

KAGRA の低温技術

1. はじめに

KAGRA は岐阜県飛騨市神岡町池ノ山の地下に建設された基線長 3 [km]のレーザー干渉計型重力波望遠鏡である。(Fig.1)

2010年にKAGRAが文部科学省により「最先端研究基盤事業」の大型低温重力波望遠鏡 (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) として選定され, 建設が開始された。現在, 東京大学宇宙線研究所 (ICRR), 高エネルギー加速器研究機構(KEK), 自然科学研究機構 国立天文台(NAOJ) が共同ホスト機関となって, 富山大学など国内外の研究機関と協力してその運用が進められている..

KAGRA に代表されるレーザー干渉計型重力波望遠鏡の性能限界を決定する原理的な雑音源の一つは, 干渉計の腕共振器を構成する鏡の熱雑音である。KAGRA では腕共振器の鏡を約 20 [K]まで冷却することで鏡の熱雑音を低減する手法を選択している。キロメートルスケールの干渉計型重力波検出器で鏡の低温化と地面振動が都市近郊の 1/100 程度の地下設置を取り入れた検出器は KAGRA だけである。^[1,2]

レーザー干渉計型重力波望遠鏡の鏡の低温化技術は, アメリカやヨーロッパで検討されている次世代重力波検出器 (第三代重力波検出器) にとって非常に重要な技術となっており, これら KAGRA 独自の技術への注目度が高まっている。

2. KAGRA 低温設備

2.1.概要

干渉計の腕共振器の鏡を冷却する目的は, 鏡内部の熱雑音を抑制し, 量子雑音レベルの計測を行うことである。大パワーレーザー光の照射を常に受け続ける腕共振器の鏡は, 鏡の基材と反射膜のわずかな光吸収が発熱源となって温度が上昇し, 熱雑音が増加する。

鏡の冷却に用いる冷熱源の振動は鏡の位置変化となって現れるため, 鏡の位置変化が無い無振動冷却が KAGRA で要請された。加えて, これら鏡は重力波の潮汐力に反応するために懸架されており, さらに $\sim 2 \times 10^{-7}$ [Pa]程度の超高真空中に置かれる。

このため, 低温鏡とその懸架装置を内包するクライオスタットと超低振動冷凍機ユニット



Fig.1 岐阜県飛騨市神岡町池ノ山地下に建設された大型低温重力波望遠鏡

© 東京大学宇宙線研究所

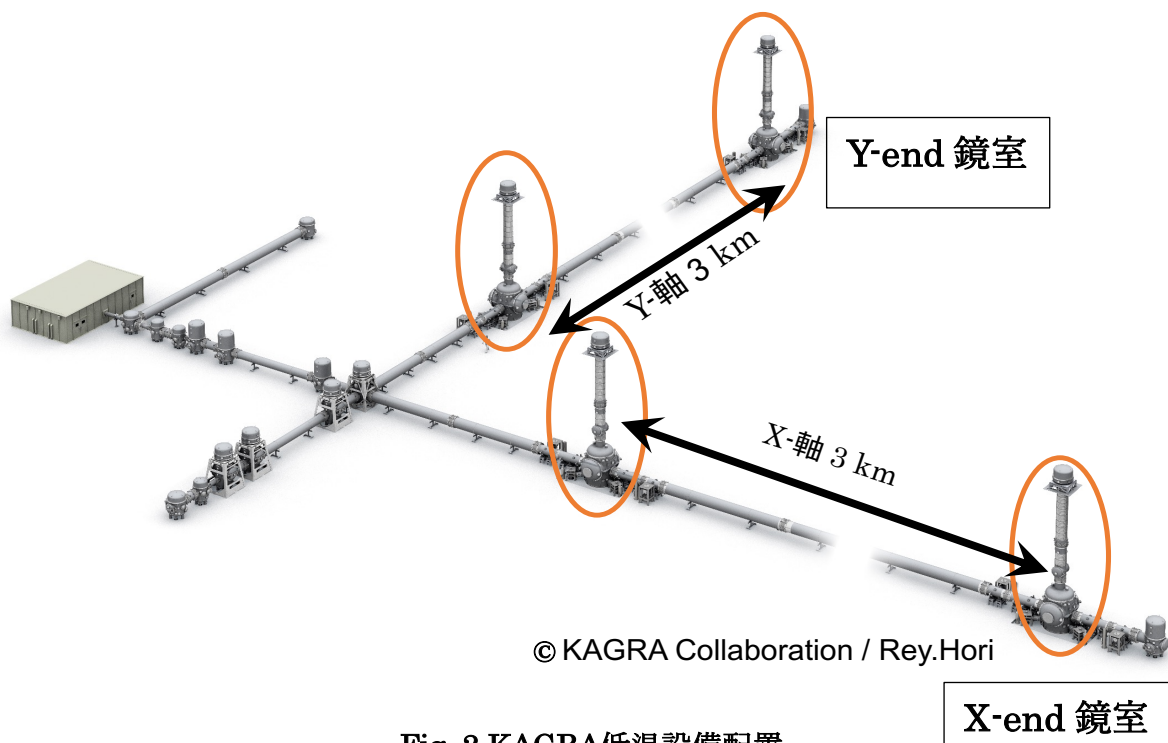


Fig. 2 KAGRA低温設備配置

で構成される超高真空対応の低温設備を製作し、干渉計の腕共振器の鏡を無振動で 20 K まで冷却することが計画された。

この計画に従って立案された KAGRA 低温設備の配置図を Fig. 2 に、構成模式図と低温説断面図を Fig. 3~4 に示す。KAGRA の低温設備はクライオスタット、冷熱源となる 4 台の超低振動冷凍機ユニットと 2 台の冷凍機付き多重バッフル付ダクト型輻射シールドから構成されている。(Fig. 3)

クライオスタットは、干渉計に必要なレーザー光を通すための常温域への開口面を持っている。(Fig. 4)

レーザー光を鏡に入射する真空ビームダクトの接続部はクライオスタットの主要な開口面である。この開口面からクライオスタット内部の低温部への輻射を抑制するため、100 K 付近まで冷却された多重バッフル付ダクト型輻射シールドが 3 km 長の真空ダクトとクライオスタットのビームダクト接続部の間に設置されている。

ビームダクトとの接続部以外にも低温鏡懸架装置を懸架する常温側の高性能防振装置との機械的結合部や鏡の位置モニターに使用するレーザー光入射窓などの常温開口面が設けられている。

KAGRA 低温設備では鏡やその付帯設備である鏡懸架系の冷却として高純度銅や高純度アルミなどの温度 10 K 付近で高熱伝導率を持つ冷却導体と小型のヘリウム冷凍機を利用した伝導冷却を採用している。伝導冷却は寒冷循環型冷却法など流体が流れる際に発生する圧力振動などに比べて振動抑制が容易になる。加えて、小型のヘリウム冷凍機を採用した結果、閉鎖空間であるトンネル内の冷媒ガスの保有量が軽減でき、トンネル内の酸欠防止として安全面からも貢献している。

本テキストでは、KAGRA 低温設備の主要な構成要素である低温鏡懸架装置、超低振動冷凍機ユニット、クライオスタットの設計手法とその性能について解説する。

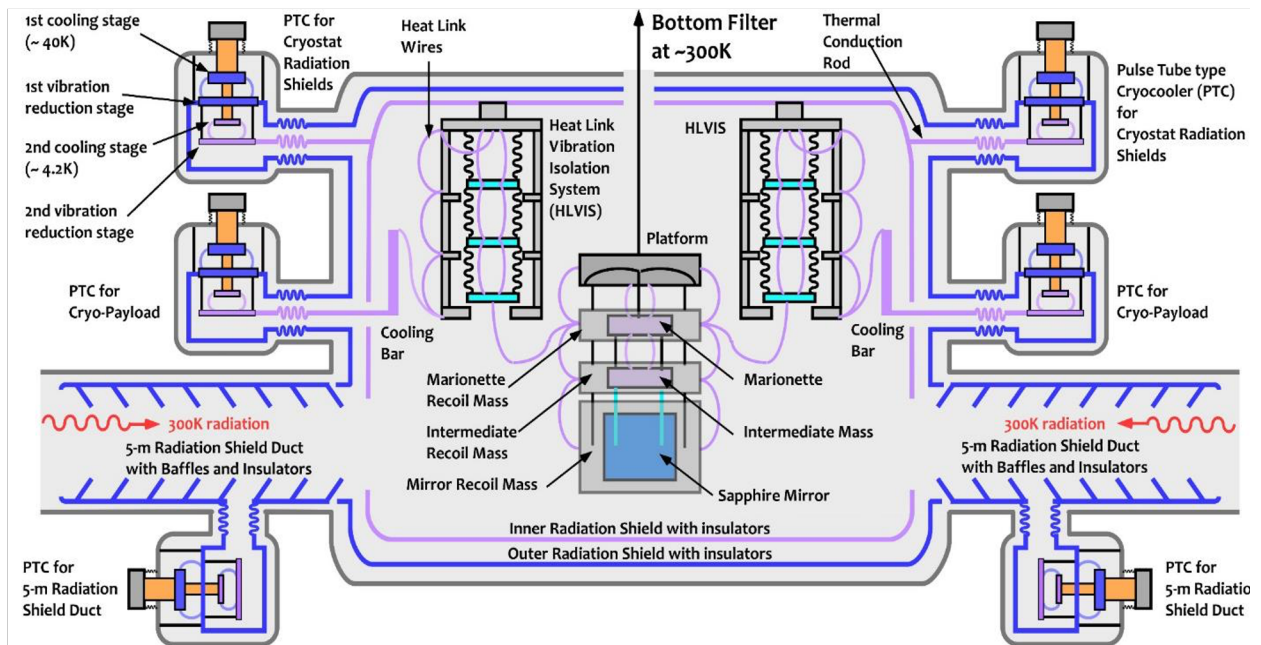


Fig. 3 KAGRA 低温設備の構成図 [3]

