



# KAGRAの低温技術

木村 誠宏

東京大学・宇宙線研究所

重力波観測研究施設

# 目次

- 1. はじめに
  - 2. KAGRA低温設備
    - 2.1. 概要
    - 2.2. 低温鏡懸架装置
    - 2.3. 超低振動冷凍機ユニット
    - 2.4. クライオスタット
  - 3. 低温設備の組立と総合試験
  - 4. 鏡冷却
  - 5. まとめ
- 謝 辞
- 参考文献

1. はじめに

# 極低温鏡システム



# KAGRA

世界でKAGRA  
だけのオリジナル技術

- 重力波の直接検出
- 基線長3kmのレーザー干渉計型重力波望遠鏡
- 岐阜県飛騨市神岡町池ノ山地下に建設

地下サイト



# KAGRAの場所

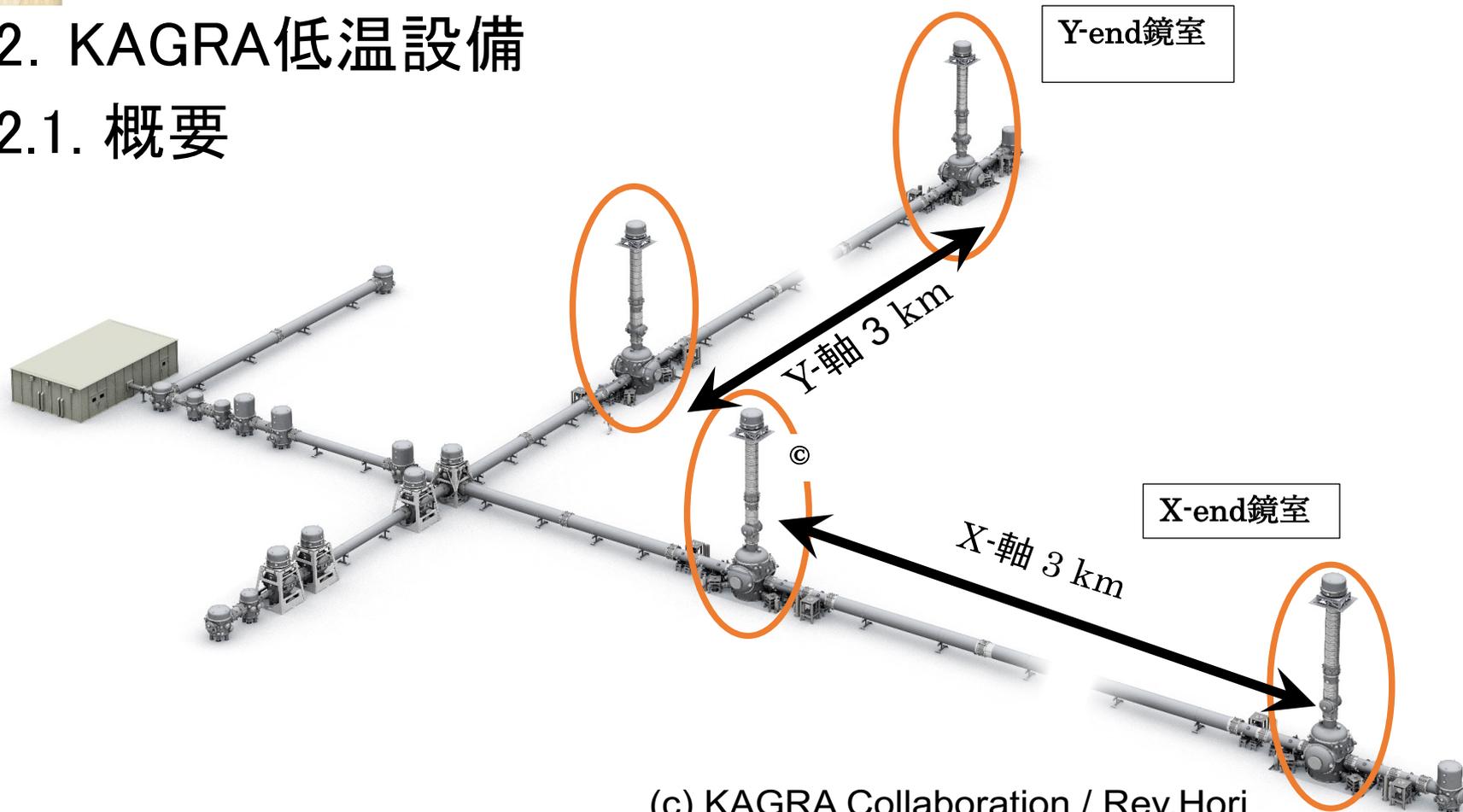


1000m 地下



## 2. KAGRA低温設備

### 2.1. 概要



(c) KAGRA Collaboration / Rey.Hori

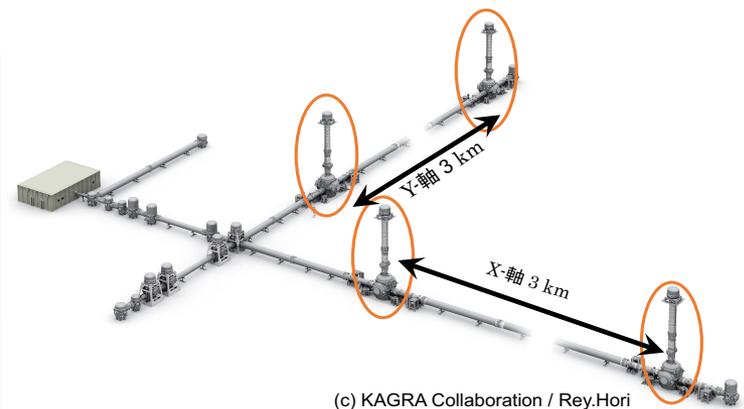
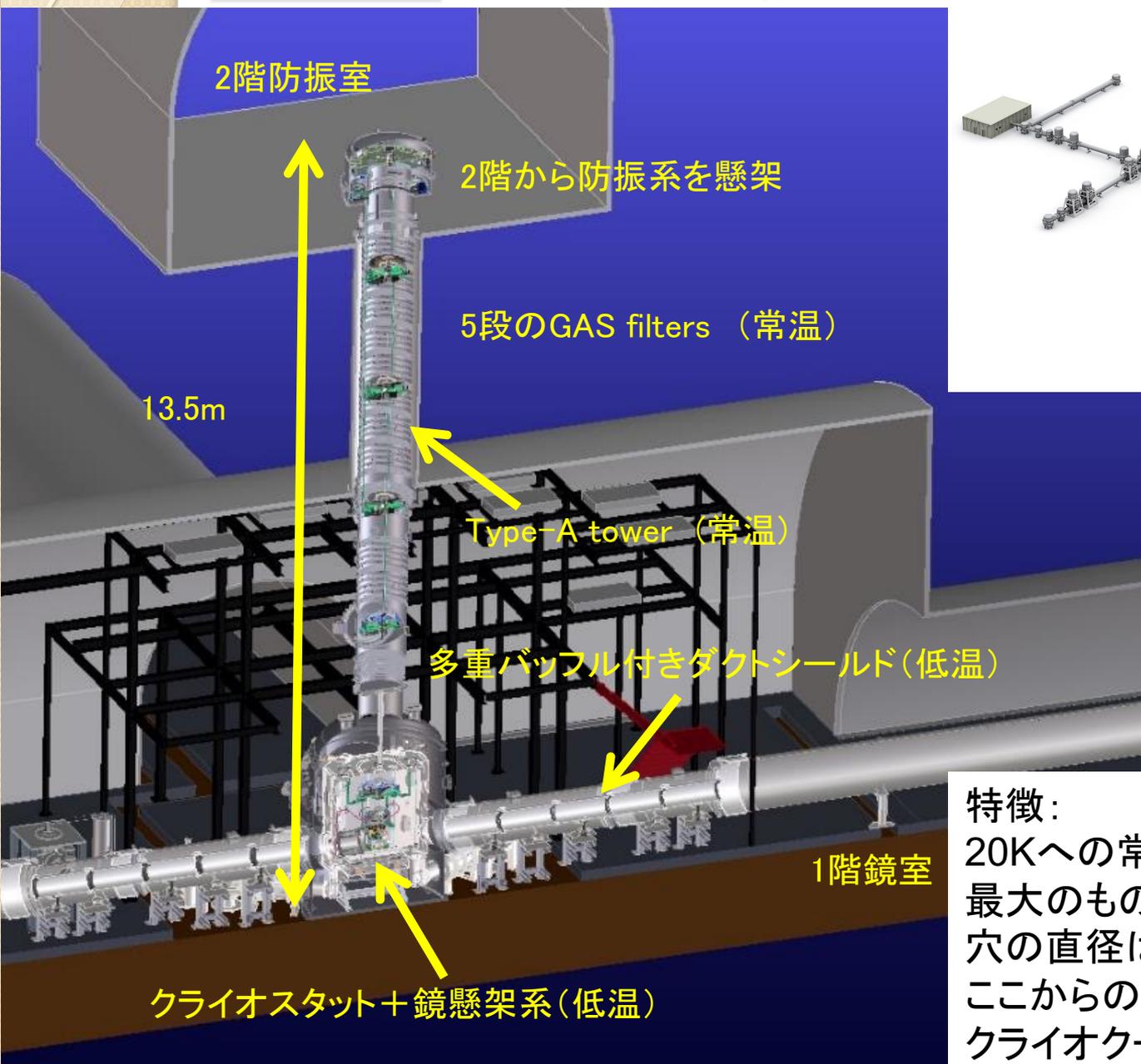
## KAGRA低温設備の配置

# KAGRA 低温設備の要求

## 要求への回答

- CLIOタイプ冷凍機を基本とする防振ステージ付パルス管式冷凍機の採用
- 鏡と防振ステージの取り付け作業のため、クライオスタットの真空容器の胴内径をφ2200に
- 神岡鉱山の地面振動を使ったクライオスタットの応答解析
- 機器の熱負荷を可能な限り小さく
- 輻射熱対策として、超高真空( $\sim 10^{-7}$ Pa)で使用可能な低脱ガス多層断熱膜(SI)の開発

# KAGRA 低温設備の構造



## 特徴:

20Kへの常温開口部の存在  
最大のものは、レーザー光の貫通穴  
穴の直径は20cmの鏡と同じ  
ここからの300K輻射は約20 W!  
クライオクーラー(8K)の能力より大きい

# KAGRA低温設備の構成

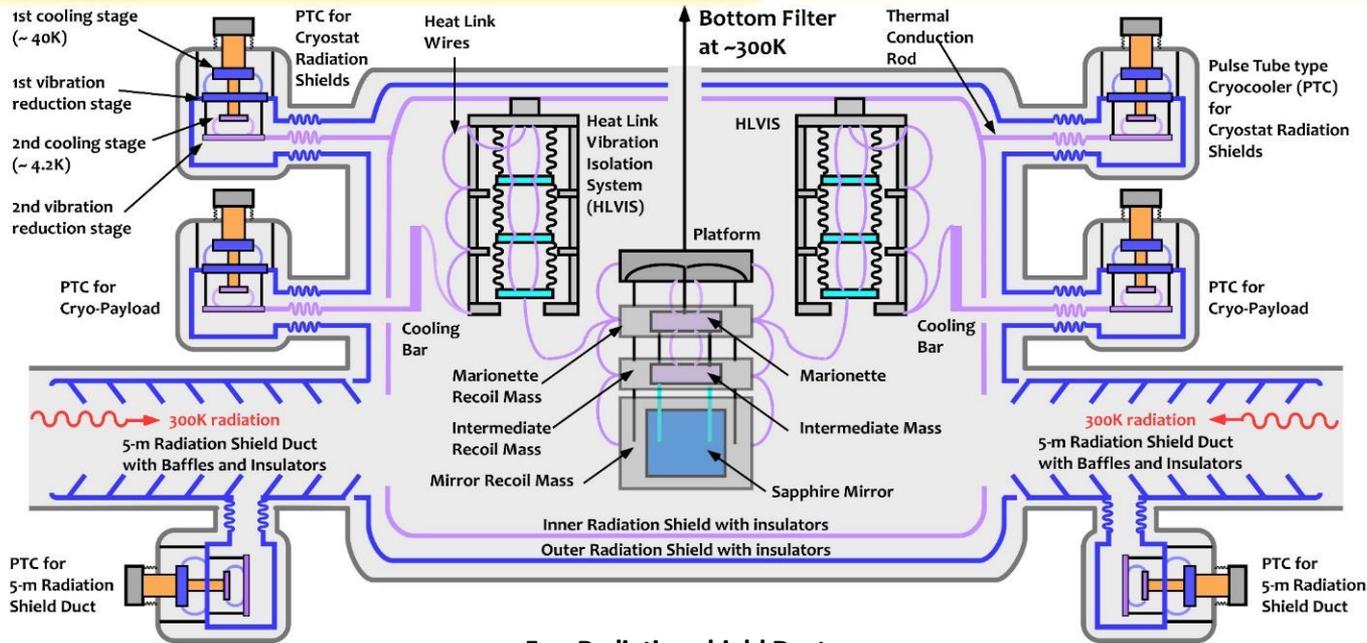
## Cryostat Chamber Dimensions:

Diameter: 2.6 m, Height: ~4.3 m, Mass: ~ 12 ton  
I/O shields Mass: 8K: ~460 kg, 80 K: ~590 kg

## Cryocoolers: 2 stage Pulse tube type

Cooling power: 0.9 W at 4K (2nd)

36 W at 50K (1st)



### Cryogenic payloads:

SOLBLACK coating

- low cost, can be coated on large area
- some magnetism, higher outgas

### 5-m Radiation shield Duct :

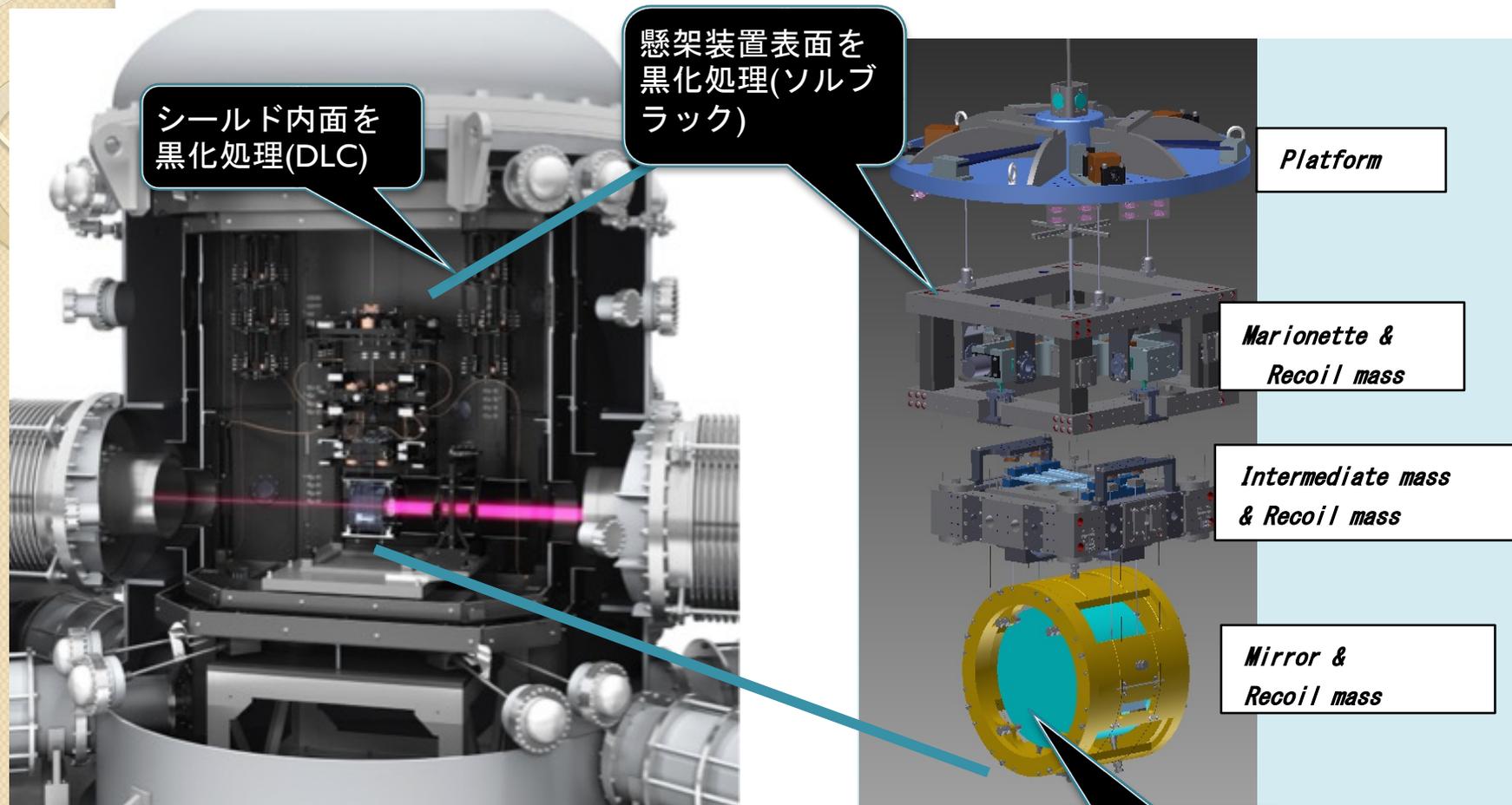
Diamond Like Carbon (DLC) coatings

- low outgas, no magnetism
- only small area, expensive

参考文献 [3]から引用

クライオスタット内に、外側(~80 K)と 内側(~8 K)の 2 層構造の輻射シールドを設置  
鏡のHR側とAR側には、ビームダクト開口部からの熱輻射を低減させるための  
多重バッフル付ダクトシールドの設置

