



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

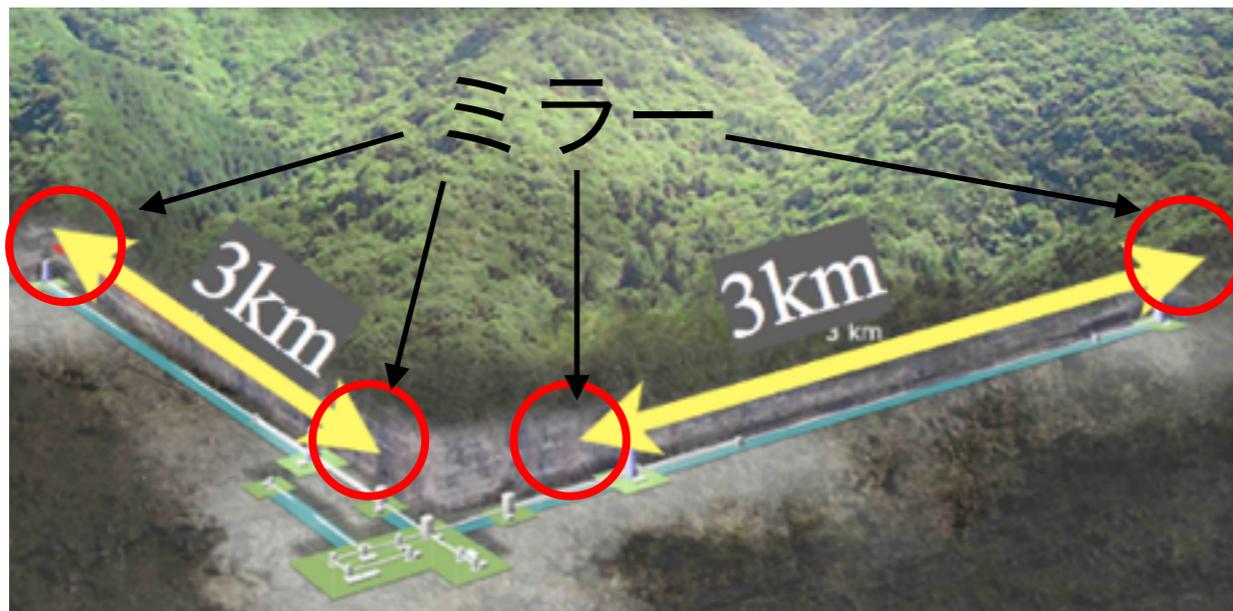
東京大学 宇宙線研究所

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

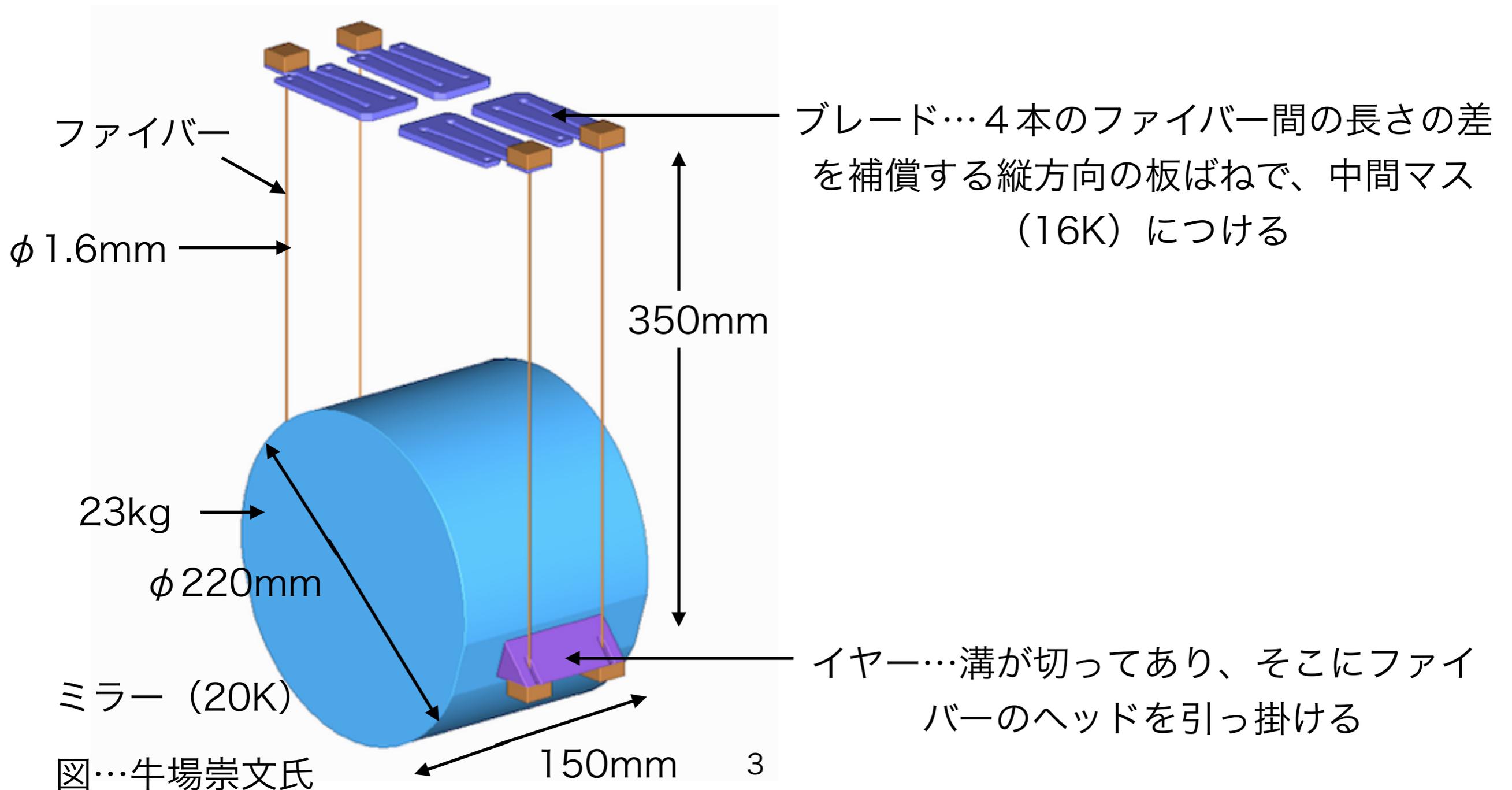
KAGRAの特徴

- 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

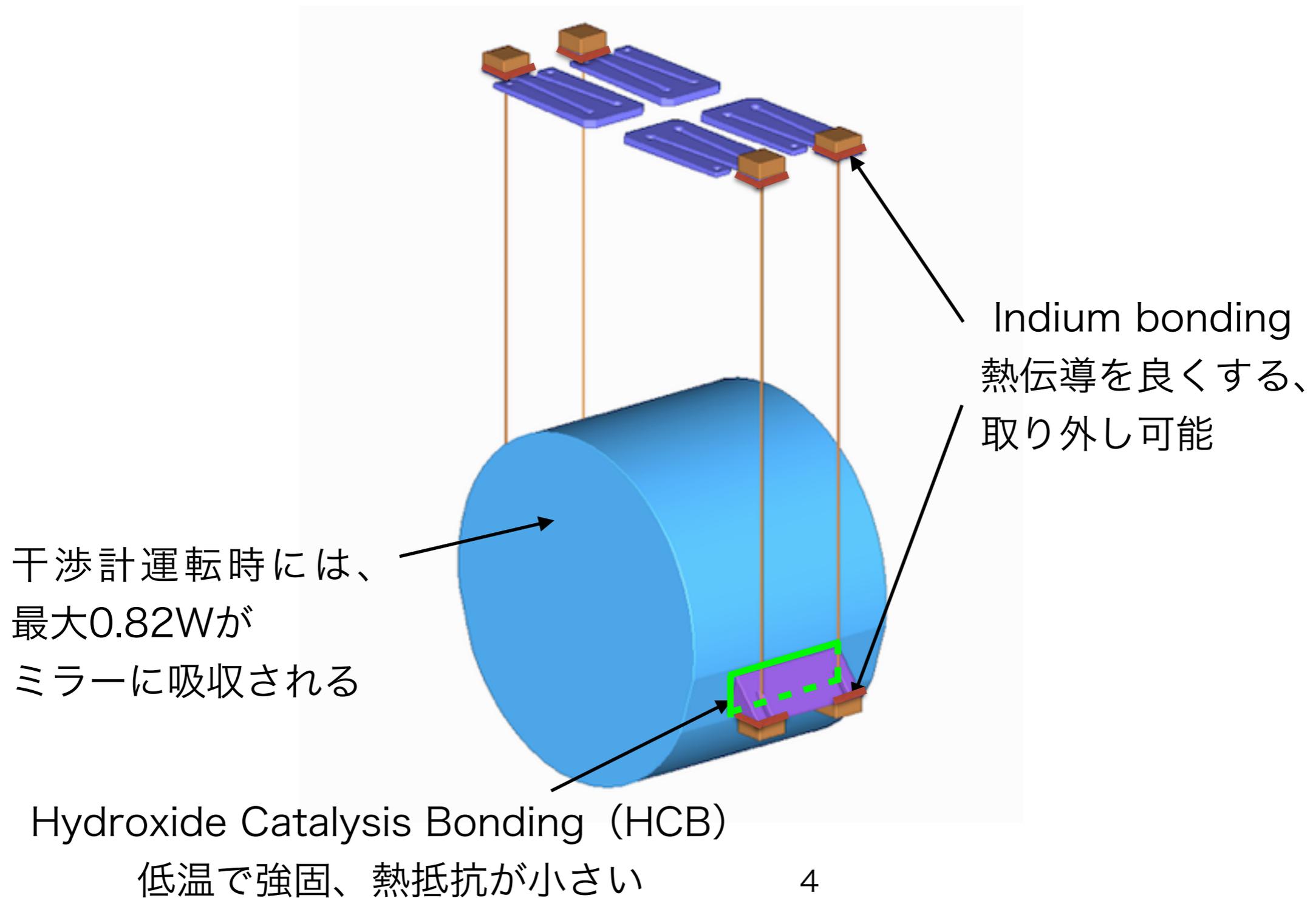


サファイア懸架系

全てサファイアで作られる (低熱雑音、高熱伝導率@低温)



