



KAGRAサファイア懸架系プロトタイプを用いた
熱抵抗の評価

Thermal resistance measurement of KAGRA
sapphire suspension prototype

2016年9月22日

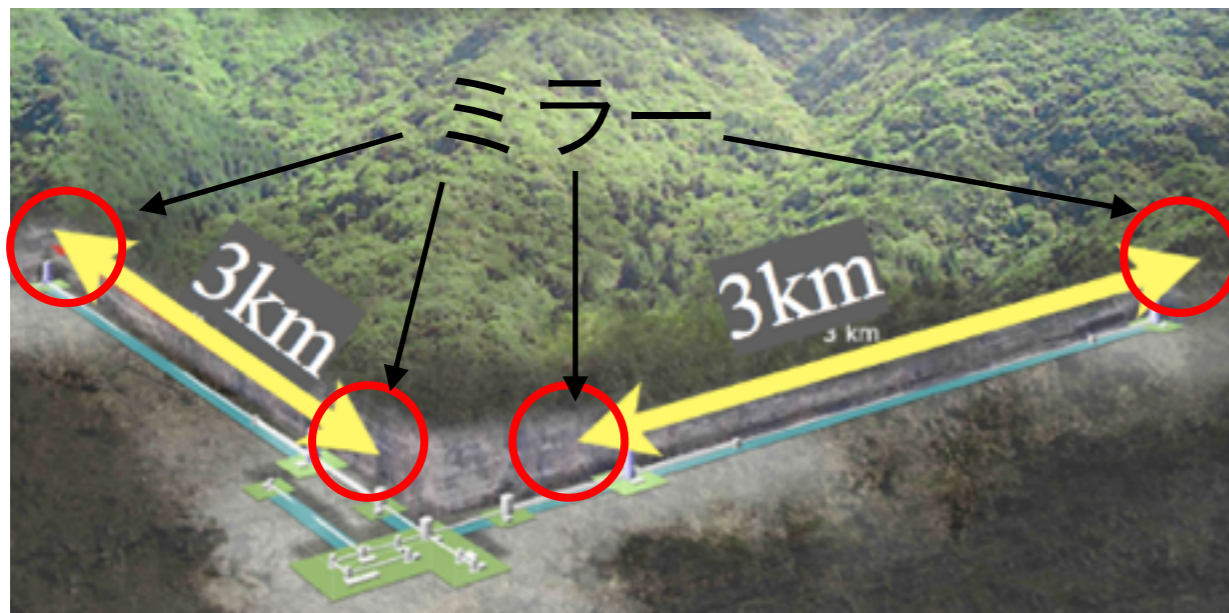
東京大学 宇宙線研究所

田中宏樹, 山元一広, Kieran Craig, 宮本昂拓, 山田智宏,
都丸隆行^A, 鈴木敏一^A, 木村誠宏^A, Rahul Kumar^A, 牛場崇文^B, 梶田隆章