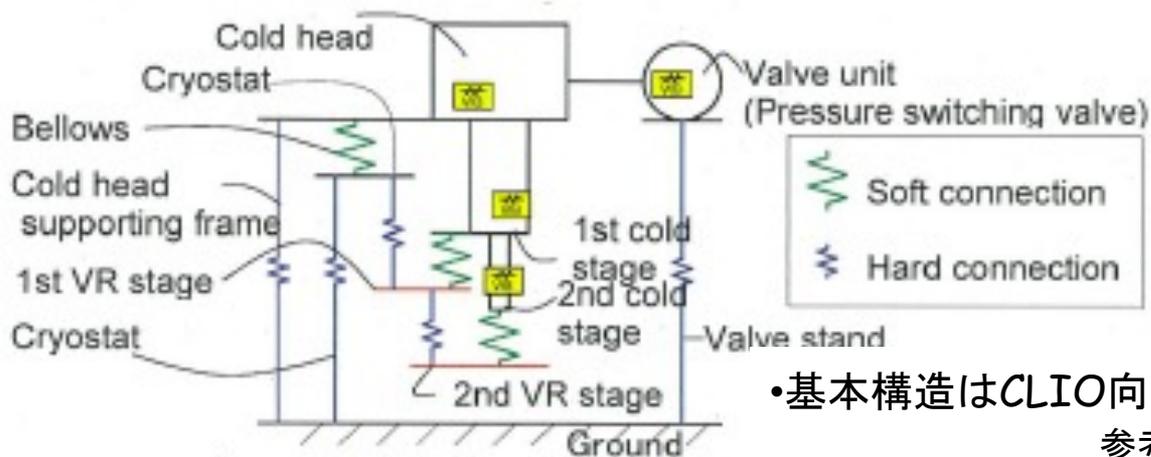
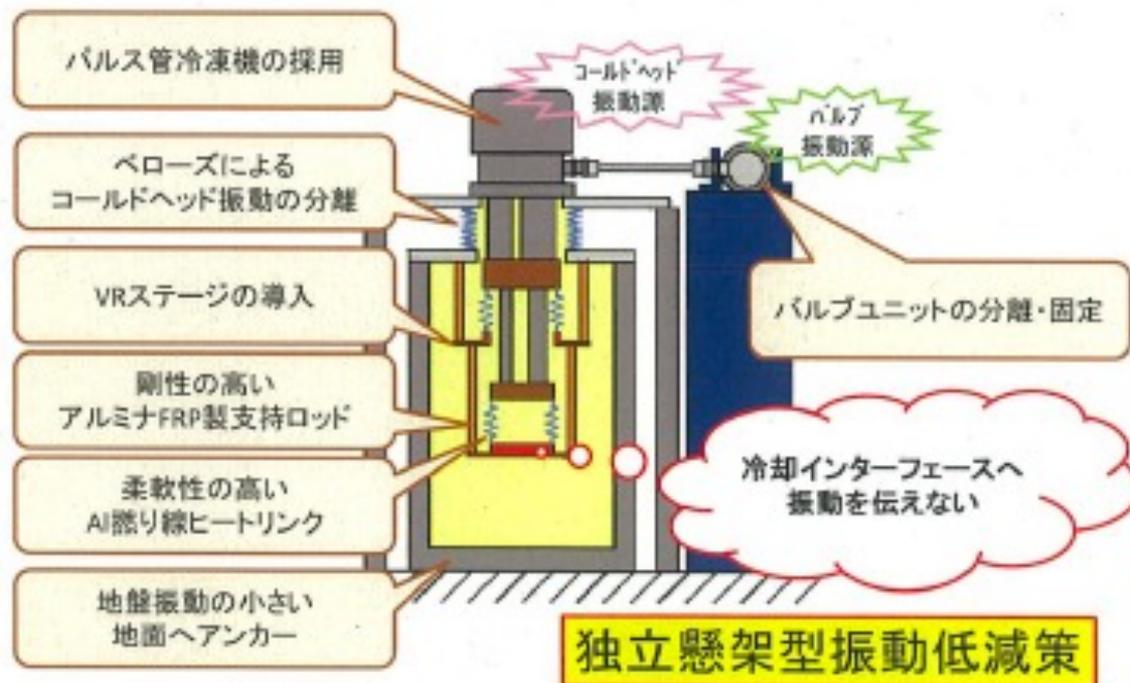
## 2.2 低温鏡懸架装置



- 低温懸架装置は2層輻射シールドの内側に設置
- 4段振り子構造の鏡懸架装置を採用
- 鏡を冷却する熱リンク(Heat Link Wires)は鏡懸架チェーンを利用
- 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を形成

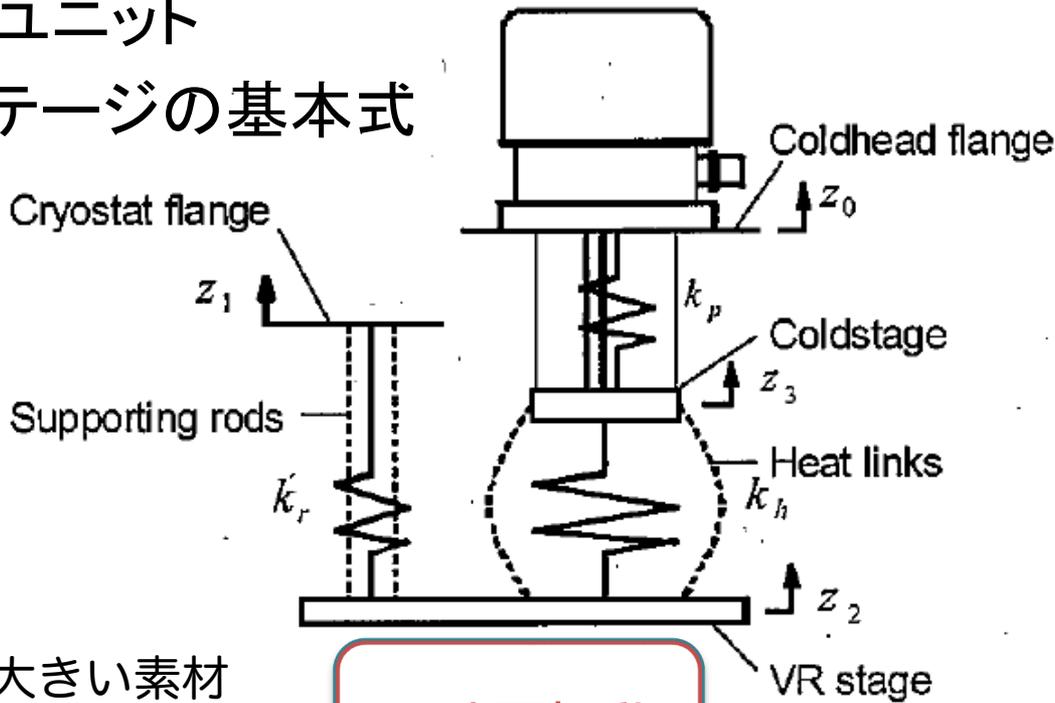
## 2.3 超低振動冷凍機ユニット

### 冷凍機ユニット 防振ステージの思想



•基本構造はCLIO向けとして開発された  
参考文献 [5]から引用

# 冷凍機ユニット 防振ステージの基本式



ヤング率が  
小さい素材の  
バネ定数

ヤング率が  
大きい素材の  
バネ定数

$$Z_2 = Z_1 + \frac{k_h}{k_r} Z_3$$

~地面振動

ヤング率の大きい素材

・ ALFRP → CFRP

ヤング率が小さい素材

・ 5Nアルミ → 7N銅

地面振動

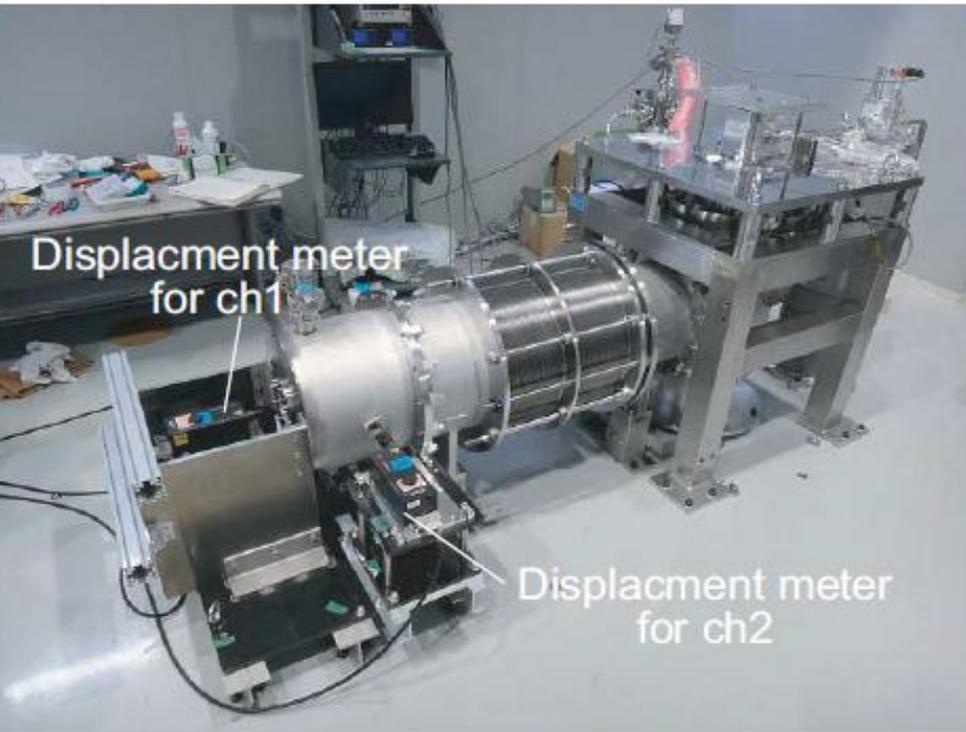
・ 神岡地下

・ 実機の防振ステージは2段のカスケード構造

・ 神岡の地面振動（都会よりも2桁下） ← 地下の長所を活かす

参考文献 [5]から引用

# KAGRA超低振動冷凍機ユニットの仕様



東大・柏キャンパスで試験中の冷凍機ユニット

## 冷凍能力

- ・ 8K伝導冷却路端において  
9Kで2.5W
- ・ 80K伝導冷却路端において  
70Kで35W

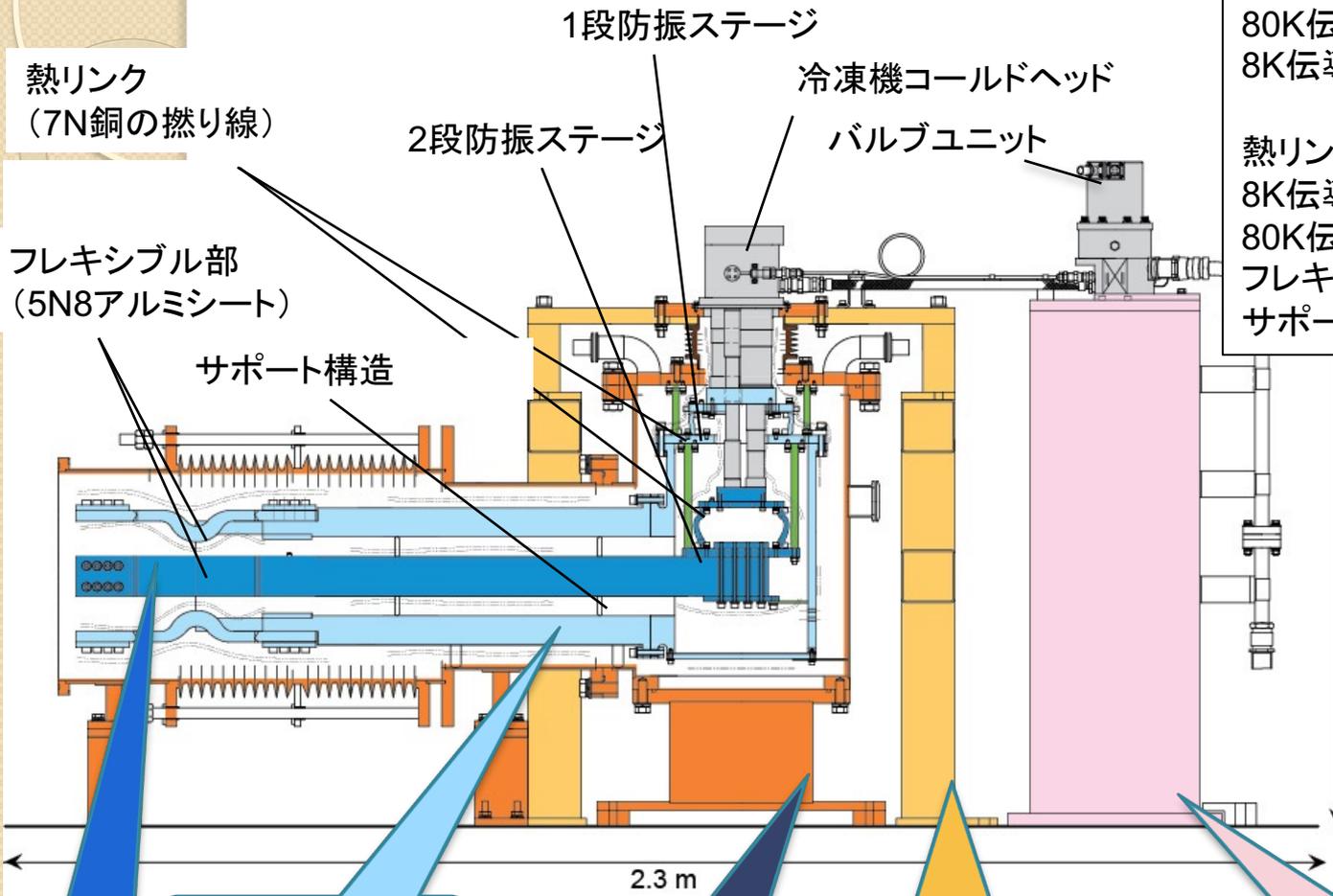
## 振動特性

- ・ 8K伝導冷却路端において  
最大±100nm以下
- ・ 80K伝導冷却路端において  
最大±100nm以下

# 冷凍機ユニット：パルスチューブ冷凍機＋防振機構

冷凍機ユニット重量：1200 kg  
 80K伝導冷却パス：150 kg  
 8K伝導冷却パス：23 kg

熱リンク：7N銅  
 8K伝導冷却パス：5N8アルミニウム  
 80K伝導冷却パス：A1000台  
 フレキシブル部：5N8アルミニウム  
 サポート構造：CFRP/GFRP



80K伝導冷却パス  
(A1050/I070)

8K伝導冷却パス  
(5N8高純度アルミ)

真空容器  
(伝導パスを支える)

サポートフレーム  
(コールドヘッドを支える)

バルブユニットマウント  
(バルブユニットを支える)

# 伝導冷却路の使用素材の選択

40,000 W/(m·K) @ 6K

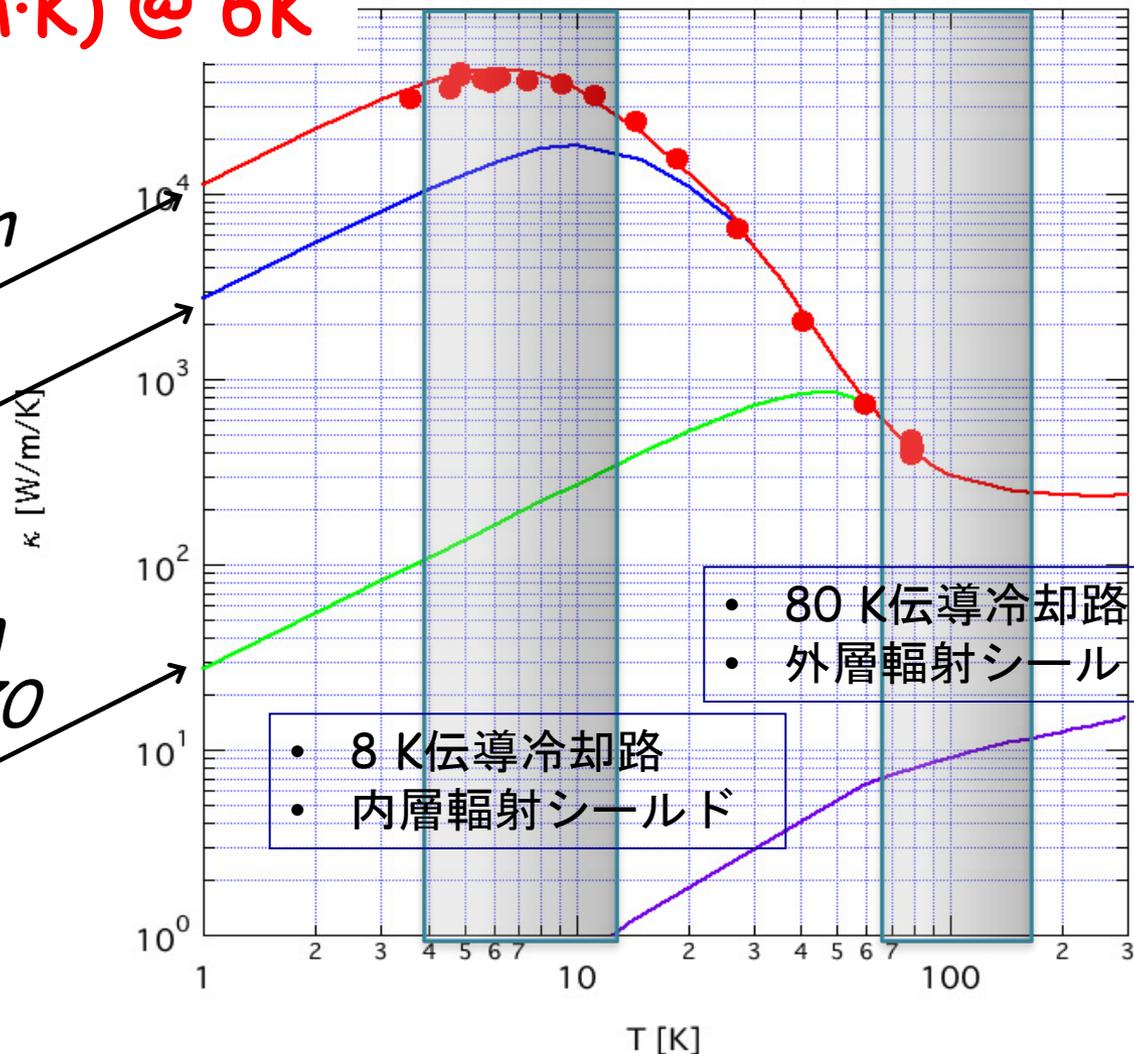
6N Aluminum

5N up Al  
RRR=3000

2N Aluminum  
~Type A-1070

コスト:

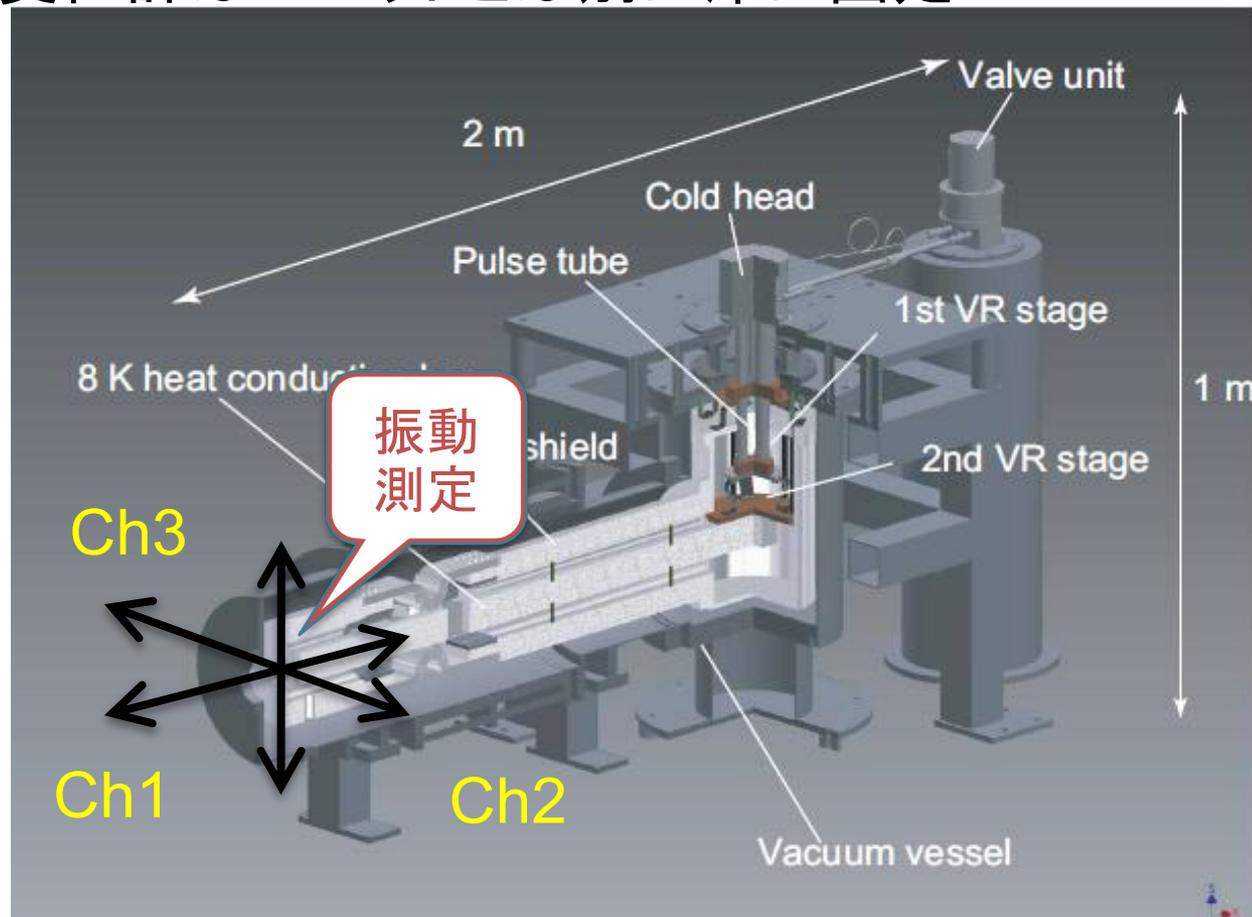
5N8 > 2N Aluminum



使用する温度域により伝導冷却路の素材の選択が必要 — OHO'22 "KAGRAの低温技術"

# 振動試験

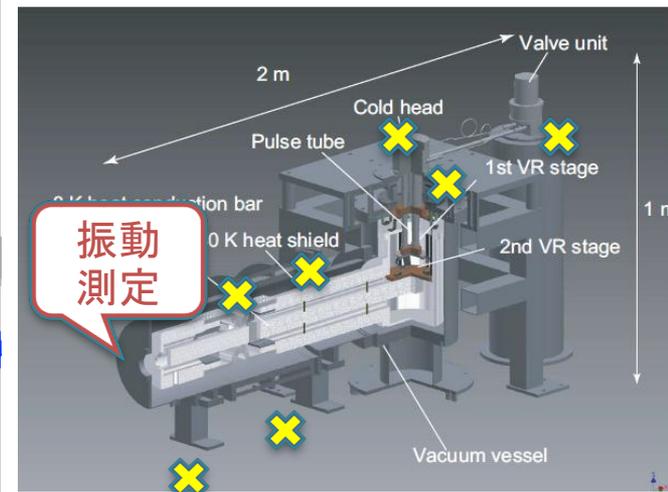
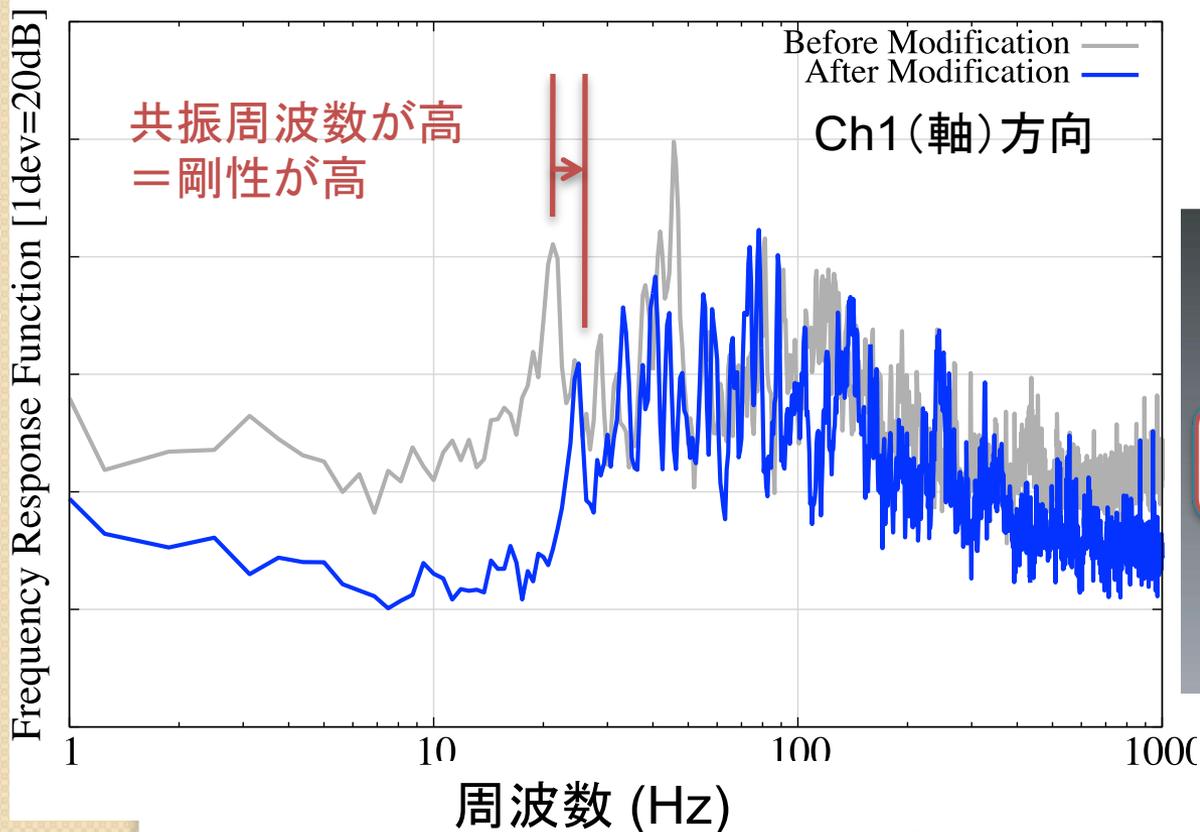
- レーザ変位計を用いて、伝導冷却路先端部の3軸方向を同時に測定
- 冷凍機ユニットは床にアンカー固定
- レーザ変位計はユニットとは別に床に固定



# ハンマリングテスト（打撃試験）

- ハンマーで打撃を加え、その応答をレーザ変位計で計測
- 共振の様子を調べながら、防振ステージ部の剛性変化を調べる（共振周波数が上がると、剛性も上がる）
- 支持構造の改良を重ねる

周波数応答関数

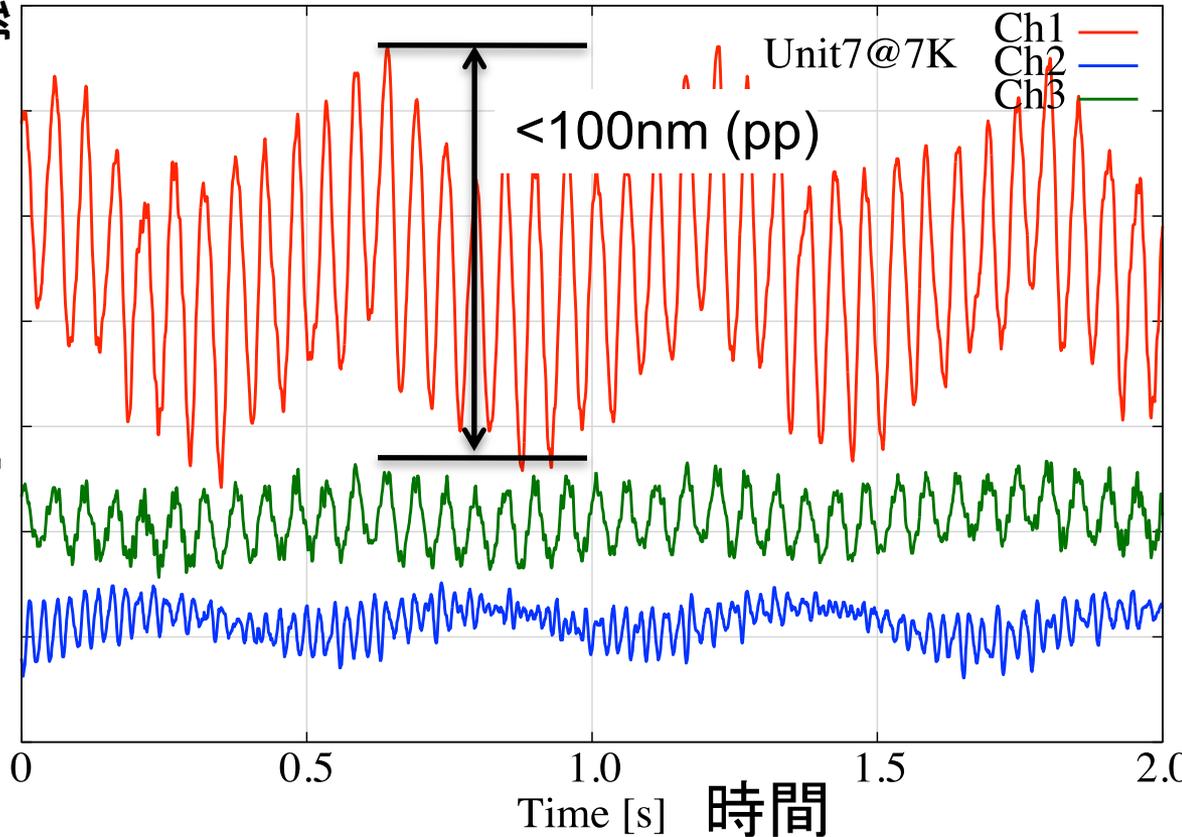


7カ所で周波数応答関数を測定して平均をとる

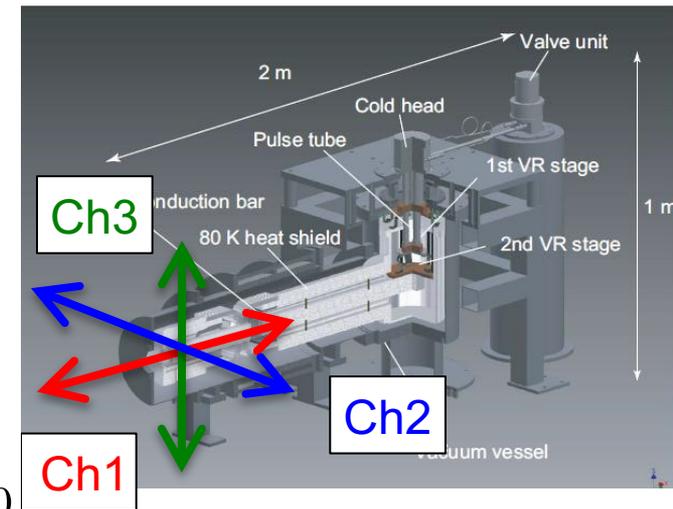
# 冷凍機ユニット振動試験（時系列データ）

- 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

Relative Amplitude (1 dev = 20 nm) 振幅

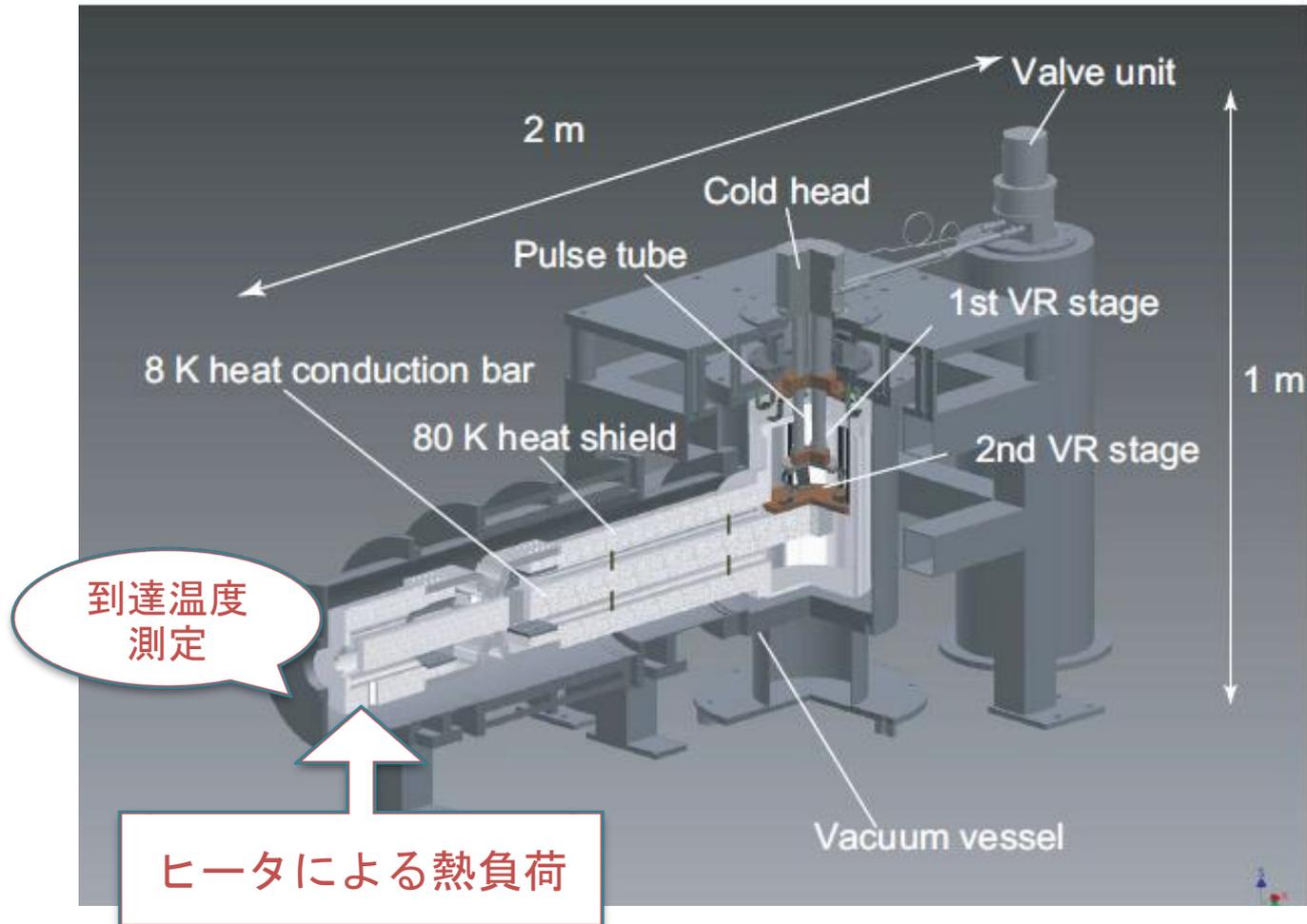


Ch1 : 軸方向  
Ch2 : 水平方向  
Ch3 : 垂直方向



# 冷凍能力

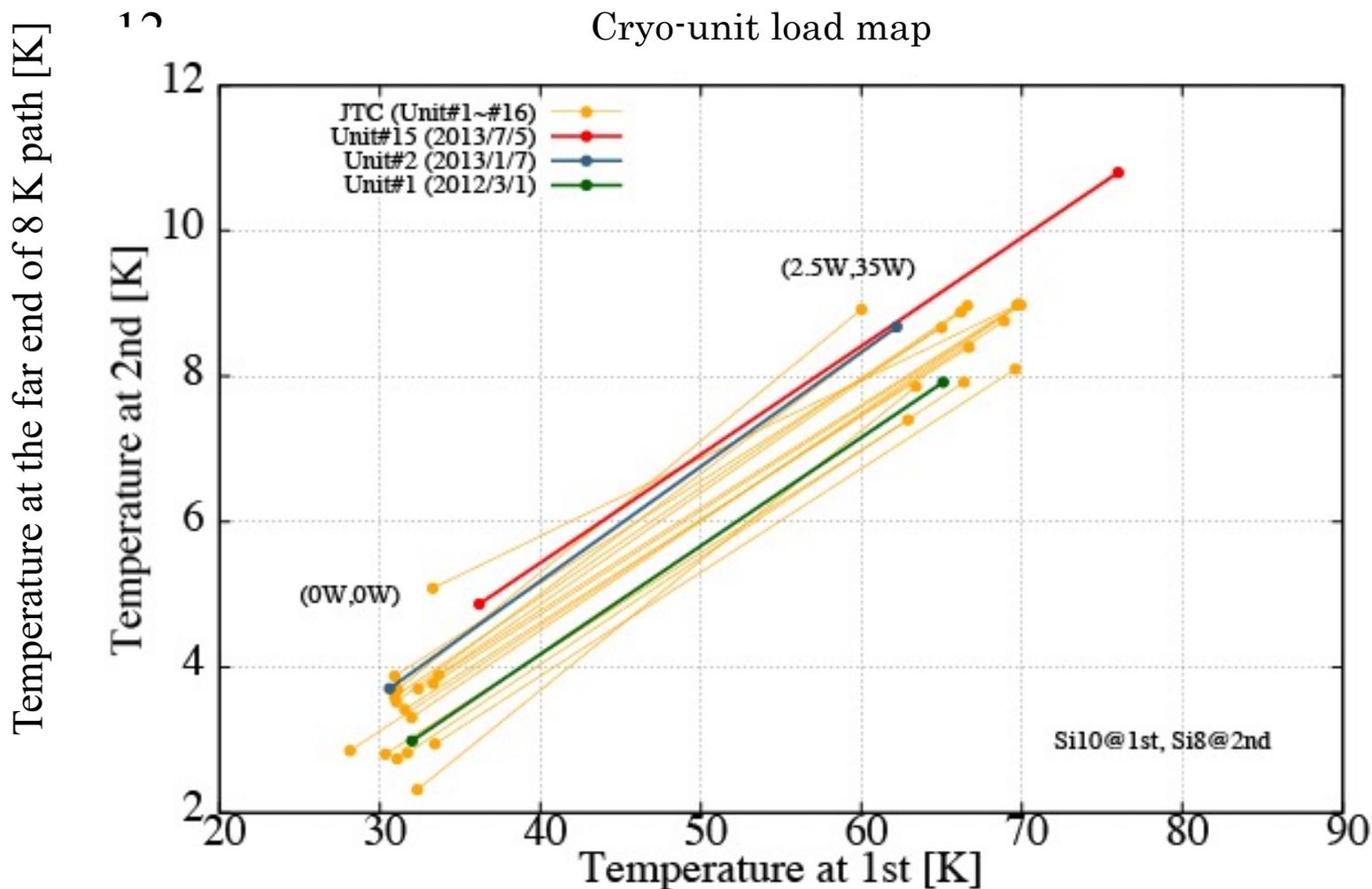
- 全ての窓を閉止し、伝導冷却路先端の温度を測定
- 伝導冷却路先端に組み込んだヒータで熱負荷を与えて冷凍能力を測定



