

# 重力波望遠鏡 KAGRA の低温システム開発状況

宇宙線研究所 東谷 千比呂  
tokoku@icrr.u-tokyo.ac.jp

## 概要

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA は、神岡地下に建設中の干渉計型重力波検出器である。神岡地下の低振動環境を利用するとともに、干渉計の要である鏡を 20 K まで冷やすことで熱雑音を低減して目標感度の達成を目指す。鏡 1 台につき大型クライオスタット 1 台および防振装置付き冷凍機ユニット 4 台を使用し、輻射と伝導で鏡を冷やす一方で伝導冷却路を伝ってくる冷凍機や地面からの振動を地盤振動以下に低減する。本発表では、2011 年度から 2012 年度にかけて行った、全 4 台のクライオスタットの製造および性能試験について紹介する。

## KAGRA低温システム

KAGRA 低温システムの設計目標は「大きな熱質量を非常に静かに冷やす」ことであり、具体的には鏡を 20 K に冷やすと同時に冷凍機から鏡までの間に振動を 1/100 以下に減らすことである。1 台のクライオスタットで 1 枚のサファイア単結晶の鏡（直径 220 mm、厚さ 150 mm、重さ 23 kg）を冷やすが、そのための冷却部の構造物だけで 1500 kg 以上になる。これらを冷やすのに冷凍機を 4 台使用する。クライオスタットの概要図を図 1 に示す。クライオスタットは、高さ 4.3 m、直径 2.6 m、重さ約 11 t で、2 重シールドの中に 1 枚の鏡を含む懸架系を吊るす構造になっている。シールドはベスベル®製の支持材により真空容器内壁から断熱支持されている。アウターシールドは 90 K 以下、インナーシールドは 10 K 以下に冷やされる。インナーシールドは主に輻射による鏡の初期冷却促進に寄与するほか、干渉計からの散乱光で生じる熱を吸収する。放射率を高めるため、インナーシールド内壁にはダイヤモンド・ライク・カーボン（DLC）加工した黒い板を取り付けている。クライオスタットにはバルブユニット分離型 2 段

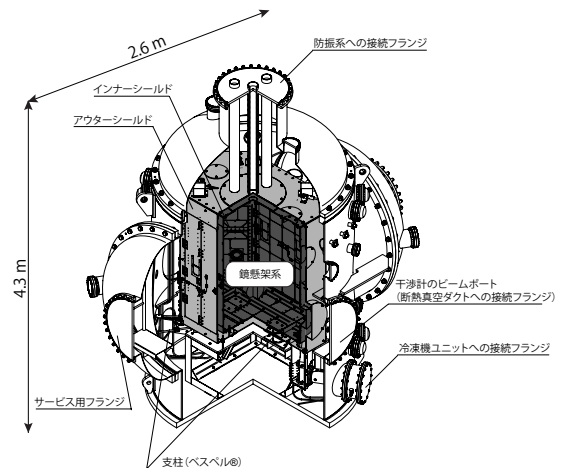


図 1. クライオスタット概要図

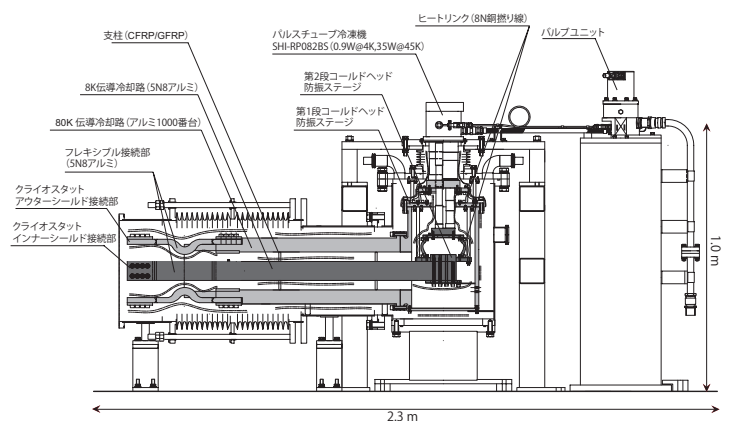


図 2. 冷凍機ユニット断面図

式パルスチューブ冷凍機を用いた防振装置付き冷凍機ユニット（図 2）が 4 台接続される。第 2 段コールドヘッドに接続された計 4 系統の伝導冷却路のうち 2 系統でインナーシールドを、熱的に独立した別の 2 系統で鏡を含む懸架系を冷やす。また第 1 段コールドヘッドに接続された計 4 系統の伝導冷却路でアウターシールドを冷やす。伝導冷却路

