



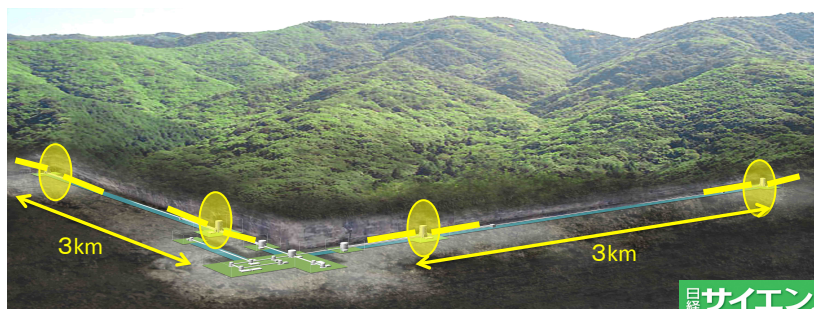
重力波望遠鏡KAGRAの低温システム開発状況

宇宙線研究所
東谷千比呂



KAGRA低温グループ
KEK 3名 (+2名)
宇宙線研 1名
ポスドク 数名
大学院生 2名
+ 東谷

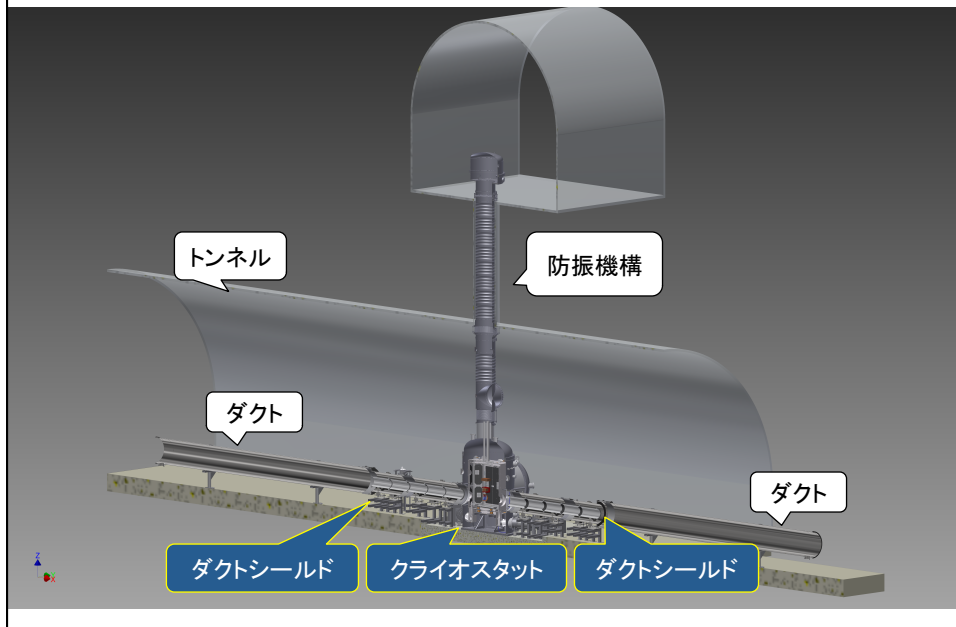
KAGRA: 大型低温重力波望遠鏡



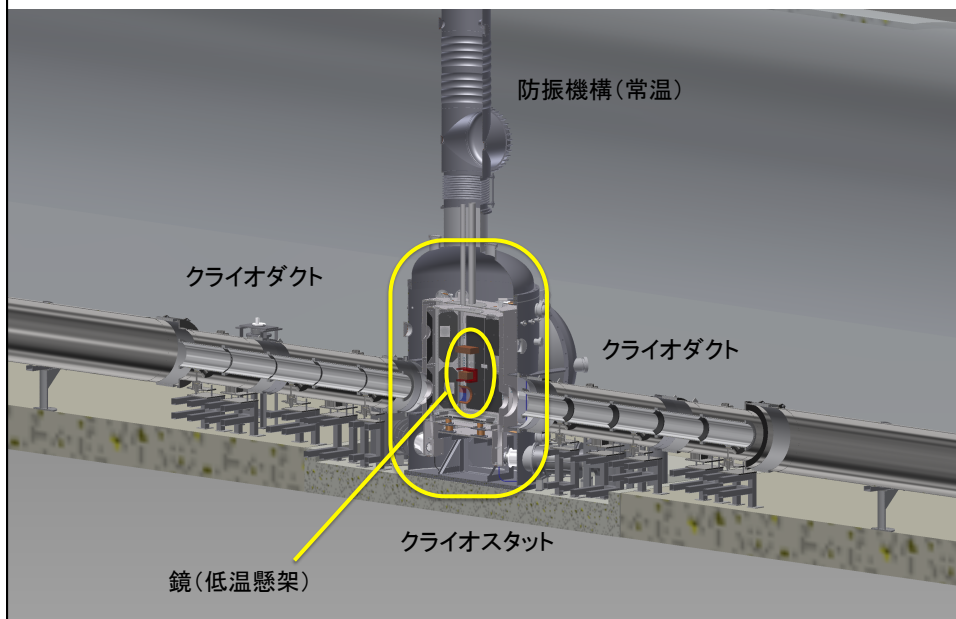
- ・重力波の直接検出を目指す
- ・基線長3kmのマイケルソン干渉計
- ・干渉計の要となる鏡を冷やす(~20 K)
- ・池ノ山(飛騨市神岡)の地下200mに建設中
(トンネル工事は2014年春に完工予定)