# Load map

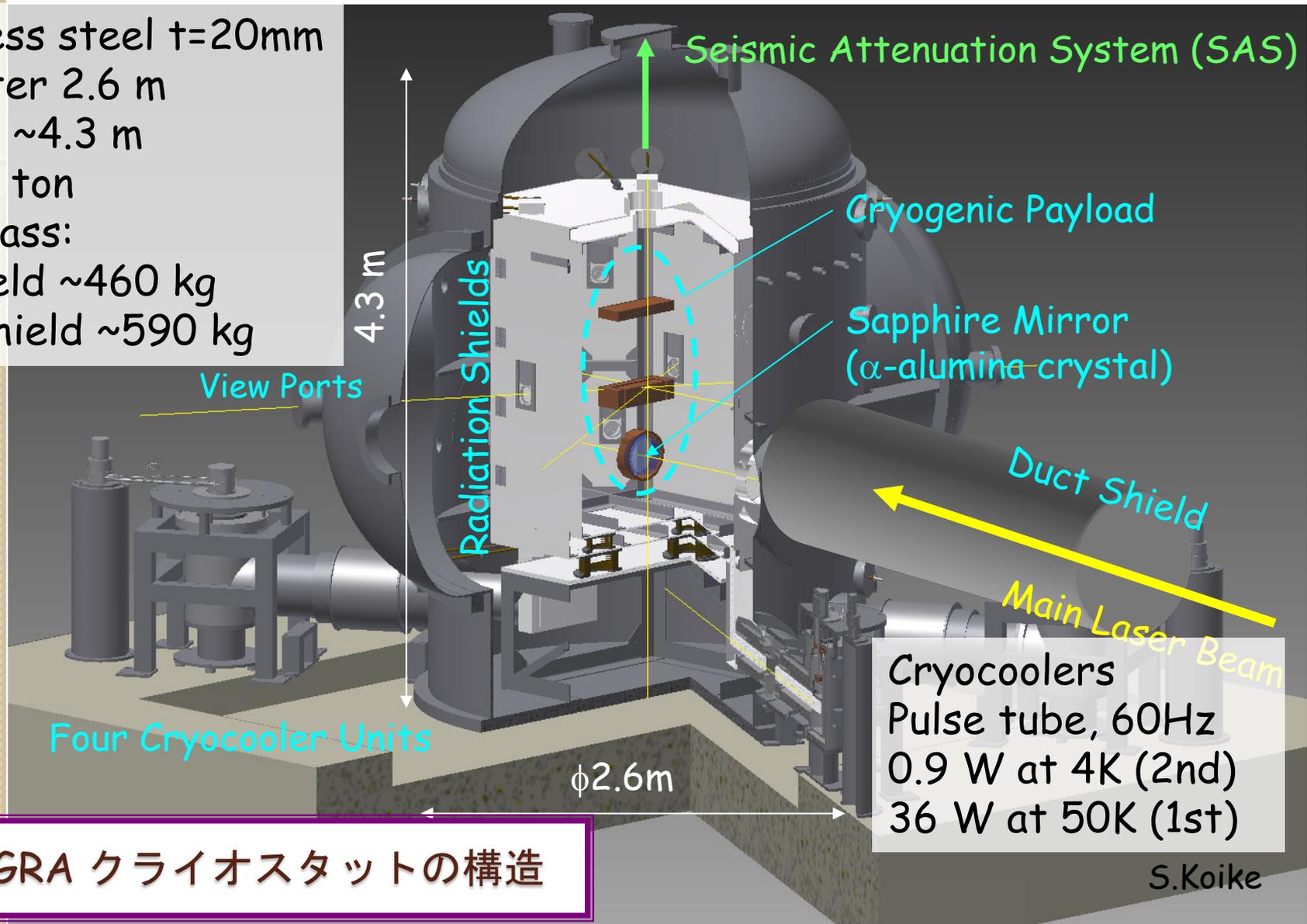
- 冷凍能力が仕様 (9K@2.5W, 70K@35W) を満たすことを確認
- 全数試験を実施

参考文献 [7] から引用



## 2.4. クライオスタット

Stainless steel  $t=20\text{mm}$   
Diameter 2.6 m  
Height  $\sim 4.3\text{ m}$   
M  $\sim 12\text{ ton}$   
Cold Mass:  
8K shield  $\sim 460\text{ kg}$   
80 K shield  $\sim 590\text{ kg}$

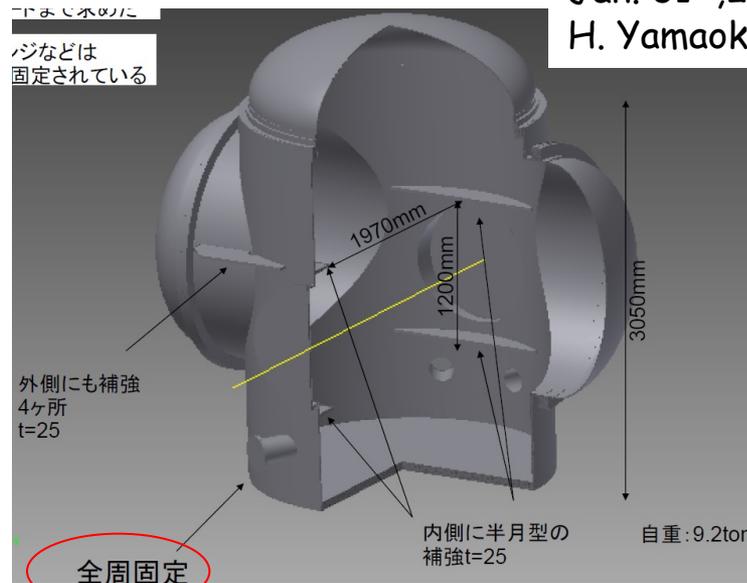
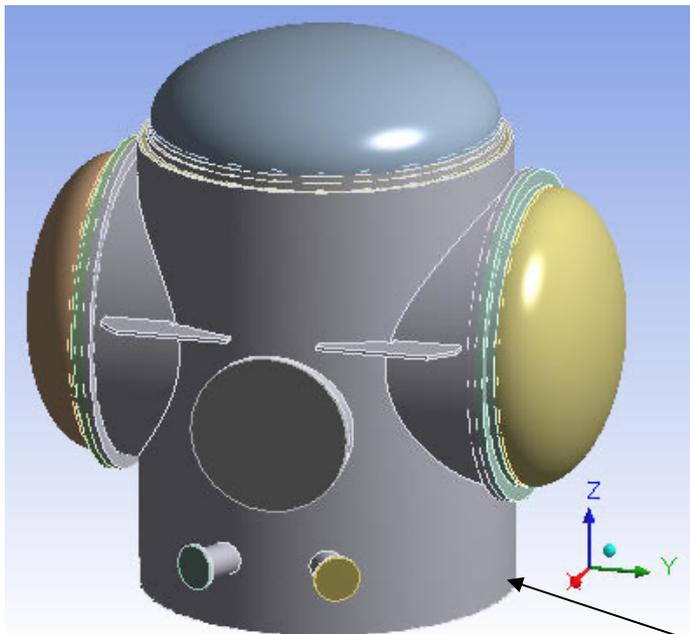


KAGRA クライオスタットの構造

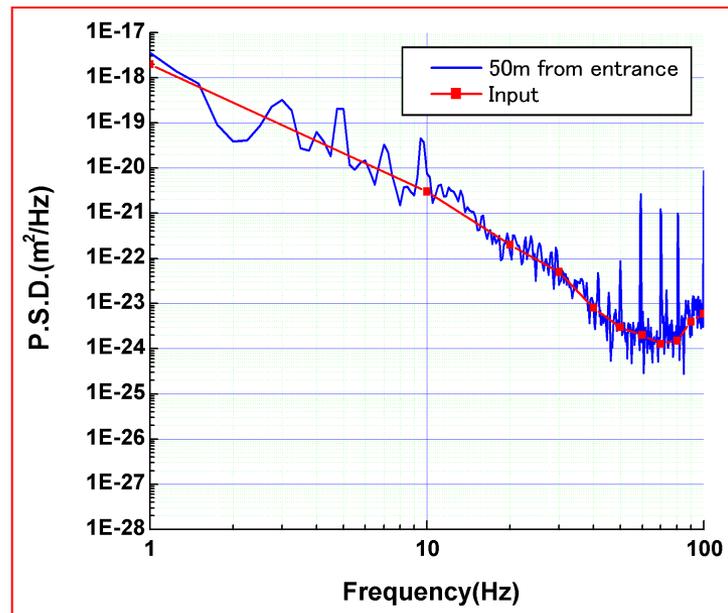
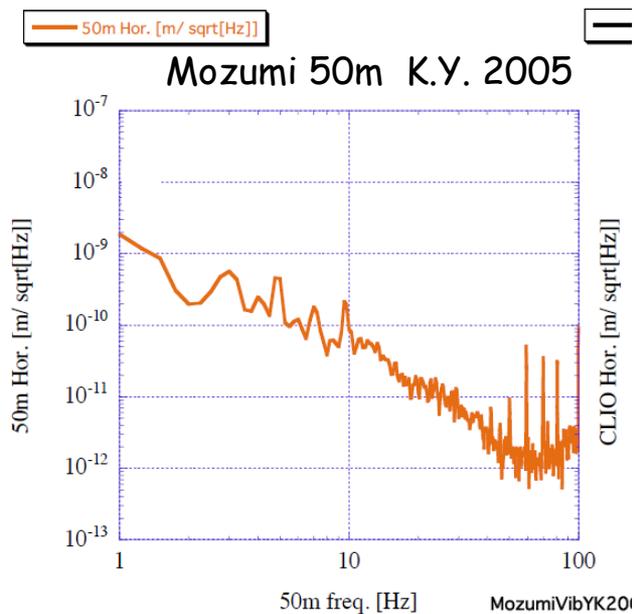
S.Koike

# 地面振動への応答解析

Jan. 31<sup>st</sup>, 2011  
H. Yamaoka

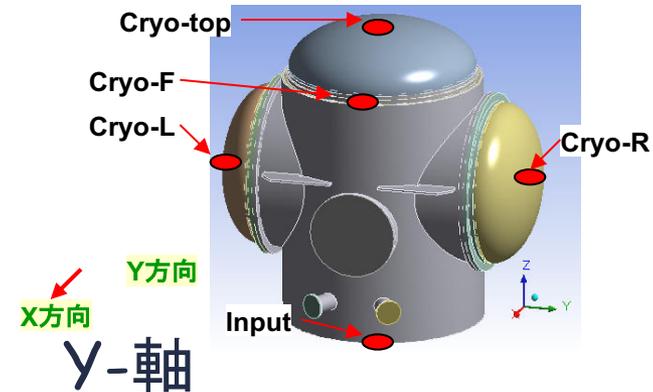


Input to peripheral of bottom

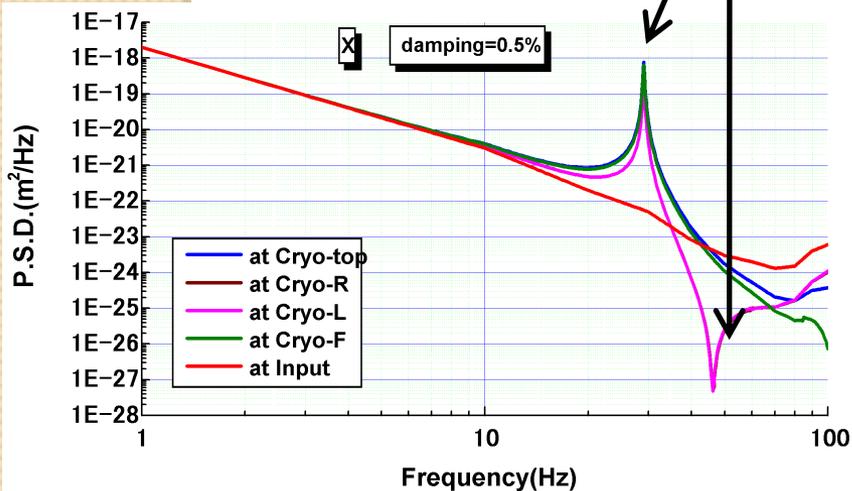


# 地面振動応答

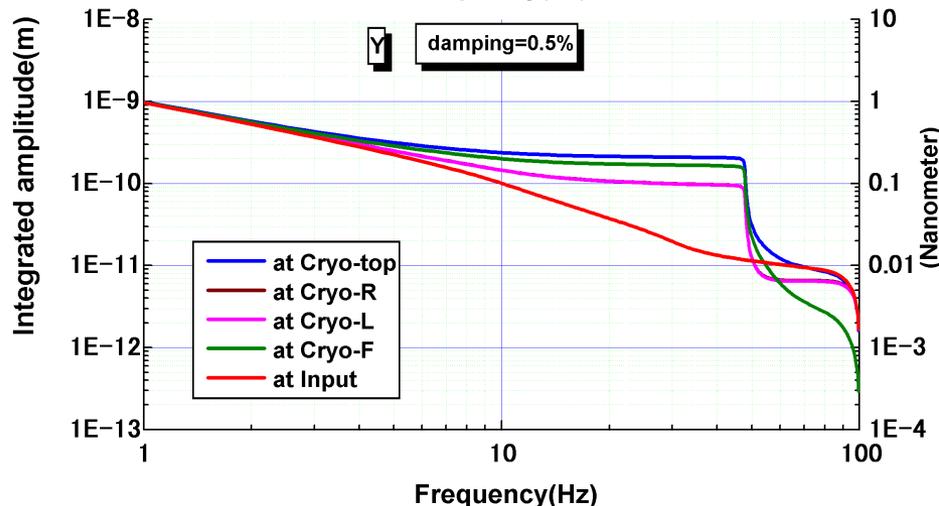
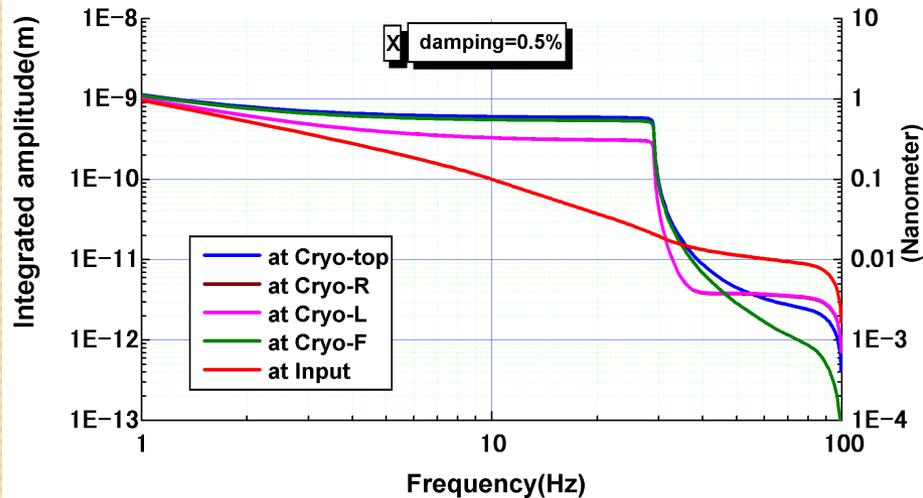
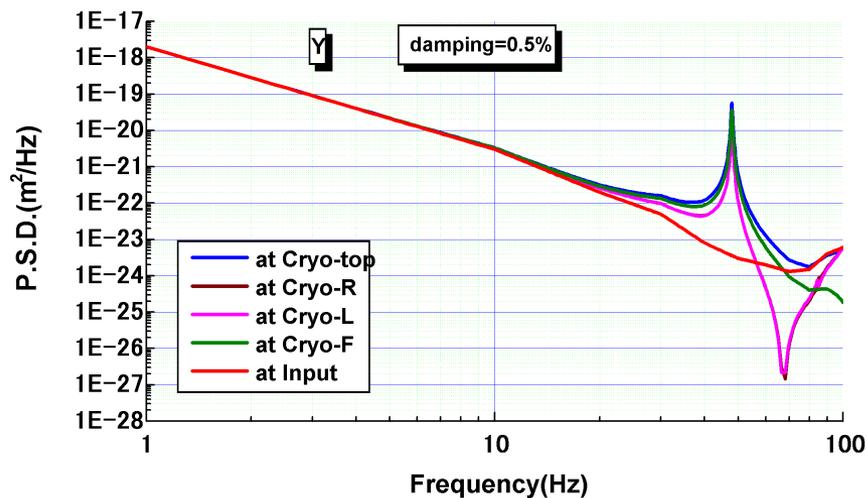
共振周波数