サファイア懸架系



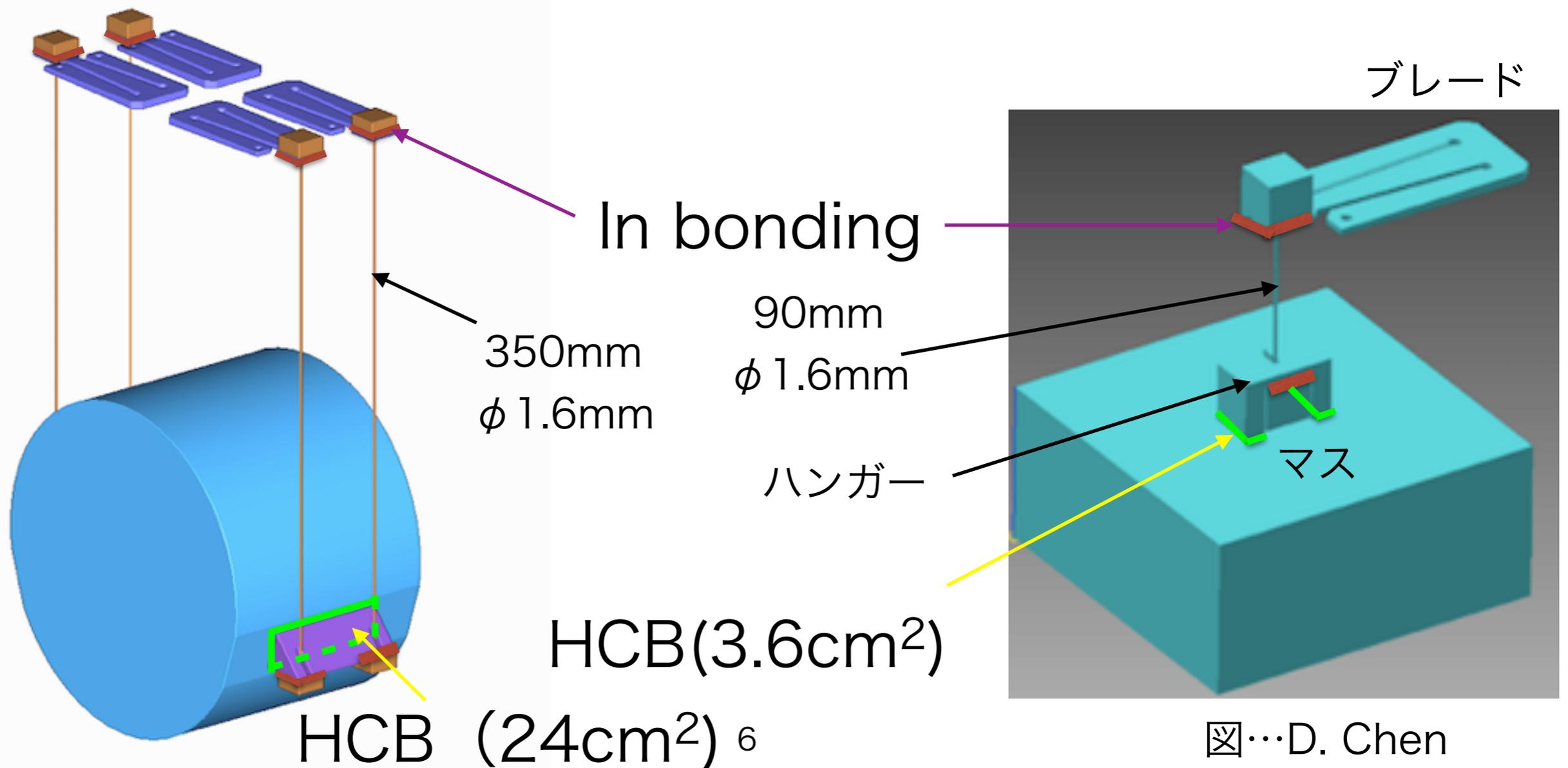
実験の動機

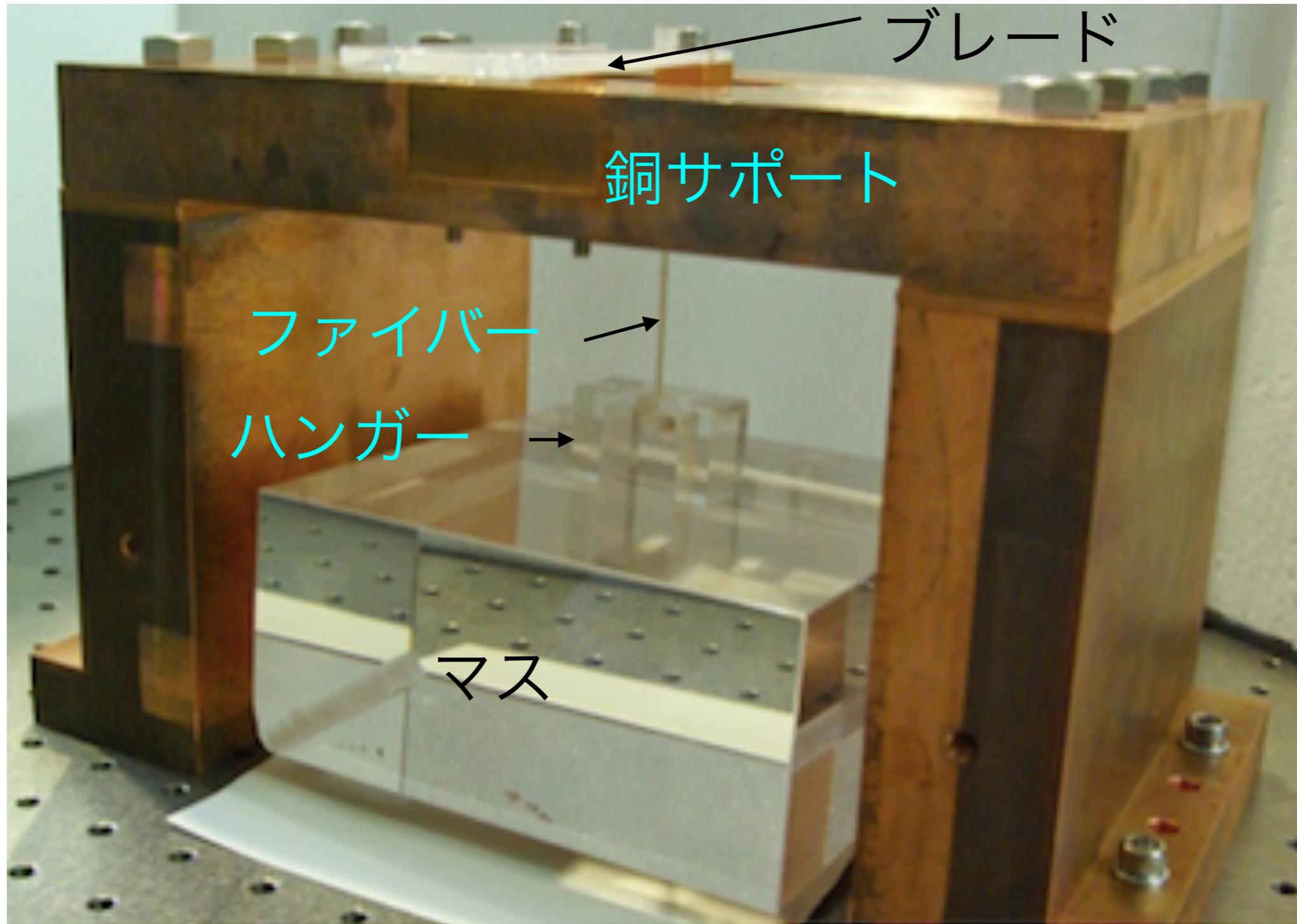
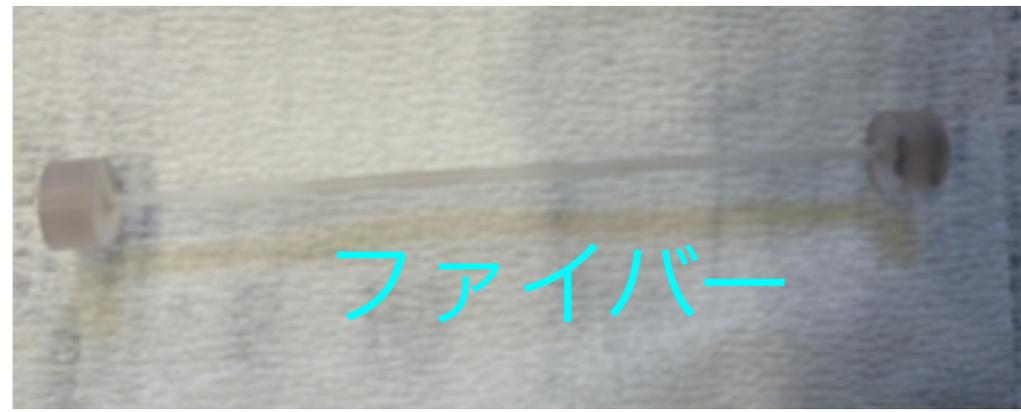
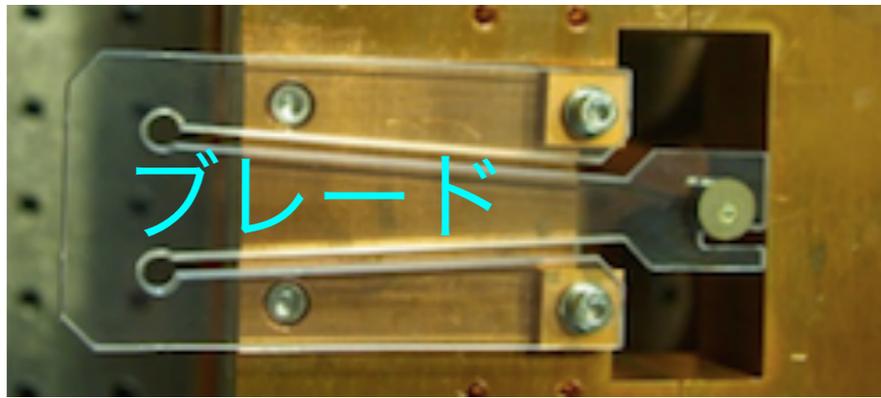
- ・ 実機を組み立てる前に、ミラーが本当に20K以下まで冷却できるかを知りたい→腕共振器に412.5Wが入射するが、このときミラーに入射する0.82Wを逃がすことができるかどうか
- ・ そのため、サファイア懸架系を簡易化したone fiber prototypeを構築し、熱負荷試験を行った。