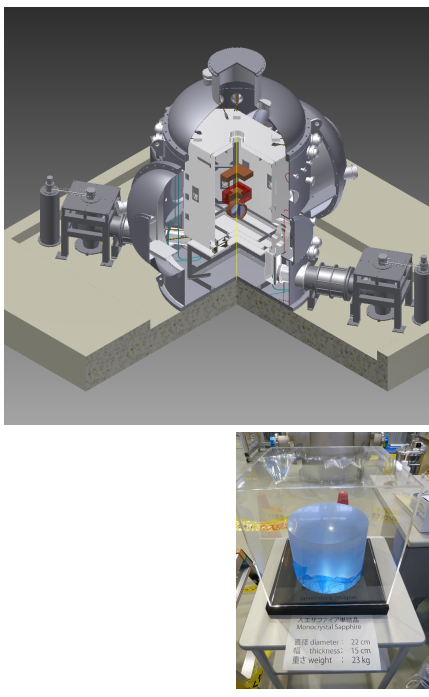


KAGRA低温設備



KAGRA低温装置

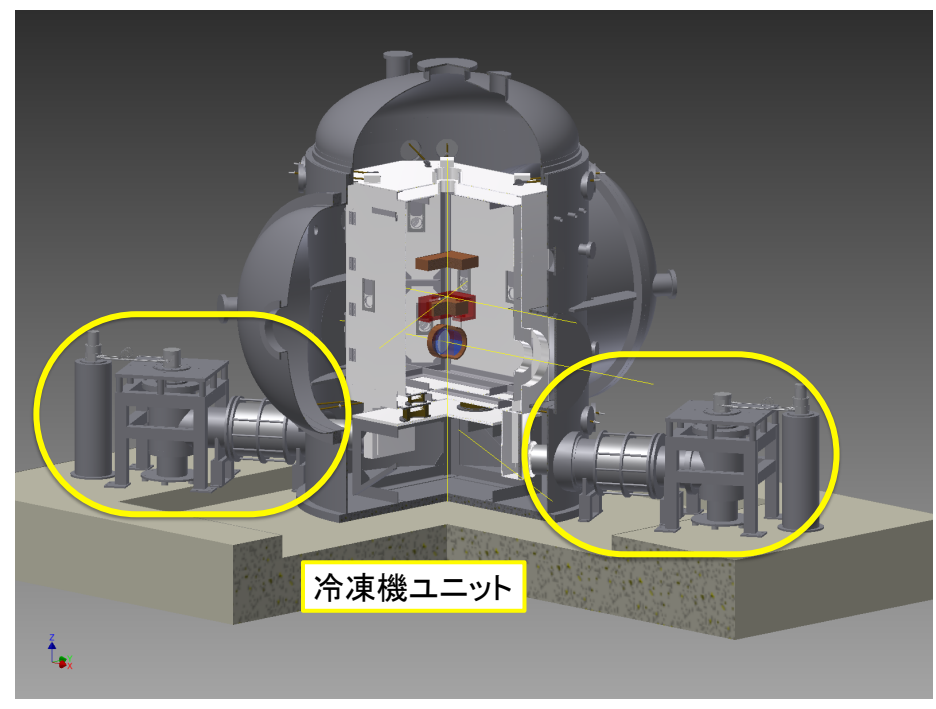




低温システム開発背景

- ・干渉計の要は単結晶サファイア鏡
（直径220mm・厚さ150mm・質量23kg）
- ・検出器にとって原理的な雑音を低減するため鏡は20K程度まで冷却
- ・鏡内部の光吸収による鏡の温度上昇を抑制。
- ・輻射シールドの輻射による初期冷却促進及び干渉計の散乱光で生じる熱を吸収。
- ・鏡は全部で4個→クライオスタット4台を製作
- ・1台のクライオスタットにつき4台の冷凍機を使用（冷凍機は計16台）
- ・干渉計の感度を上げるため、冷凍機を含めた低温装置の振動を神岡地下の地面振動以下に低減