X-軸



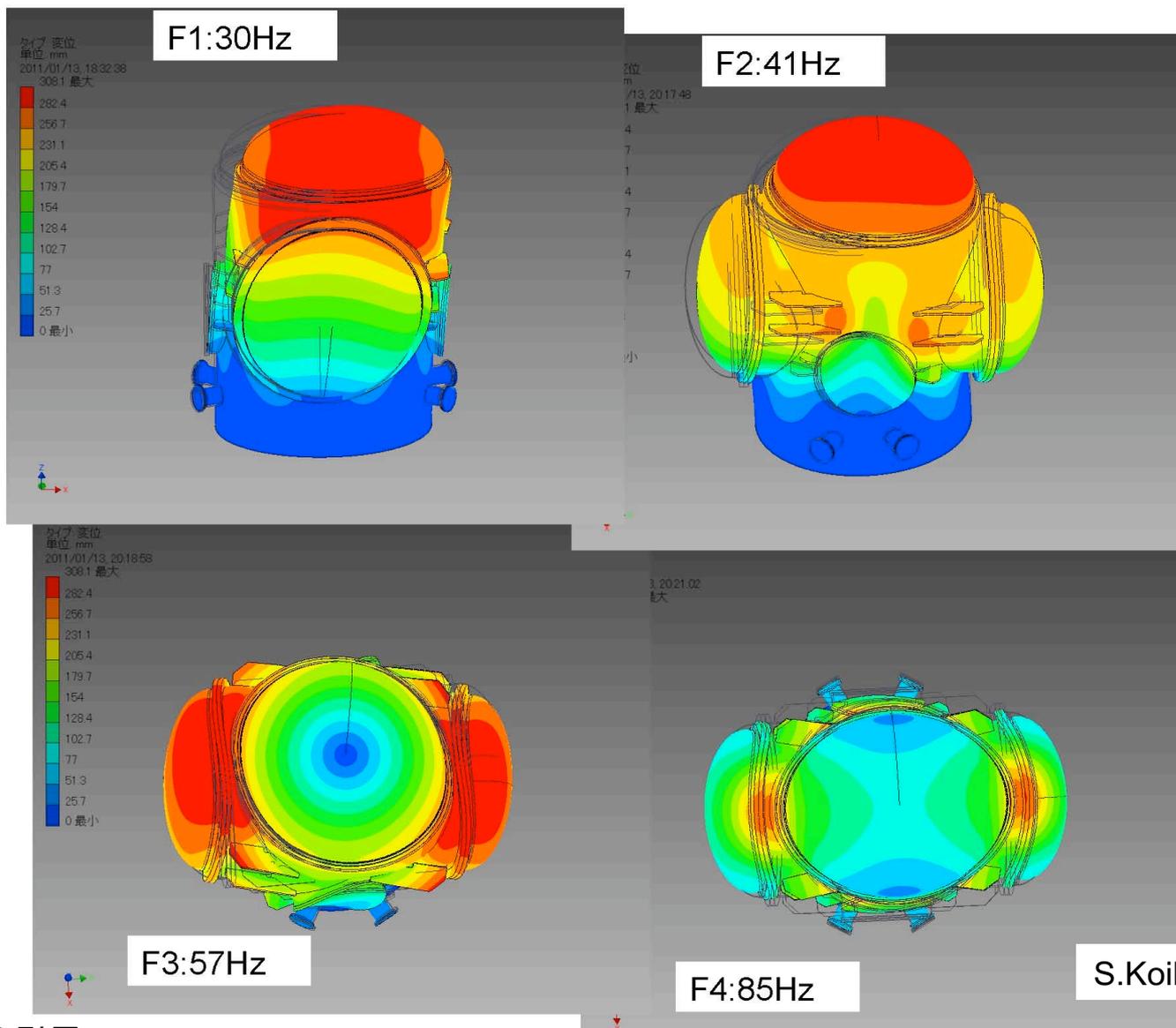
Y-軸



# モーダル解析の結果：真空容器

## 共振周波数

- F1 29.86 Hz
- F2 41.27 Hz
- F3 57.22 Hz
- F4 85.01 Hz
- F5 89.68 Hz
- F6 93.33 Hz
- F7 111.81 Hz
- F8 120.70 Hz



参考文献 [15]から引用

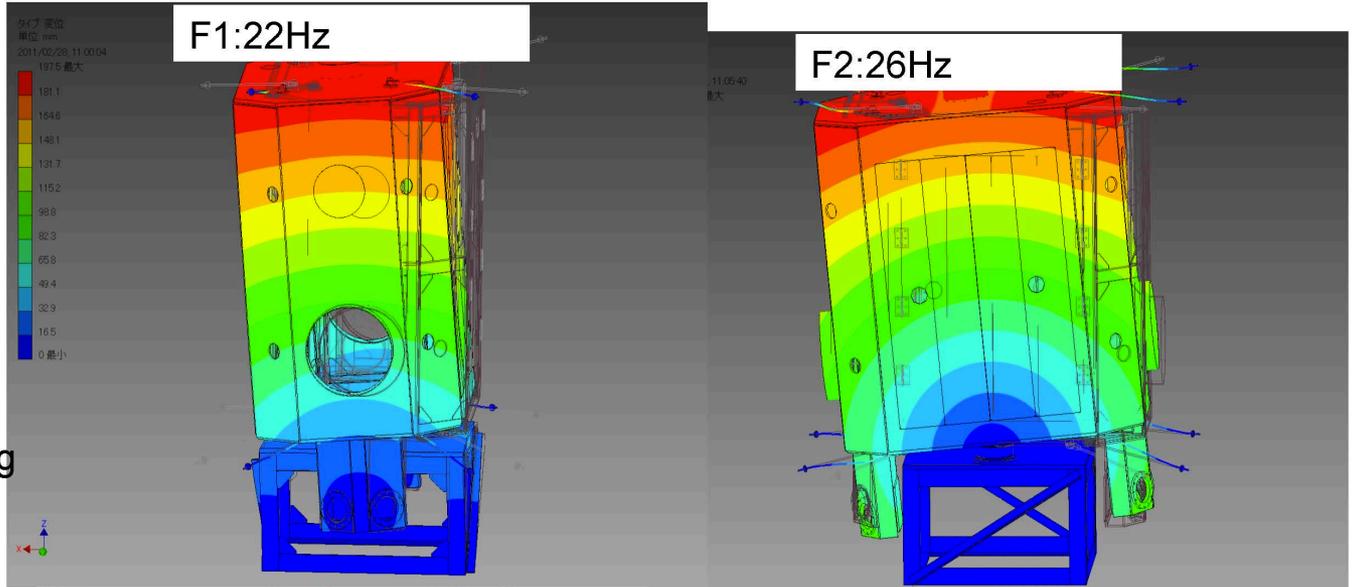
# モーダル解析の結果：外層輻射シールド

S.KOIKE

## 支持構造材有

- F1 22.51 Hz
- F2 25.98 Hz
- F3 39.47 Hz
- F4 41.79 Hz
- F5 46.22 Hz
- F6 57.38 Hz
- F7 59.04 Hz
- F8 76.29 Hz

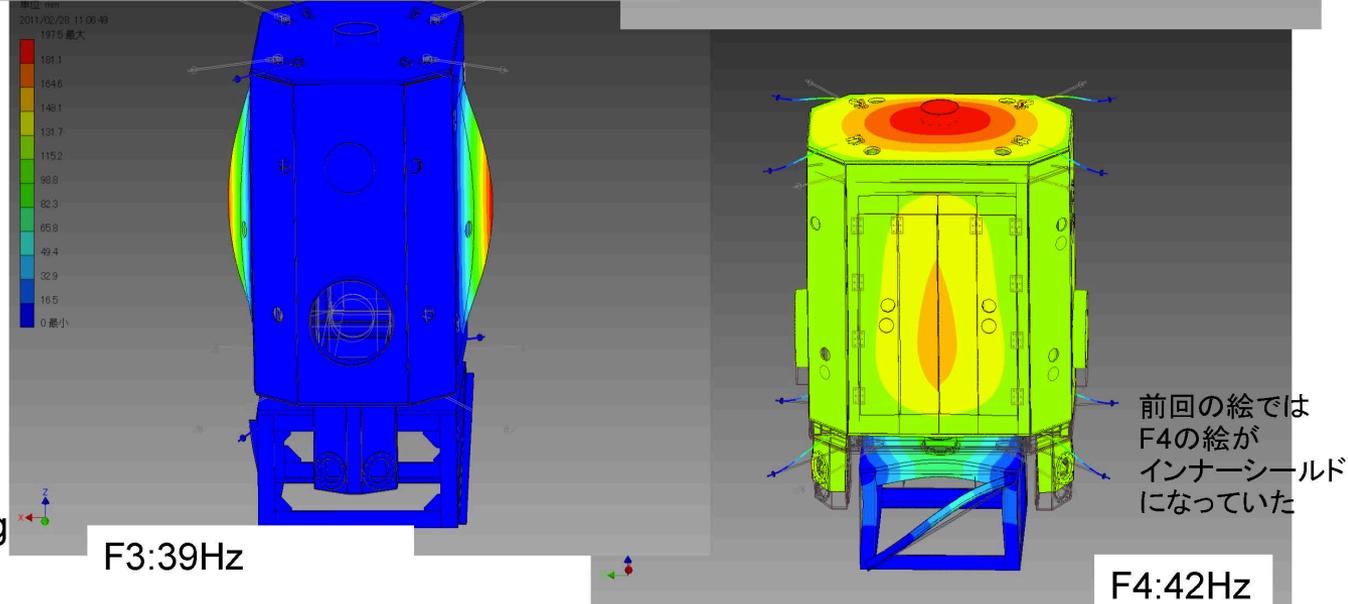
Mass=893.429 kg



## 支持構造材無

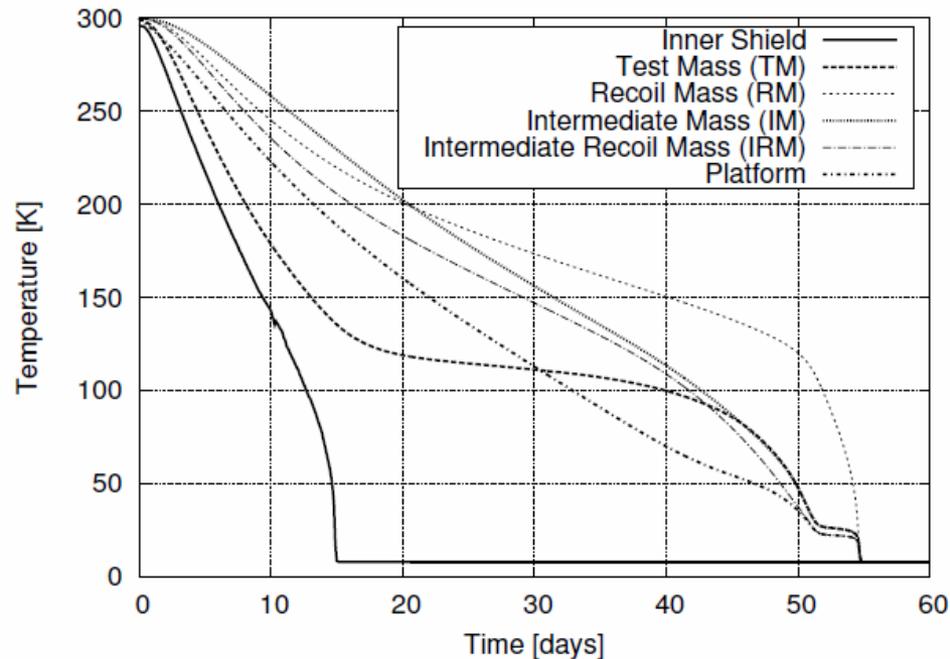
- F1 7.86 Hz
- F2 16.80 Hz
- F3 39.18 Hz
- F4 41.78 Hz
- F5 43.01 Hz
- F6 44.96 Hz
- F7 57.11 Hz
- F8 58.41 Hz

Mass=889.352 kg

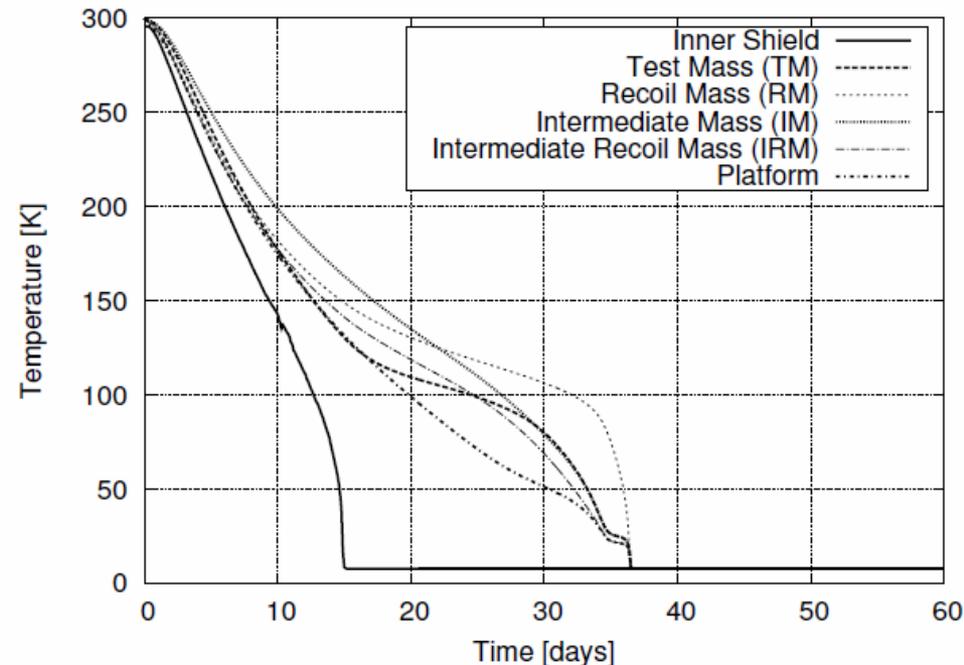


参考文献 [15]から引用

# 低温設備の初期冷却時間のシミュレーション



放射冷却無：熱リンクのみ



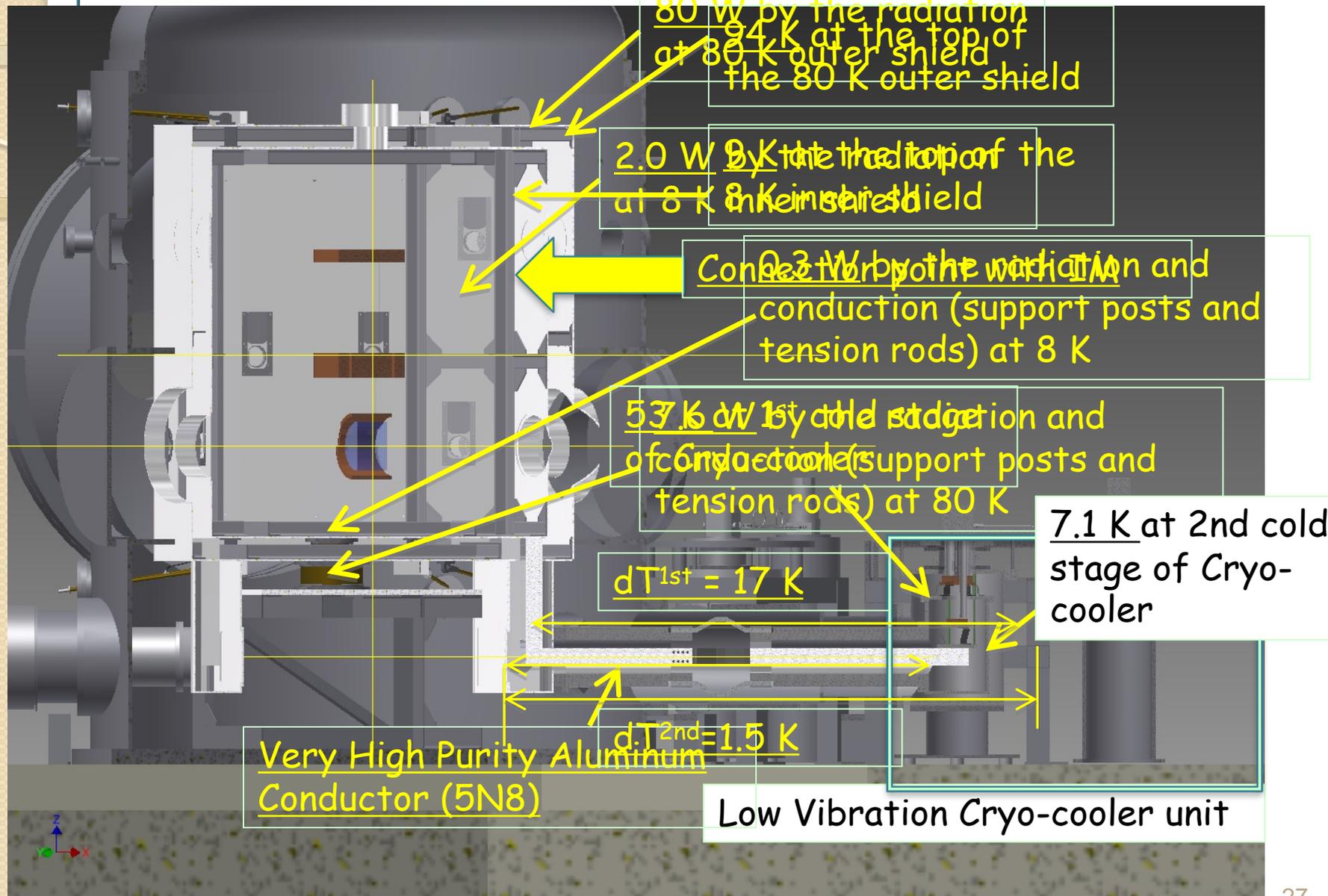
放射冷却有

- \*\* 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唆
- \*\* 放射伝熱と伝導冷却を組み合わせ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

