

KAGRAの低温技術 Cryogenics for KAGRA

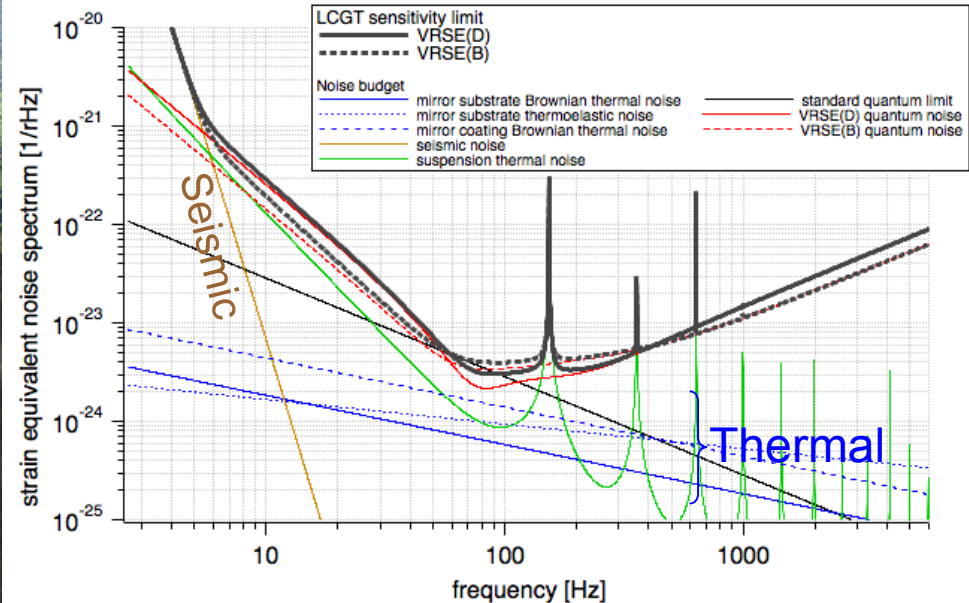
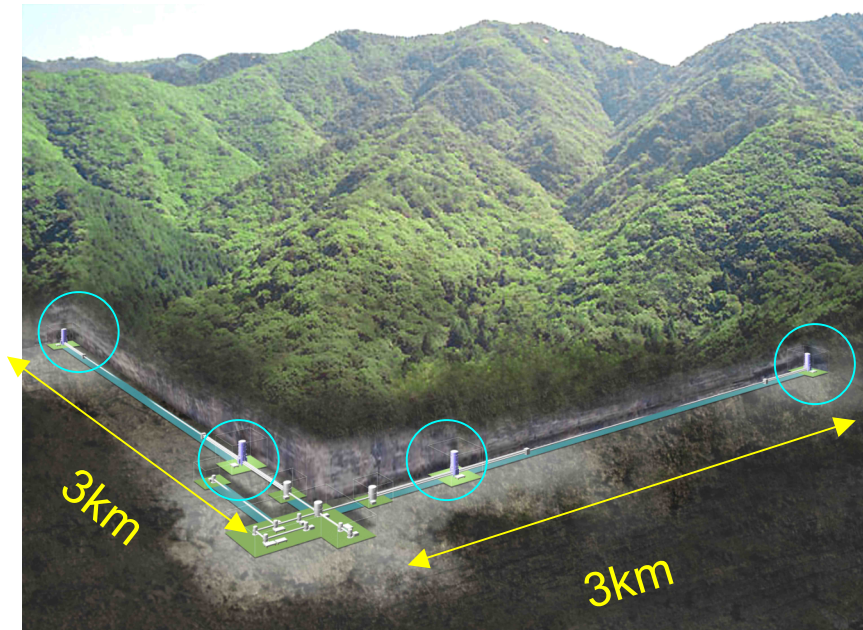
第二回可視赤外線観測装置技術ワークショップ
2012年12月18日

鈴木敏一
KEK / KAGRA ICRR

<内容>

- KAGRA Project
- 冷却の特徴
- 低温系の構成(冷却系の構成機器)
 - クライオスタット
 - 冷凍機ユニット
 - ダクトシールド
- まとめ