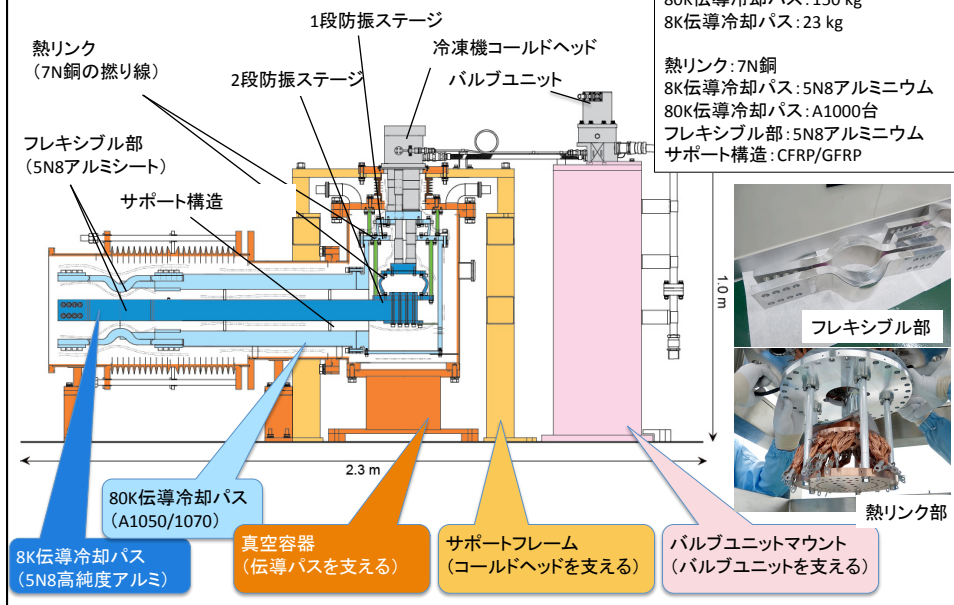
コンセプト
大きな熱質量を極めて静かな環境で冷やす



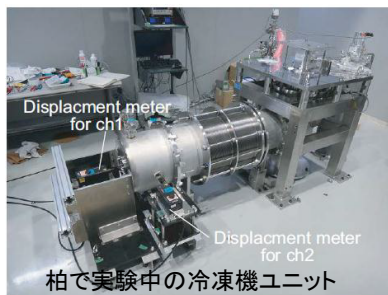
冷凍機ユニット

冷凍機ユニット：パルスチューブ冷凍機＋防振機構

ジェック東理社で製作



冷凍機ユニット仕様



冷凍能力

- ・8K伝導冷却パス端において 2.5W@9K
- ・80K伝導冷却パス端において 35W@70K

振動特性

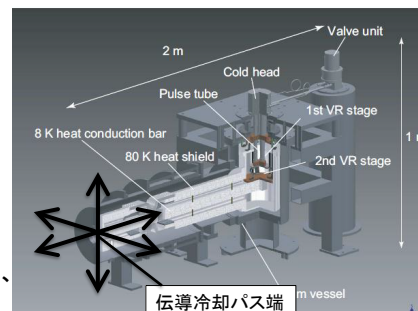
- ・8K伝導冷却パス端において最大±100nm以下
- ・80K伝導冷却パス端において最大±100nm以下