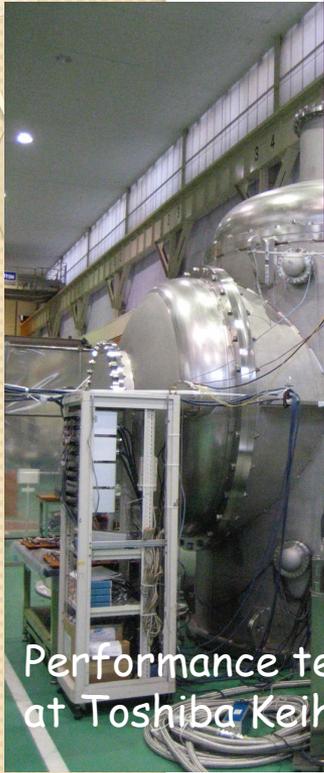
参考文献 [17]から引用



# 熱負荷の見積と実際



# 工場



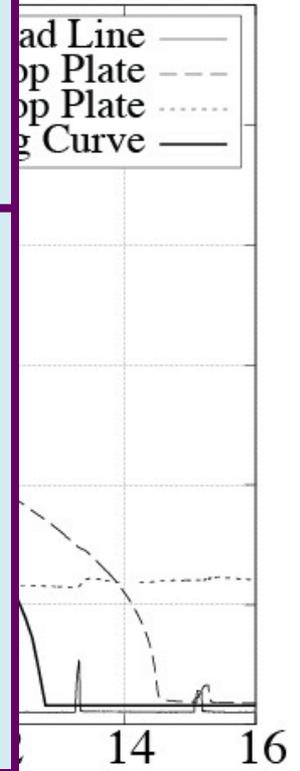
Performance test at Toshiba Keik

- 300K
- クライ
- 冷却時

| Cryo-payload        | Esti. (W)          | Meas. (W) |
|---------------------|--------------------|-----------|
| ◦ <u>Payload</u>    | 1.0                | -         |
| ◦ Mirror Deposition | (1.0?)             | -         |
| Total               | <u>1.0</u> (2.0 ?) | -         |
| W/unit              | <u>0.5</u> (1.0 ?) | 0.4       |

| 8K Shield               | Esti. (W)           | Meas. (W) |
|-------------------------|---------------------|-----------|
| ◦ View Ports            | (0.4)*              | -         |
| ◦ Radiation From 80 K   | 2.0                 | -         |
| ◦ Support post and Rods | 0.3                 | -         |
| ◦ Electrical wires      | $3 \times 10^{-4}$  | -         |
| ◦ Scattering Light      | (< 4.0 ?)           | -         |
| Total                   | <u>2.3</u> (6.7 ?)  | <2.0      |
| W/unit                  | <u>1.15</u> (3.4 ?) | <1.0      |

| 80K Shield              | Est. (W)           | Meas. (W)  |
|-------------------------|--------------------|------------|
| ◦ Eleven View Ports     | (22)               | -          |
| ◦ Radiation From 300 K  | 80                 | -          |
| ◦ Support post and Rods | 7.6                | -          |
| ◦ Electrical wires      | $3 \times 10^{-4}$ | -          |
| Total                   | <u>88</u> (110)    | <u>125</u> |
| W/unit                  | <u>22</u> (27.5)   | 31         |



測された

# KAGRA極低温設備建設の流れ

2011 Jfy

2012 Jfy

2013 Jfy

2014 Jfy

2015 Jfy

Apr./'11.

Apr./'12

Apr./'13

Apr./'14

Apr./'15

鏡用クライオスタット

基本設計(KEK)

初年度部品製作

組立てと性能試験

神岡へ輸送・保管

鏡用冷凍機ユニット

基本設計(KEK)

7台の製作と性能試験

9台の製作と性能試験

断熱真空設備

基本設計(KEK)

8台の断熱真空設備製作と性能試験

クライオスタット組立て

'14.11~'15.1

X&Yエンド

'15.2~'15.4

X&Yフロント

断熱真空設備用  
冷凍機ユニット

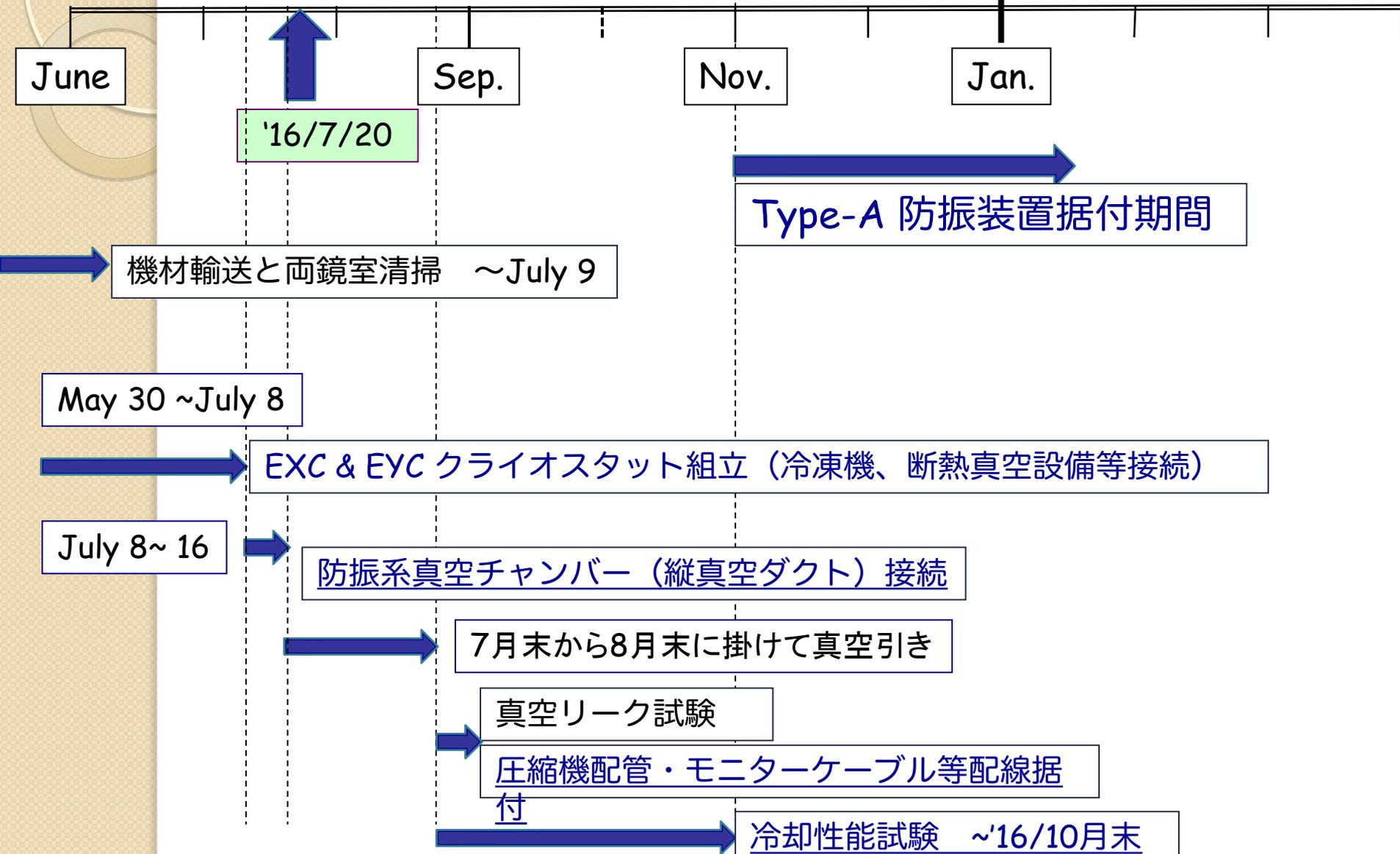
8台の製作と性能試験

### 3. 低温設備の組立と総合試験

### 組立と性能試験スケジュール

2016

2017



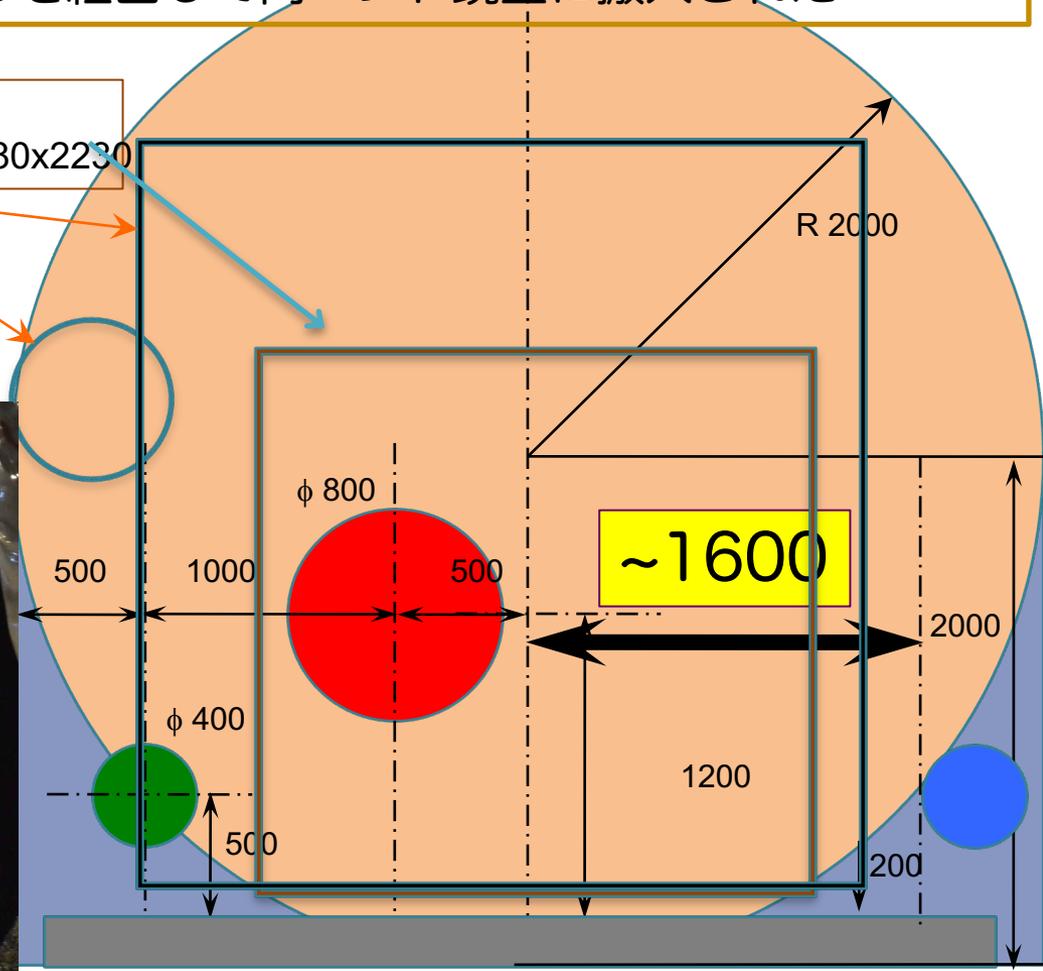
# 機材のトンネル内輸送 (参考)

- \*\* エンド鏡室への輸送機材総重量15 ton (X-end→ 8.5 ton、Y-end 7 ton)  
(圧縮機、フレキシブル配管、断熱真空設備、冷却水循環装置等)
- \*\* 断熱真空設備を除く主要な機材は、KAGRAから約30 km離れた倉庫で保管  
全ての機材は長さ3 kmのトンネルを經由して両エンド鏡室に搬入された