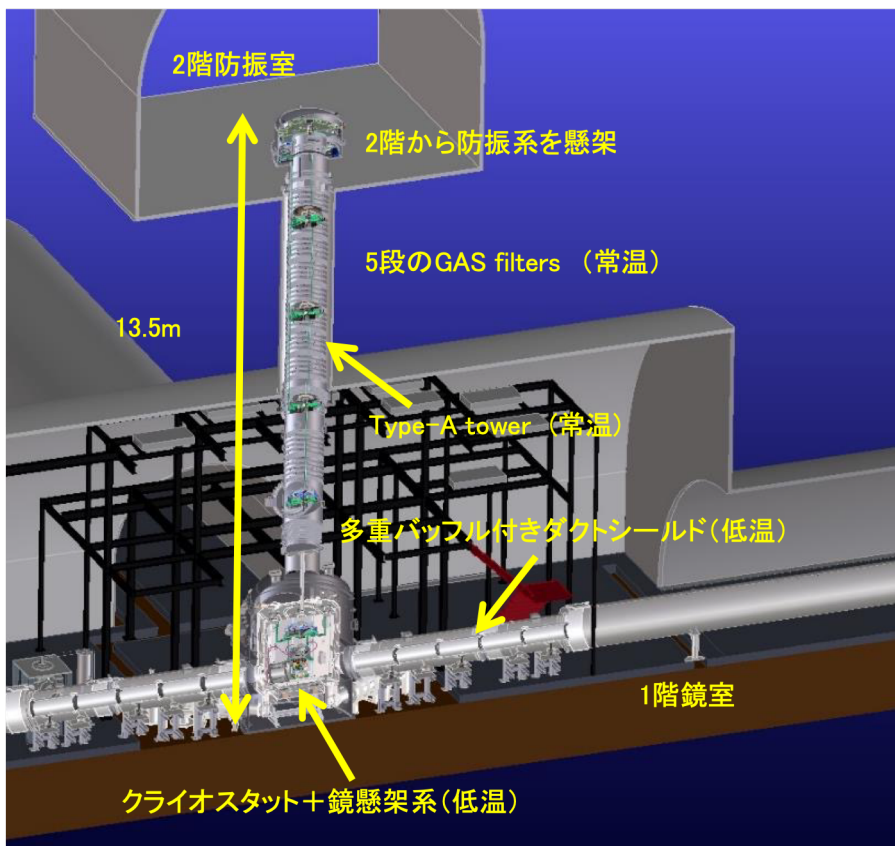


Fig. 4 KAGRA 低温設備断面図

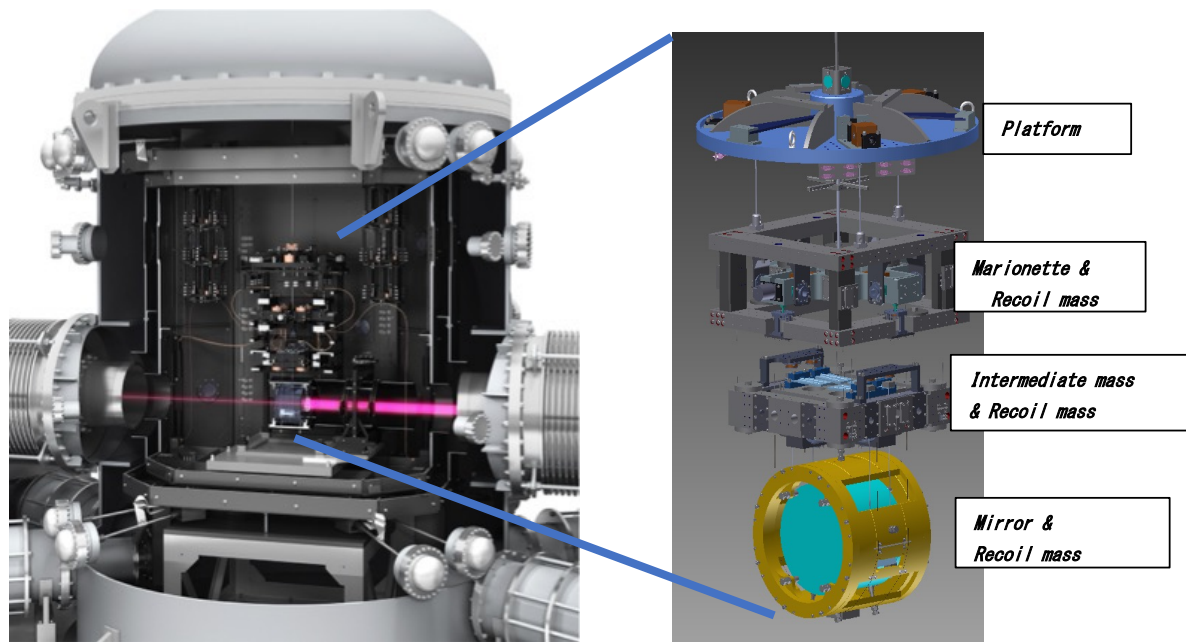


Fig. 5 クライオスタット内の低温鏡懸架装置 (イメージ図 © KAGRA Collaboration / Rey. Hori) と低温鏡懸架装置の構成

2.2. 低温鏡懸架装置

本項では、低温鏡懸架装置の構造を紹介する。^[4]

Fig. 5 はクライオスタット内の低温鏡懸架装置 (イメージ図) とその懸架装置の構成である。KAGRA では 4 段振り子構造の鏡懸架装置が採用されている。上から順番にプラットフォーム (Platform), マリオネット (Marionette), 中間マス (Intermediate Mass) が懸架され、その下が低温鏡 (Mirror) である。マリオネット, 中間マスおよび鏡にはその外側を覆うように反跳マス (Recoil mass) と呼ばれる質量が同様に懸架されている。この反跳マスは、鏡の位置制御に用いるコイル・マグネットアクチュエータのコイルの取り付けベースとして用いられる。鏡を冷却する熱リンク (Heat Link Wires) は鏡懸架チェーンを利用し、クライオスタット内の高純度アルミ製冷却導体の先端 (Cooling Bar) から縦防振装置 (HLVIS), マリオネット反跳マス, そこから各ステージ熱リンクを接続して伝導冷却のパスが形成されている。また、上部のプラットフォームにはベリリウム銅製の板バネを導入し、縦方向の防振も実

現している。(Fig. 3)

2.3. 超低振動冷凍機ユニット

本項では、KAGRA 低温設備の超低振動冷凍機ユニット (以下、冷凍機ユニット) の特徴である防振ステージと伝導冷却路に焦点を当てる。

2.3.1. 構造

冷凍機ユニットは、動作時に発生する振動が実用上無振動と見なせる池ノ山地下の地面振動レベル以下に低減することが求められている。この要求を満たすため、冷凍機ユニットは冷凍機 (冷凍能力 約 1 W @ 4 K) と防振ステージ並びに伝導冷却路を組み合わせた構造を持っている。この構造は、高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センターが KAGRA のプロトタイプとして建設された基線長 100 [m] の CLIO 向け超低振動冷凍機開発で得た知見から設計されている。^[5,6]

冷凍機ユニットの振動特性と冷凍能力は 2.4 のクライオスタットの設計から得た知見を基に次のように決定した。

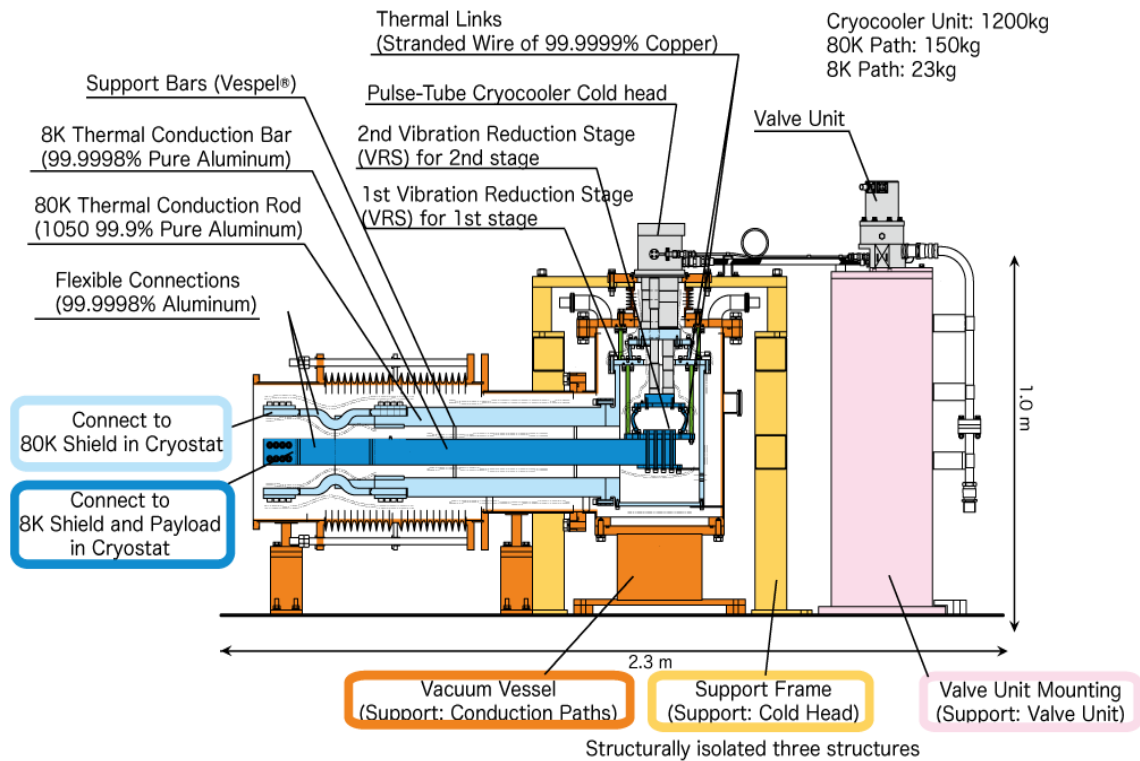


Fig. 6 冷凍機ユニット構造図 [7]

(1) 振動特性

- ・ 8 K 伝導冷却路 最大振幅±100 [nm]以下
- ・ 80 K 伝導冷却路 最大振幅±100 [nm]以下

(2) 冷凍能力

- ・ 8 K 伝導冷却路接続端温度 9 K で 2.5 [W]
- ・ 80 K 伝導冷却路接続端温度 70 [K] で 35 [W]

冷凍機ユニットの構造設計の要は、地面に強く固定された防振ステージを用意し、それと冷凍機の間を柔らかくて熱伝導率が高い素材で結ぶと云う点である。これに従って設計・製作した冷凍機ユニットの構造図を Fig.6 に示す。 [7]

冷凍機ユニットの冷熱源は CLIO 向け超低振動冷凍機と同様にバルブユニット分離式の 2 段階パルス管冷凍機（住友重機械工業社製 RP-082B2S, 1st stage 35 [W] @45 [K], 2nd stage 0.9 [W] @4.2 [K]) を選定し、冷凍機ユニットに使用するパルス管冷凍機 16 台全数について冷凍機冷凍能力を測定している。その測定結果の一部を Fig.7 に示す。 [7]

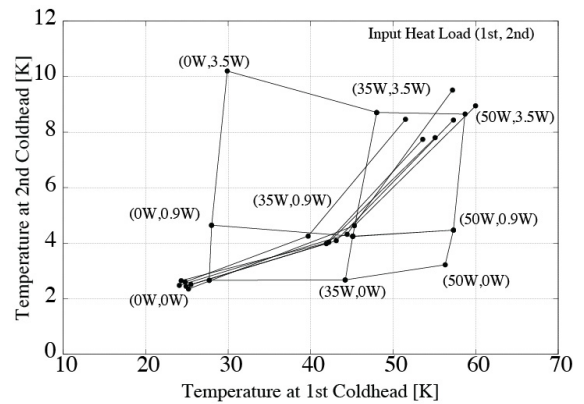


Fig. 7 冷凍機単体の冷凍能力 [7]