ICRR, ^AKEK, ^B東大理学系研究科

KAGRAの特徴

- 地上の干渉計型重力波検出器の雑音源...**地面振動、熱雑音**
- KAGRAの特徴...**地下に建設、ミラーの冷却**



低温懸架系



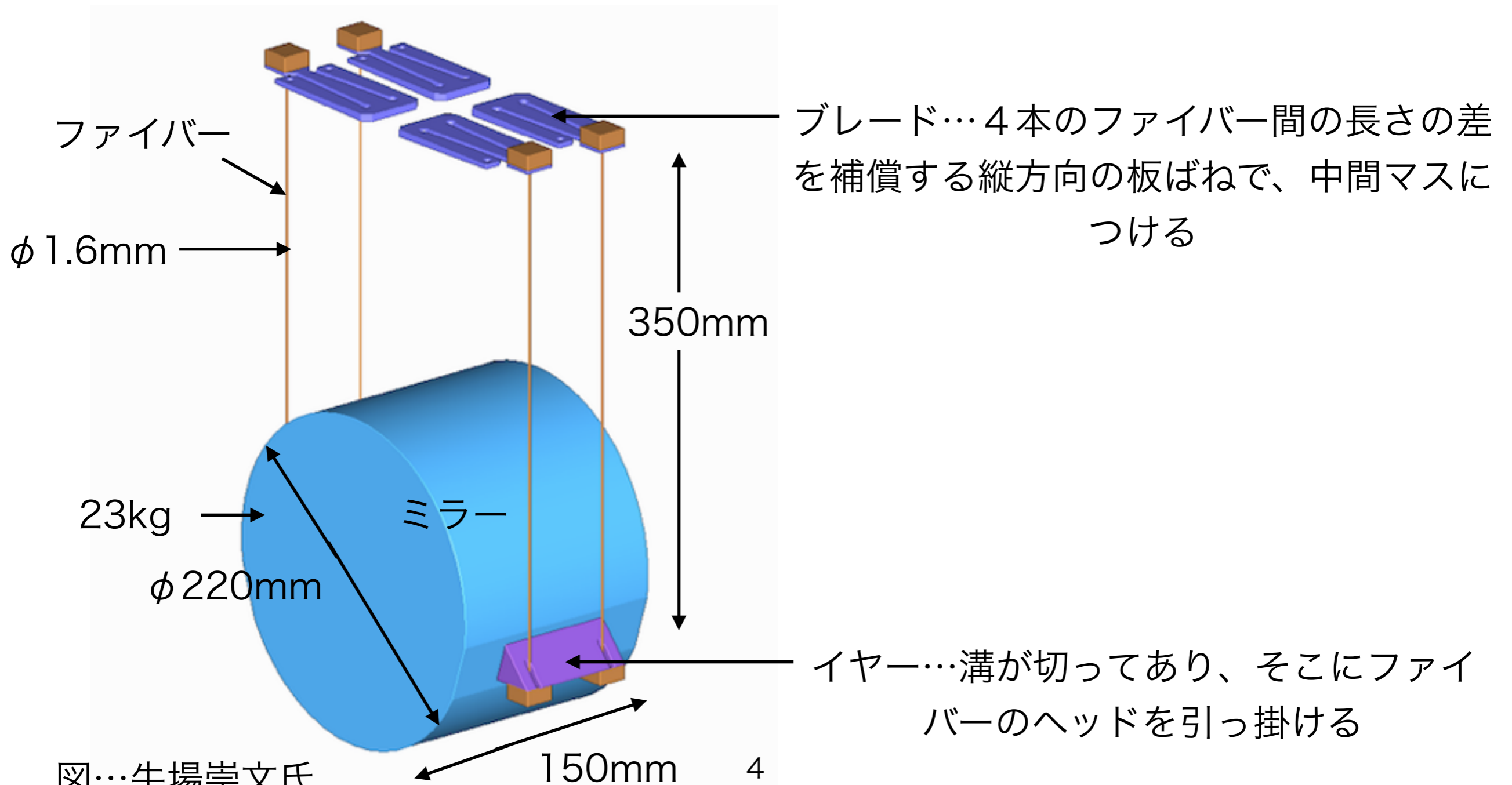
中間マス

ミラー

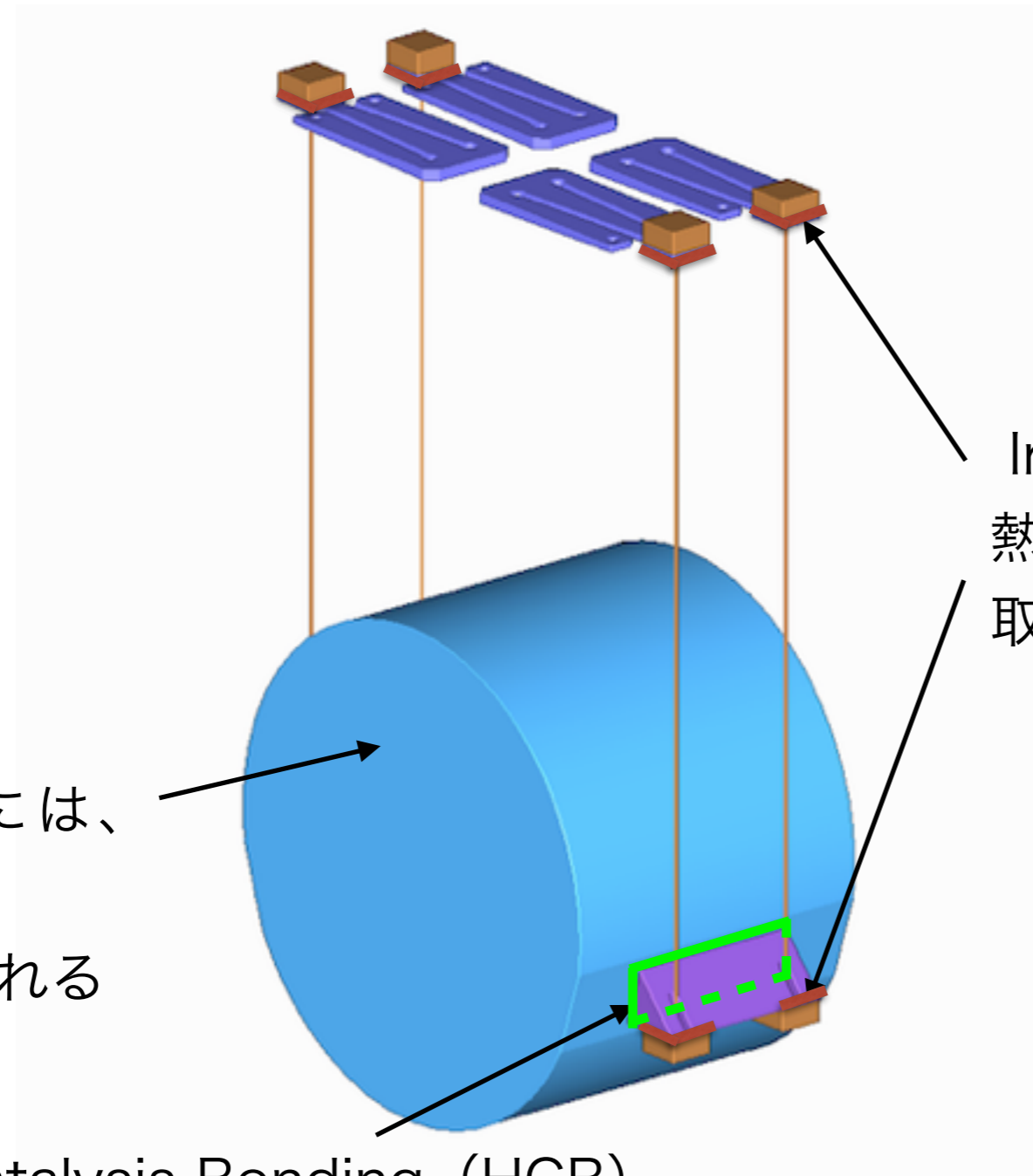
サファイア懸架系

サファイア懸架系

全てサファイアで作られる



サファイア懸架系



~20K

干渉計運転時には、
最大0.82Wが
ミラーに吸収される

Indium bonding
熱伝導を良くする、
取り外し可能

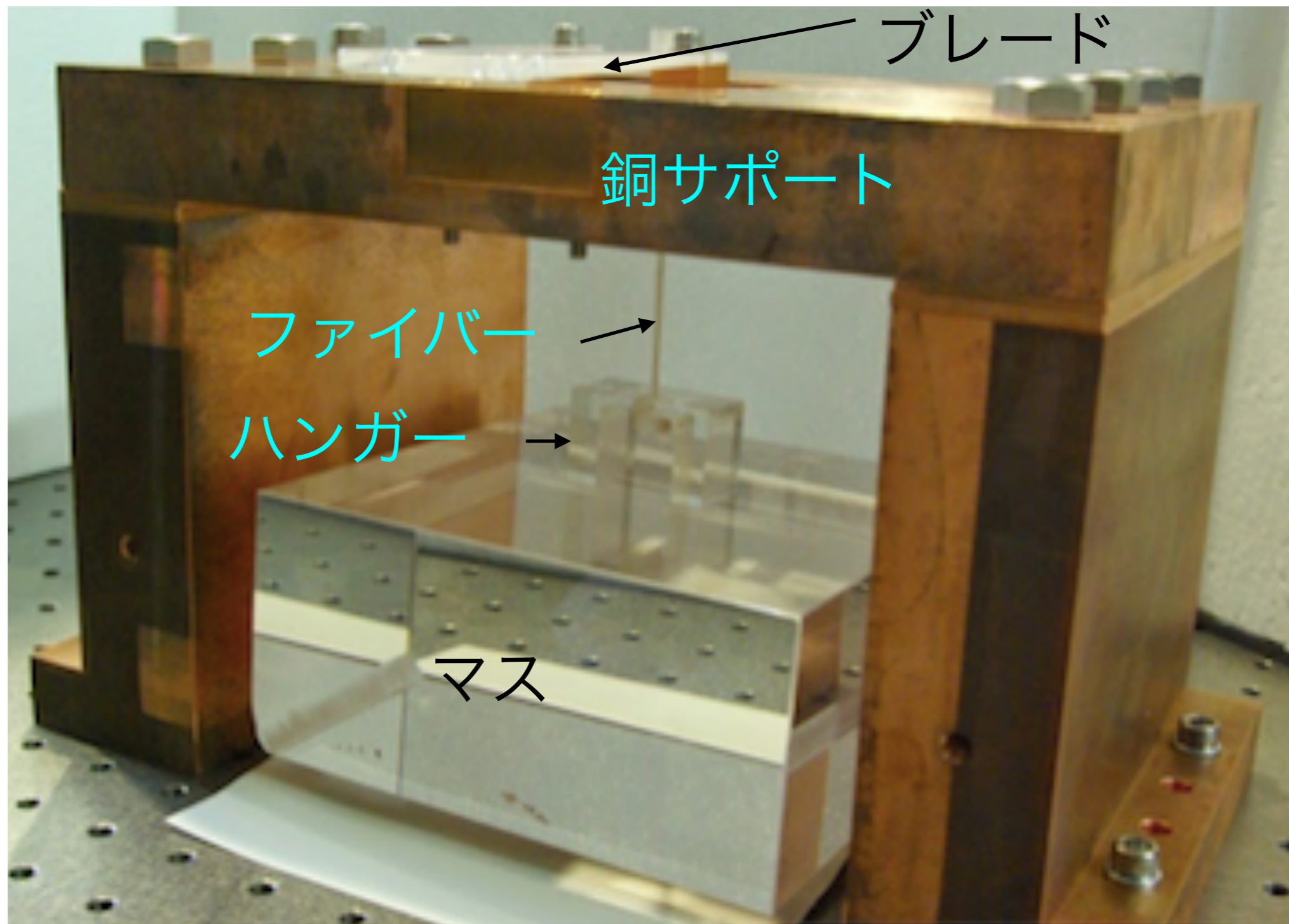
Hydroxide Catalysis Bonding (HCB)