Cryo-chamber  
weight; 12 t  
height; 3150 mm  
width; 2700 mm

Side ports box  
3.4 t, 2480x2480x2230

ventilating duct  
φ 600 mm



トンネル内輸送中の機材

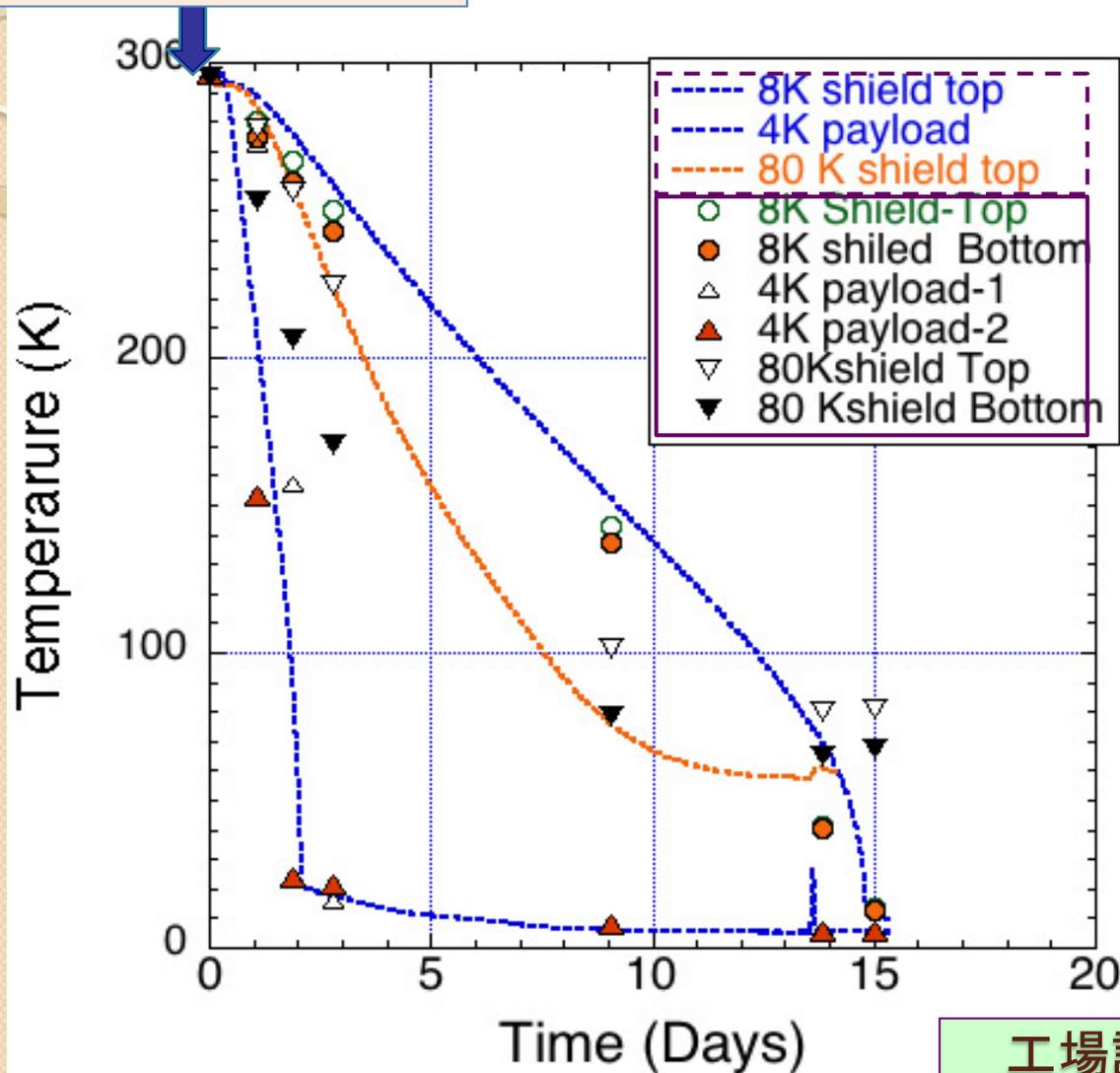


組立を完了した低温設備

# KAGRA抗内での冷却試験の結果 (2017.Feb.6~Mar.13)

KAGRA  
2017/2

Feb. 6 Operation start



工場試験

KAGRA 抗内

工場試験の結果を再現

# KAGRA抗内でのクライオスタット温度分布

~82 K at the top of  
the 80 K outer shield

13.2 K at the side of  
8 K inner shield

47~56 K  
@ 1st cold stage  
of Cryo-cooler

6.1 & 6.8 K  
@ cryo payload  
system

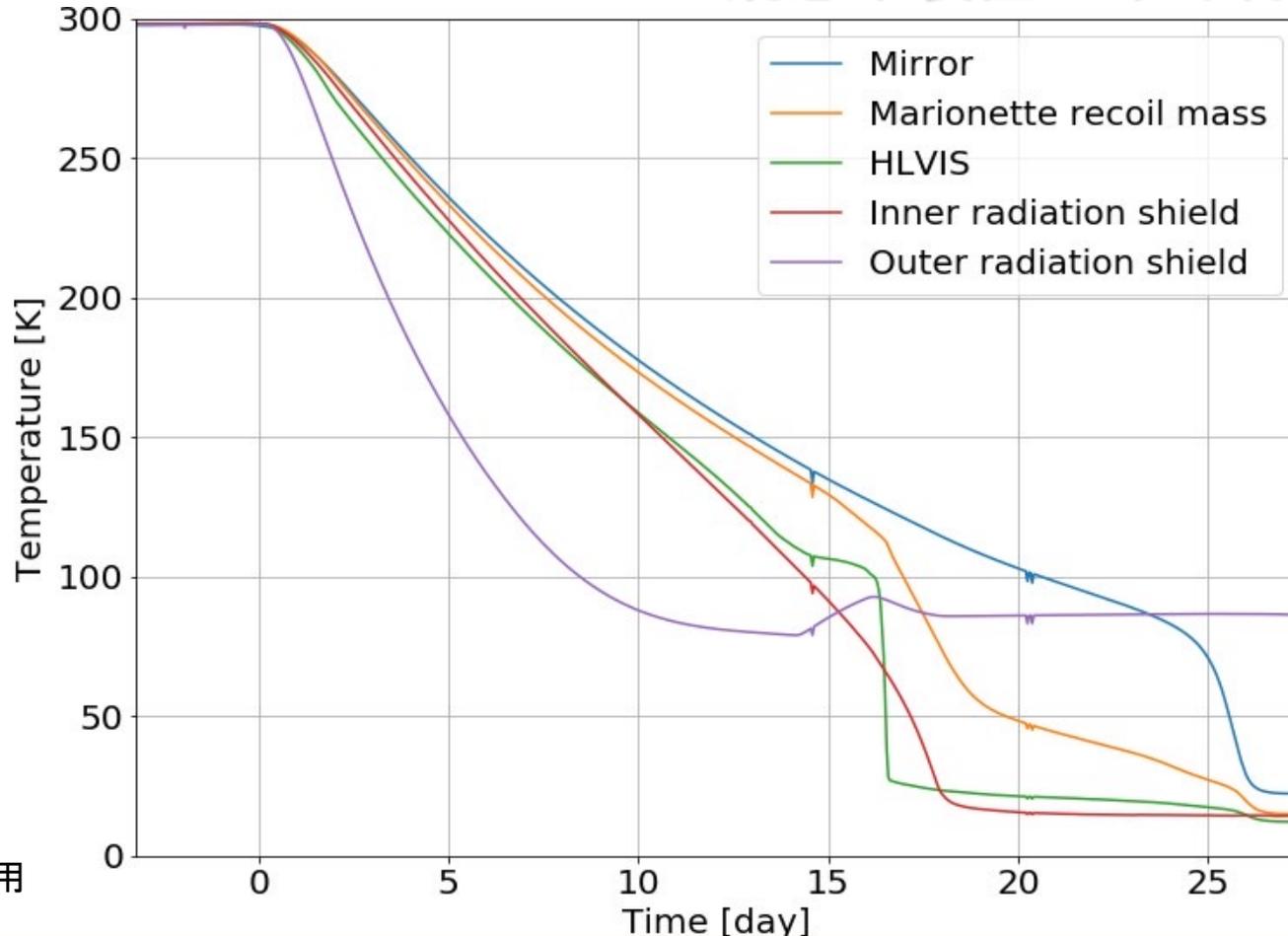
3.9 & 5.7 K  
@ cryo payload  
system

10 & 12 K  
@ 8 K shield  
system

12.5 K @  
shield system

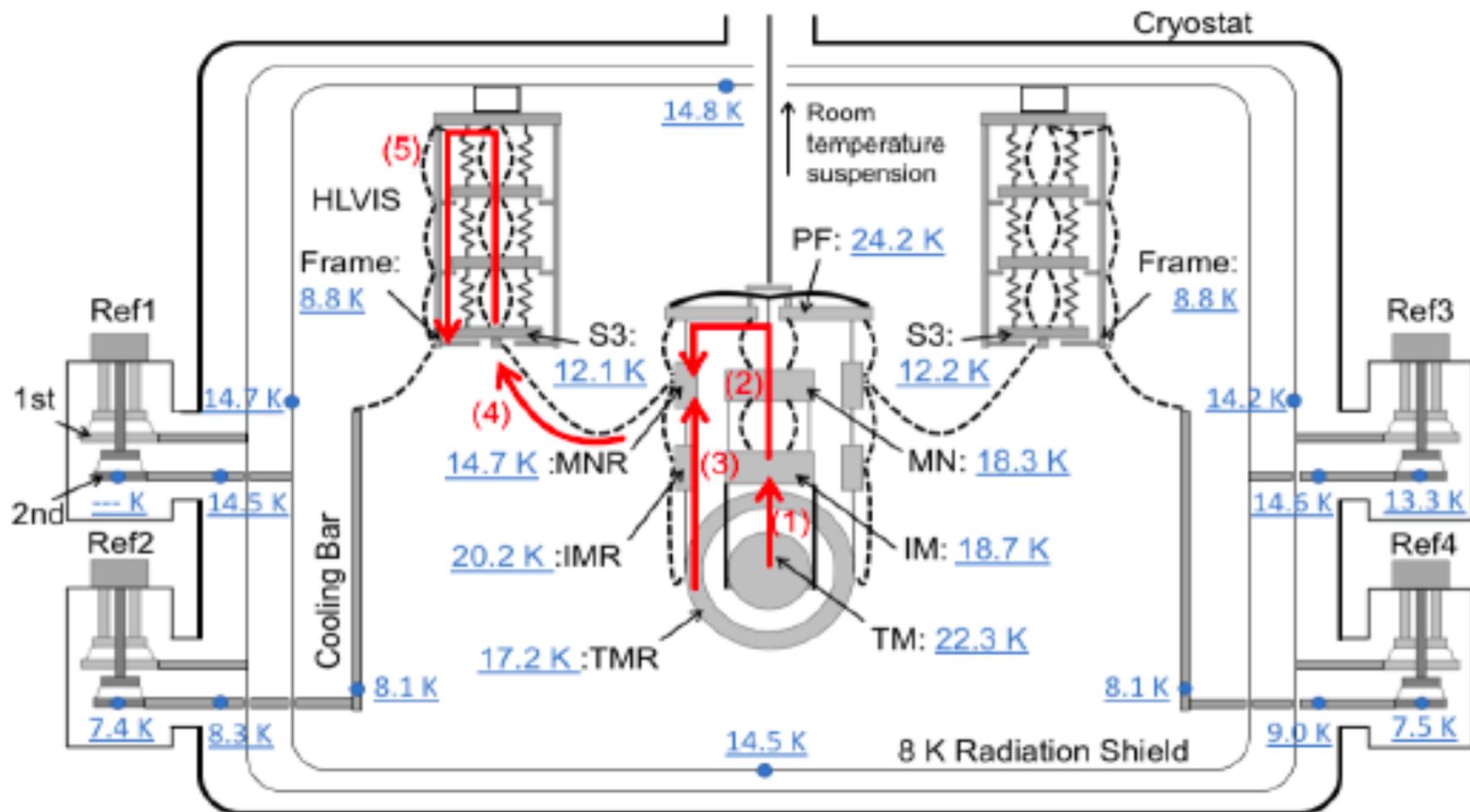
## 4. 鏡冷却

## 鏡懸架装置の冷却特性



参考文献 [16]から引用

- \*\* 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 (Internal radiation shield), 鏡 (Mirror), マリオネット反跳マス (Marionette recoil mass), HLVISが同時に冷却されている
- \*\* 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, マリオネット反跳マス, 鏡の順で冷却が進む
- \*\* 低温設備の冷却開始から27日目に鏡は22Kに到達
- \*\* 100 K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

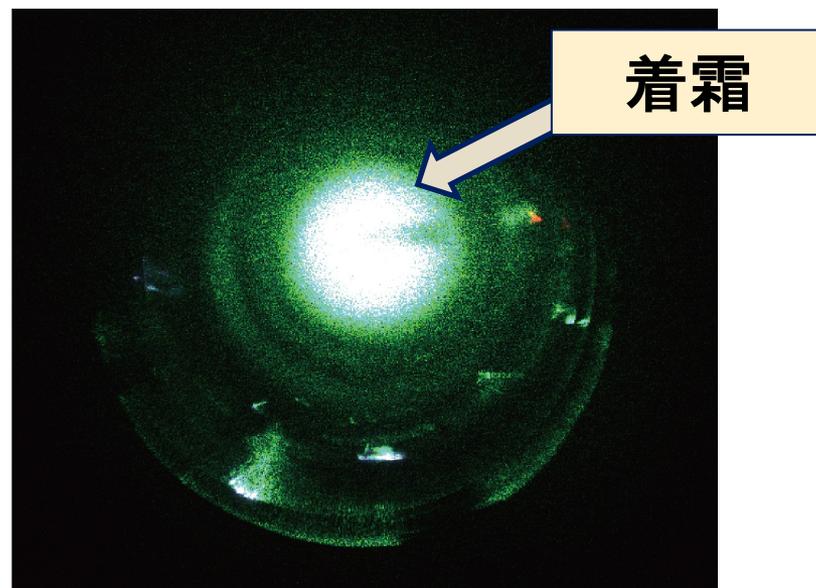
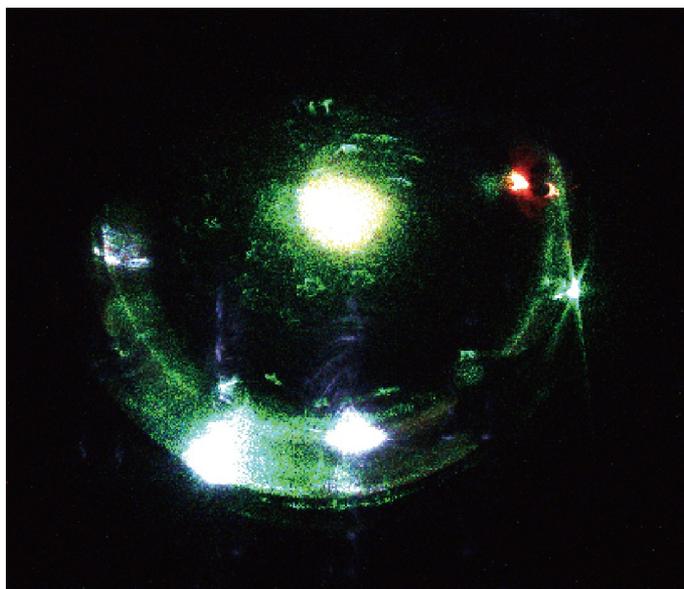


## 冷却完了後のクライオスタット内温度分布

# 鏡の着霜問題とその対策

## 着霜した鏡

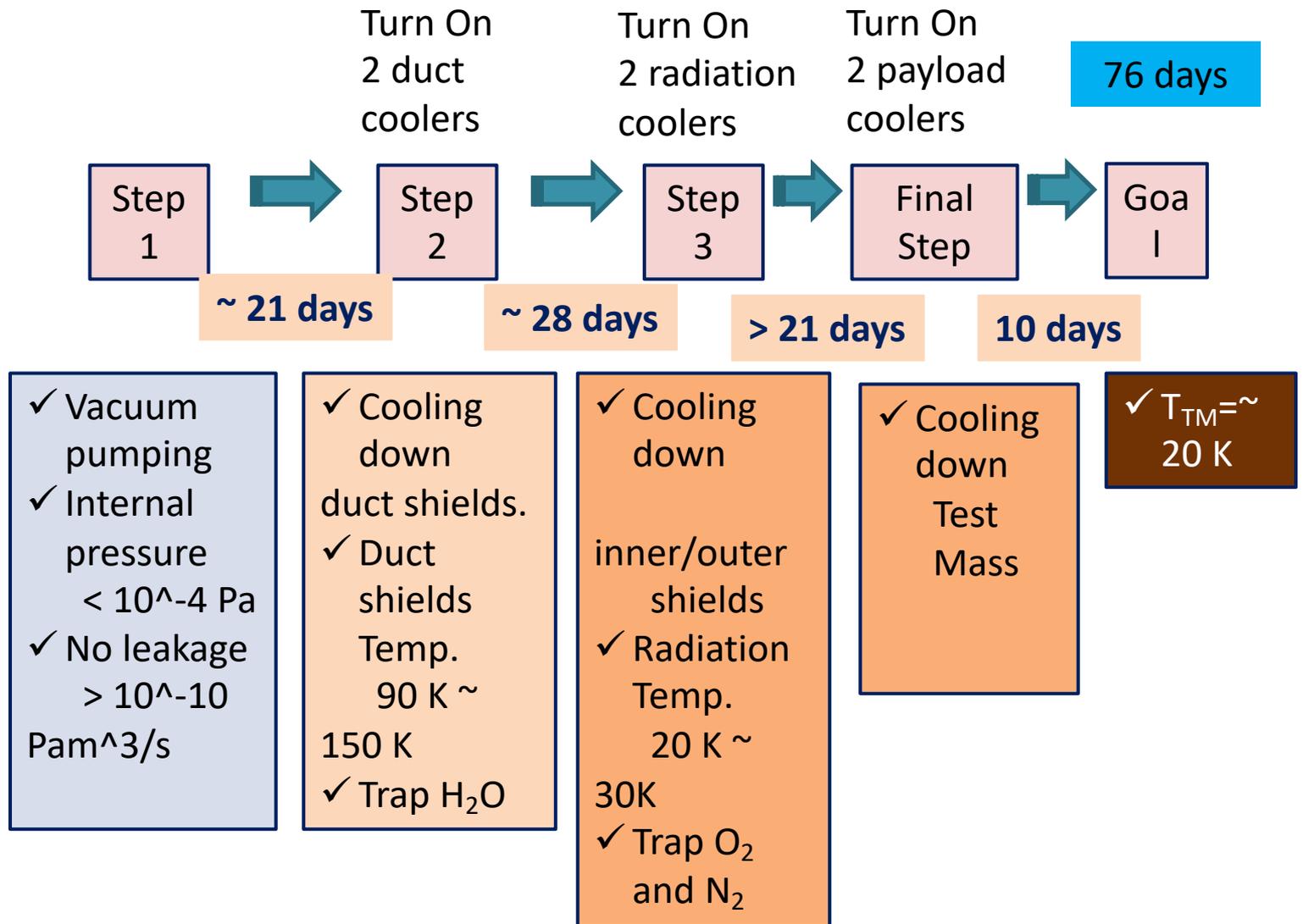
- 着霜を防止しつつ、鏡を $\sim 20\text{K}$ まで安定的に冷却させるため、2020年末から2021年初めまでクライオスタットを用いた冷却実験を実施

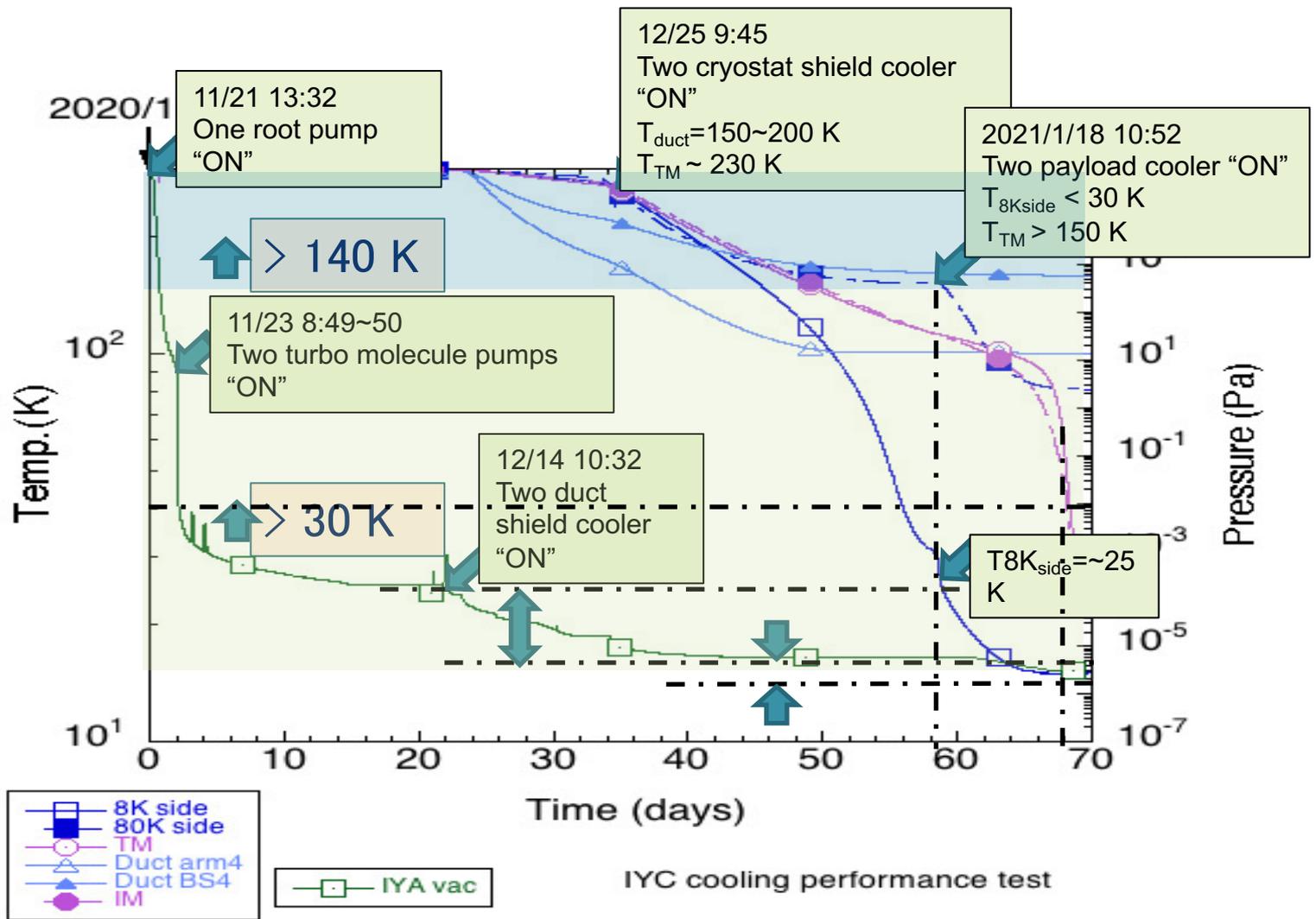


参考文献 [23]から引用

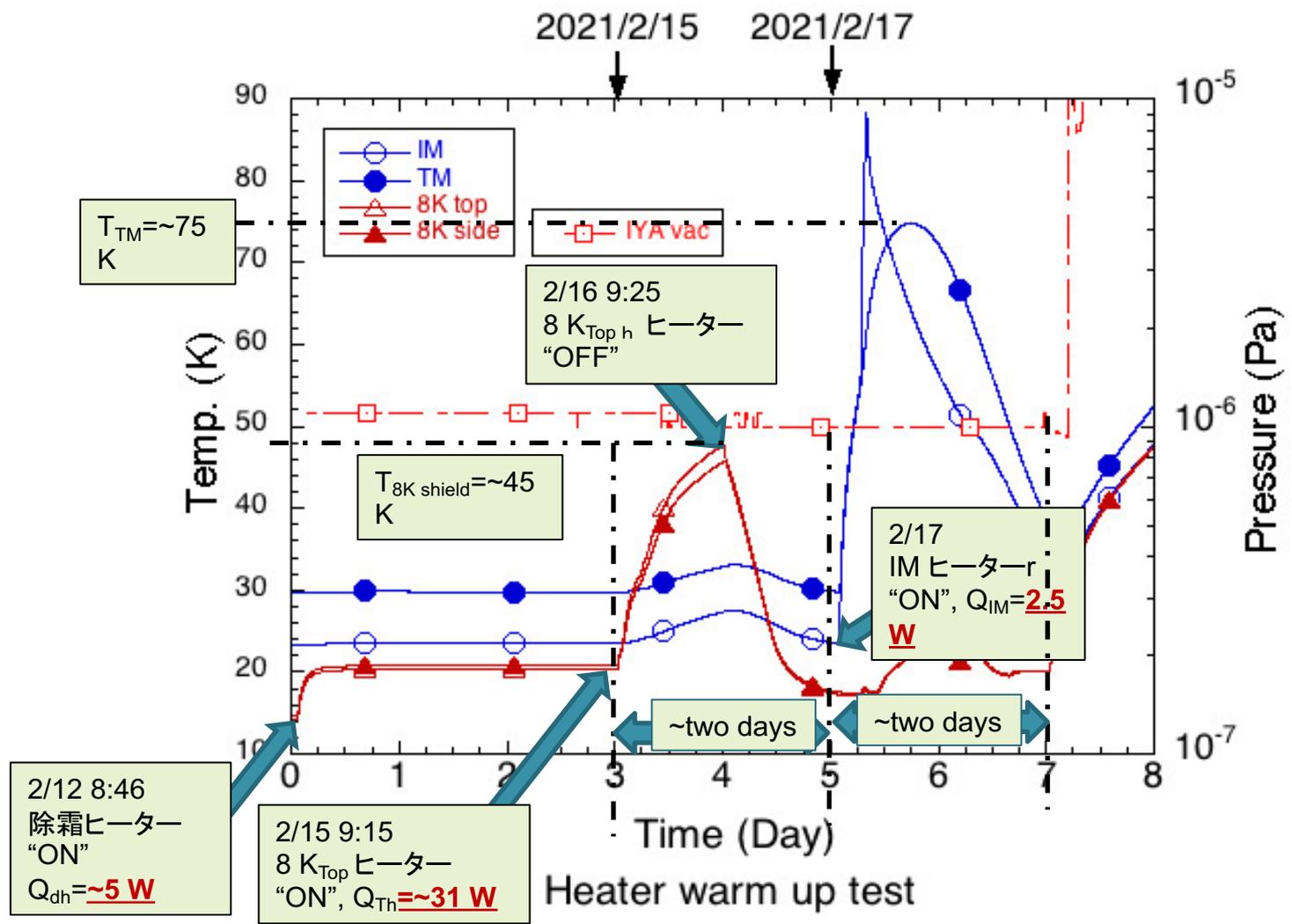
写真は、TM温度 $\sim 25\text{K}$ での着霜の例(@EXC 2020/08)  
O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oの氷結により霜が形成されたと推定