熱性能試験

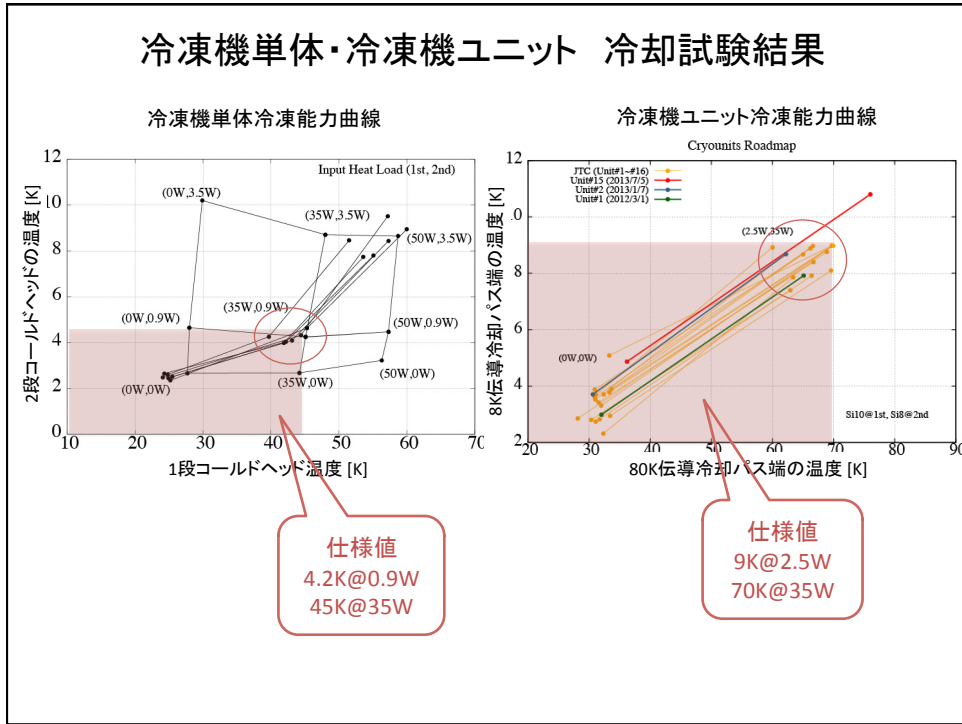
- ・伝導冷却パス端に組み込んだヒータに熱負荷を与えて応答を見る

振動試験

- ・レーザ変位計を用いて、伝導冷却パス端部の3軸方向の振動を同時に測定
- ・冷凍機ユニットは床にアンカー固定
- ・レーザ変位計はユニットとは別に床に固定
- ・使用測定器: レーザ変位計(小野測器LV-9300)、加速度計(特許機器MS-102S)