低温で強固、熱抵抗が小さい

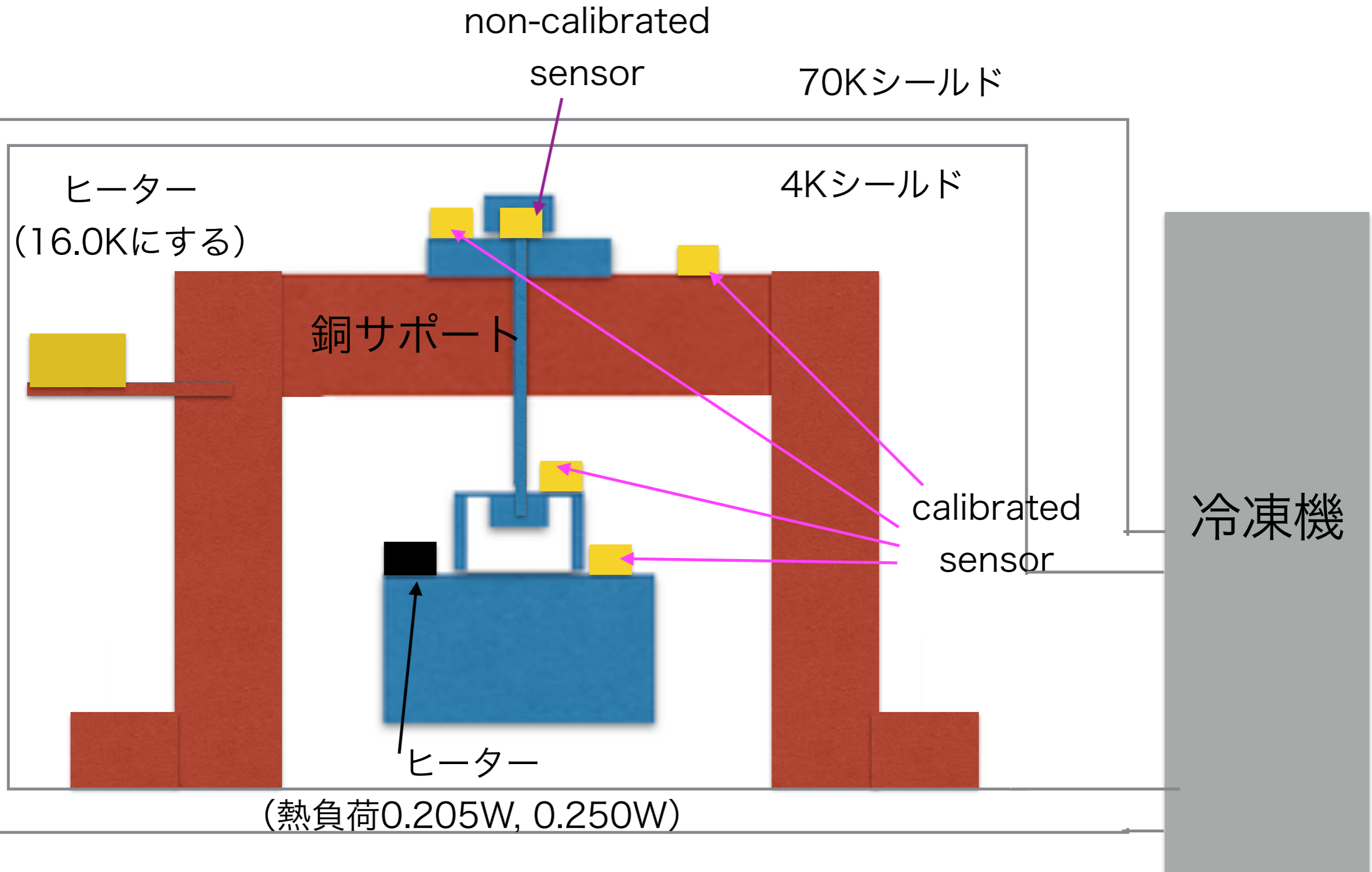
実験の動機

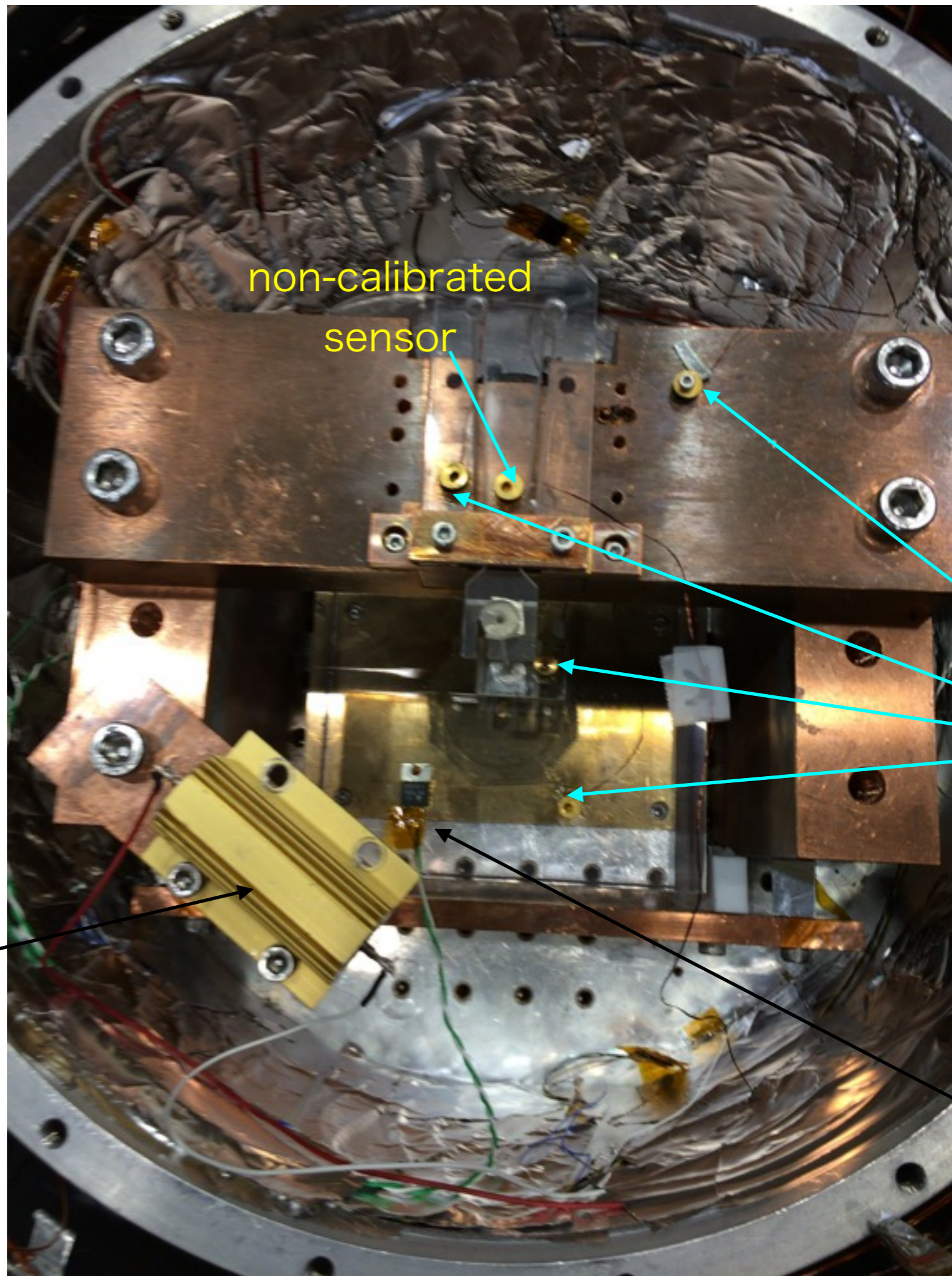
- ・ 実機を組み立てる前に、ミラーが本当に20K以下まで冷却できるかを知りたい→0.82Wの入熱を逃がすことができるかどうか
- ・ そのため、サファイア懸架系を簡易化したone fiber prototypeを構築し、熱負荷試験を行った。

One fiber prototype



実験セットアップ





4Kシールド

non-calibrated
sensor

calibrated
sensor

ヒーター

ヒーター

実験結果

熱負荷が0.205Wの場合

16.0K (non-calibrated)