KAGRA Project

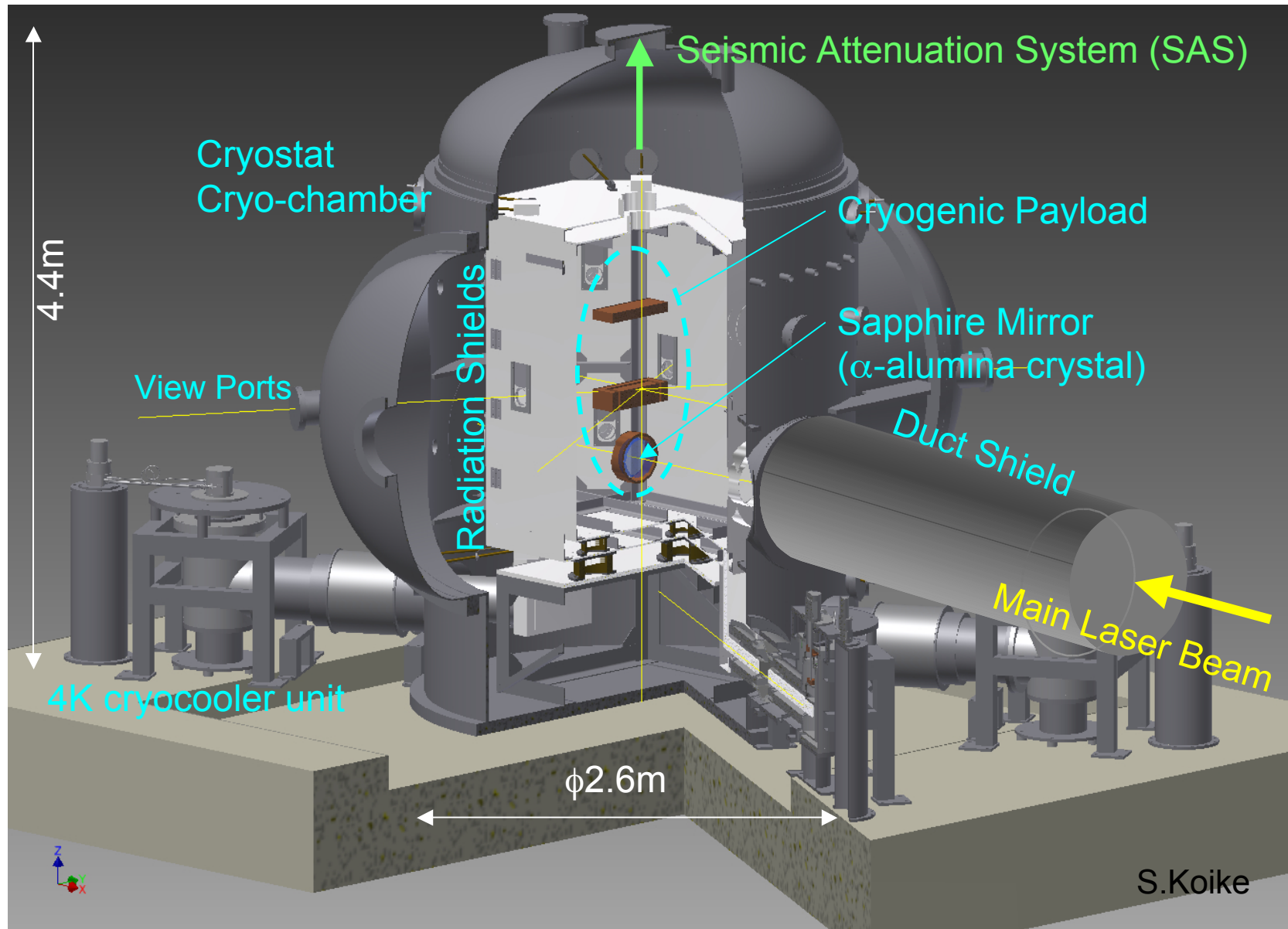


- 重力波の直接検出と重力波天文学の創成をめざす
- 神岡 池ノ山の地下に大出力高安定レーザーを光源とする腕長3kmの干渉計を設置
- 干渉計の鏡を20Kに冷却して熱雑音を低減する
- 1年間あたり数回の重力波イベントを検出できる感度を達成
- 2010年度半ばから建設がスタートした。2017年度の運用開始を目指している。