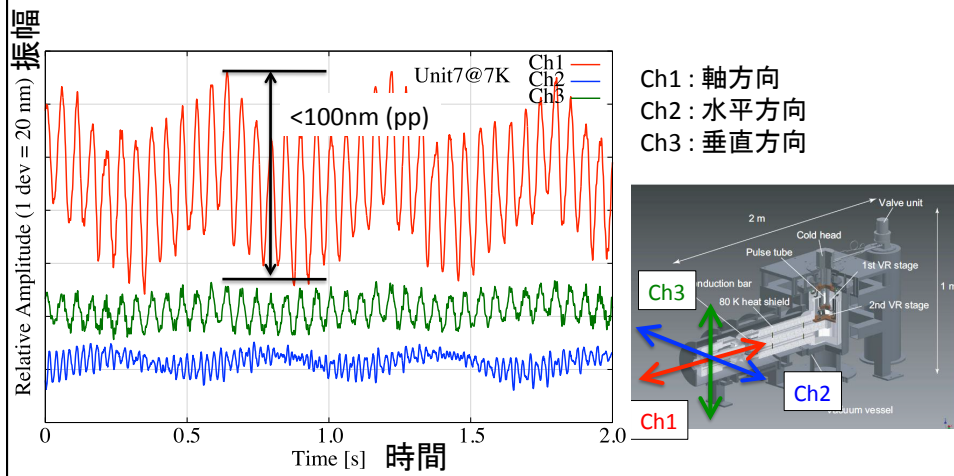


冷凍機単体・冷凍機ユニット 冷却試験結果



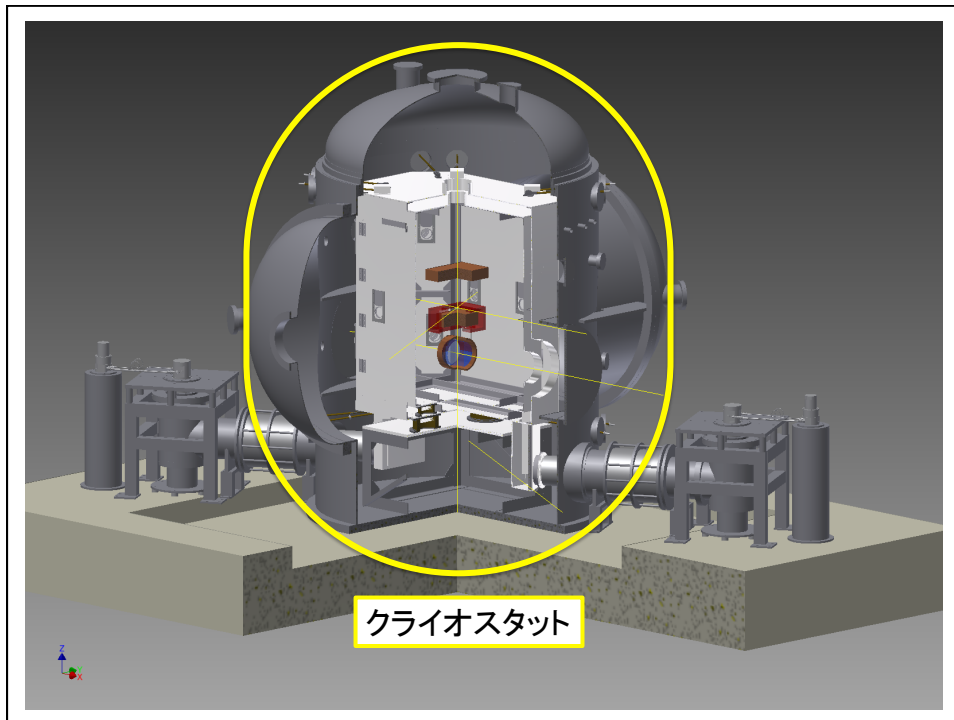
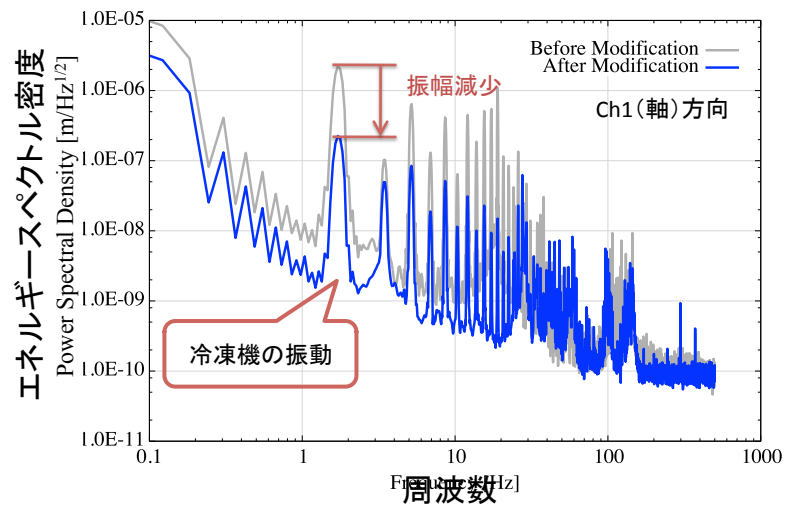
冷凍機ユニット振動試験(時系列データ)

- 運転温度での振動測定(8K伝導冷却パス・80K伝導冷却パスそれぞれ測定)
- 冷凍機ヘッドの振動(約1.7Hz)が最大
- 変位は軸方向(Ch1)で<100nm (peak to peak)
- 振動性能が低温で仕様を満たすことを確認