70Kシールド

4Kシールド

16.0K

銅サポート

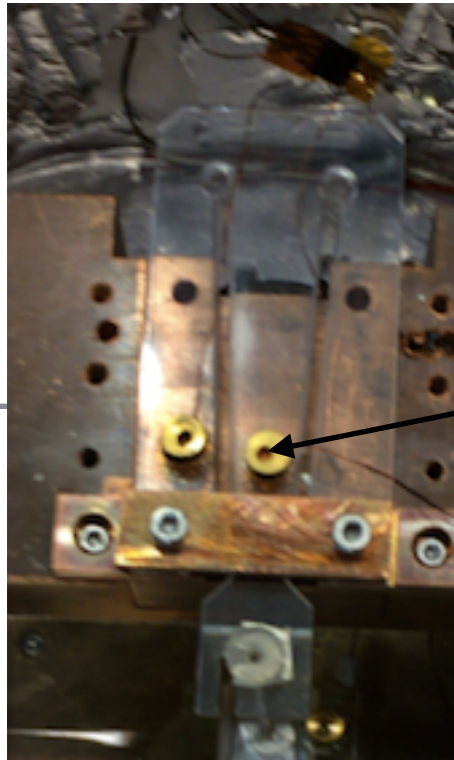
ヒーター

0.205W

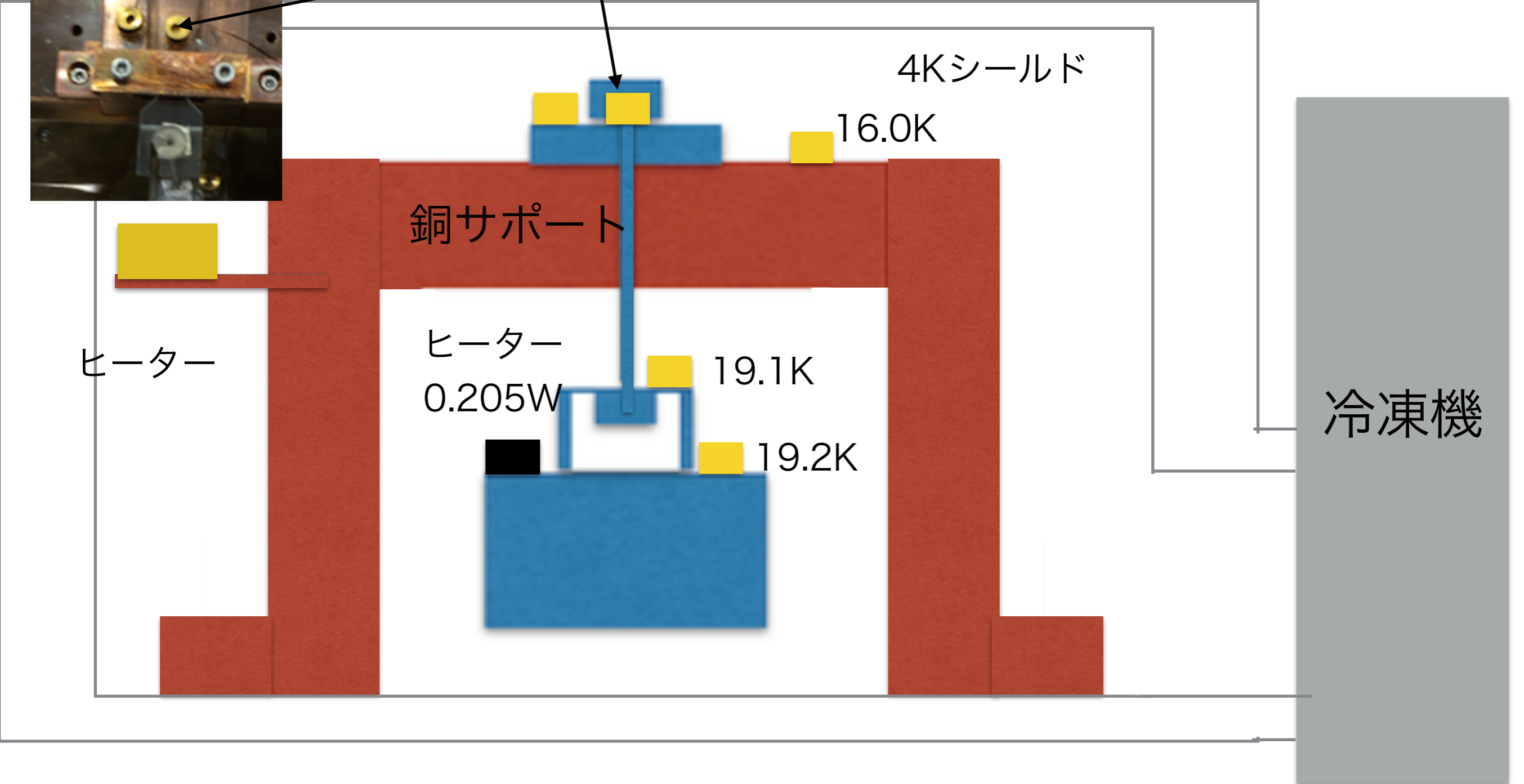
19.1K

19.2K

冷凍機



ヒーター



ブレード内の熱勾配

- ・ 熱負荷が0.205Wの場合と0.250Wの場合において、ブレードの温度は0.07Kの差が生じた。

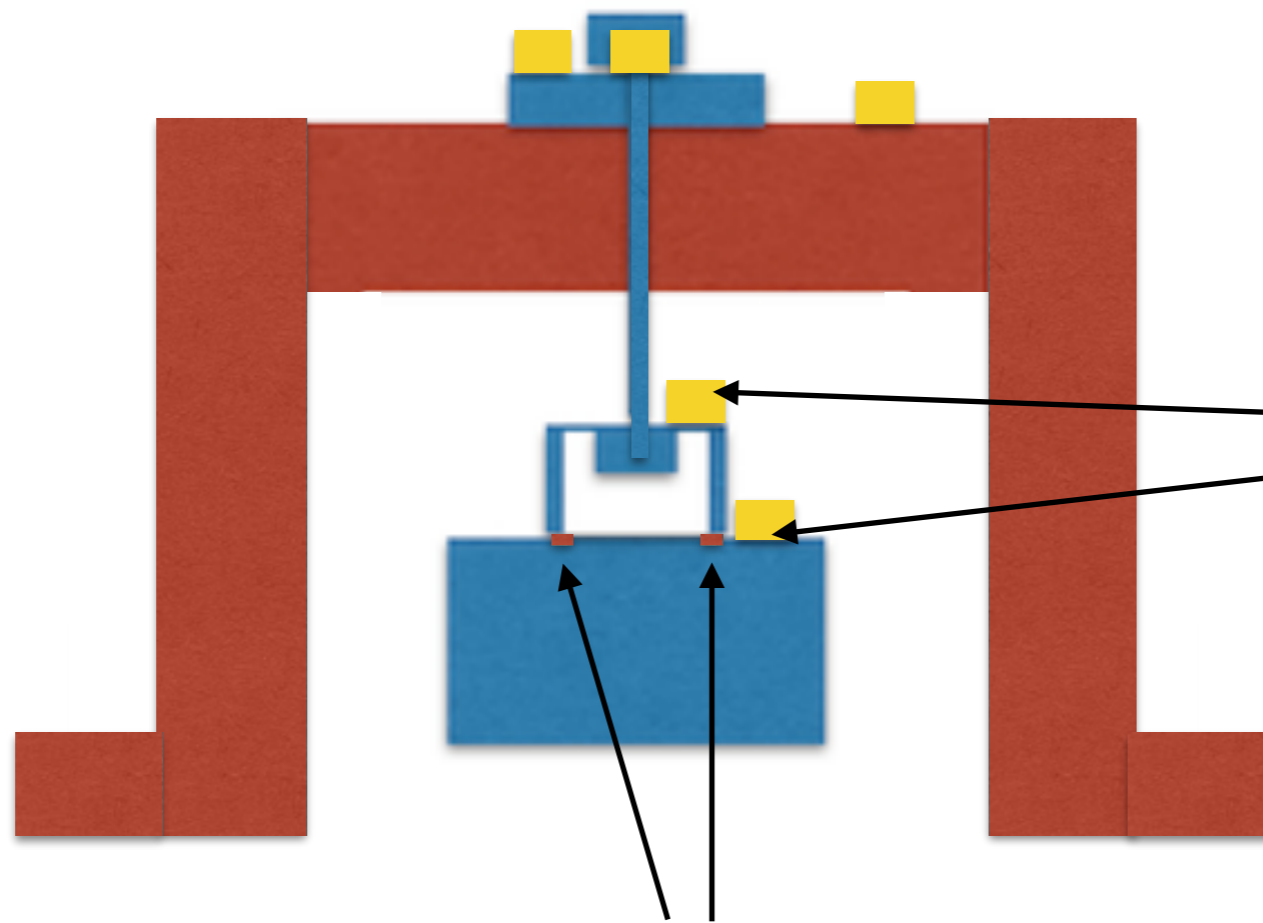
→0.45Wの入熱でブレードの温度が0.07K上昇

- ・ 0.205Wの入熱ではブレードの温度は0.32K上昇すると考えられる

→実際のブレードの温度は16.3K

HCBでつくく温度差

0.205Wの熱負荷のときと0.250Wの熱負荷のときの比較



HCB部分の温度差…
0.205Wのとき0.08K
0.250Wのとき0.09K
→0.45Wの熱負荷で0.01K
→0.205Wのときの実際の温度差0.05K

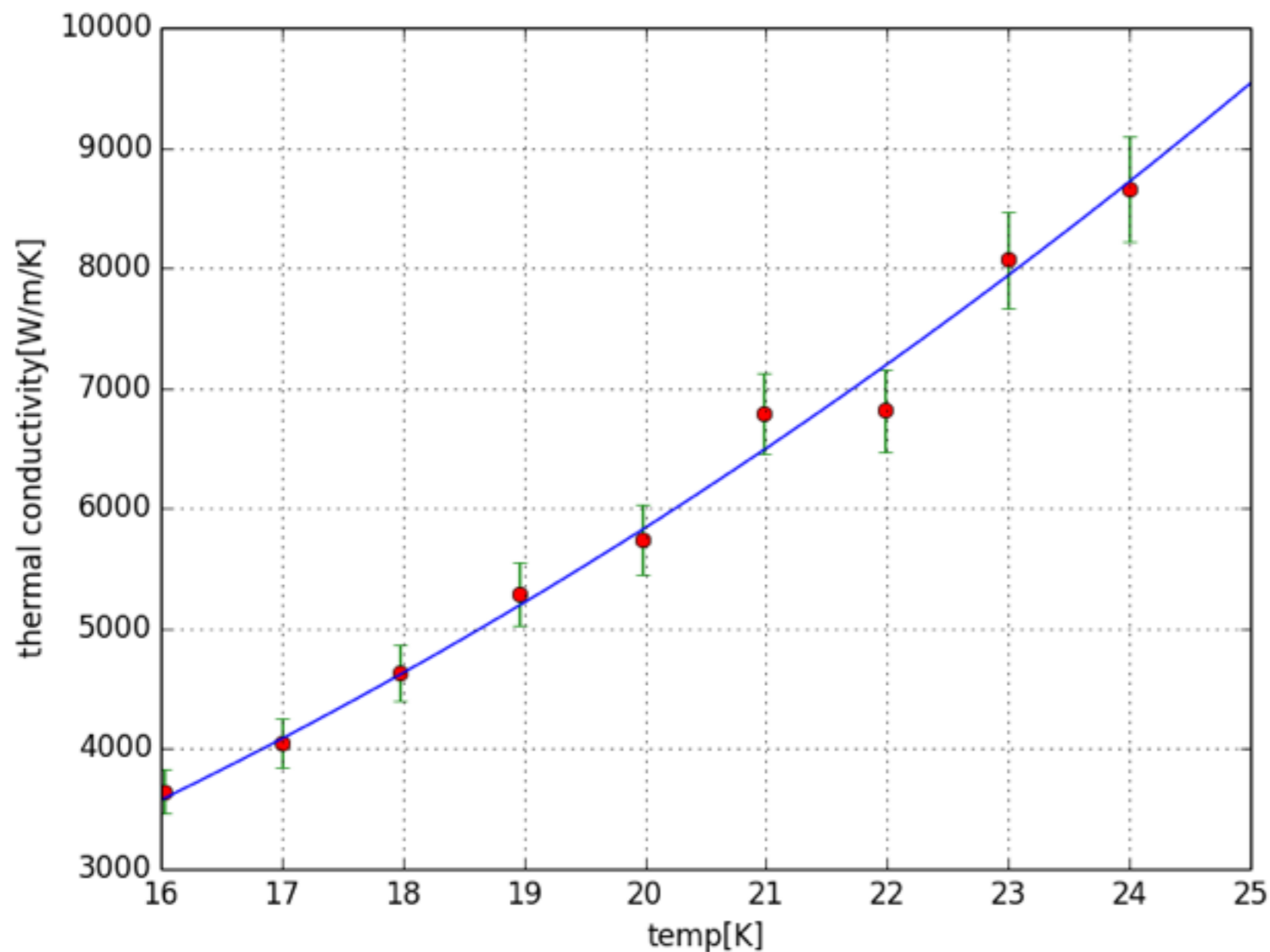
HCB面積...計3.6cm²

KAGRAのHCB面積...2本のファイバーにつき24cm² (本実験の7倍)

KAGRAのHCB部分への入熱...1箇所につき0.41W (本実験の2倍)

→KAGRAにおけるHCB部分の温度差は本実験のおよそ2/7倍 (0.02K)

サファイアファイバーの熱伝導率



$$\rightarrow \kappa = 7.98(\pm 0.39)T^{2.2}$$

[W/(m · K)]
(16~24Kで最小二乗法)

A. Khalaidovski, [Evaluation of heat extraction through sapphire fibers for the GW observatory KAGRA]
[Class. Quantum Grav. 31\(2014\) 105004.](#)

Indiumでつく温度差

- Indiumがないと仮定すると、ハンガー 19.1Kのとき、ファイバーの上ヘッドおよびブレードはファイバーの熱伝導率のグラフから17.0~17.2Kとなる。

$$W=0.205[\text{W}]$$

$$S=2.00 \times 10^{-6}[\text{m}^2]$$

$$l=0.090[\text{m}]$$

$$\kappa = 7.98(\pm 0.39)T^{2.2}$$