冷凍機の防振ステージ(Vibration Reduction Stage)から延伸する伝導冷却路の金属材料について述べる。

冷凍機の 2nd 防振ステージに接続され、鏡またはクライオスタットの内層輻射シールドを冷却する 8 K 伝導冷却路(8 K Thermal Conduction Bar)は幅 50 [mm], 高さ 75 [mm] の 5N8 超高純度アルミ角材（純度 99.9998%）を使用している。 [8] この理由は、超

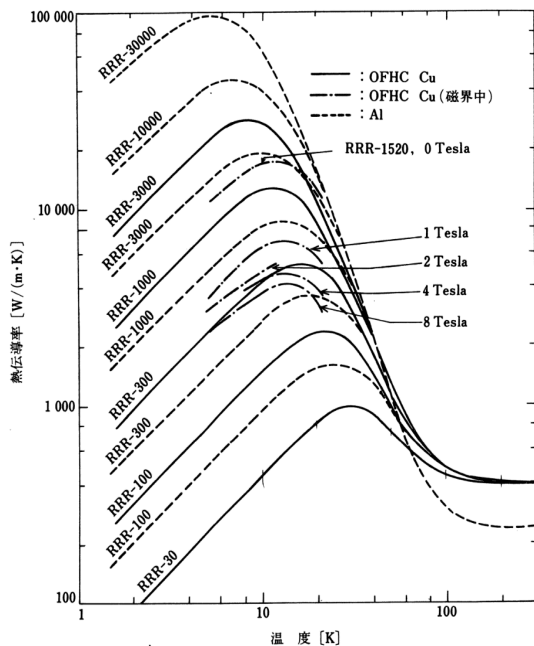


Fig. 8 無酸素銅及び純アルミの熱伝導率^[9]
 図中の RRR は金属の残留抵抗比

高純度金属材料が持つ高い熱伝導率（6N アルミ材で 40,000 [W/(m·K)] @ 6 [K], 5N アルミ材で 20,000 W/(m·K) @ 10 K）により冷却対象と冷凍機間の熱輸送から生じる温度差を最小にするためである。(Fig.8)加えて、その副次的効果として超高純度金属材料が持つヤング率（6N アルミ材で 40 [GPa]）の振動抑制効果を狙っている。

1st 防振ステージに接続されてクライオスタットの外層輻射シールドを冷却する 80 K 伝導冷却路(80 K Thermal Conduction Rod)は A1070 純アルミ材を採用している。

これは、Fig. 8 に示されるようにアルミの熱伝導率が温度 300 K から 60 K 付近まで純度に寄らないためである。^[9]

この他、冷凍機ユニットの設計過程で 3 つの設計上の課題が判明した。

(1) CLIO 向け超低振動冷凍機の開発から時間が経過し、防振ステージの熱リンクに使用していた高純度 5N アルミ製撚り線の技術継承が行われなかった。このため、代替え

となる撚り線の検討と調達が必要。

(2) 防振ステージの支持ロッドに使用していたアルミナ繊維強化プラスチック (ALFRP) 製造の事業継承がなかった。このため、代替えとなる素材の検討と調達が必要。

(3) CLIO 向け超低振動冷凍機では冷凍機ユニットとクライオスタットを連結する伝導冷却路の防振支持構造が含まれていなかったため、新規設計が必要。

2.3.2. 防振ステージと伝導冷却路の設計検討

冷凍機ユニットの防振ステージの設計検討は、CLIO 向け超低振動冷凍機で確立された設計概念を踏襲している。^[5,6]

防振ステージ設計の要点は、熱リンクのバネ定数を小さくする、支持ロッドのバネ定数を大きくする、冷凍機取付フランジの振動を小さくする (=地面振動) の 3 項目である。

この要点の内、新たな設計課題となった熱リンクと支持ロッドの 2 項目について述べる。

2.3.2.1. 熱リンク用撚り線の検討

防振ステージに組み込む熱リンク用撚り線の構造と使用する素線の検討を行った。

式(2-1)は、片持ち梁のたわみの式から導出したバネ定数の計算式である。^[8]

$$k = K \frac{E}{L^3} I = K \frac{E}{L^3} \frac{\pi D^4}{64} \quad (2-1)$$

ここで、 k はバネ定数(N/m)、 K は形状係数、 E はヤング率[GPa]、 L はバネの長さ[m]、 D は撚り線の素線径[m]である。

冷凍機ユニットの設計開始時点で熱リンクに使用可能な高純度金属製素線は、7N 超高純度銅（純度 99.99999 %）のみであった。^[10]

一方、7N 銅と 5N アルミのヤング率が 117 [GPa]と 69 [GPa]であり、CLIO の 5N アルミ製撚り線（素線径 0.15 [mm]）のバネ定数以下とするため、7N 超高純度銅の素線径を約半分の 0.08 [mm]とした。

Table 1 熱リンクの断面席と導体構成

断面積 [mm ²]	構成 [本/本/本/mm]
15	19/7/22/0.08

Table 1 に冷凍機ユニットの熱リンクの導体構成と撚り線の断面積を示す。冷凍機の冷却段と防振ステージを接続する熱リンクの構造は、Fig.9の複合ロープ撚り線構造である。

複合ロープ撚り線は、1次撚り(0.08 [mm]を22本)、2次撚り(1次撚り線を7[本])、本撚り(2次撚り線を19[本])を撚り合わせた構造である。また、撚り合わせもS撚りとZ撚りが組み合わされている。この撚り線構造も、CLIO 向け超低振動冷凍機開発から得た知見に基づいている。^[11]

熱リンクはその両端にボルト固定用の端末(7N 材のブロック)を取り付けた後、加工歪み除去と脱ガスを兼ねて真空中で温度 500 [°C] 3時間の焼鈍処理を実施している。Fig.10に熱処理前と熱処理後の熱リンク端末の断面組織写真を示す。熱処理前後の写真から、熱処理温度が高くなるほど、熱リンク素線の結晶粒が大きくなっていることが理解できる。

熱処理前後の熱リンク素線の熱伝導率の測定結果を Fig.11 に示す。熱処理により、熱伝導率が改善されていることが確認できる。

7N 材のバルクと見なされる形状では 500 [°C]以上の熱処理で熱伝導率がさらなる上昇が見込まれることが示唆されている。^[11]

一方、本熱リンク素線の測定では異なる熱処理温度による熱伝導率に顕著な差が示されなかった。これは、熱リンク素線の直径が 0.08 [mm]と細く、極低温領域での電子の平均自由行程(RRR 10000 のサンプルで 0.4 [mm])に対して小さいためと考察している。^[10]

2.3.2.2. 防振ステージ支持ロッドの検討

アルミナ繊維強化プラスチック(ALFRP)に代わる素材としてヤング率 117 [GPa]のカーボン繊維強化プラスチック(CFRP)を防振ステー

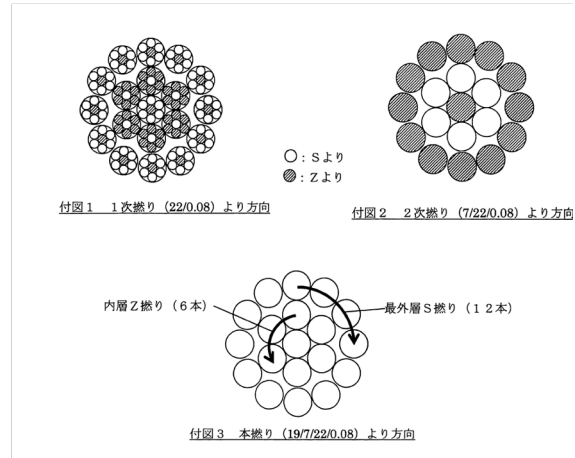


Fig. 9 複合ロープ撚り線の断面構造

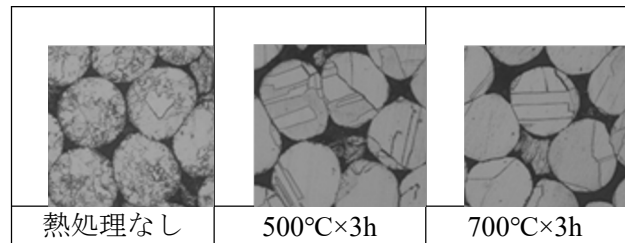


Fig. 10 熱リンク圧着部のφ0.08 [mm]-7N銅素線の断面組織

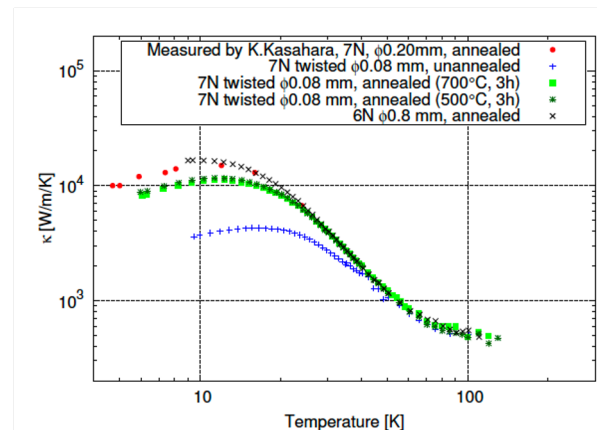


Fig. 11 φ0.08 [mm]-7N銅素線の熱伝導測定結果^[11]

Table 2 防振ステージのバネ定数と変位量の計算値結果

項目		寸法	単位		
バネ定数	CFRP 5本	1 st 防振ステージ	φ14x180Lx2.0t [mm]	4.57 x 10 ⁵	N/m
		2 nd 防振ステージ	φ14x75Lx1.5t [mm]	4.85 x 10 ⁶	N/m
	ヒートリンク 96本	1 st 防振ステージ	L=225 [mm]	6.02 x 10 ¹	N/m
		2 nd 防振ステージ	L=113 [mm]	4.82 x 10 ²	N/m
変位量	クライオスタットフランジ (=地面振動)			0	m
	1 st コールドステージ			2.0 x 10 ⁻⁵	m
	1 st 防振ステージ			2.64 x 10 ⁻⁹	m
	2 nd コールドステージ			2.0 x 10 ⁻⁵	m
	2 nd 防振ステージ			4.82 x 10 ⁻⁹	m

ジの支持ロッドとして選定した。

(ALFRP のヤング率は 100 [GPa])

式(2-2)は、参考文献[5]の式(4-8)から引用した防振ステージの式である。

$$Z_2 = Z_1 + \frac{k_h}{k_r} Z_3 \quad (2-2)$$

ここで、 Z_2 は防振ステージの変位量[m]、 k_r は防振ステージ支持ロッドのバネ定数[N/m]、 k_h は熱リンクのバネ定数[N/m]、 Z_3 は防振ステージの変位量[m]、 Z_1 は防振ステージの取付部の変位量[m]である。