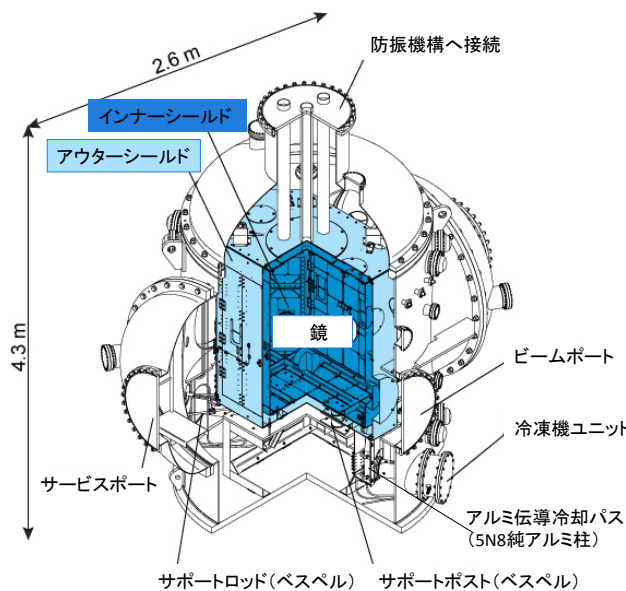


冷凍機ユニット振動試験 (エネルギースペクトル密度)

- 時系列データをフーリエ変換
- 振動の周波数を見ることで、振動の原因を特定する



クライオスタット



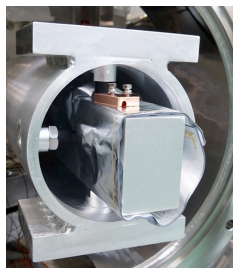
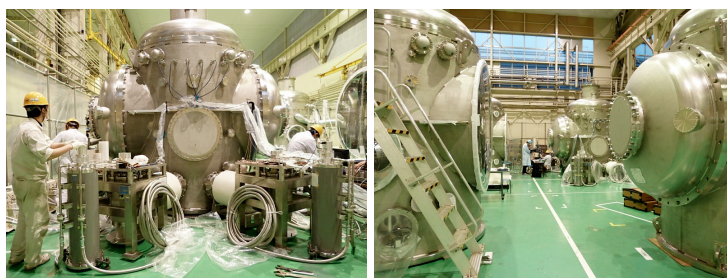
冷却重量:
 アウターシールド(80 K): 590 kg
 インナーシールド(8 K): 460 kg
 (クライオスタット全重量: 11000 kg)
 素材:
 シールド構造材: A6000番台
 シールド壁材: A1050
 シールド壁内面: DLCコーティング
 サポート構造材: ベスペル(SP-1)
 伝導冷却パス: 5N8アルミニウム

4台の冷凍機ユニットから
 ・2系統の8K伝導冷却パスで鏡(懸架系)を冷却
 ・2系統の8K伝導冷却パスでインナーシールドを冷却
 ・4系統の80K伝導冷却パスでアウターシールドを冷却

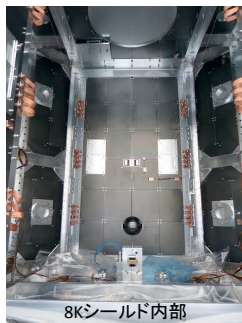
冷却温度仕様
 ・インナーシールド10K以下
 ・アウターシールド90K以下
 ・鏡へのヒートリンク接続部(2カ所)に熱負荷各2Wを付与時に8K以下。

クライオスタット冷却試験

4台とも東芝が製作。東芝京浜事業所(横浜)で冷却試験(2013年2-3月)。



伝導冷却パス(クライオスタット側)