出典:<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0264-9381/29/12/124007/>

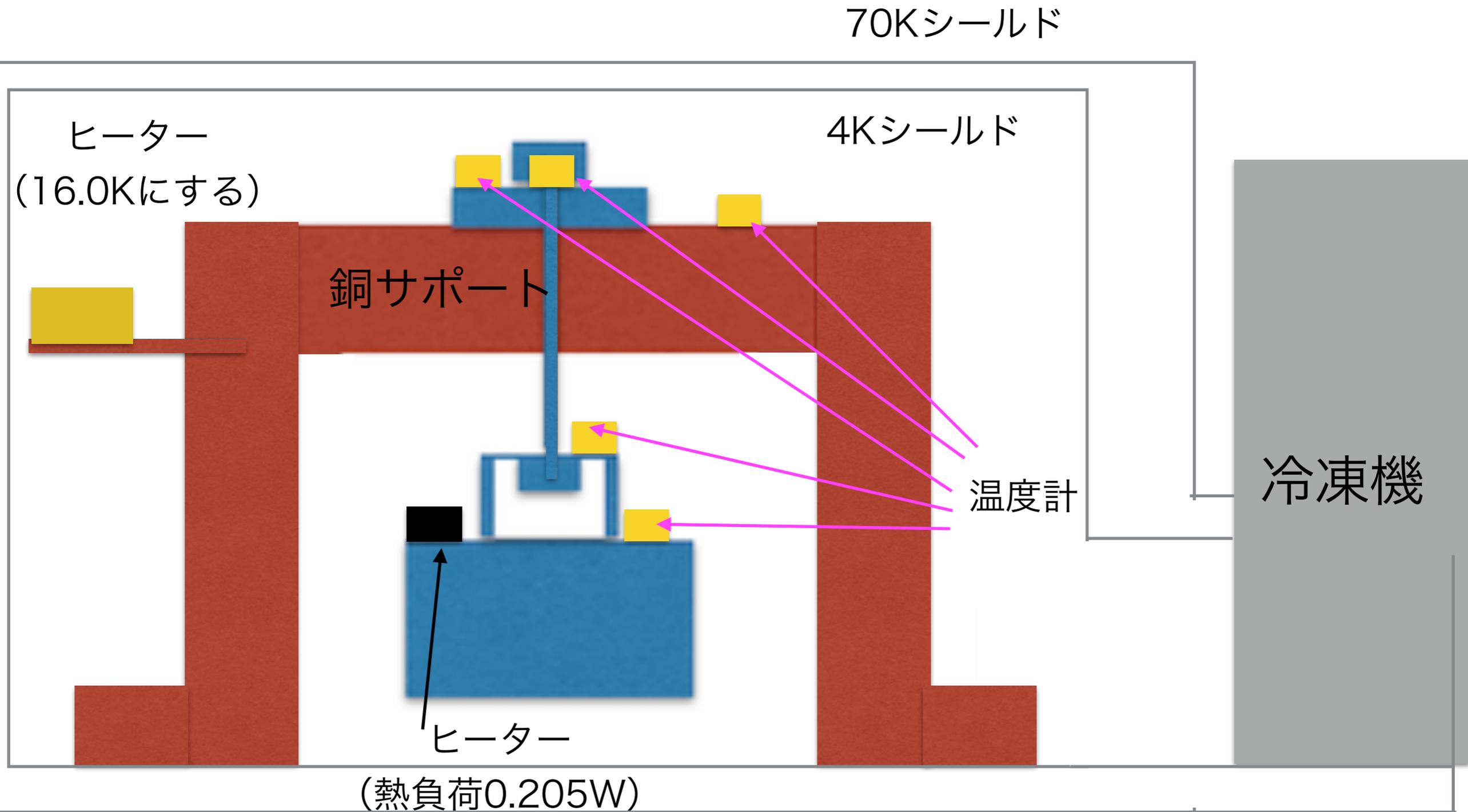
One fiber prototype

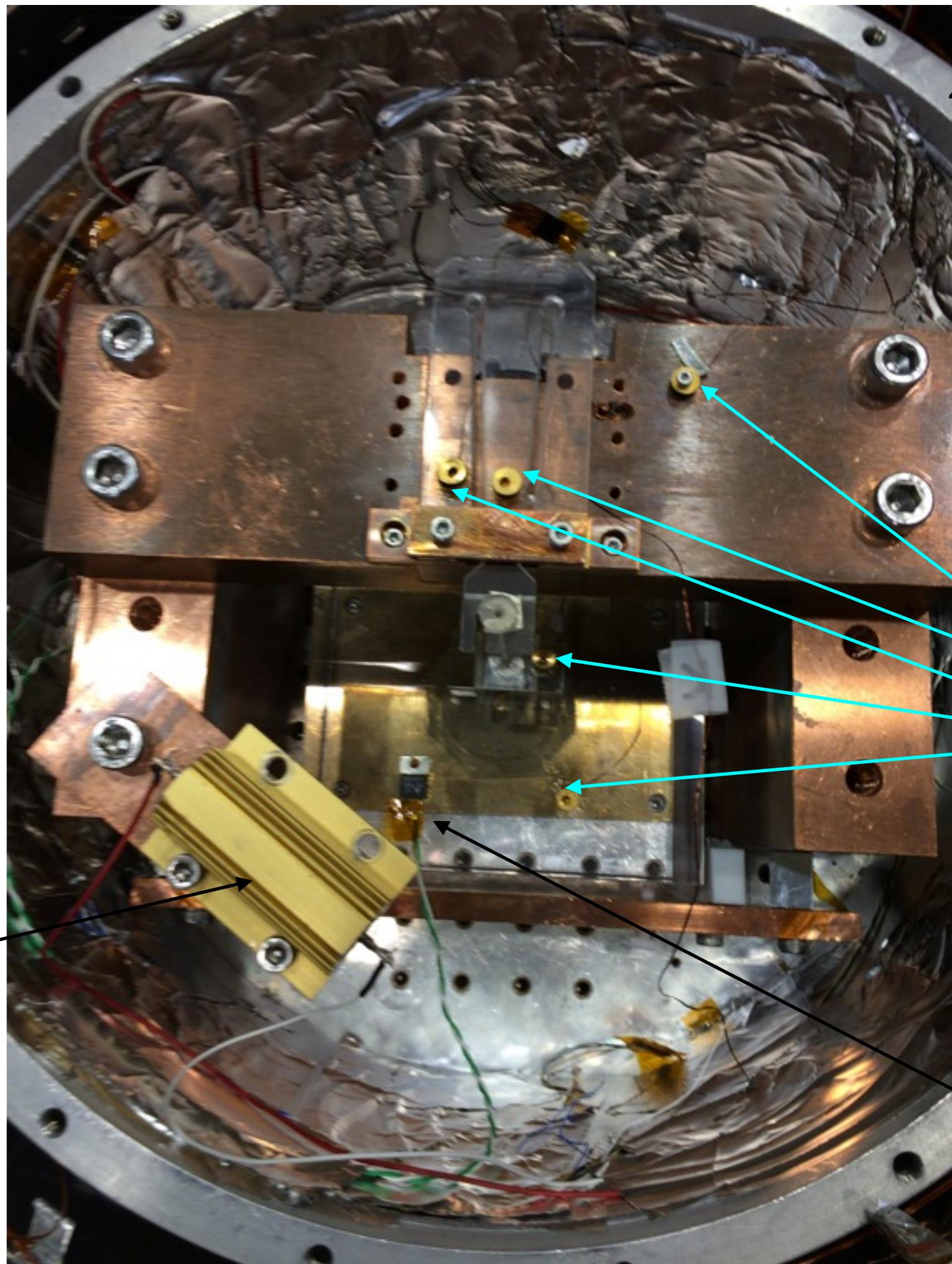
- ファイバー1本とブレード1つで5.6kg（ミラーの質量の1/4）のマス进行吊るす（組立が容易）。
- 全てサファイアで、かつ接合部の要素が含まれている。