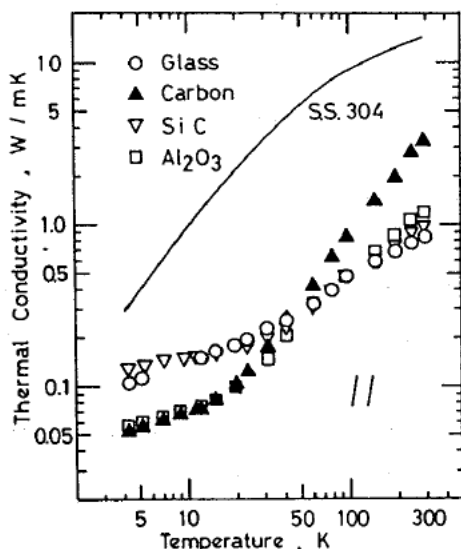


Fig. 12 各種 FRP 材料の熱伝導率の温度依存性^[12]

Table 3 支持ロッド 5本の熱負荷 (計算)

部位	熱負荷
1 st 防振ステージ	0.6 W
2 nd 防振ステージ	0.02 W

防振ステージのバネ定数と変位量の計算結果を Table 2 に示す。計算ではクライオスタットフランジの振動を地面振動 0 [m]とした。支持ロッドの形状と使用本数をパラメータとした計算の結果から、2nd防振ステージの振動が、防振比 1:4300 で 4.8×10^{-9} [m]まで減衰することが示唆された。

Fig.12 に示すように CFRP の熱伝導率は ALFRP のそれに比べて 50 [K]付近より上で大きく、50 [K]付近以下で小さい。^[12]

1st防振ステージの CFRP 製支持ロッドの個体熱伝導分の増加による熱負荷を減らすため、ALFRP を使用した場合と同程度の熱負荷となるよう CFRP パイプの肉厚を選定している。

冷凍機ユニット防振ステージ支持ロッドの熱負荷の計算結果を参考として Table 3 に示す。

2.3.2.3. 8 K 伝導冷却路の設計

Fig. 13 に KAGRA 冷凍機ユニット用として新規設計した 8K 伝導冷却路の形状を示す。8 K 伝導冷却路は、幅 50 [mm]、高さ 75 [mm]、長さ 947 [mm]の直線部と幅 75 [mm]、厚さ

率の 1/4 程度まで減ずると予測された。このため、冷凍機ユニット並びにクライオスタット内の 8 K 伝導冷却路は、伝導冷却導体の実効的な熱伝導率を 5000 [W/(m・K)]として熱設計している。この実効的な熱伝導率の妥当性については 3.2 の伝導冷却路の評価の項で述べる。

本冷却路についても加工歪み除去と脱ガスを兼ねて真空中で温度 500 [°C] 3 時間の焼鈍処理を実施している。

2.3.3. 冷凍機ユニットの振動特性と冷凍能力

冷凍機ユニットの振動測定は、冷凍機ユニットの伝導冷却路接続部先端に装着された真空断熱容器の可視化窓からレーザ距離計のレーザ光を入射し、8 [K]伝導冷却路先端部に取付た反射用ミラーの反射により軸方向・垂直・水平の 3 軸方向を直接且つ同時に測定している。(Fig. 15 及び Fig. 16)

実機 1 号機の性能試験の結果、8 [K]伝導冷却路先端部に生じている振動が仕様値 (<100 [nm]) より大きいことが確認された。

この対策として加速度センサーを使用したハンマリング試験を実施し、冷凍機内の伝導冷却路の支持構造材が振動伝搬の主要な経路となっていることが判明した。支持構造材の種類・形状や支持方法の改良を続けた結果、伝導冷却路の冷凍機側端部に仮付けされている輸送用固定治具が軸方向の制振に効果的であることが示された。[13]

この輸送用固定治具の素材を CFRP に変更し、伝導冷却路の軸方向の支持機構とすることで接続部先端部の振動の要求仕様値を達成している。8K 伝導冷却接続端で測定した冷凍機ユニットの振動波形を Fig.17 に示す。[7]

冷凍能力の測定は、振動測定後に冷凍機ユニットを常温まで加温し、振動測定用可視化窓の閉止並びに輻射シールド及び SI を装着した後、反射用ミラー近傍に取り付けられた加熱ヒータを使用して熱負荷を加えている。

Fig.18 に冷凍機ユニットの冷凍能力測定結果を示す。図の縦軸は 8 K 伝導冷却路の先端温

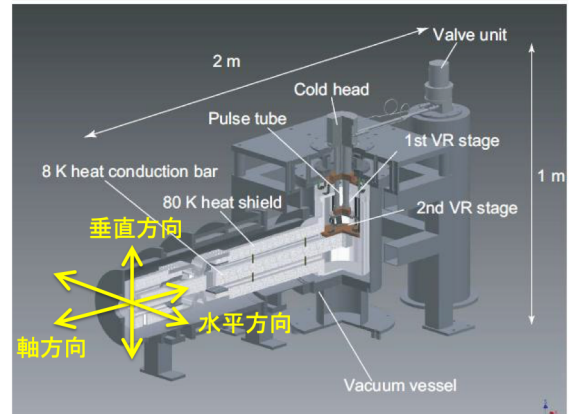


Fig. 15 8 K 伝導冷却路先端部の振動測定

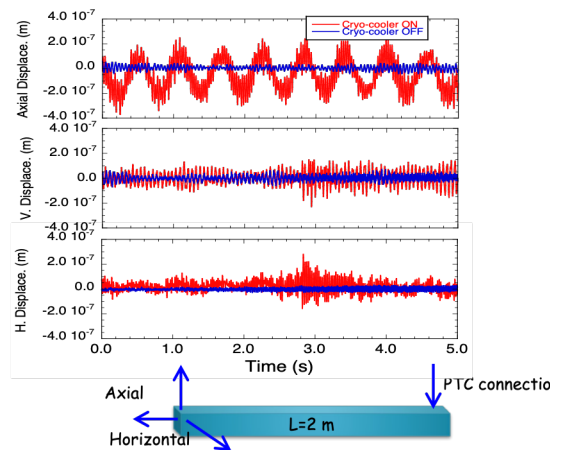


Fig. 16 8 K 伝導冷却路先端部の振動測定結果

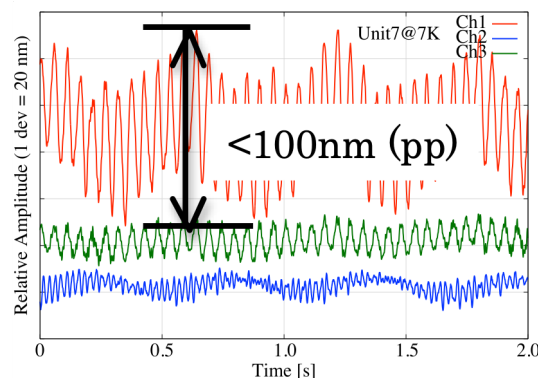


Fig. 17 冷凍機ユニット振動波形の測定^[7]
上から軸方向(Ch1)、垂直方向(Ch2)、
水平方向(Ch3)

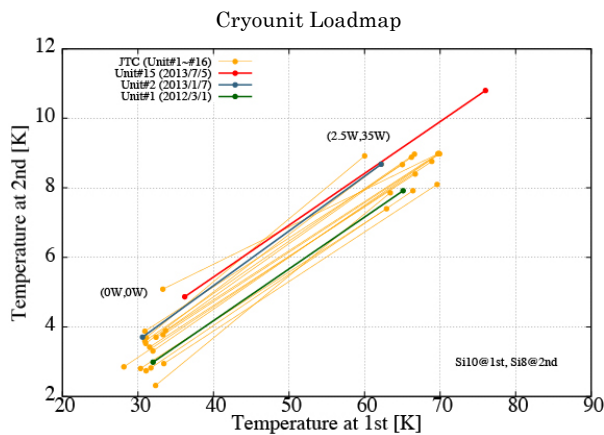


Fig. 18 冷凍機ユニットの冷凍能力^[7]

度,横軸は 80 K 伝導冷却路の先端温度である。また,図中の () 書きの数値は,それぞれの伝導冷却路先端に加えられた熱負荷である。

製作された 16 台冷凍機ユニットについて振動特性と冷凍能力の全数測定を実施し,全ての冷凍機ユニットについて要求仕様が満たしたことを確認している。

冷凍能力測定結果は,次項のクライオスタットの熱負荷測定の校正データとして利用している。

2.3.4. その他

この他,クライオスタットの超高真空対応として,冷凍機ユニット真空容器の真空界面である内表面を複合電解研磨している。また,冷凍機ユニットの多層断熱に使用する Super Insulation (SI:超断熱膜)は 2.4.3 で紹介する高真空対応向けに改良した製品を使用している。この SI を 80 K 伝導冷却路の外表面に 50 層,8 K 伝導冷却路の外表面に 20 層施工している。

冷凍機ユニットの組立は全てクリーンルーム内で行った。これら真空に関連する部材への要求は, KAGRA 真空設備の仕様を踏襲している。^[20]

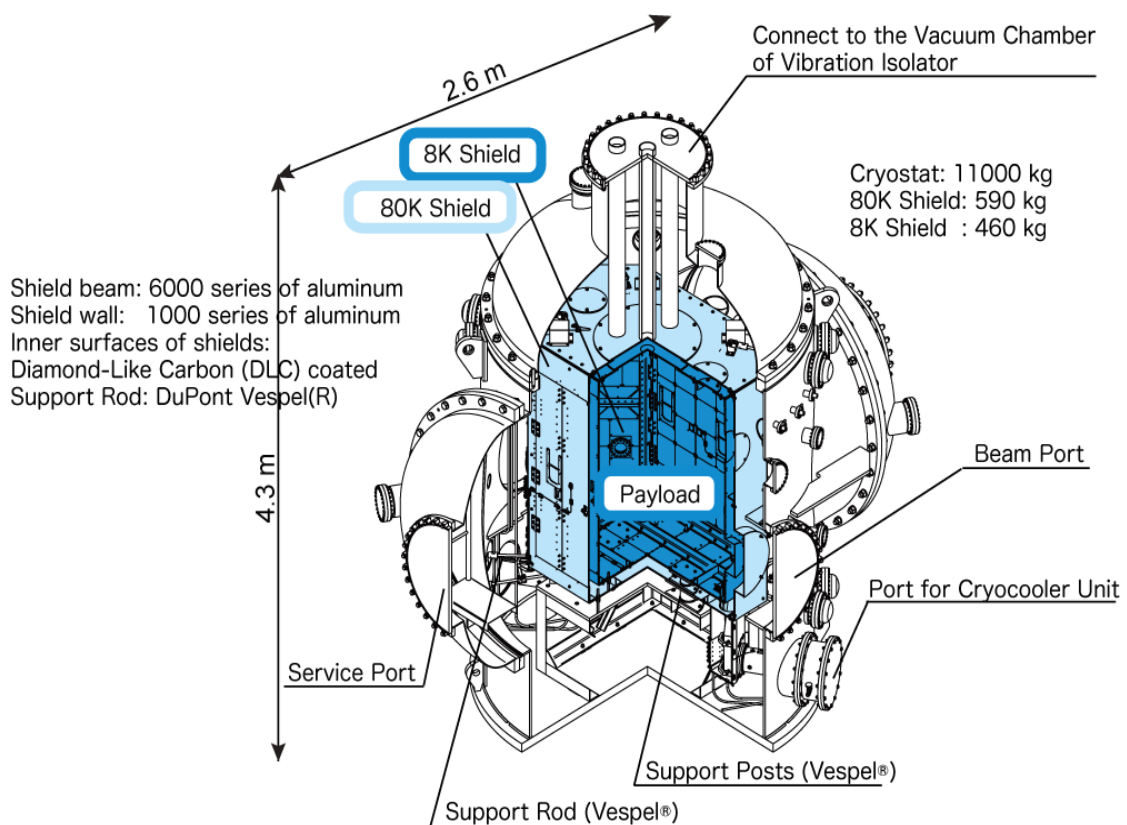


Fig. 19 クライオスタット外形図^[7]