$$[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$$

$$T_{lower\ head}=19.1[\text{K}]$$

$$W = \int_{T_{upper\ head}}^{T_{lower\ head}} \kappa \frac{S}{l} dT$$

$$\longrightarrow T_{upper\ head}=17.1 \pm 0.1[\text{K}]$$

Indiumでつく温度差

- ・ one fiber prototypeにおいて、Indiumにおける温度差は上下合わせて0.7~0.9Kとなる。
- ・ 実機ではIndiumの面積は本実験の5~6倍、厚さは本実験の約半分であるから、実機のIndiumにおける温度差は本実験の約1/10（上下合わせて0.1K程度）となる。

KAGRAミラーの温度

$$W = \int_{T_{upperhead}}^{T_{lowerhead}} \kappa \frac{S}{l} dT$$

$$W = 0.205 [\text{W}]$$

$$S = 2.00 \times 10^{-6} [\text{m}^2]$$

$$l = 0.350 [\text{m}]$$

$$\kappa = 7.98 (\pm 0.39) T^{2.2} \longrightarrow T_{lowerhead} = 22.5 \sim 23.0 [\text{K}]$$

$$[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$$

$$T_{upperhead} = 16.3 [\text{K}]$$

→ KAGRAミラーは22.6~23.1K

結論と考察

- ・ KAGRAのミラーは0.82Wの熱を吸収したとき22.6~23.1Kまで上がり、KAGRAの要求（20K以下）を満たさない。
- ・ KAGRAの要求を満たすためには、腕共振器へ入射するレーザーパワーを412Wから210Wまで下げなければならない。

KAGRA まとめと展望

まとめ

- ・ one fiber prototypeを用いて、KAGRAのミラーの温度を推定した。
- ・ 今回の実験から、ミラーに0.82Wの入熱があるとき、22.6~23.1Kになるという結果を得た。
- ・ これはKAGRAの要求（ミラーが20K以下）を満たしていないので、これを満たすには腕共振器に入射するレーザーパワーを減らす必要がある。