実験セットアップ





4Kシールド

温度計

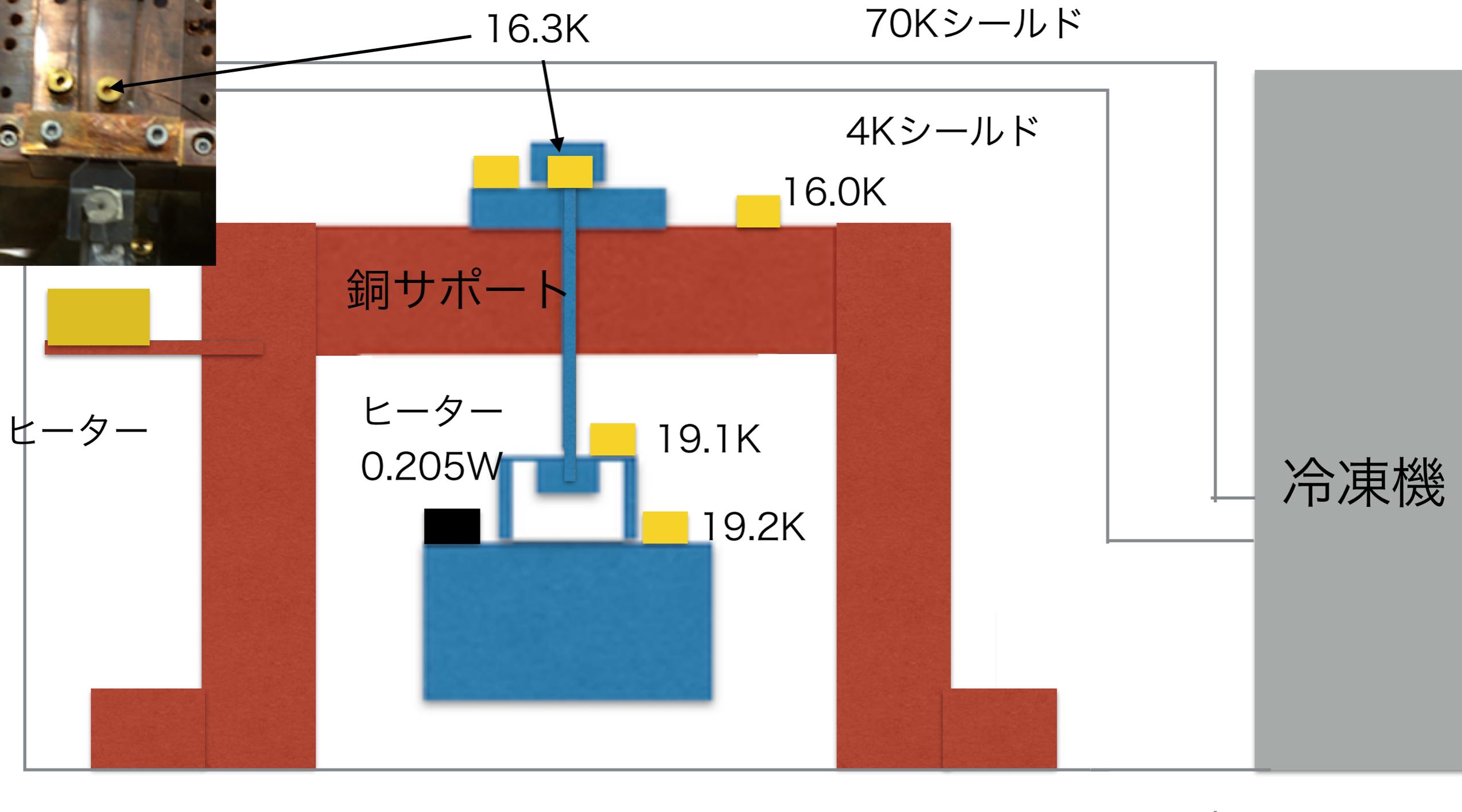
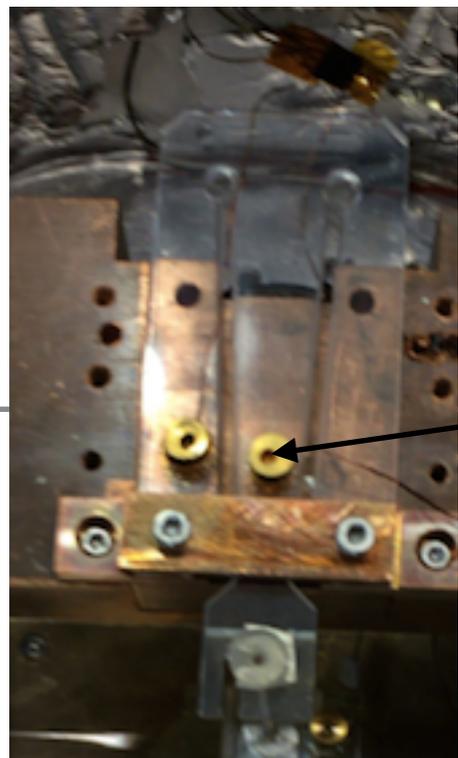
ヒーター

ヒーター

実験手順

- ・ ここではファイバーが1本なので、マスにつけたヒーターに0.205W（規定の0.82Wの1/4）を与えた。
- ・ 黄のヒーターを用いて、銅サポートを中間マスと同様、16.0Kに制御した。
- ・ 接合部の面積がKAGRAと異なるので、KAGRAの場合に焼き直すため、各要所に温度計をつけてモニターした。

実験結果



KAGRAミラーの温度

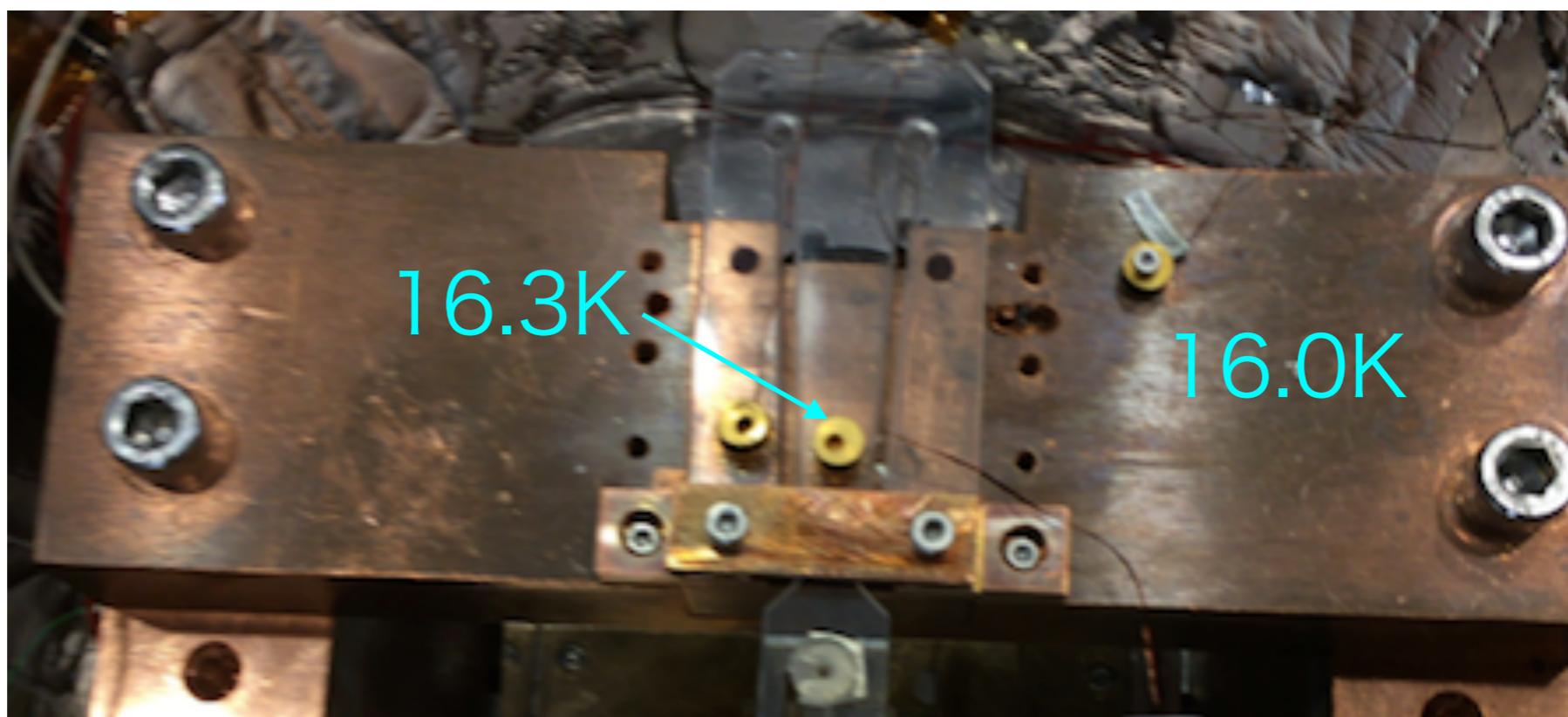
one fiber prototypeにおける

- ・ (1)銅サポートとブレード先端の温度差
- ・ (2)HCBによる温度差
- ・ (3)インジウムによる温度差
- ・ (4)ファイバーによる温度差

を求める→KAGRAに焼き直す。

(1)銅サポートとブレード先端の温度差

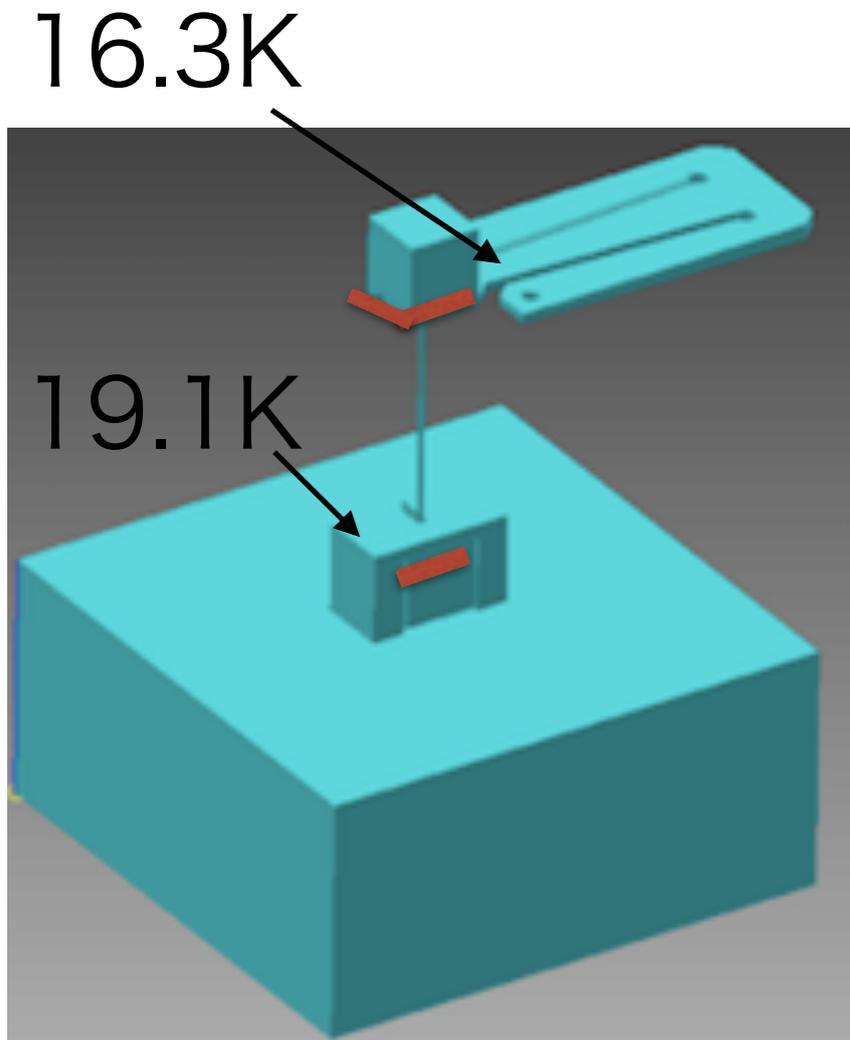
- 銅サポートの温度が16.0Kのとき、熱負荷0.205Wを与えると、ブレード先端の温度は16.3K→温度差0.3K