2.4. クライオスタット

2.4.1. 構造

低温鏡懸架装置を内包するクライオスタットは 3km 長のトンネル内輸送とトンネル内設置場所での再組立という条件から設計・製作を行っている。

クライオスタットの立案段階で策定された要求仕様を次に示す。

- (1) 小型冷凍機を使用した伝導冷却
- (2) 鏡冷却の熱リンク接続部温度が 8 K 以下
- (3) 低温鏡懸架装置組込作業を行うための作業空間をクライオスタット内に確保する
- (4) 観測時のクライオスタット内圧力を 10^{-7} [Pa]程度の圧力を保持可能な超高真空対応であること
- (5) クライオスタットの製造場所からトンネル内設置箇所への輸送を考慮した設計であること

設計・製作したクライオスタットの外形図を Fig.19 に示す。^[7]

クライオスタットは高さ 4.3 [m]、直径 2.6[m]の大きさを持ち、組立時の総重量は約 11, 000 [kg]である。クライオスタット内には室温の真空容器内表面から内層側シールドへの熱侵入を防ぐ断熱構造として 2 層構造のそれぞれの温度の輻射シールドが設置されている。

低温鏡懸架装置は、2 層構造の内層輻射シールドで囲われた空間中に設置される。

懸架装置が組み込まれる内層輻射シールドの大きさは幅 1.6 [m]、奥行き 1.02 [m]、高さ 1.7 [m]である。また、低温鏡懸架装置の組み込み作業用として幅 1.6 [m]、奥行き 0.89 [m]、高さ 1.48 [m]の観音扉構造の開放面が設けられている。

外層輻射シールドの大きさは幅 1.81 [m]、奥行き 1.22 [m]、高さ 1.92 [m]で、幅 1.09 [m]、高さ 1.55 [m]の観音扉構造の開放面が設けられている。

2 層構造の輻射シールドはそれ自身の剛性と冷却時の熱伝導性を確保するため、A6063 アルミ製のフレームに厚さ 10 [mm]の A1070 純ア

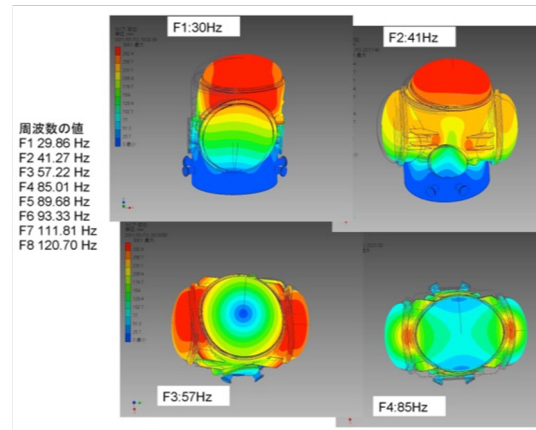


Fig. 20 真空容器の固有値解析の結果^[15]

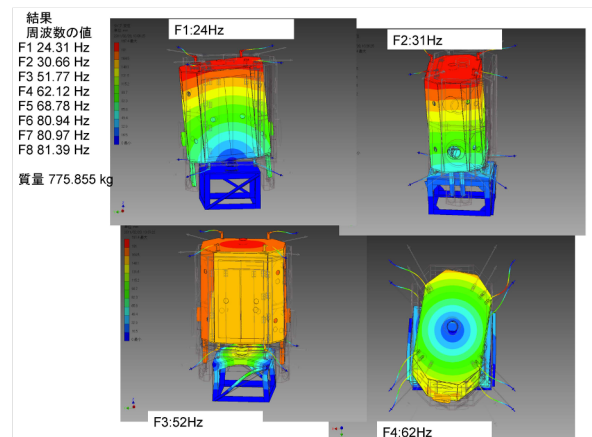


Fig. 21 内層輻射シールドの固有値解析の結果^[15]

ルミ板を組み合わせた構造で、その質量は内層側が約 460 [kg]、外層側が約 590 [kg]である。

2 層構造の輻射シールドは 2.3 の超低振動冷凍機ユニットを接続して伝導冷却で冷却される。それぞれの冷却温度はクライオスタット設計時に内層側が約 10 [K]、外層側が温度 80 [K]と見積もられた。

クライオスタットの設計では固有値解析（モーダル解析）を実施し、その構造保持法も含めた設計を実施している。

真空容器と 2 層輻射シールドの固有値解析の結果例を Fig.20 及び Fig.21 に示す。^[15]

前述の固有値解析の他にも神岡鉱山地下トン

ネルで実測された地面振動データを使用して真空容器の地面振動に対する応答解析も実施している。

2.4.2. 伝導冷却路と鏡の冷却法

クライオスタット内には低温鏡懸架装置（以下、鏡）と輻射シールドを冷却する 2 系統の伝導冷却路が組み込まれている。

それぞれの伝導冷却路には冷凍機ユニットが 2 台ずつ、計 4 台の冷凍機ユニットが接続されている。伝導冷却路を 2 層化した理由は、冷凍機の並列化による冷凍能力の増加と冷凍機故障の際の冗長性向上を図ったためである。

鏡と内層側輻射シールドの伝導冷却路の部材は、2.3 の超低振動冷凍機ユニットと同じくその冷却温度に応じて 5N8 超高純度アルミ材（純度 99.9998 [%]）と A1070 純アルミ材を選定・使用している。

クライオスタットの鏡用伝導冷却路先端から鏡まで 5N8 超高純度アルミ製撚り線（Fig. 3 の Heat Link Wires）が縦防振装置（Fig. 3 の HLVIS）を経由して接続されている。この撚り線は直径 0.15 [mm] の細線 49 本を撚り合わせており、撚り線のバネ構造による振動抑制効果を利用するためである。^[15]

一方、常温から 100 [K] 付近の温度域ではアルミの熱伝導率は純度に寄らず 200 [W/(m・K)] 程度とほぼ一定のため、常温から 100 [K] 付近の温度域では伝熱面積の小さい撚り線部分の熱抵抗が相対的に大きくなり、結果として重力波観測に要求される鏡の温度 20 [K] に到達する冷却時間が長くなる。

この鏡の冷却時間を短縮するため、KAGRA クライオスタットでは、鏡の常温から 100 [K] 付近まで鏡から内層側輻射シールド内面への放射伝熱を利用した冷却法を採用した。

これは式(2-3)の Stefan-Boltzmann 方程式で記述される放射伝熱量である。

$$q_{rad} = \sigma \epsilon A T^4 \quad (2-3)$$

ここで、 σ は Stefan-Boltzmann 定数 5.67×10^{-8}

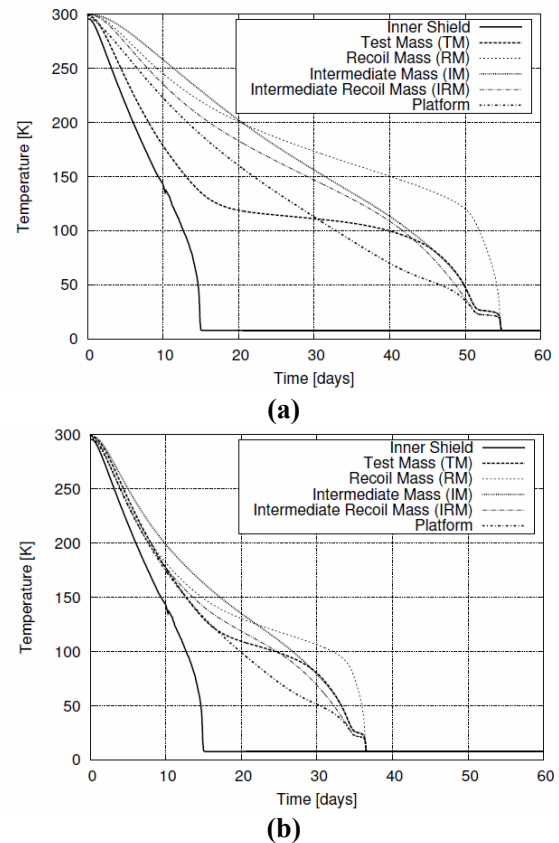


Fig. 22 初期冷却時間のシミュレーション結果^[17]

[W/m²K⁴], ϵ は放射率, A は表面積, T は温度である。

式(2-3)から放射伝熱量は放射率 ϵ の値に依存する。この放射率 ϵ を 1 に近づけるため、内層側輻射シールドと鏡の懸架装置の表面に黒化処理が施工されている。^[16]

KAGRA 低温設備で採用した黒化処理は内層輻射シールド内表面がダイヤモンド・ライク・カーボン(DLC), 鏡の懸架装置の表面は濃黒色無電解鍍金（商品名：ソルブラック）である。

Fig.22 に初期冷却時間のシミュレーション結果を示す。^[17] (a)は黒化処理施工無しの冷却時間の計算結果, (b)は黒化処理を施工した場合の冷却時間の計算結果である。

このシミュレーションから約 150 [K] 以上では、鏡は放射伝熱により冷却, 150 [K] 以下では、熱伝導による冷却が支配的であることが示

された。この放射伝熱と伝導冷却を組み合わせた複合冷却法により、鏡の初期冷却時間が伝導冷却路だけの場合に比べて約 1/2 に短縮されると見積もられた。^[17]

2.4.3. 多層断熱

低温設備ではクライオスタットの真空断熱容器内の放射抑制のために Super Insulation (超断熱膜) を使用した多層断熱構造を持つ。Super Insulation (以下, SI) は、基材であるポリエステル系薄膜フィルムの両表面にアルミを蒸着した素材が一般的である。KAGRA 低温設備では、この SI を外層側放射シールドの外表面に 50 層、内層側放射シールドの外表面に 20 層施工している。その真空脱ガス面積はクライオスタット真空容器内表面や放射シールドの表面のそれよりも桁違いの大きくなっている。クライオスタット内の圧力を $\sim 10^{-7}$ Pa 程度に保持すると云う超高真空対応の要求から、この SI 表面の脱ガス特性が検討された。

実験から SI の脱ガス特性を支配する水分吸着量は SI 表面に蒸着されたアルミよりも SI の基材であるポリエステル系薄膜フィルムの厚さに依存していることが判明した。^[18,19]

この結果を基に、SI に用いる薄膜フィルムのフィルム厚さを 25 [μm] から 5 [μm] に変更することで SI 表面からの脱ガス特性を改善し、100 時間程度の初期排気を行えば電界研磨したステンレス板と同程度の桁まで気体放出速度を減少させられることできた。

