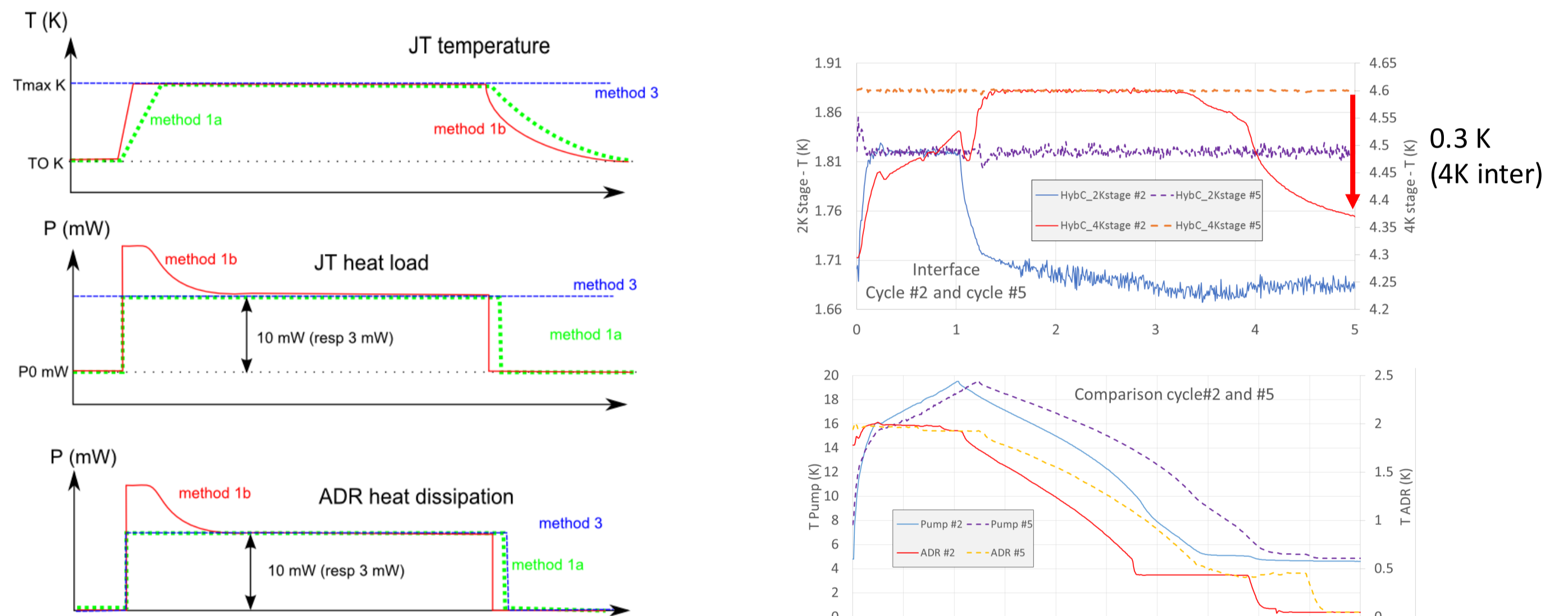


Fig 4. 左: 想定した3つのリサイクルパターン。Method1aではJT冷凍機への負荷を増やす、1bである時間は最大冷却能力を越える負荷をかけた時、温度は維持する。右: 実際に1bのパターンでのリサイクル例。右上はJTの温度で、右下がsorptionのヒータ部の温度と50mKステージの温度。JTは熱負荷の高い時間も一定の温度を維持できている。

今後の予定など

Cryostat #1実験では、PT冷凍機からの熱侵入があることが分かっており、改善を試みた後に、2018年2月からまた4週間の試験を行なう。これらの実験結果は、SPICAの冷却系検討、Athena/X-IFUの冷却系設計にフィードバックされており、現在X-IFUの設計が質量・電力の削減が可能か、マージンを十分に取れるか、などの観点から見直しをされている。日本のJT冷凍機をAthena/X-IFUに搭載したいという方向に替わりはない。この設計を受けて、X-IFUのDemonstration modelとなるCryostat #3が冷却系と40x2=80素子のTESマイクロカロリメータを組み込んで製作され、冷却性能や機械的・電氣的ノイズも含めて評価される予定である。

References

- Barret D, et al, Proceedings of SPIE 9905 (2016) 99052F doi: 10.1117/12.2232432
- Charles I, et al, Proceedings of SPIE 9905 (2016) 99052J doi: 10.1117/12.2232710
- Prouve, T. et al, Cryogenics, 89 (2018), 85 doi:10.1016/j.cryogenics.2017.11.009
- Sato Y, et al, Cryogenics, 74 (2016), pp.47-54 doi: 10.1016/j.cryogenics.2015.10.017
- Shinozaki K., et al., Cryocooler, 16 (2010) pp.1-8
- Duval, J.-M., et al, Materials Science and Engineering 101, no. 1 (2015): doi: 10.1088/1757-899X/101/1/012010

Acknowledgements

This work is funded by European Space Agency (ESA) through the CTP contract number 4000117207/16/NL/HB, and JAXA/ISAS. We thank for SHI cryogenic team for for technical discussions and support.