(2) HCBによる温度差

- ・ one fiber prototypeにおいて、0.205Wの熱負荷があるとき、HCBにおける温度差は0.05K

(3) Indiumによる温度差



- ・ この2箇所間の温度差はファイバーとIndiumからなる。
- ・ ファイバーの熱伝導率は先行研究で測定済みなので、そこからファイバーにおける温度差を求められる。
- ・ Indiumにおける温度差を求めると、上下合わせて0.7K~0.9Kとなる（詳細は次ページ）。

(3) Indiumによる温度差

- Indiumがないと仮定すると、ファイバー下ヘッドが19.1Kのとき、ファイバーの上ヘッドは17.0~17.2Kとなる→16.3Kとの差は0.7K~0.9K

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

$$S=2.01 \times 10^{-6}[\text{m}^2]$$

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

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

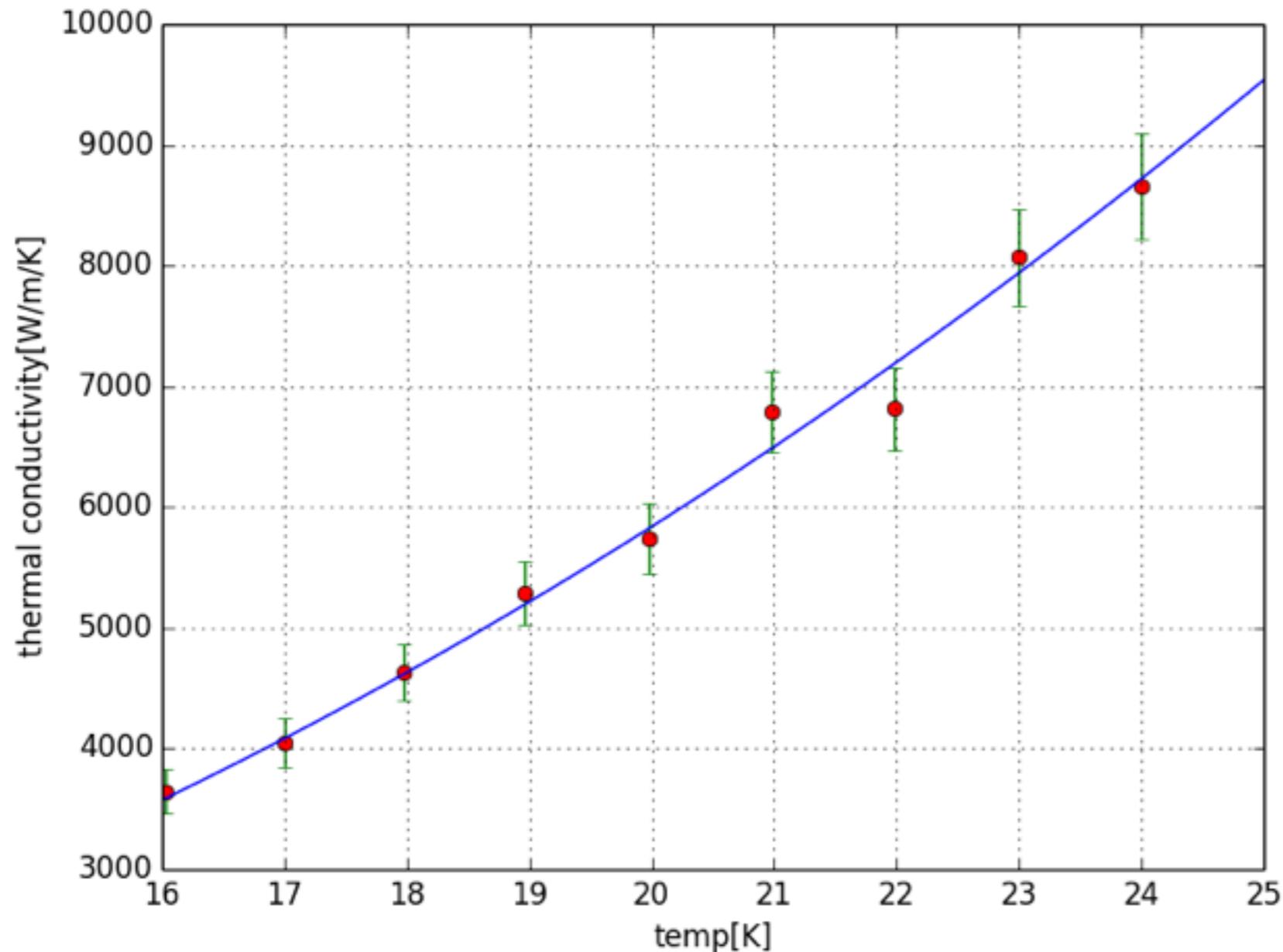
$$[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$$

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

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

$$\longrightarrow T_{\text{upper head}}=17.0 \sim 17.2[\text{K}]$$

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

KAGRAミラーに換算

- ・ (1)中間マス（銅サポート）とブレード先端の温度差…one fiber prototypeと同じ→温度差0.3K
- ・ (2)HCBによる温度差…one fiber prototypeでは0.05Kだが、KAGRAではHCB面積が本実験の7倍、入熱が本実験の2倍なので、0.05Kの2/7→温度差0.02K
- ・ (3)Indiumによる温度差…one fiber prototypeでは0.7~0.9Kだが、KAGRAではIndiumの面積は本実験の5~6倍（約3cm²）、厚さは本実験の約半分（0.1mm）であるから、実機のIndiumにおける温度差は本実験の約1/10となる→上下合わせて温度差0.1K程度

KAGRAミラーの温度

- ・ (4)ファイバーでつく温度差… 先行研究の熱伝導率を使用。

Indiumによる温度差を無視すると

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

$W = 0.205 [\text{W}]$
 $S = 2.01 \times 10^{-6} [\text{m}^2]$
 $l = 0.350 [\text{m}]$
 $\kappa = 7.98 (\pm 0.39) T^{2.2} \longrightarrow T_{lowerhead} = 22.5 \sim 23.0 [\text{K}]$

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

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

(1)~(4) → KAGRAミラーは22.6~23.1K

結論

- ・ 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。

考察

- ・ 温度が上がると熱雑音が大きくなってしまふ。
- ・ 腕共振器に入るパワーを下げると温度は保てるが量子雑音が大きくなる→最適化が必要
- ・ 温度を20Kに保つのが最もよい。

	パワーそのまま (23K)	パワーを下げる (20K)
binary range (本来250Mpc)	230Mpc	240Mpc
イベント数	本来の22%減 年8回	本来の11%減 年9回

出典:K. Somiya[Detector configuration of KAGRA - the Japanese cryogenic gravitational-wave detector -]

ArXiv:1111.7185v2(2012)