さらに SI を積層する際に用いられる層間セパレーターについてもポリエステル製ネットからアルミ蒸着された薄膜フィルムの片面に不織布を融着する事でフィルムの薄膜化による強度補償と使用する有機材料の総量を減少させている。

SI の熱伝達特性は式(2-4)で表される。

$$q_t = q_r + q_c \quad (2-4)$$

ここで q_r は SI の放射熱伝達成分、 q_c は SI の接触熱伝達成分である。

接触熱伝達成分 q_c は SI の質量並びに施工時の SI への圧迫によって変化する。

有機材料の総量の減少は同式から q_c の改善効果があることが示唆される。

この他、クライオスタットの超高真空対応として、真空容器の真空接面である内表面を複合電解研磨している。また、放射シールドや伝導冷却路に使用している金属材料についても脱ガスを兼ねた焼鈍処理(真空中 500°C 3 時間)と表面研磨を行っている。これら真空に関連する部材への要求は、KAGRA 真空設備の仕様を踏襲している。^[20]

2.4.4. クライオスタットの熱負荷

クライオスタットの設計から推定された熱負荷 (Estimated Heat Load) を Table 4 に示す。^[7] 表には 3.1 で述べる実熱負荷 (Measured Heat Load) と合わせて示す。実熱負荷測定では個々の熱負荷要素を分離測定できないため、熱負荷を纏めた数値で示されていることに注意されたい。^[7] また、表では冷凍機ユニット 1 台当たりの熱負荷 [W/Unit] も参考として記載している。

表から、クライオスタットの設計熱負荷は、内層側放射シールドが温度 10 K で 5.0 [W] と予測された。その内訳は、光学窓 0.4 [W]、外層側放射シールドからの放射 2.2 [W]、支持構造材 2.4 [W] と推定された。

外層側放射シールドの熱負荷は温度 80 [K] で 116 [W]、その内訳は光学窓 22 [W]、真空容器内表面からの放射 70 [W]、支持構造材 24 [W] と推定された。

Table 4 クライオスタット熱負荷 ^[7]

		Components	Estimate d Heat Load [W]	Measured Heat Load [W]
1st Cold Stage	80 K Shield		116	125
	(Load per Cryocooler		29 W/Unit	31 W/Unit)
(breakdown)				
	- Eleven (11) View Ports		22 *	-
	- Radiation from 300 K		70	-
	- Support Posts/Rods		24	-
	- Electrical Wires		3×10^{-4}	-
2nd Cold Stage	8 K Shield	5	< 2.0	
(Load per Cryocooler		2.5 W/Unit	< 1.0 W/Unit)	
(breakdown)				
	- Duct Shields		< 0.05 *	-
	- Eleven (11) View Ports		0.4 *	-
	- Radiation from 80 K		2.2	-
	- Support Posts/Rods		2.4	-
	- Electrical Wires		3×10^{-4}	-
	- Scattering Light		Several watts *	-
	Payload		1 *	
(Load per Cryocooler		0.5 W/Unit		0.4 W/Unit)
	- Mirror Deposition		1 *	-

3. 低温設備の組立と総合試験

3.1. 工場内試験

2011年4月からクライオスタットと冷凍機ユニット設計が開始され、2013年3月までに4台のクライオスタットと16台の冷凍機ユニットが完成した。

クライオスタットの製造と平行してクライオスタットと冷凍機ユニットを組み合わせた総合試験が2013年1月からクライオスタットの製造者である(株)東芝の京浜事業所内で実施され、クライオスタットの熱負荷を含む冷却特性を確認した。

その結果、クライオスタットの低温鏡懸架装置の冷却系と2層輻射シールドは冷却開始から

約2週間で設計温度に到達することを確認した。冷却試験から、内層側輻射シールドの熱負荷は設計 5.0 [W] に対して実負荷は 1.0 [W] であった。実負荷が設計に比べて小さい理由は、工場試験時は光学窓やビーム接続部が閉止されており、この箇所からの輻射入熱が負荷されないためである。外層側輻射シールドの熱負荷は設計 116 [W] に対して実負荷は 125 [W] であった。

この結果、クライオスタットの熱負荷がほぼ設計通りであることが確認された。

工場試験で測定したクライオスタットの実熱負荷を Table 4 に示す。

この他、冷却試験では KAGRA トンネルでの冷却運転を模擬したクライオスタット内の振動測定や内層輻射シールド内表面から模擬低温懸架に懸架された鏡への放射伝熱による冷却の寄与に関する実証試験が行われた。[17,21]

3.2. 伝導冷却路の評価

伝導冷却路の評価回路を Fig. 23 に示す。図中の(a)は鏡の冷却路、(b)は内側輻射シールドの冷却路を模式的に表した図である。また、図中の T1 から T11 は冷却路表面に組み込まれた温度計である。図の T3 (T11) の右横の実線は

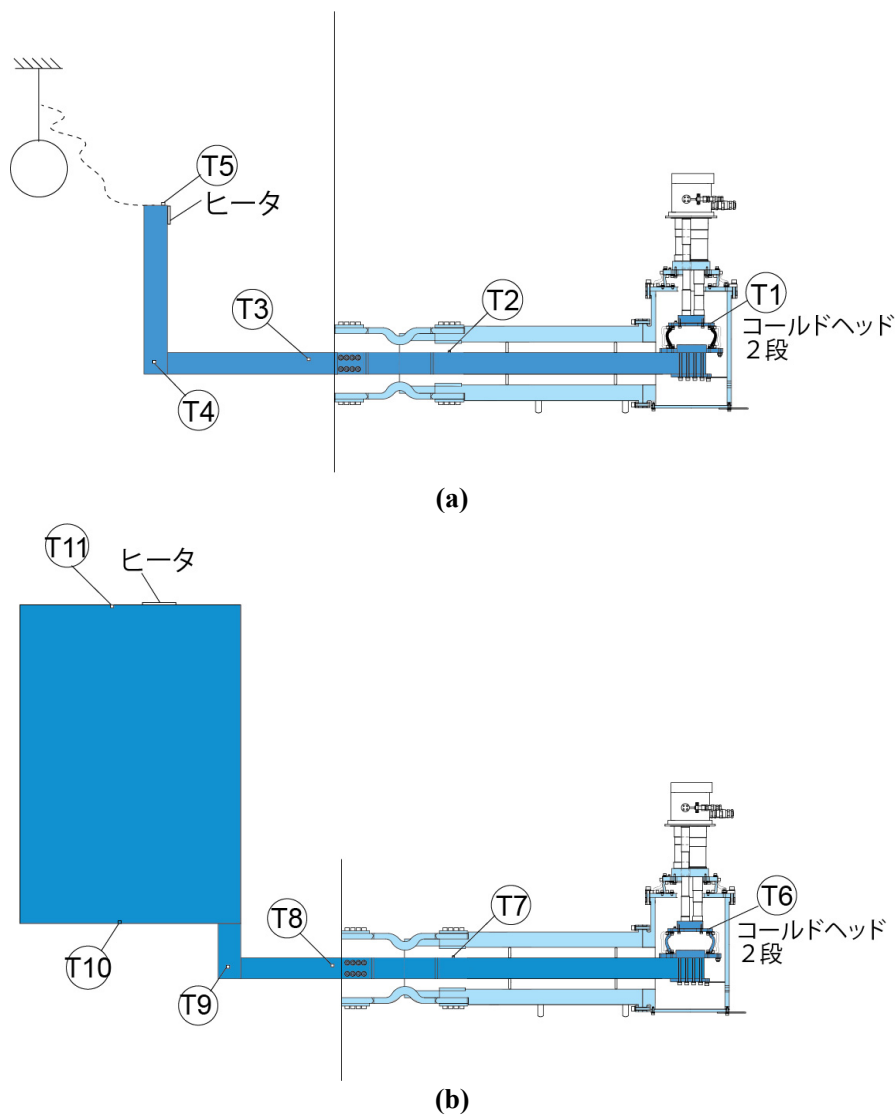


Fig. 23 伝導冷却路の評価回路。
(a): 鏡懸架冷却路, (b): 内側輻射シールド冷却路

クライオスタットと冷凍機ユニットの取り付け点を示している。

温度計 T3 から T5 の距離は 1.4 [m] で、クライオスタット内にある。伝導冷却路の断面と使用素材は冷凍機ユニットと同じ幅 50 [mm,] 高さ 75 [mm] の 5N8 アルミ材を使用している。また、伝導冷却路の屈折点(T4 並びに T9 位置)は溶接で接合されている。伝導冷却路の評価は T5 直近のヒーター並びに T11 直近のヒーターと冷凍機の冷凍能力測定結果を用いて行った。

ヒーター加熱量 5 [W] で、4 基のクライオスタットの鏡冷却路の冷凍機冷却ステージからクライオスタット内冷却路端部間の平均熱抵抗は 0.13 [K/W] であった。また、4 基のクライオスタットの内側輻射シールド冷却路の冷凍機冷却ステージからクライオスタット内冷却路端部間の平均熱抵抗は 0.44 [K/W] であった。これを熱伝導として評価するとそれぞれ ~ 5600 [W/(m \cdot K)] と ~ 3200 [W/(m \cdot K)] であった。

これまで述べたように 5 箇所の溶接接合部(冷凍機ユニット 4 箇所、クライオスタット 1 箇所)、3 箇所のボルト接合部が伝導冷却路に存在していること、測定が 4 端子ヒートフロー法による微少区間の温度差測定でないことから、参考値程度であることに注意されたい。

一方、2.3.2.3 の 8 K 伝導冷却路の設計で述べた熱伝導率の減少率の推定は上記の熱伝導評価からほぼ妥当な推定と考えられる。このことから、伝導冷却の設計では導体接合部溶接や機械的接合面の設計において適当な熱伝導率の減少率 (= 安全率) の導入が必要である事が示唆されている。

3.3. 低温設備の再組立と試験

総合冷却試験を完了した 4 基の低温設備(クライオスタット 4 台、冷凍機ユニット 16 台)が KAGRA トンネル内への搬入のために順次分解・梱包され、2013 年夏までに岐阜県飛騨市内の保管倉庫に輸送された。

2014 年に低温設備のトンネルへの輸送が開始され、最初の輸送でクライオスタットが Fig.