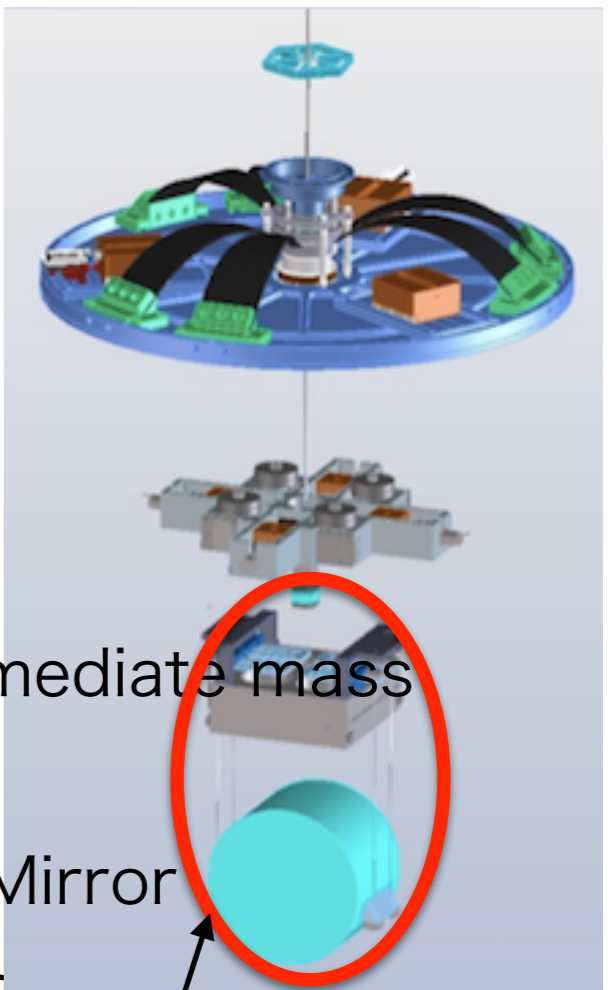
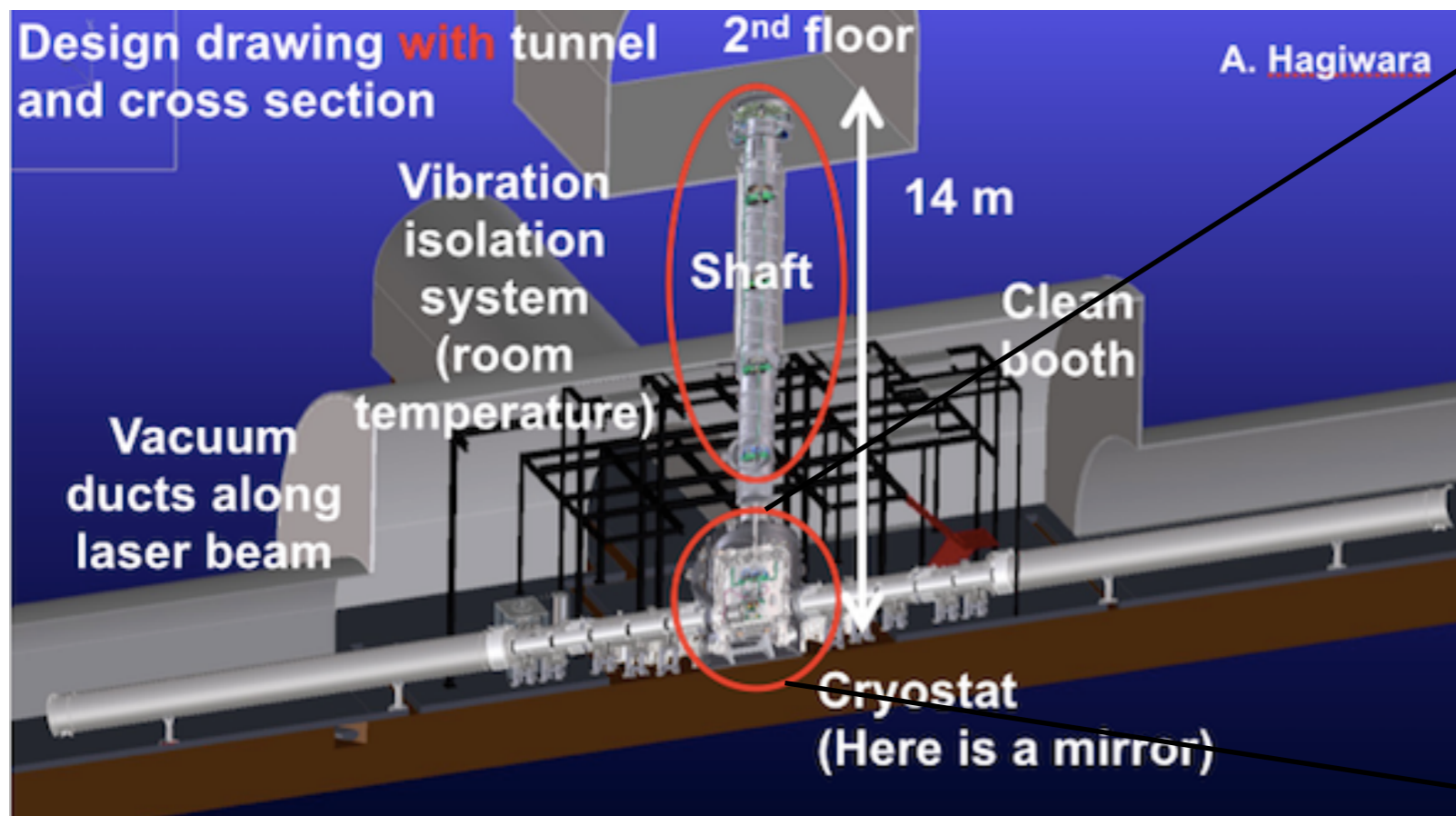
今後の課題

- ・ cryogenic payload全体での熱負荷試験を実施する。

Thank you!!!