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。

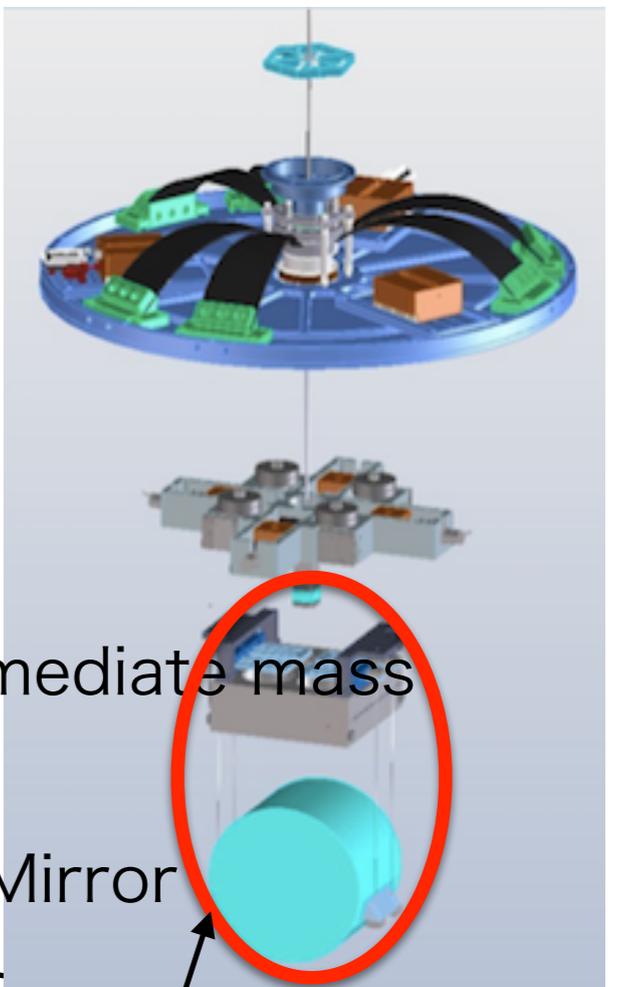
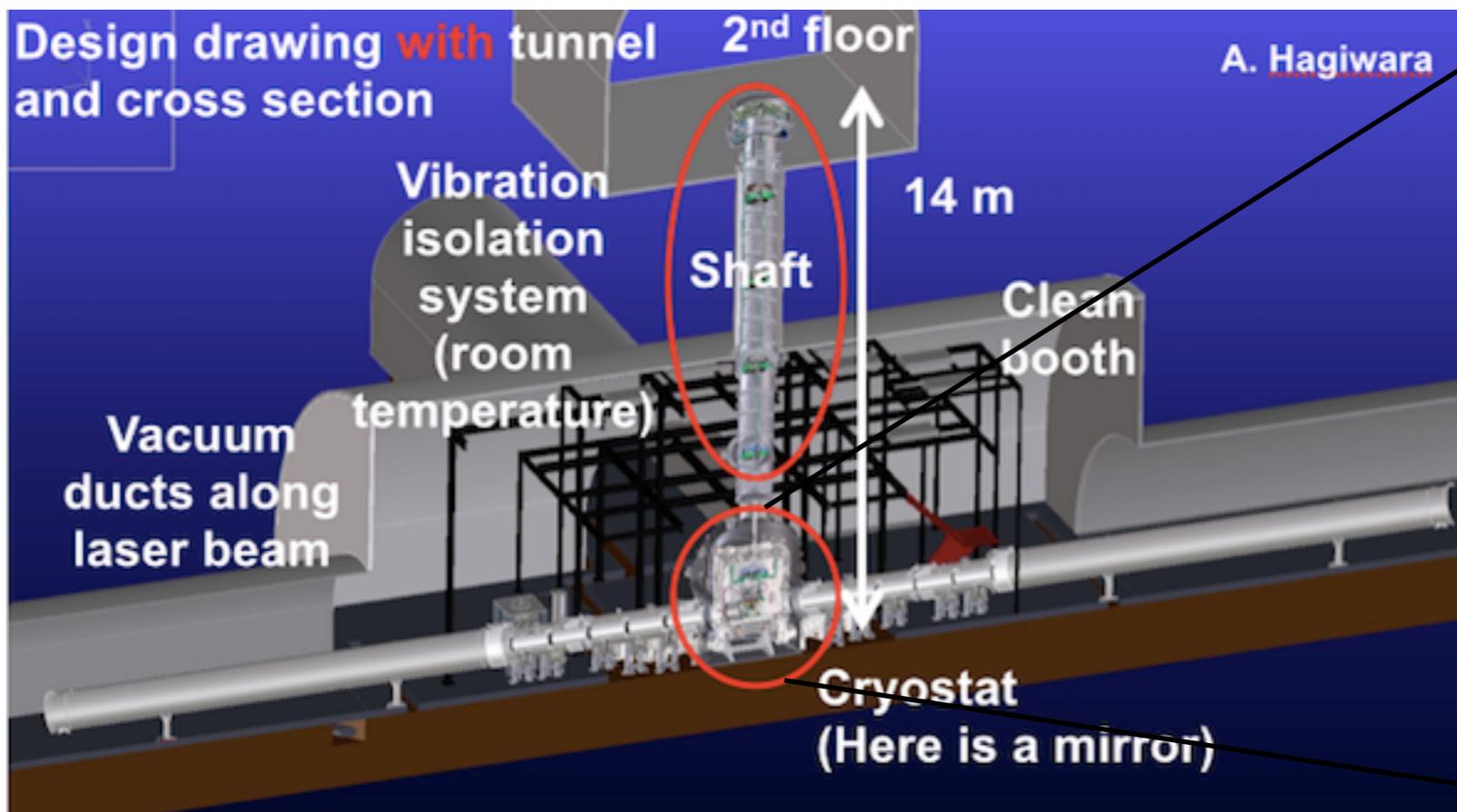
今後の課題

- ・ cryogenic payload全体での熱負荷試験を実施する。

Thank you!!!

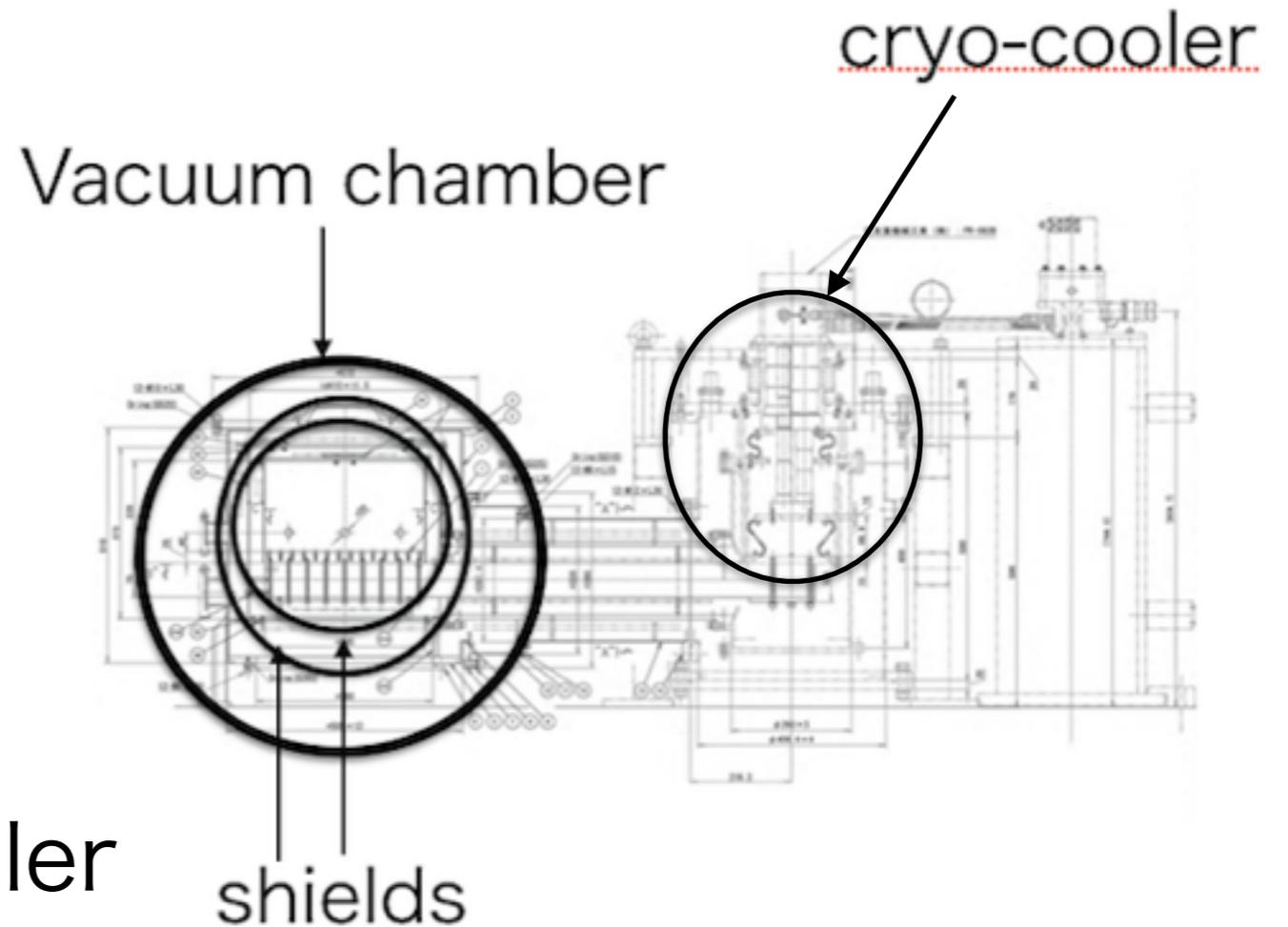
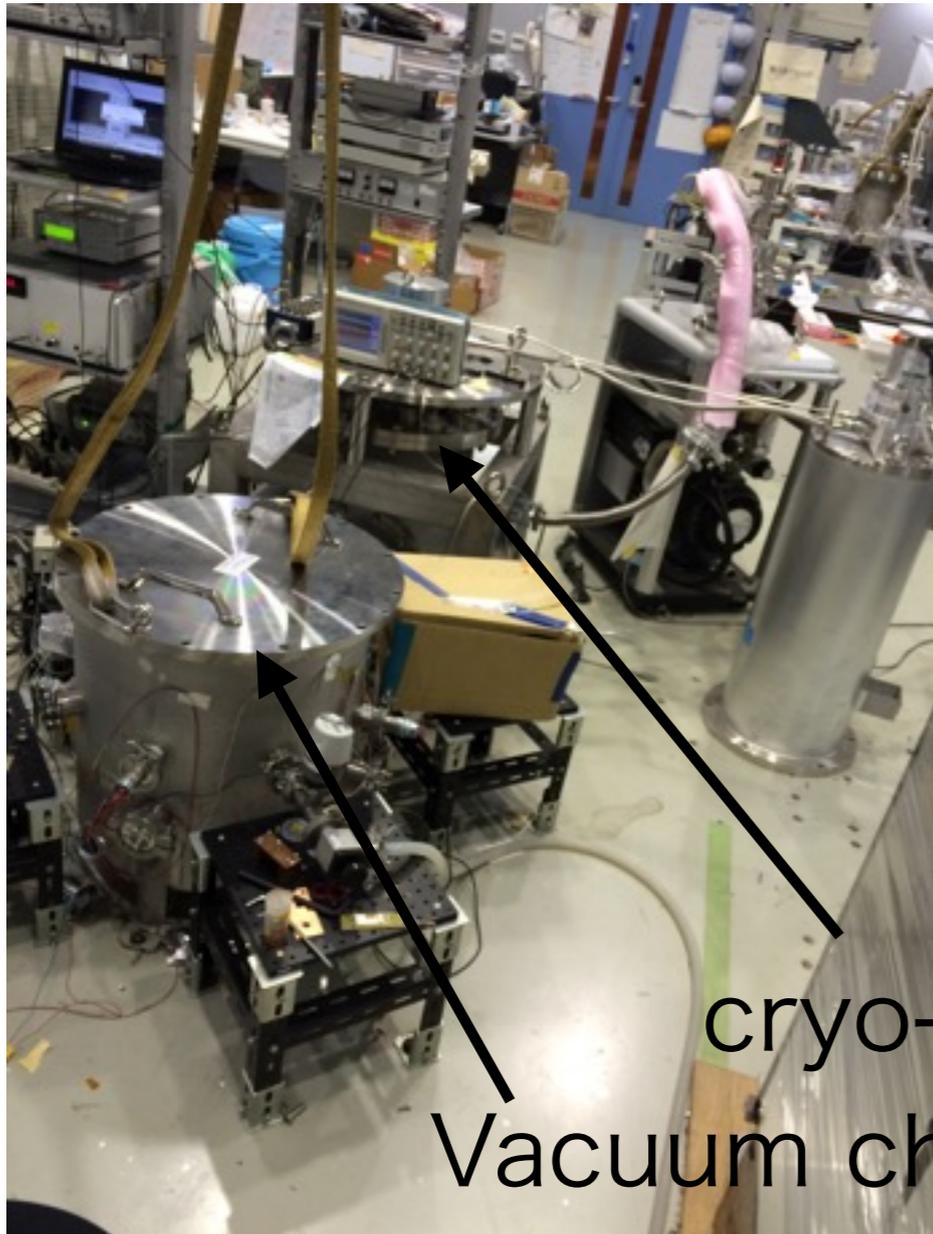
Cryogenic payload