KAGRA Cryogenics 冷却の特徴

- 高出力レーザーのあたる鏡での発熱、レーザー光散乱に抗しての冷却。
- 300K空間への開口(主ビームダクト、SASとの結合)を持つクライオスタットでの熱輻射の防止。
- 鏡の高真空($p \sim 10^{-7}$ Pa)中での冷却。(実験スペースの真空と断熱用の真空が分離できない。そのため真空に接する素材は冷却無しでも高真空仕様を満たすものに限られる。)
- 神岡地下トンネルの静粛性を損なわず、トンネル内での長期連続運転に適した冷却方法の実現。 → 防振装置付き小型冷凍機による低振動冷却 + 高純度金属による伝導冷却
- 初期冷却速度を上げ、観測の待ち時間を短縮する
- 高真空実現のための低脱ガス断熱材の使用
- 光学系の汚染防止のためクリーン度を維持
- 計測系への電氣的ノイズ、音響ノイズの防除。
- サファイア鏡をサファイア細ロッドで懸架する。低機械損失、十分な伝熱、を両立する構造の実現。

KAGRA Cryogenic Components



クライオスタット熱負荷推定

(散乱光の無い場合)

1段冷却ステージ 80 K

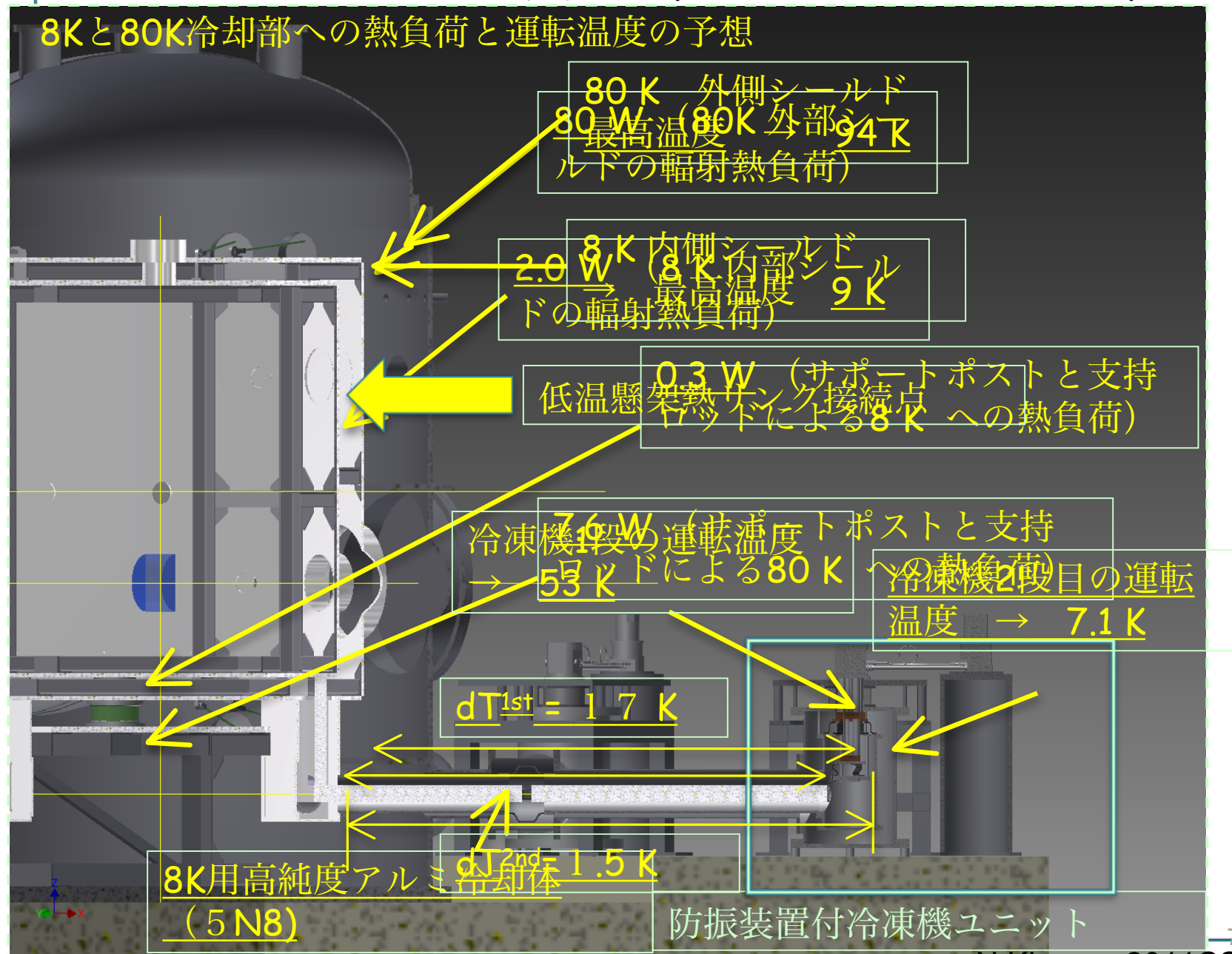
2段冷却ステージ 8 K

• 80 K輻射シールド	(W)
○ ダクトシールド	8.2
○ 可視化窓	7.8
○ 輻射	80
○ 支持機構	7.6
○ 計測線	3×10^{-4}
合計	<u>103</u>
冷凍ユニット1台当たり	<u>33</u>

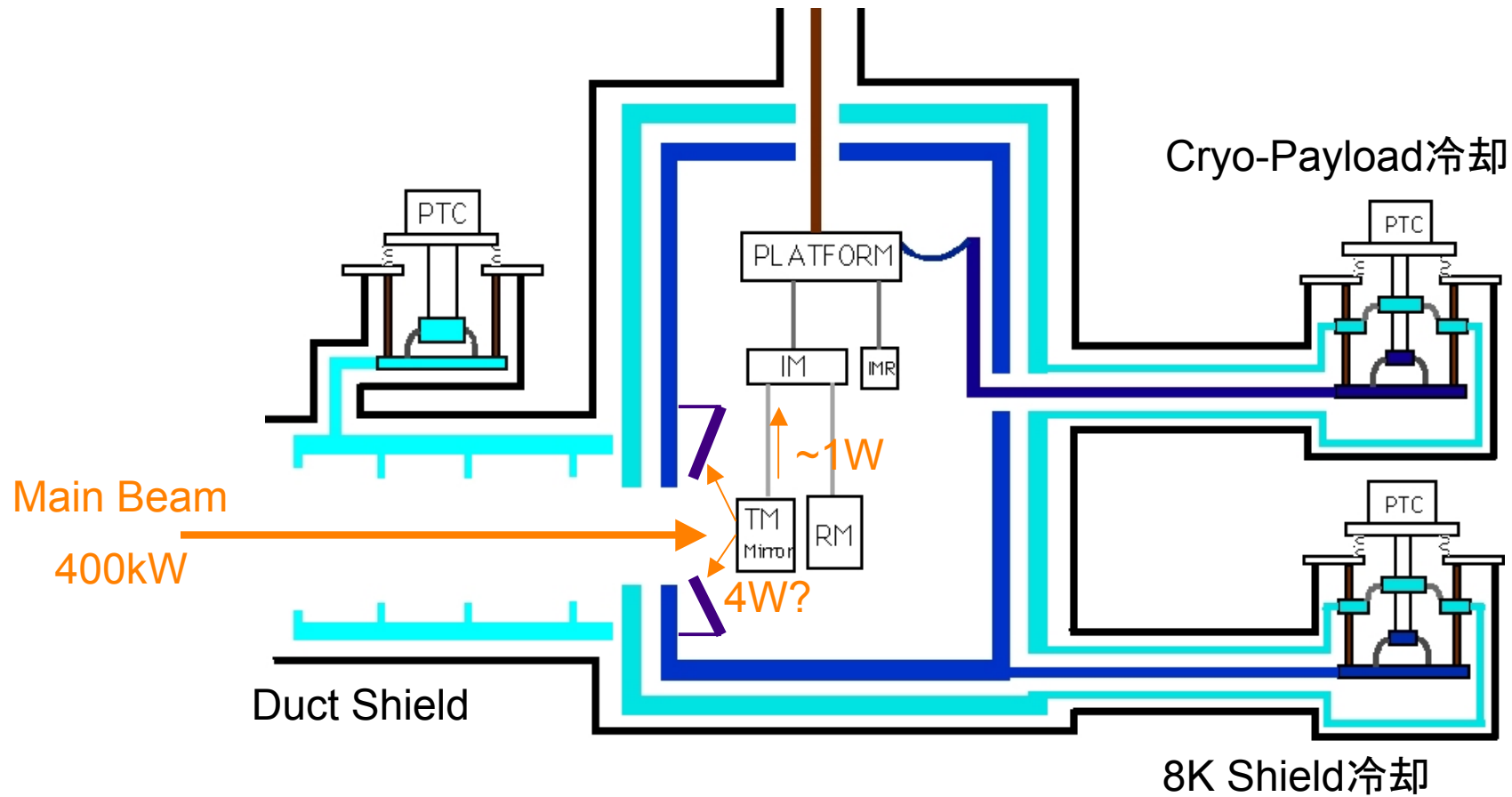
• 8 K輻射シールド	(W)
○ ダクトシールド	0.3
(Beam and SAS)	
○ 可視化窓	0.8
○ 80 K輻射	2.0
○ 支持機構	0.3
○ 計測線	3×10^{-4}
○ 鏡吸収	0.9
○ 高角度散乱	?
合計	<u>4.4</u>
冷凍ユニット1台当たり	<u>1.4</u>