Fig. 24 総合組立を完了した Y-end 鏡室 (Fig.2) の低温設備

2 の X-end 鏡室と Y-end 鏡室へそれぞれ搬入された。2014 年 11 月から、低温設備のトンネルで鏡冷却用クライオスタット、冷凍機並びに多重バッフル付ダクト型輻射シールドを組み合わせる総合組立が開始され、途中の中断期間を経て 2016 年 7 月末に組立を完了している。

2014 年 11 月からは、低温設備のトンネルで鏡冷却用クライオスタット、冷凍機並びに多重バッフル付ダクト型輻射シールドを組み合わせる総合組立が開始され、途中の中断期間を経て 2016 年 7 月末に組立を完了した。

この組立に要した期間は、機材の輸送等も含めて 1 クライオスタット辺り約一ヶ月であった。

Fig.24 に KAGRA トンネルで総合組立を完了した Y-end 鏡室の低温設備を示す。

組立を完了した低温設備は、2016 年 10 月から冷却性能の確認試験を開始し、2017 年 8 月までに全試験を完了した。この冷却性能確認試験の結果を Fig.25 に示す。図中の破線は、2013 年の(株)東芝京浜事業所内での試験結果、シンボルが Y-end 鏡室低温設備試験の結果である。図から、KAGRA トンネル内の設置場所に於いても工場試験での冷却特性を再現し、約 2 週間

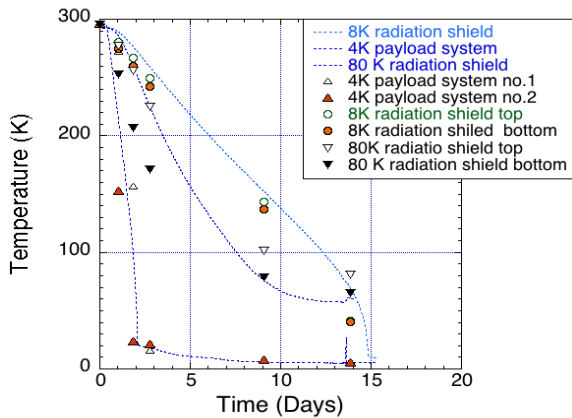


Fig. 25 Y-end 鏡室低温設備の冷却特性

の冷却期間で定常状態まで冷却できることを確認した。また、この結果から工場試験以降の輸送、保管並びにトンネル輸送等による低温設備の損傷が無い事が確認された。

4. 鏡冷却

4.1. 鏡の冷却特性

2019年、観測運営に向けて4枚の鏡が極低温に冷却された。Fig.26は、2019年4月から5月にかけてのY-end 鏡室低温設備の冷却曲線で

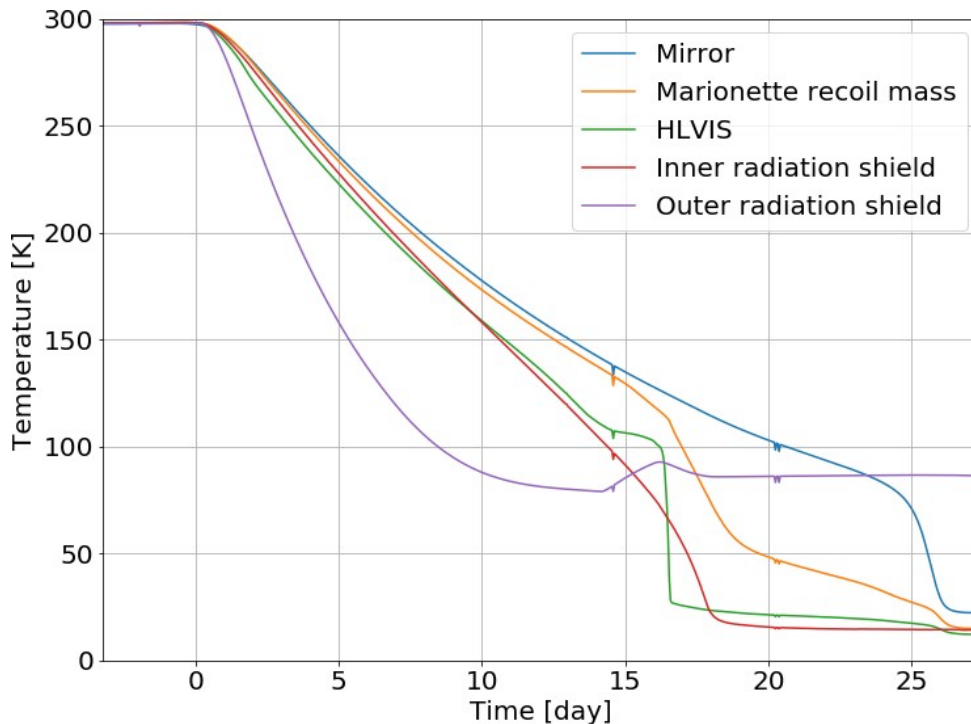


Fig. 26 KAGRAの極低温システムの冷却曲線^[16]
(図中の各コンポーネントは Fig. 3 を参照)

ある。^[17] Fig.26 が示すように 100K 以上の冷却は放射伝熱が支配的であるため、内層輻射シールド、鏡、マリオンネット反跳マス、HLVIS が同時に冷却されている。一方、100K 以下では 5N8 超高純度アルミ製撚り線による伝導冷却が支配的のため、冷凍機に近い冷却要素から、HLVIS、マリオンネット反跳マス、鏡の順で冷却が進んでいる。低温設備の冷却開始から 27 日目に鏡は 22K に到達している。100K 以下で鏡の冷却速度が急激に変化しているのは、温度の低下に伴ってヒートリンクの熱伝導率が上昇したこと、鏡や懸架装置の素材の比熱が低下したためである。

冷却完了後のクライオスタット内温度分布を Fig.27 に示す。

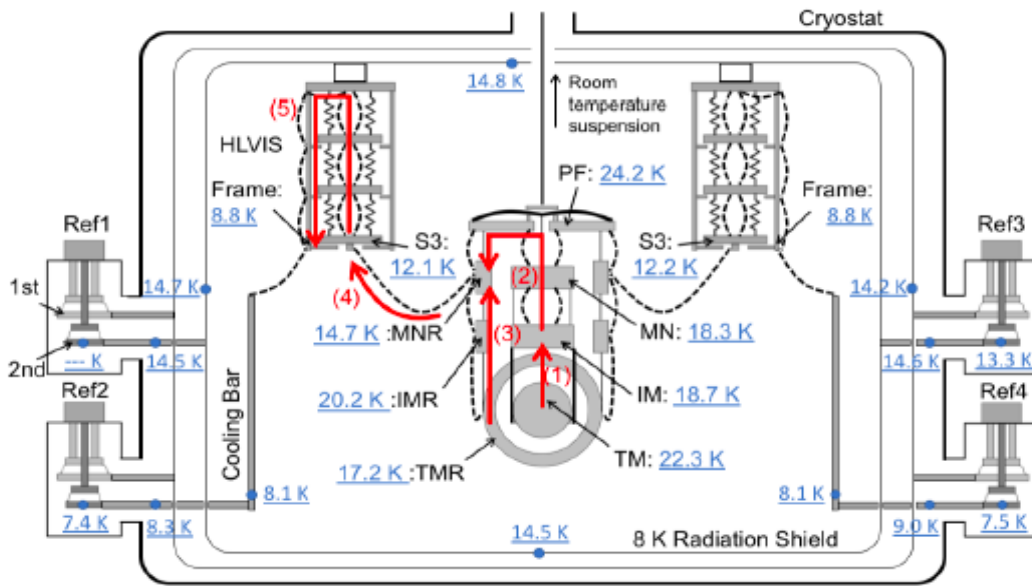


Fig. 27 冷却完了後のクライオスタット内温度分布

4.2. 鏡の着霜問題

LIGO-Virgo-KAGRA の国際重力波ネットワークの第3期観測期間 (O3) (2020年3月終了) に向けて低温設備の冷却を開始したところ、鏡の表面に霜が形成されると云う深刻な問題が発生した。これは、鏡の初期冷却時に鏡表面への残留ガスの分子吸着が予想以上に大きく、鏡面に目に見える霜が形成された推定された。鏡面に霜が形成された状態 (右) と形成されていない状態 (左) での緑色レーザーを照射した鏡面の写真を Fig.28 に示す。^[22] 極低温 (~22 K) の鏡面に非常に厚い霜が形成された結果、緑色レーザーのビームを大きく散乱させていることが理解できる。

鏡面に厚い霜が形成された結果、干渉計の性能指標の一つである Finesse が室温の約 1500 から数百以下まで低下した。KAGRA ではこの Finesse を 1400 前後としており、Finesse の低下は KAGRA の観測運転にとって深刻な問題となる。^[25]

鏡に着霜したガスの成分は、鏡を加温した際の温度と Finesse の変化から N₂ と O₂ が主であることが示唆された。

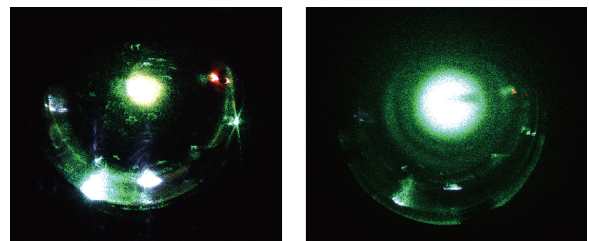


Fig.28 緑色レーザーが照射された鏡面の写真^[22] (右)着霜した鏡, (左)霜の無い鏡

このため、鏡表面に残留ガスが着霜すること無く、観測期間中は鏡の冷却を安定的に継続で可能な方法の確立が新たな課題となった。^[24]

4.3. 新たな鏡冷却法の提案

低温鏡の着霜による Finesse 低下という問題を受けて、鏡表面への霜の形成を防ぐ新たな冷却方法が検討され、低温設備の各冷却要素を段階的に冷却し、真空槽内の残留ガス分子を鏡表面ではなく、輻射シールドの表面に吸着させるという冷却法が提案された。

新たに提案された段階的冷却法を以下に示す。

Step 1:

真空容器内の真空排気時間を21日以上とし、容器内の圧力を 1×10^{-4} [Pa]以下とする。

Step 2:

真空排気後に実施するHeリーク試験の判定値を 1×10^{-11} [Pam³s⁻¹]以下とし、判定値以上のリーク箇所は補修を実施する。

(これまでの基準は 1×10^{-10} [Pam³s⁻¹]の検出感度でリークが検出されないであった。)

Step 3:

クライオスタットに接続されている2台の多重バッフル付きダクトシールドの冷却を開始し、約11日の冷却時間で残留ガス中の水分(H₂O)をダクトシールド内表面に吸着させる。

ダクトシールド内表面の平均温度が140 [K]以下で水分(H₂O)の分圧は飽和蒸気圧温度から 1×10^{-6} [Pa]台と予測。

Step 4:

輻射シールド冷却用冷凍機ユニット2台(Fig. 3のPTC for Cryostat Radiation Shields)によりクライオスタットの内層側と外層側輻射シールドの冷却を開始する。約24日の冷却時間で残留ガス中の水分(H₂O), N₂, O₂を内層輻射シールド内表面に吸着させる。内層輻射シールド表面の平均温度が20 K以下でN₂とO₂の分圧は飽和蒸気圧温度から 1×10^{-8} [Pa]台と予測。

Step 5:

低温鏡懸架装置の冷却を開始する。

(冷却時間は約10日)

その他、Step 1~4の冷却期間中、ガス分析器(Q-mass)を使用して残留ガスの分圧測定を継続して行い、残留ガスの分圧変化を観測する。

4.4. 新冷却法の実証

KAGRA 低温設備を使用して2020年11月から2021年2月にかけて新冷却法の実証試験が行われた。この冷却法で冷却された低温設備

の特性をFig.29に示す。

この冷却法により、鏡が22 [K]に到達するのに要した時間は49日であった。

(真空排気時間(21日)を除く)