# 着霜しない冷却法の確立





## 提案された冷却法の結果



## 除霜ヒーターによる鏡と内層輻射シールドの加温特性

## 5. まとめ

- KAGRA低温設備は加速器関連技術の応用例の一例
- 今後も加速器超伝導技術の多方面への応用を期待

# 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.

# 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](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] 榎原 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](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] 榎原 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 $\mu$ 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
- [26] K. Yamamoto, Cryogenics, Amaldi Research Center Summer School, 6-7 September 2022



# Appendix

# KAGRA 干渉計構成

## Dual Recycled Fabry-Perot Michelson Interferometer

### モードクリーナー

- 26 m
- フィネス: 500

### レーザー

- 波長: 1064 nm
- パワー: 180 W
- NPRO + Fiber amp. + laser module

### PRM

80 W

825 W

3km

ETM

この鏡が低温  
~20 K

### 主干渉計

- Resonant sideband extraction with detuning
- パワーリサイクリングゲイン: 11
- シグナルリサイクリングゲイン: 15

ITM

この鏡が低温  
~20 K

BS

ITM

400 kW

ETM

3km

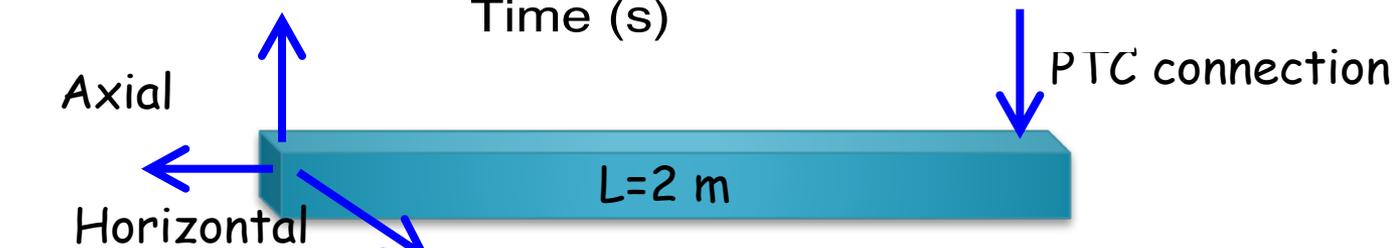
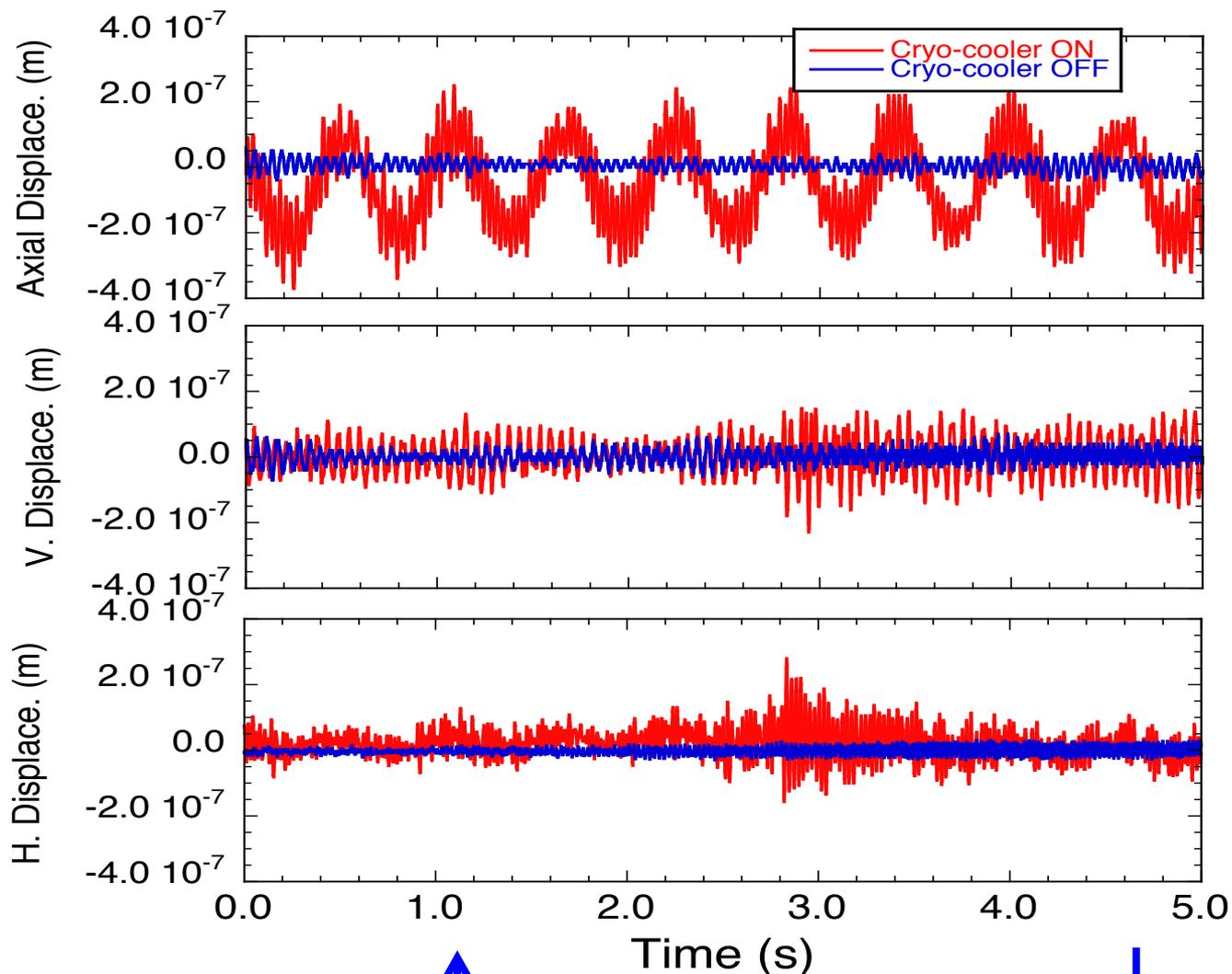
### Signal Extraction Mirror

この鏡が低温  
~20 K

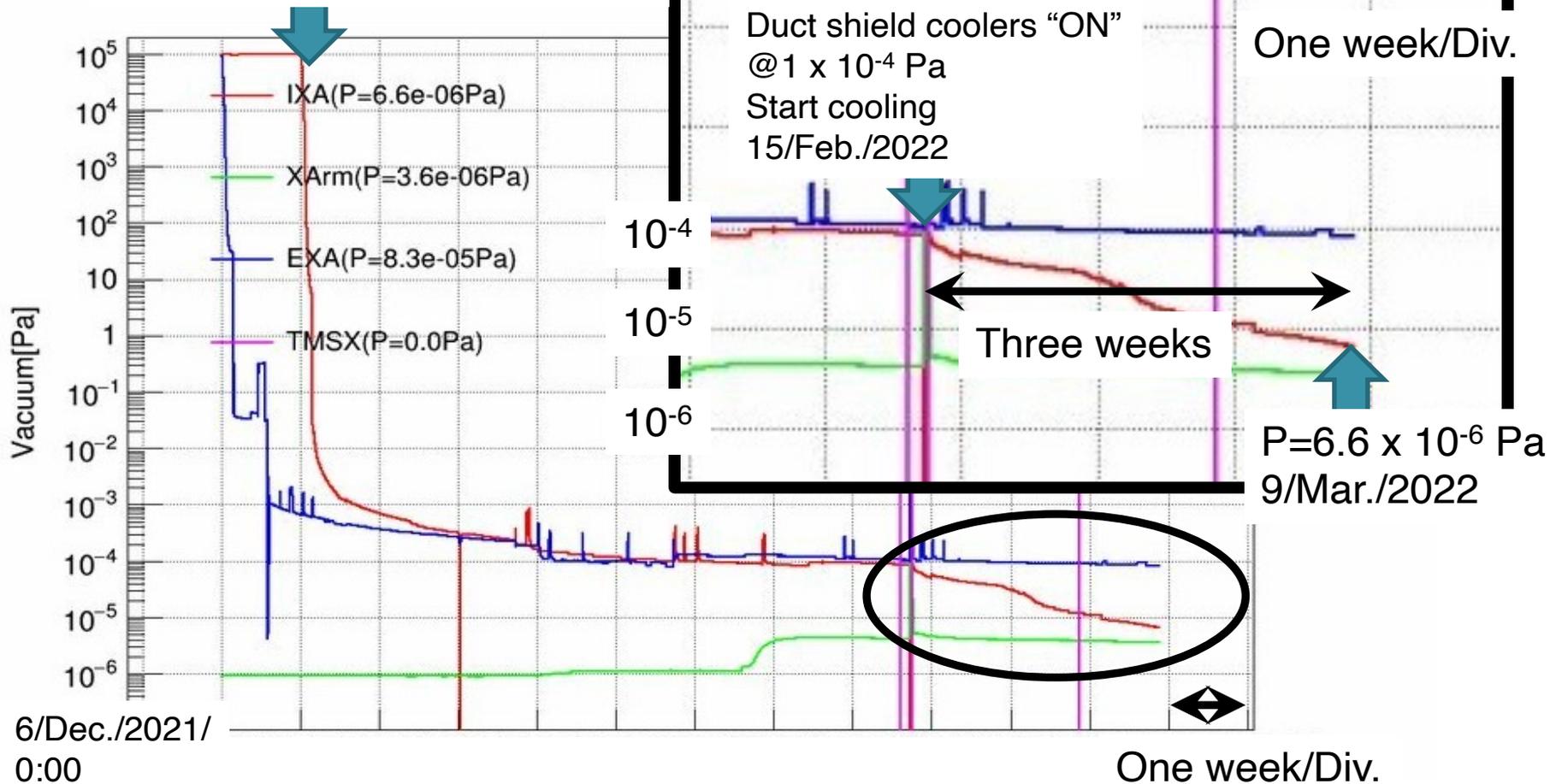
この鏡が低温  
~20 K

### アウプット モードクリーナー<sup>45</sup>

# Vibration Level at edge of AL thermal conductor

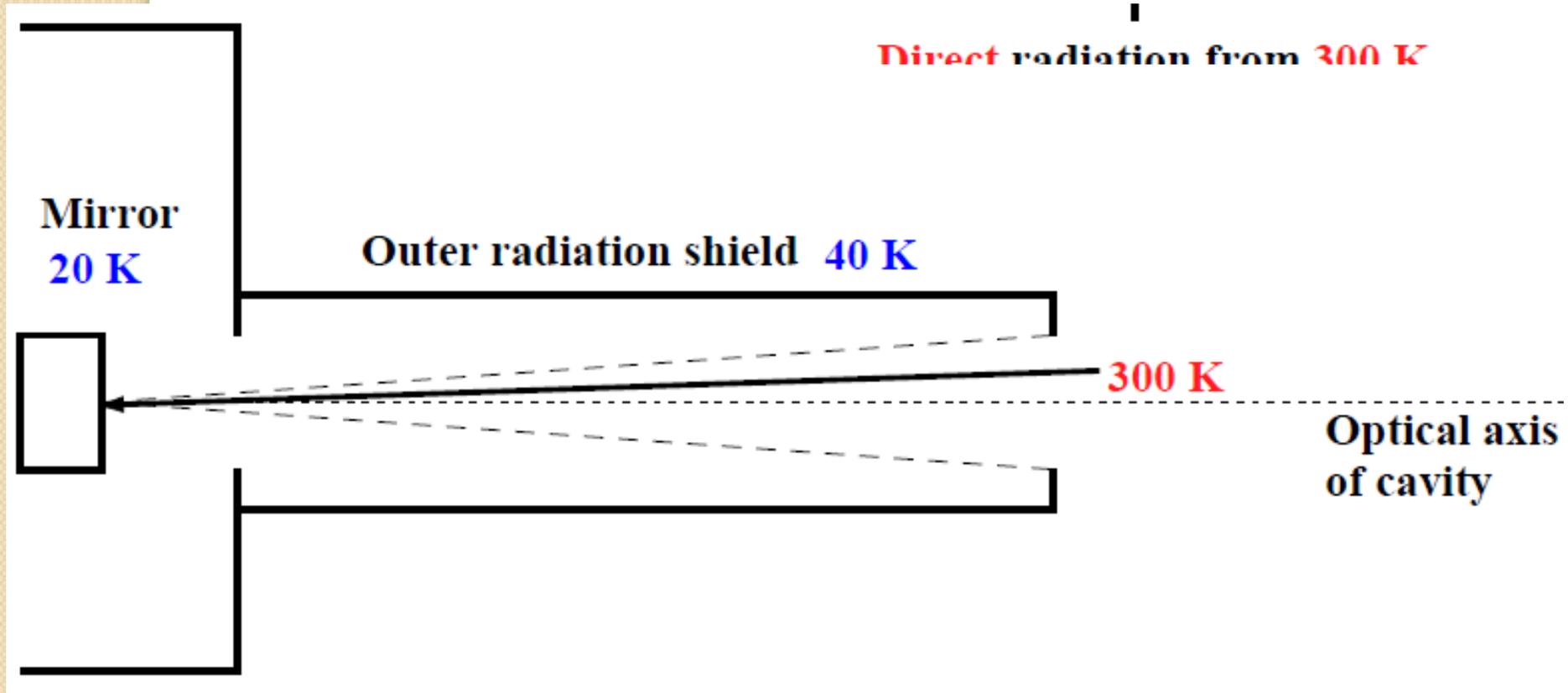


“START” evacuation of IXC  
23/Dec./2021



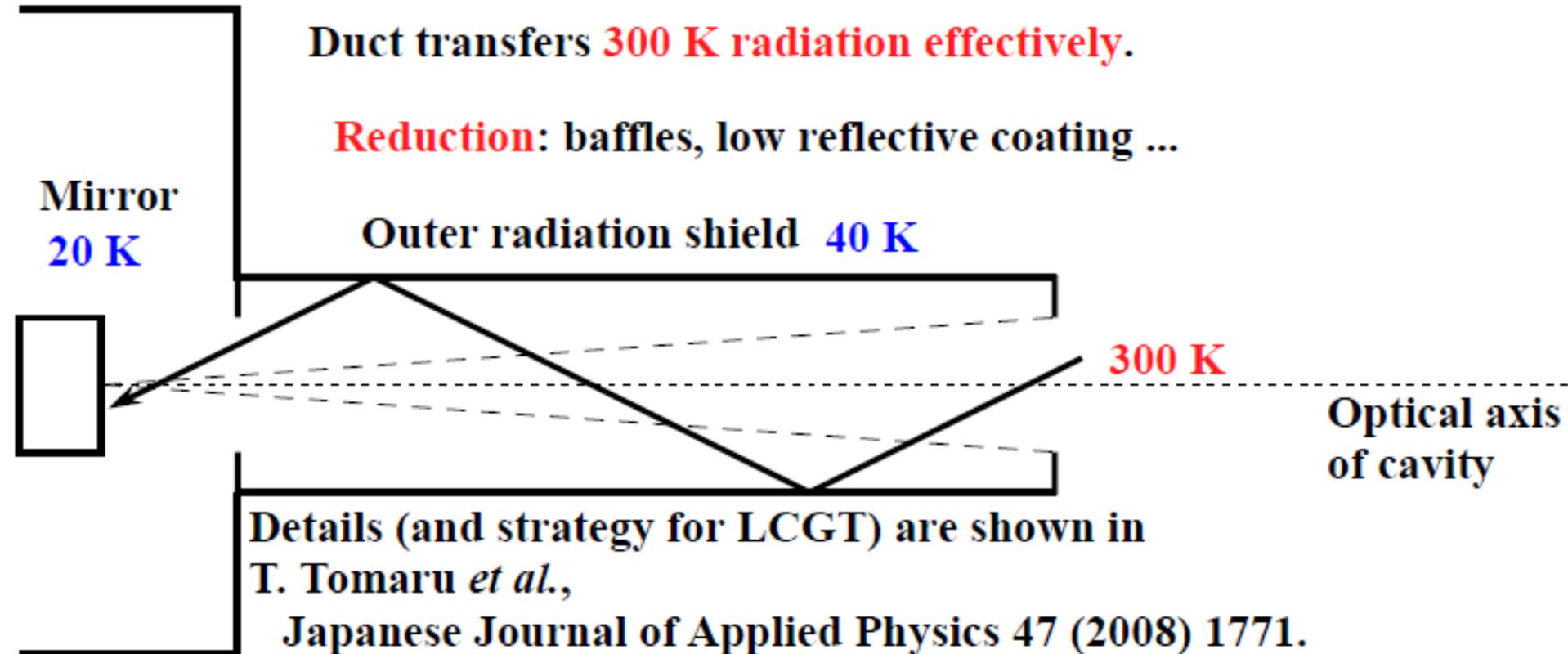
## クライオスタット内圧力の変化

# 多重バツフル付きダクトシールド



Power of 300K radiation is proportional to **solid angle of hole** (inversely proportional to duct length). So, 300 K radiation should be small.  
But actually,.....

# 多重バッフル付きダクトシールド



T. Tomaru et al.,  
Journal of Physics:Conference Series 122 (2008) 012009.

**But actually, cryo duct can transmits 300K radiation well (!) because inner surface of cryo duct reflects radiation !**