クライオスタット運転温度 (散乱光のない場合)

8Kと80K冷却部への熱負荷と運転温度の予想



冷却系の散乱光対策 - 冷却の2系統化 -



- クライオスタット1台あたり4台の冷凍機ユニットを2台ずつ2系統に分けてCryo-Payloadと8Kシールドの冷却を行う
- 広角散乱抑止バッフルは8Kシールドを經由して冷却する

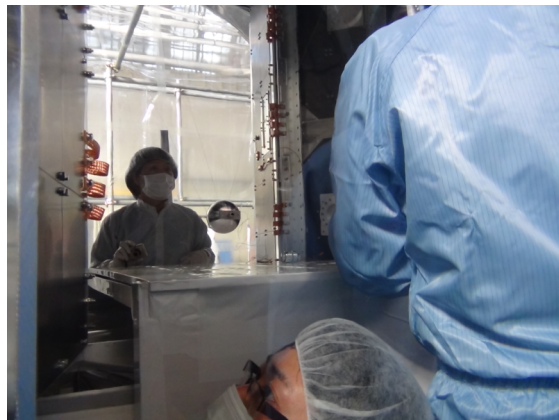
Cryogenics : Cryostat assembling and performance test



Dressing partition of
No.1 Cryostat



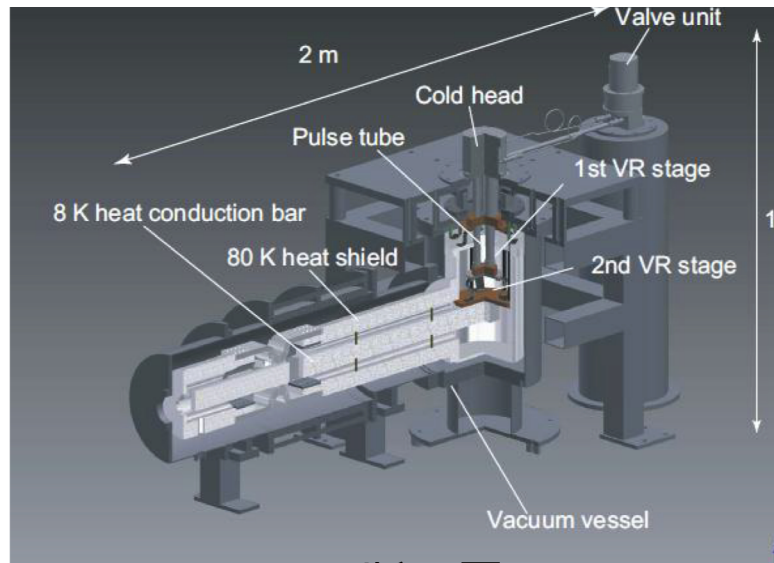
Ceiling part of 8K shield



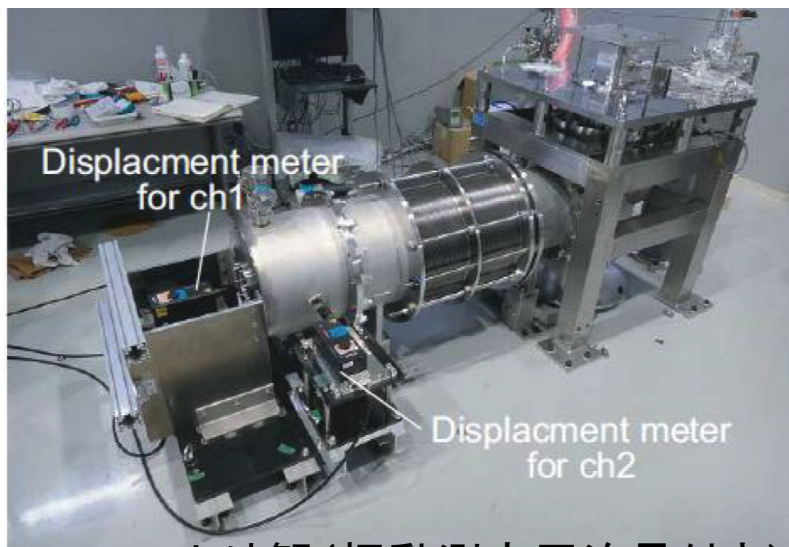
Al sphere for an initial cooling
test of mirror suspension

- Assembling of cryostats and preparation of performance tests are in progress in the TOSHIBA Keihin Factory.