低温懸架系



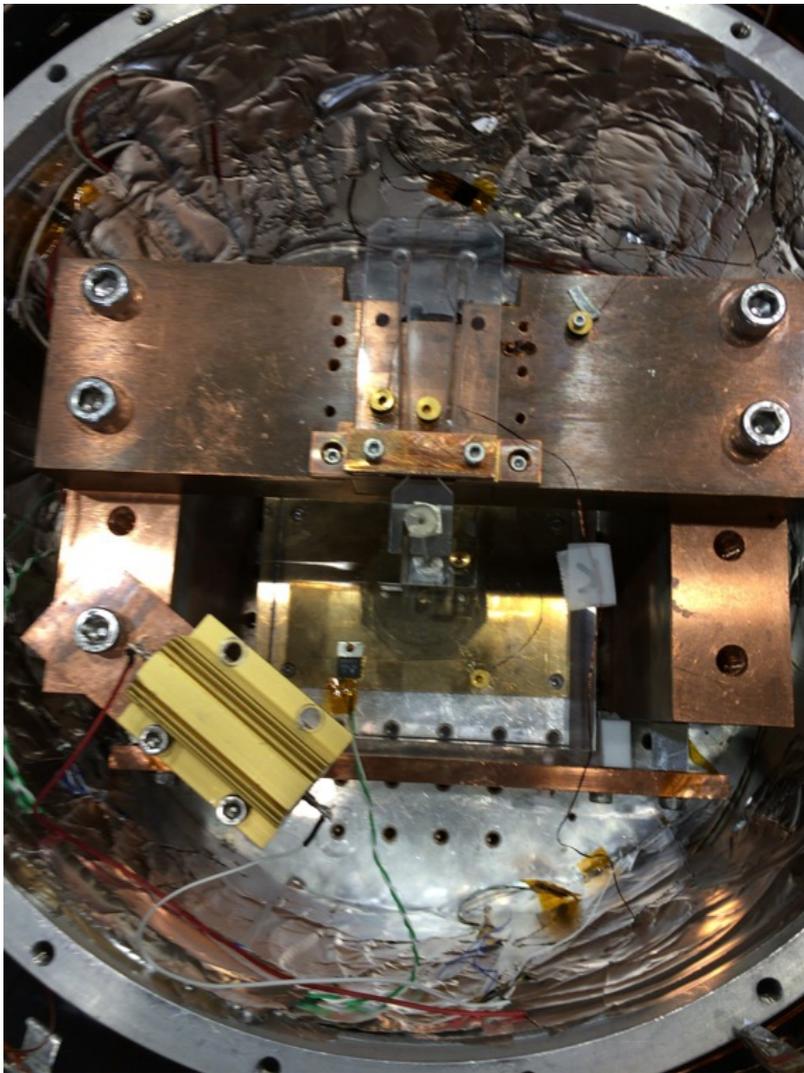
サファイア懸架系

実験装置

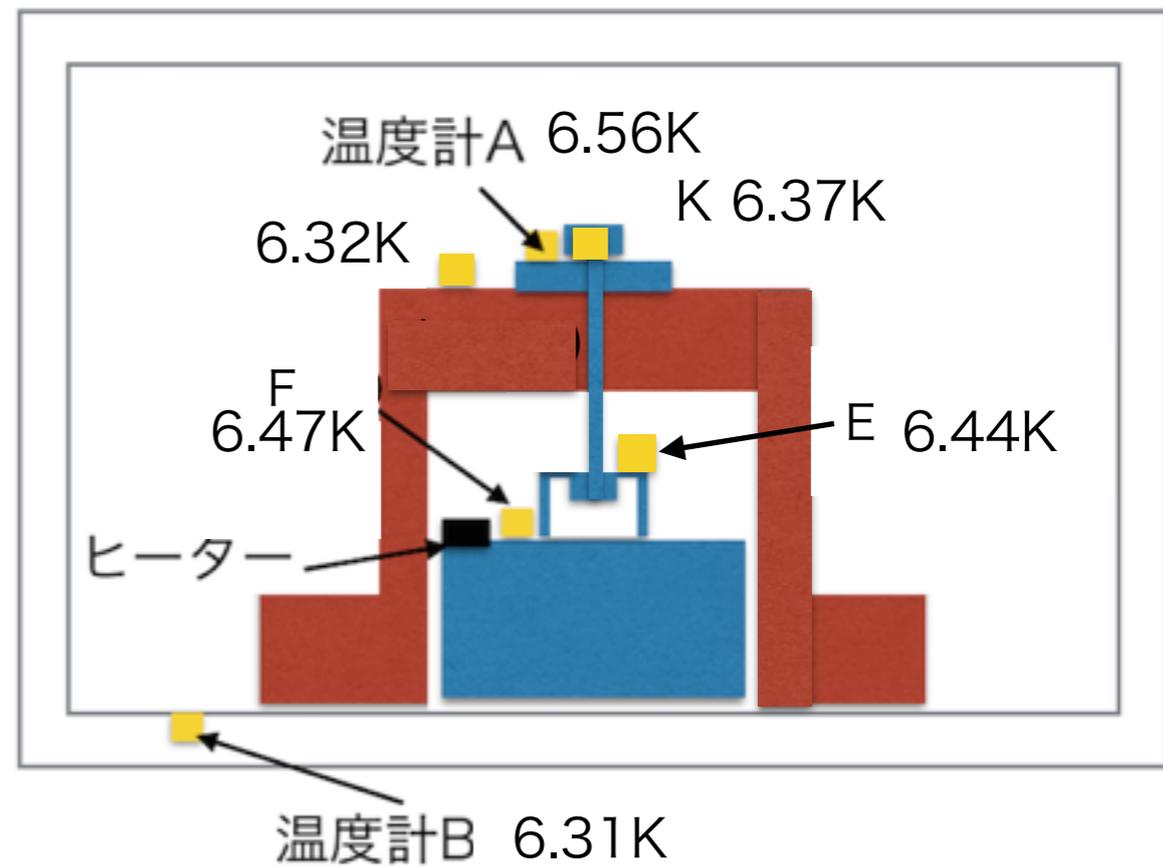


真空 (0.001Pa未満) にして、cryo-coolerで5 Kまで冷却する

heat load(6th)



冷却後



ブレードの温度

- ブレードの温度計はnon-calibrated
- 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。