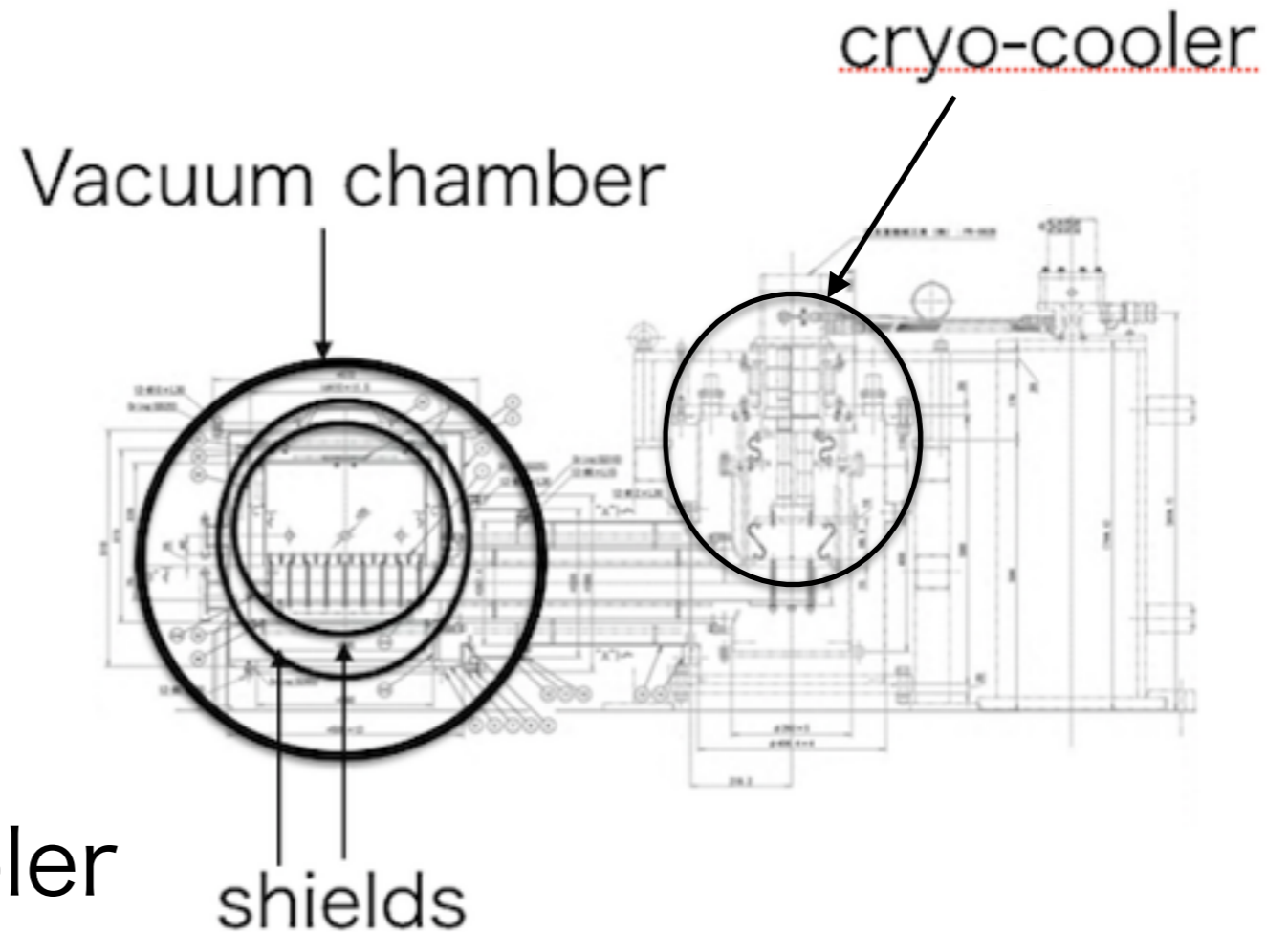
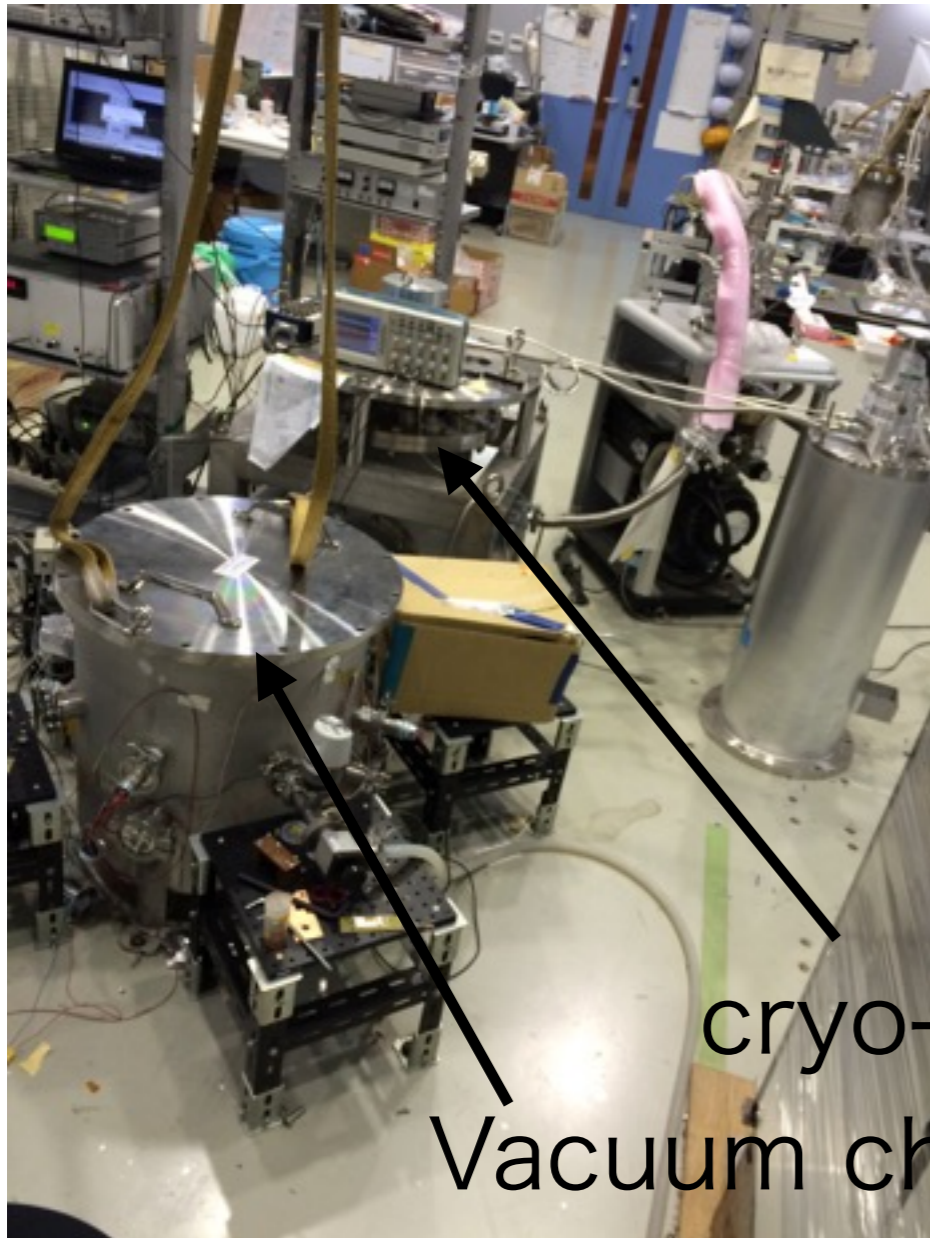
Cryogenic payload

