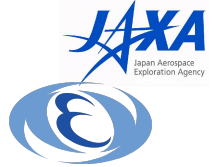


国際協力研究による宇宙応用を目指した無冷媒50mK冷却システムの開発 II

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⁴

1:ISAS/JAXA, 2:RDD/JAXA, 3:KEK, 4:AIST



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]の一部のコンプによる、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 sorption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50mKの達成と冷却サイクルの確立を行なった。結果は好調であり、X-IFUの要求を唯一満たす冷凍機として、日本の2KJT/4KJTがX-IFUのベースラインプランとなった。

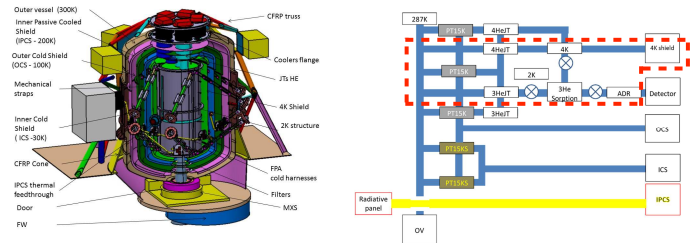


Fig 1. 左: X-IFUの現状設計, 右: 冷却系のブロックダイアグラム。赤い波線の部分をCryostat#1は模倣する。(X-IFUの設計は、2019年1月のiPRRにむけ準備中のもの)

Cryostat #1実験

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、2018年3月まで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、実際の動作をさせることができた。

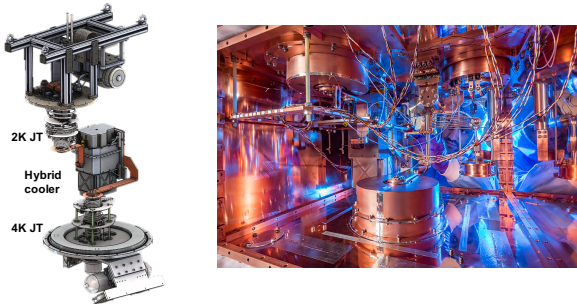


Fig 2. 左: 冷却系の心臓部。下から2段スターリング冷凍機(2ST)を予冷機とする4K JT冷凍機, 上から1K JT冷凍機がAir Liquid製のパルスチューブ冷凍機を予冷機として差し込まれている。中心にあるのがSPICA/SAFARI用に開発されたEMのHybrid Cooler。右: 実際に組み込んだ写真 (by CEA)



Fig 3. 左: Hybrid Cooler組み込み時の日仏共同作業。右: 完成後、Cryostat #3(X-IFU DM)試験用に作られた新しいクリーンルームに移設したCryostat#1。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。その後、CEAによる3He sorption+ADRにより50mKに冷却するHybrid Cooler (HybC)と結合させ、合計17回の冷却試験をおこなった。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りリサイクルができるかの実証を行なった。

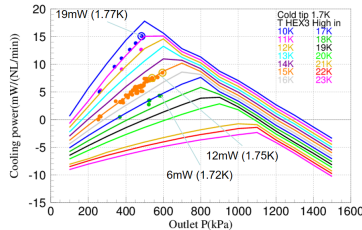


Fig 4. JTの冷却能力は、予冷段の温度と圧縮機による吐出圧に強く依存する。PT予冷機の冷却能力が高いため、JTの予冷段温度を定格の15Kより下げ、11Kで行なった時の冷却能力は、予想曲線上にのり、最大19mW@1.77Kに達した。(World record?)

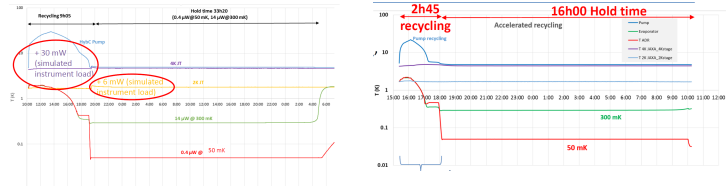


Fig 5. 実験したリサイクルパターン 左: 検出器からの熱流入も含めX-IFUの標準的なものを想定し33時間のホールド時間を得た。右: ToO等への対応の為素早く(~1/3)リサイクルするパターンを想定、JTは熱負荷の高い時間も一定の温度を維持できている。この他、SPICA/LiteBIRDを想定したパターンでも実証試験を行なった。

今後の予定など

Cryostat #1実験の結果を経て、日本のJT冷凍機がX-IFUの要求を満たすことが確認でき、X-IFUのベースラインプランとして、4KJTと2KJTを搭載することにした(当初は2KJTはRALがベースラインで日本がオプションだった)。この体制を前提に、AthenaではInstrument Consortium Consolidationが行われ、日本を含むX-IFU Consortiaが正式に採用された。2019年春のiPRRを経てPhase B studyへと向かう。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・電氣的のノイズも含めて評価される予定である。この実験は2020年春より開始される。また、今年度国内で行なった2ST圧縮機からボールベアリングを廃し、低擾乱化する試みも順調である。今後この方式を応用し、JT圧縮機の長寿命化に挑戦する。また、Cryostat#1実験に関して、実験結果以外のL&Lなども含めた実験報告書[7]を作成した。興味のある方はご覧ください。

References

- Barret D, et al, Proceedings of SPIE 10669 (2018) 99052F doi: 10.1117/12.2312409, arXiv:1807.06092 [astro-ph.IM]
- 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
- CC-CTP Cryostat #1 実験まとめ, JAXA技術資料 RZA-2018001

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.