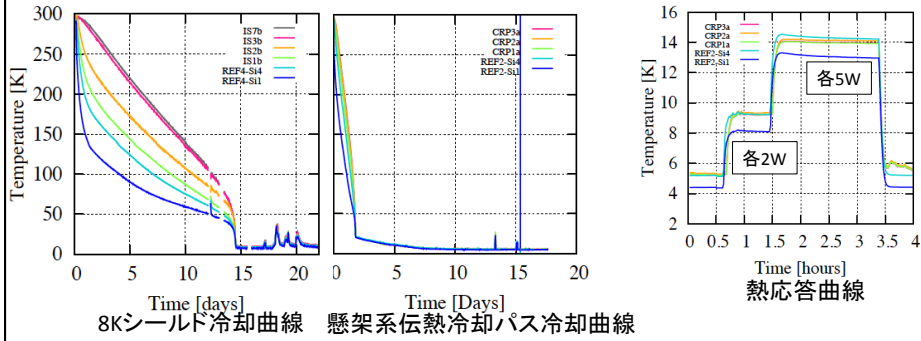
8Kシールド内部



中では最大4人が作業可能

クライオスタット冷却試験

各部の最低到達温度測定と熱負荷による熱応答試験

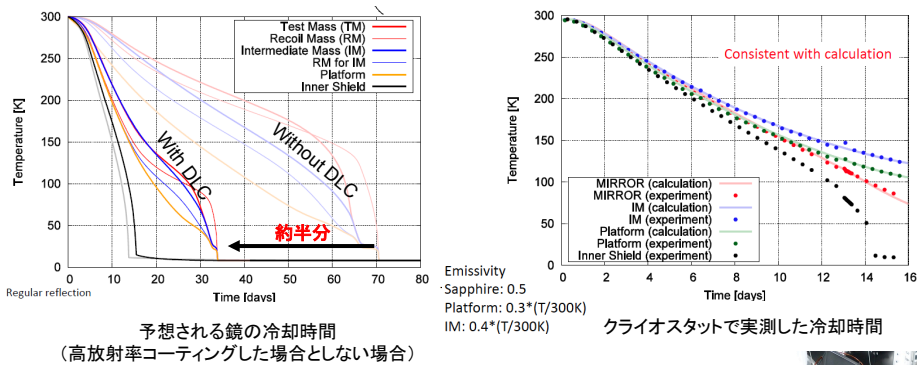


- ・鏡へつながる懸架系伝熱冷却パス端部の到達温度=4~6K。
- ・そこから鏡へは、振動を伝えないよう細く柔らかい熱リンクを数段経て接続し、鏡の20K到達を目指す。
(熱リンクと懸架系間の接触熱抵抗の軽減、などが今後の開発課題)

※クライオスタットでの懸架系冷却試験、低温振動試験などの詳細は物理学会、低温工学学会などにて継続的に発表中。

輻射による初期冷却時間低減

Y. Sakakibara/ICRR



- ・外面にDLCを施したダミーミラー(懸架)を吊るし、輻射冷却の効果をみる。
- ・シミュレーションした冷却曲線とほぼ一致して冷えた
- ・鏡の初期冷却に高放射率コーティングが効果があることを確認。

※クライオスタットでの懸架系冷却試験、低温振動試験などの詳細は物理学会、低温工学学会などにて継続的に発表中。

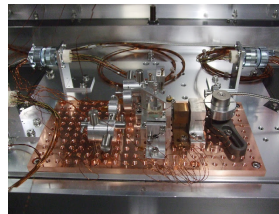
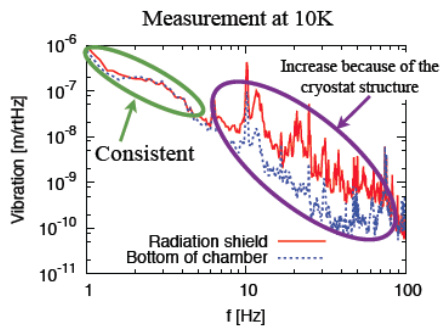