Fig.26の冷却時間27日と比較して約2倍の鏡の冷却時間が必要であるが、この冷却法により目視で確認できるほど厚い霜が付くことなく鏡の冷却に成功している。

この実証試験では、懸架装置の中間質量(Fig.3中のIntermediate Mass)と内層輻射シールドに装着されたヒーターによる除霜試験も実施した。

ヒーターで加温した鏡(図中のTM)並びに内層輻射シールド(図中の8 K top及び8 K side)の加温特性をFig.25に示す。

この加温ヒーターによりN₂とO₂の除霜温度40 [K]以上までの加温時間が1日、再冷却に必要な時間が1日であることが確認された。

この結果から、鏡表面又は輻射シールドの光学窓に霜が付着しても約2日で除霜が可能であることを実証した。また、KAGRAの観測運転の保守期間を利用して定期的に除霜することで観測期間中もFinesseの低下を防ぐことができることを確認した。

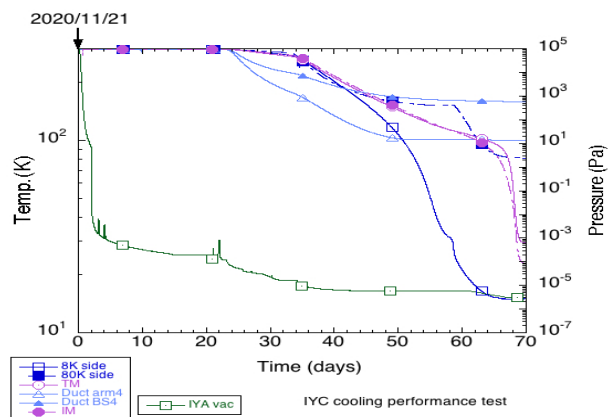


Fig. 29 実証実験で確認した低温設備の冷却特性

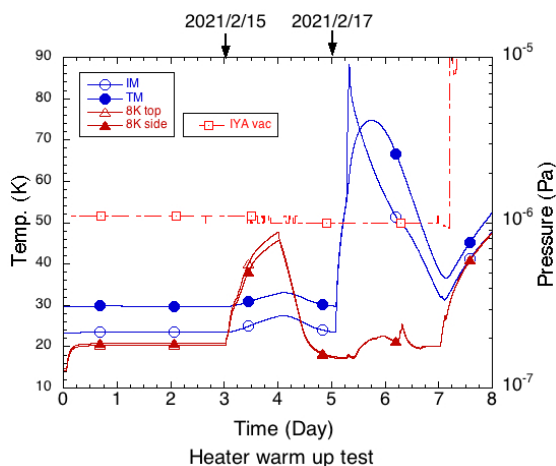


Fig. 30 除霜ヒータによる鏡と内層輻射シールドの加温特性

この実証実験では、神岡町池ノ山の地下に設置されたクライオスタット内の低温下での振動測定が行われている。^[3]

この振動測定では、新たに開発された極低温干渉型加速度計^[22]を用いて低温環境下で実施されている。測定された振動の解析の結果、冷凍機ユニットに由来するクライオスタットの固有振動が KAGRA の重力波観検出感度に影響しないことが示された。^[23]

5. まとめ

本テキストで紹介した KAGRA 低温設備の設計・製作は高エネルギー加速器研究機構が持つ加速器関連の技術が応用例である。

特に冷凍装置を冷熱源とする伝導冷却は、高エネルギー素粒子検出用超伝導磁石等で多用されており、建設が検討されている国際リニアコライダー計画でも伝導冷却化した補正用超伝導磁石の設置が検討されている。

今後とも加速器建設で開発された先進技術が多方面で応用され、さらなる科学の発展に寄与することを希望している。

本稿では KAGRA に応用された低温技術を解説した。本稿に記述した他にもクライオスタットの超高真空の立場からの設計検討が実施されている。

真空の仕様等を含めた KAGRA 全体の解説

が参考文献[1,2]に纏められているので参照されたい。また、KAGRA 低温技術の内、多重バッフル付きダクトシールドの機能と設計法は原稿作成の都合で省略した。この多重バッフル付きダクトシールドについては次の機会で紹介したい。

6. 謝辞

2011 年 4 月以来、多くの方の協力により KAGRA 低温設備の設計・製作が進められ、観測開始までたどり着くことができました。

内山 隆氏（東大宇宙線研）、大橋 正健氏（東大宇宙線研）、大森 隆夫氏（帝京大学）、久米 達哉氏（KEK）、小池 重明氏（KEK）、榊原 裕介氏（東大宇宙線研）、斎藤 芳男氏（KEK）、鈴木 敏一氏（KEK）、陳たん氏（東大宇宙線研）、東谷 千比呂氏（東大宇宙線研）、山岡 宏氏（KEK）、山元 一広氏（東大宇宙線研）の皆様から低温設備の設計と関連する R&D でご協力頂きました。ここに感謝いたします。

（五十音順、括弧内は KAGRA 低温設備設計開始時の所属）

2011 年 4 月のプロジェクト開始に当たって山本 明前 KEK 超伝導低温工学センター長から多大なサポートを頂きました。ここに感謝いたします。

今回、OHO'22 のテキストとして KAGRA 低温技術の解説文書作成の機会を提供頂いた事務局に感謝いたします。

7. 補遺

補遺として、Fineness と真空ダクト内の圧力について簡単に解説する。

7.1. Fineness

KAGRA は、Fabry-Perot Michelson 干渉計（FPMI）を基本とし、重力波信号である位相変化を増幅するため、光子を直交する腕内に複数回往復させる。FPMI では Finesse と呼ばれるパラメータがある。Finesse は重力波検出器

の腕共振器を構成する鏡の反射率の単調増加関数である。^[25]

KAGRAはこのFinesseを1400前後としている。冷却された鏡の表面に真空槽内の残留ガスが着霜した結果、反射率が下がりFinesseが低下した。

このため、鏡表面に残留ガスが着霜することなく、冷却を継続することは長期観測を行う低温干渉計の課題であった。^[22]

7.2. 真空ダクト内の圧力

干渉計の光路上に存在する気体分子は、レーザー光を散乱し光路長変化の原因となる。加えて、鏡への気体分子の入射・脱離による鏡の機械的・音響的振動も干渉計の雑音となる。

KAGRAの目標感度を得るための圧力は 2×10^{-5} [Pa]以下と見積もられ、KAGRAではさらに1桁の安全係数を持たせて、干渉計の運転時の圧力条件を $\sim 2 \times 10^{-7}$ [Pa]としている。^[20]

参考文献

- [1] 特集「重力波検出と極低温冷却技術」
J. Cryo. Soc. Jpn., **46** (2011)
- [2] 特集「KAGRA~時空のさざ波をとらえる~」日本機械学会誌, **120** (2017)
- [3] R. Bajpai, et al., A laser interferometer accelerometer for vibration sensitive cryogenic experiments, *Meas. Sci. Technol.* **33** (2022) <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac6d46>
- [4] 都丸 隆行、他「KAGRAの防振系」日本機械学会誌 **120** (2017) pp.16-19
- [5] 幾島悠喜、「超低振動クライオクーラーの開発研究」総合研究大学院大学 学位論文(博士) (2008)
https://ir.soken.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=652&item_no=1&page_id=29&block_id=155
- [6] 幾島悠喜、他「超低振動パルス管冷凍装置-冷凍能力と振動-」*J. Cryo. Soc. Jpn.*, **43** (2008) pp.7-14
- [7] C. Tokoku, et al., Cryogenics System for the Interferometric Cryogenics

Gravitational Wave Telescope, KAGRA – Design, Fabrication, and Performance Test -, *Adv. Cryog. Eng.*, **59** (2014), pp.1254-1261.

- [8] 都丸隆行、他「超高純度金属細線による伝導冷却 I –高純度アルミニウム-」
J. Cryo. Soc. Jpn. **46** (2011) pp.415-420
- [9] 低温工学・超電導学会 物性データより、<https://www.csj.or.jp/handbook/index.html>
- [10] 新富孝和、他「超高純度金属細線による伝導冷却 II –高純度銅-」*J. Cryo. Soc. Jpn.*, **46** (2011) pp.421-425
- [11] 榊原 祐介、「A Study of Cryogenic Techniques for Gravitational Wave Detection」東京大学大学院 学位論文(博士) (2014)
https://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/records/8069#.YwL1cy_3LSw
- [12] 西嶋 茂宏、他「クライオスタットの支持材に関する研究」大阪大学研究センターだより **57** (1987) pp. 17-19
- [13] T. Kume, S. Koike, et al., Development of the low vibration cryocooler unit for large-scale cryogenic gravitational wave telescope, KAGRA, *Proc. of ICEC 24* (2012), pp.399-402.
- [14] 小池 重明、他「KAGRA クライオスタットの設計-振動解析について-」平成 25 年度 核融合科学研究所技術研究会報告 (2014) pp.28-31.
- [15] T. Yamada, et. al, High Performance Heat Conductor with Small Spring Constant for Cryogenic Applications, *Cryogenics*, Vol. **116** (2021), 103280.
- [16] 榊原 祐介、他「大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 熱シールド用金属の低温における波長 $10\mu\text{m}$ での反射率測定」*J. Cryo. Soc. Jpn* **46** (2011) pp.434-440
- [17] Y. Sakakibara, et. al, A study of cooling time reduction of interferometric cryogenic gravitational wave detectors using a high-emissivity coating, *Adv. Cryog. Eng.*, **59** (2014), pp.11176-11183.
- [18] 大森 隆夫他、他「大型重力波望遠鏡

- (LCGT)における真空技術と断熱技術」 *J. Cryo. Soc. Jpn.* **46** (2011) pp.408-414
- [19] 高田 聡他、他「真空多層断熱材用アルミ蒸着ポリエステルフィルムの気体放出速度の測定」、 *J. Vac. Soc. Jpn.*, **57** (2014) pp.1-6
- [20] 齊藤 芳男、他「KAGRA の真空装置」
日本機械学会誌 **120** (2017) pp.16-19.
- [21] D. Chen, et al., Vibration measurement in the KAGRA cryostat, *Class. Quantum Grav.* **31** (2014),
doi:10.1088/0264-9381/31/22/224001.
- [22] H. Abe, et al., The Current Status and Future Prospects of KAGRA, the Large-Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope Built in the Kamioka Underground, *Galaxies* 2022, 10, 63,
<https://doi.org/10.3390/galaxies10030063>
- [23] R. Bajpai, et al., Vibration analysis of KAGRA cryostat at cryogenic temperature, *Class. Quantum Grav.* **39** (2022) <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ac7cb5>
- [24] K. Hasegawa, et al., Molecular adsorbed layer formation on cooled mirrors and its impacts on cryogenic gravitational wave telescopes, *Phys. Rev. D*, **99** (2019), 022003.
- [25] 麻生 洋一、他「超高感度重力波検出器のための光学設計と制御」 *J. Vac. Soc. Jpn.*, **54** (2011) pp.597-603