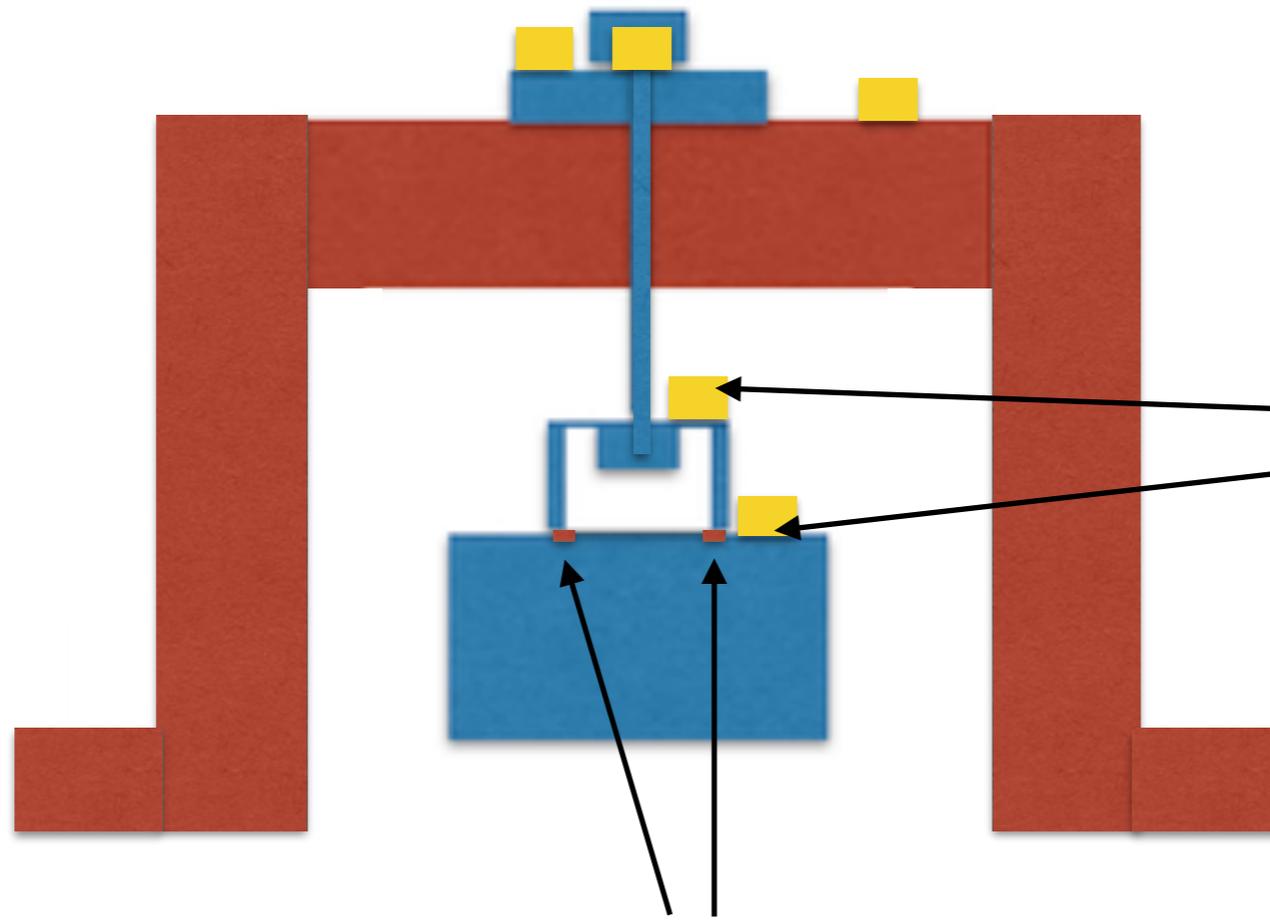
→0.045Wの入熱でブレードの温度が0.07K上昇

- 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

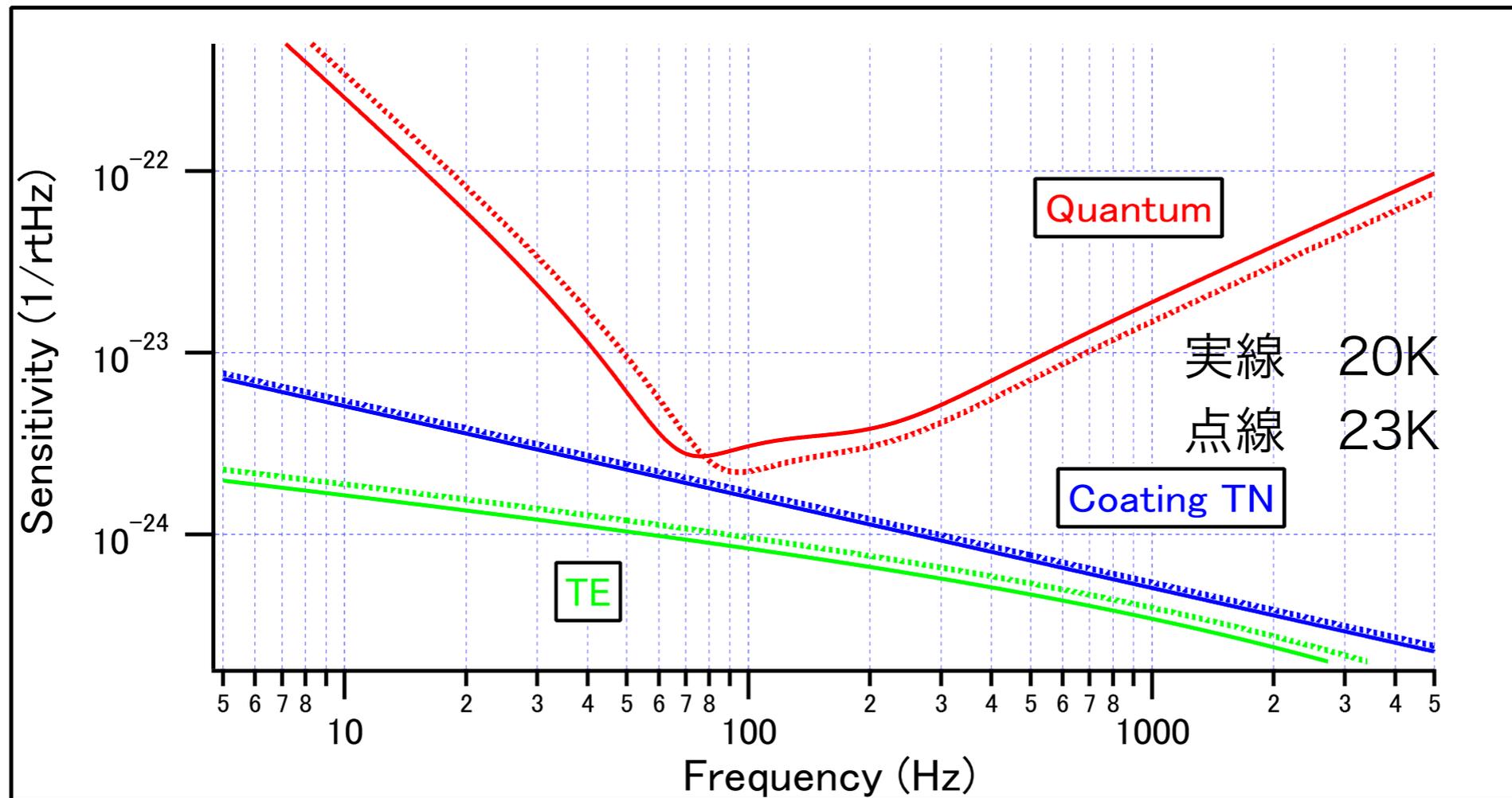
0.205Wの熱負荷のときと0.250Wの熱負荷のときの比較



HCB部分の温度差…
0.205Wのとき0.08K
0.250Wのとき0.09K
→0.045W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

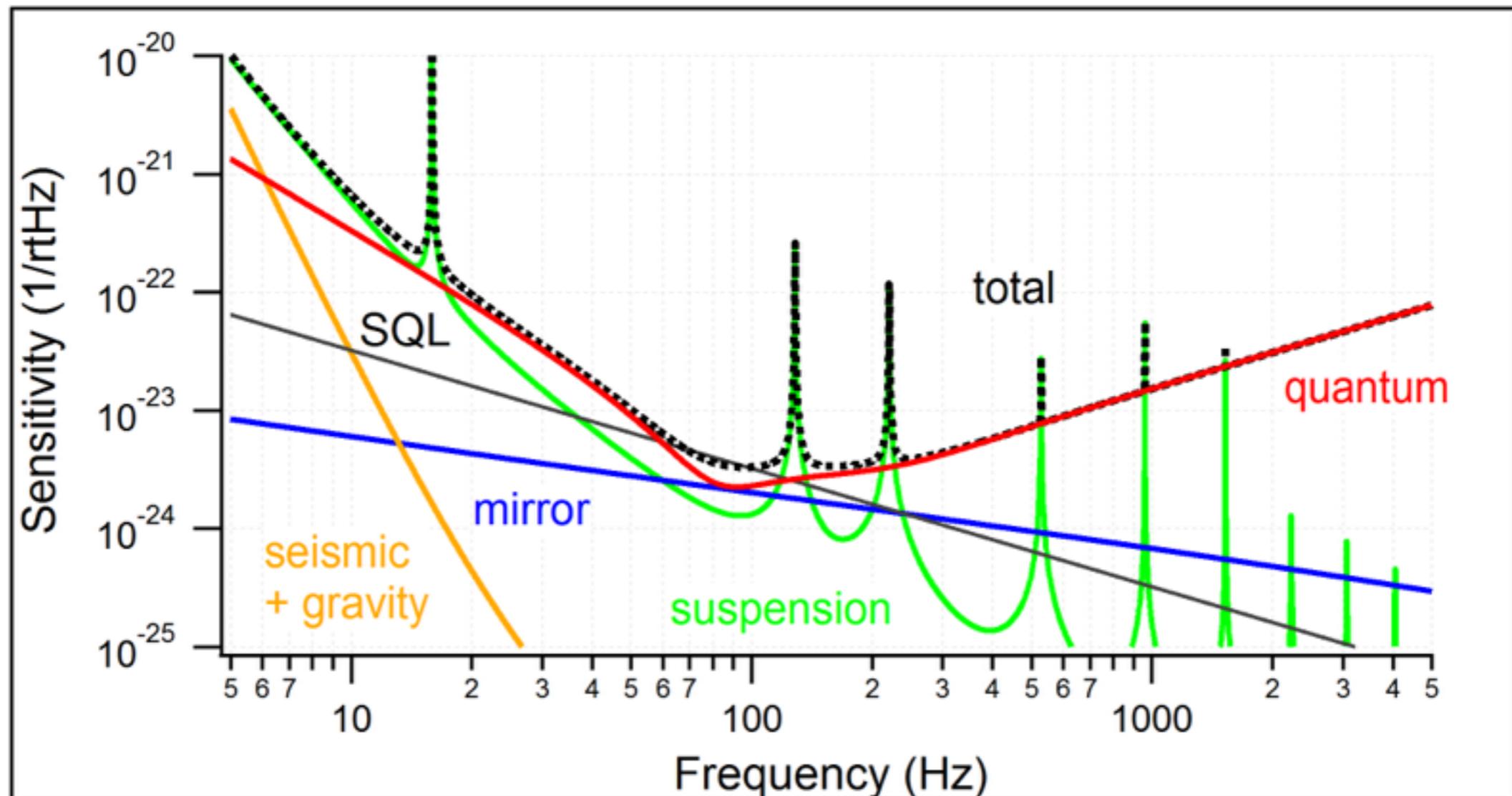
KAGRAミラーの温度



出典:K. Somiya[Detector configuration of KAGRA - the Japanese cryogenic gravitational-wave detector -]

ArXiv:1111.7185v2(2012)

感度曲線



出典...KAGRA HP

mirrorの熱吸収

- ・ 825Wの出典…下記
- ・ $825W \cdots 412.5W \times 50\text{ppm/cm} \times 30\text{cm}$
 $+ 407\text{kW} \times 0.5\text{ppm} = 0.62 + 0.20$
- ・ $407\text{kW} = 412.5 \times 2 / \pi \times 1550$

出典:K. Somiya[Detector configuration of KAGRA - the Japanese cryogenic gravitational-wave detector -]

ArXiv:1111.7185v2(2012)