低温懸架系



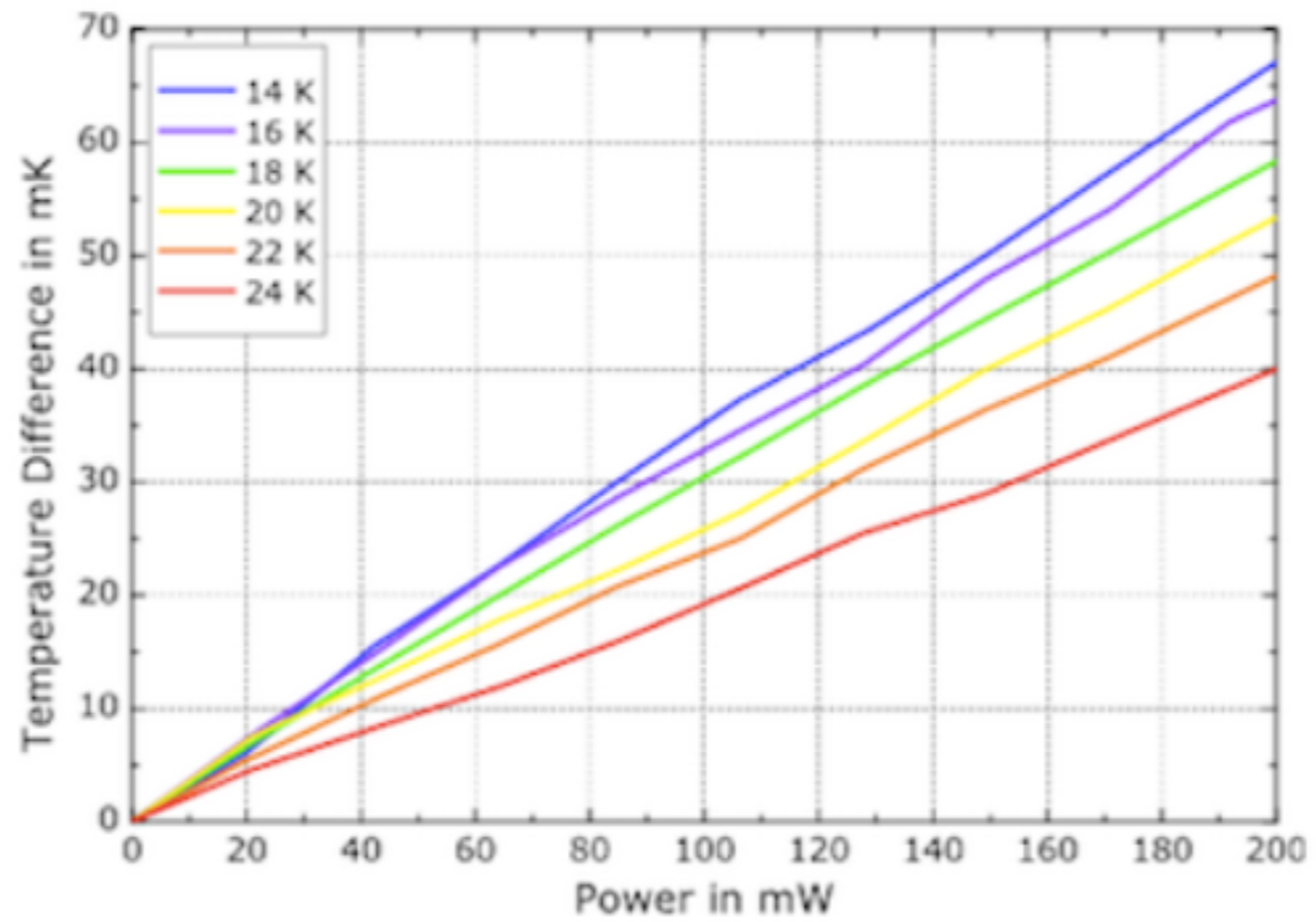
サファイア懸架系

実験装置



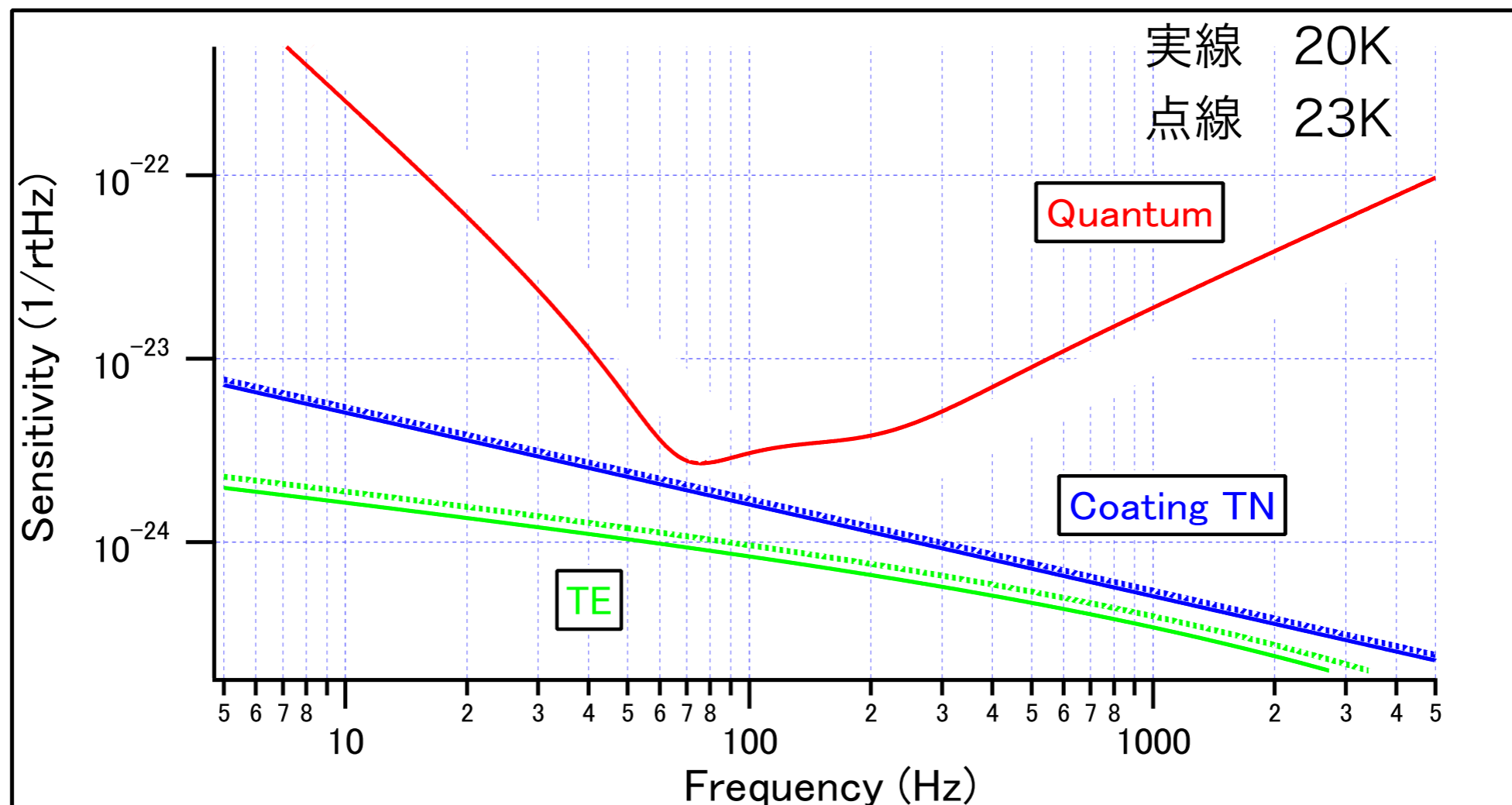
真空 (0.001Pa未満) にして、cryo-coolerで5 Kまで冷却する

Indium

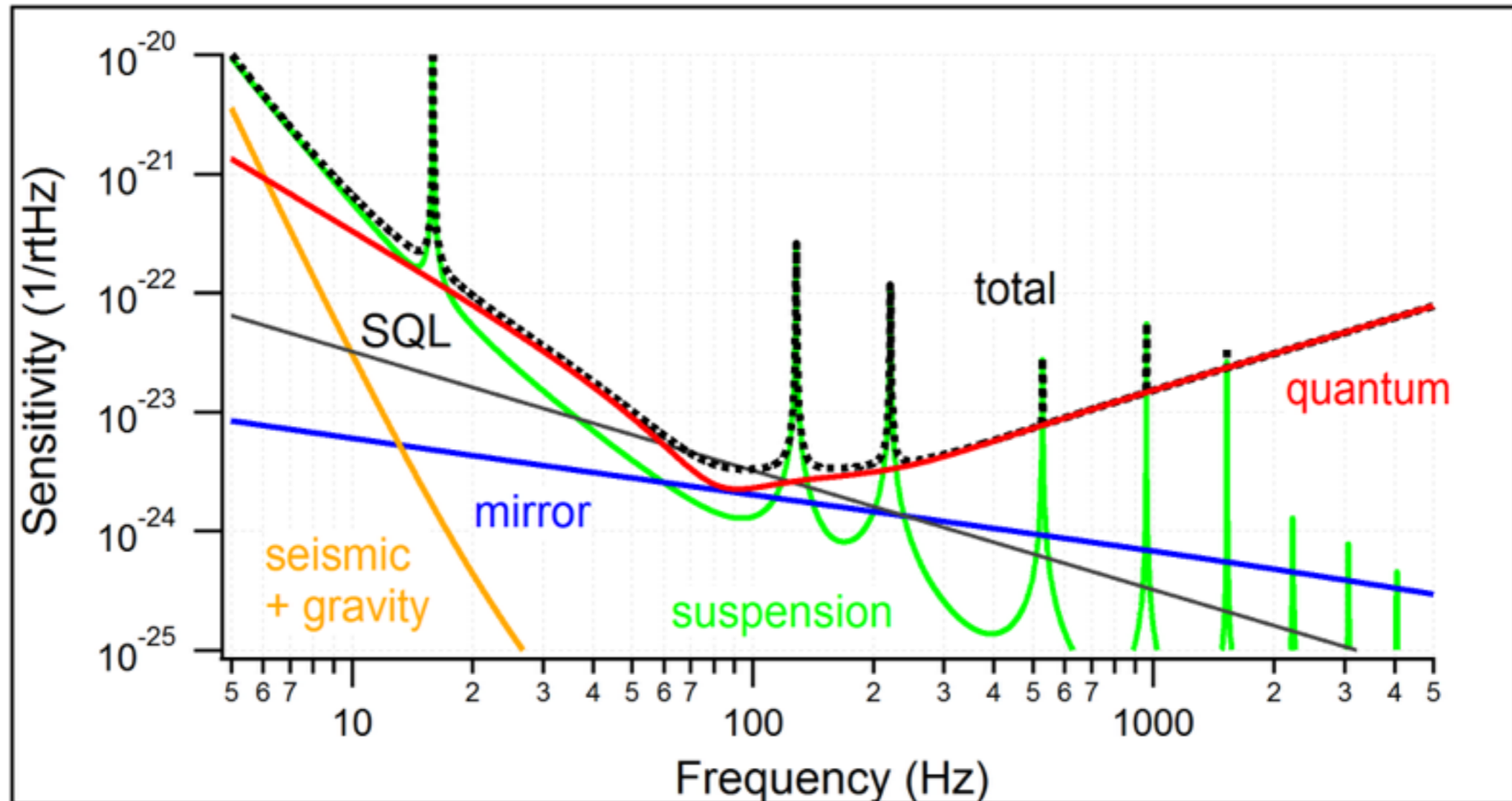


KAGRAミラーの温度

- KAGRAでは、ミラーが22.5Kになっても、熱雑音は観測帯域において感度を制限しない
→ミラーは十分冷却可能である。



感度曲線



出典…KAGRA HP

KAGRA ミラーの温度

- ・ KAGRAにおいて、重力波を検出できる中性子連星までの距離範囲…ミラーが20Kで250Mpc、23Kで230Mpc

mirrorの熱吸収

- $825\text{W} \cdots 412.5\text{W} \times 50\text{ppm/cm} \times 30\text{cm}$
 $+ 400\text{kW} \times 0.5\text{ppm} = 0.62 + 0.20$