クライオスタット振動試験

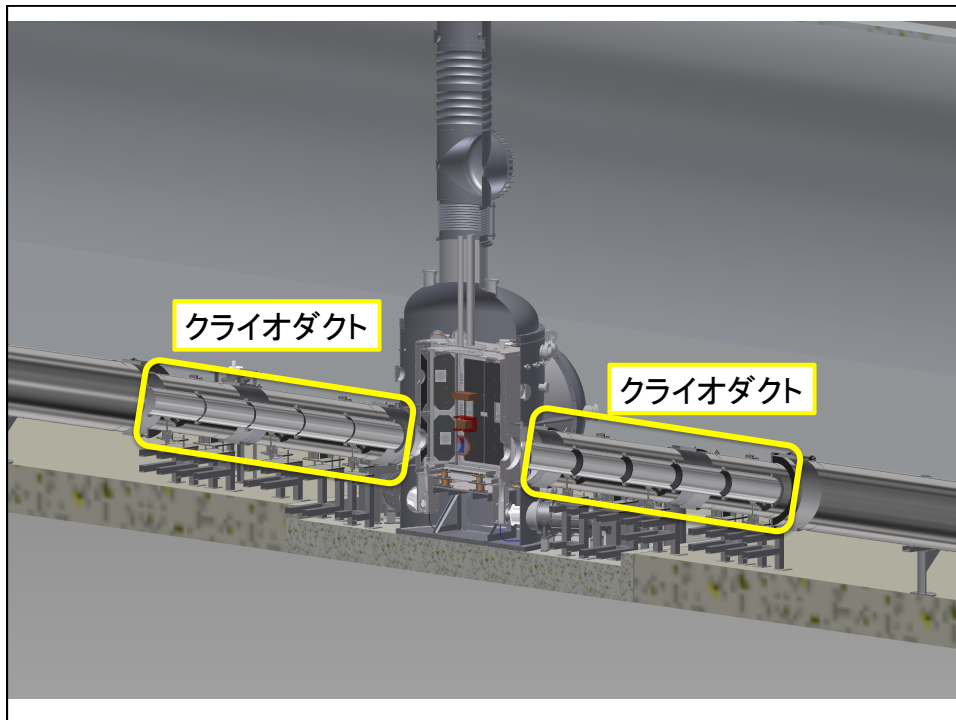
D.Chen/ICRR

シールドの振動を動作温度で測定

- ・シールドの振動が熱リンクや散乱光を介して検出器の雑音となる。このために実際に8Kシールドが冷えた状態で、冷凍機動作時のシールドの振動を測定。
(ただし東芝工場は神岡坑内より地面振動が約100倍大きい)
- ・床面の振動に対するクライオスタット内部の振動の比で評価(解析中)。
- ・この他、クライオスタット(常温時/低温時)の打撃検査なども実施。



※クライオスタットでの懸架系冷却試験、低温振動試験などの詳細は物理学学会、低温工学学会などにて継続的に発表中。



クライオダクト

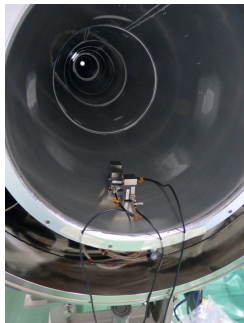
常温ビームダクトからの輻射を低減、散乱光(熱)の吸収



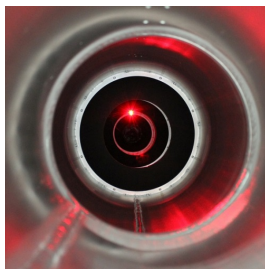
防振機構付き冷凍機



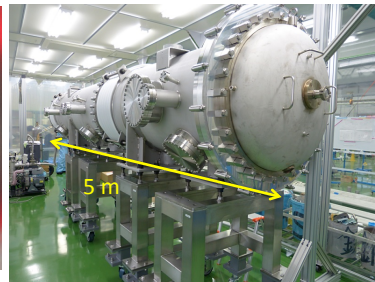
初期型 17m(東芝で製作, 2013年度)



振動試験・冷却試験



散乱試験



改良型 5m×3本(東理社で製作, 2013年度)

まとめ

KAGRAの低温システムについて、冷凍機単体性能試験、冷凍機ユニット試験、クライオスタット試験を実施し、冷却性能・振動性能を確認した。製作・試験は2011年～2012年度に実施。

クライオダクトは2013年製造に入り、17mダクトを試験後、改良した5mダクトを製作中、今後、冷却性能・振動性能・散乱光低減性能などを試験。来年度も続く。

今後の開発

- ・ 鏡懸架系の冷却機構の開発中。
- ・ 柏に試験用クライオスタット立ち上げ。
本番用サファイア鏡も冷却できる。
(冷凍機1台+液体窒素予冷)
- ・ 2014年度からトンネルへの搬入・据え付け作業開始。