は、防振ステージや可とう部を含む高純度アルミニウム（純度 5N8=99.9998 %）のシート・棒・板および高純度銅（純度 7N~8N）の撚り線などで構成される。さらに冷凍機のバルブユニット、コールドヘッド、および伝導冷却路の 3 つは独立した支持機構により地面にアンカーされ、冷凍機で発生する振動が伝導冷却路へ極力伝わらないようにしている。運転温度におけるクライオスタット内の目標真空度は  $10^{-7}$  Pa であり、これを実現するため、クライオスタット内壁は洗浄性を高め不純物の付着を防ぐために電解複合研磨で仕上げている。また各部品表面から放出されるアウトガスを極力低く抑えるために、クライオスタット内で使用する材質やその取り扱いにも厳しく基準を設けている。

## 性能評価試験

柏キャンパスにおいて冷凍機単体の冷却性能試験および冷凍機ユニット単独での冷却・性能試験[1]を行った後、クライオスタットを製造した東芝京浜事業所（神奈川県横浜市）内の工場にてクライオスタット全 4 台について、全体を組み上げての冷却・振動性能評価試験を行った[2]。冷却性能試験では、クライオスタット内各所に設置した温度計により各所の最低到達温度を測定し、また干渉計からの散乱光等による熱負荷に相当する熱をインナーシールドや鏡への伝導冷却接続部へ与えて温度応答を調べた。また、運転温度におけるインナーシールドの振動測定試験や、インナーシールド内壁からの輻射による鏡の初期冷却効果実証実験も行った[3]。

## 試験結果

クライオスタットの初期冷却には 2 週間を要した。図 3 に各部の典型的な冷却曲線を示す。インナーシールドの温度降下は事前の熱設計シミュレーションによる予想とほぼ一致した。またヒータによる熱負荷試験で得られた温度応答曲線（図 4）は実際の運転時の熱流入量のキャリブレーションとして活用できる。

## まとめ

KAGRA クライオスタット 4 台について製造が完了し、冷却および振動性能試験が実施され、4 台ともおよそ設計値を満たすことが確認された。筆者は主に冷却・振動性能試験の実施および冷却性能評価を行った。一連の KAGRA 低温システムの開発は大学院生を含む 10 名ほどのメンバーが中心となって開発が続いている。現在（2013 年度）は、鏡を含む懸架系や断熱真空ダクトなどクライオスタット内外の低温関連機構の開発が進行中である。

## 参考文献

1. C. Tokoku et al. Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.232
2. C. Tokoku et al. Proceedings of CEC/ICMC 2013 (2013) in press
3. Y. Sakakibara et al. Proceedings of CEC/ICMC 2013 (2013) in press

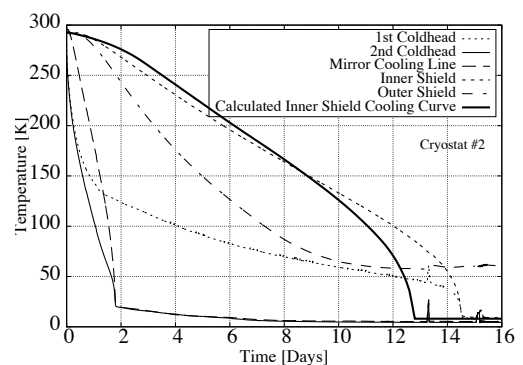


図 3. クライオスタット各部の典型的な冷却曲線

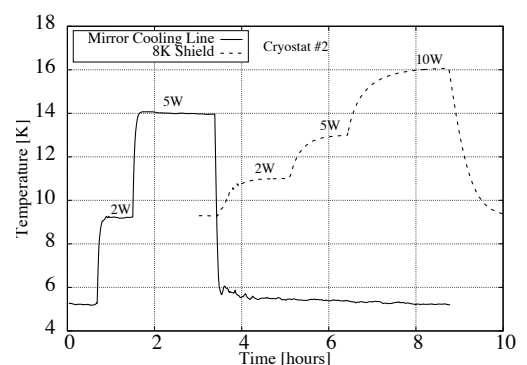


図 4. 熱負荷試験で得られた鏡へのヒートリンク接続部およびインナーシールドの典型的な温度応答曲線