- Basic test items
 - Cooling time, minimum attainable temperature under various heat loads.
- Specific test items
 - Cryostat No.1 : Cooling test of $\phi 105$ Al sphere without DLC.
 - Cryostat No.2 : Cooling test of $\phi 105$ Al sphere with DLC.
 - Cryostat No.3 : Vibration measurement of 8K shield using interferometer(ICRR) and accelerometer(Roma Univ.)
 - Cryostat No.4 : Cooling test of a scaled preliminary model of cryogenic payload.

4K Cryocooler Unit 防振構造



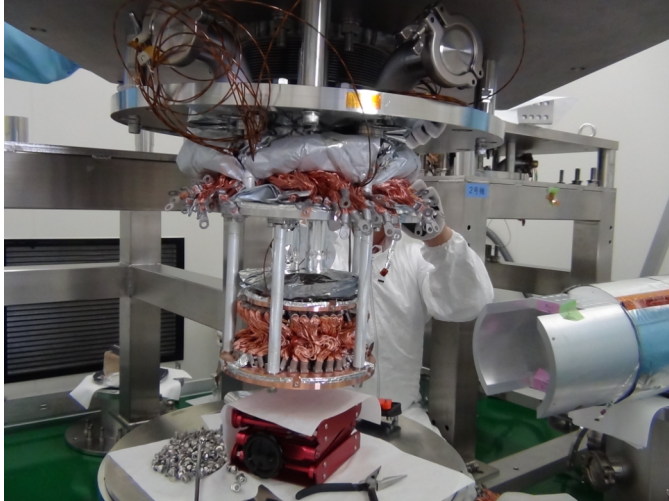
ユニット3D断面図



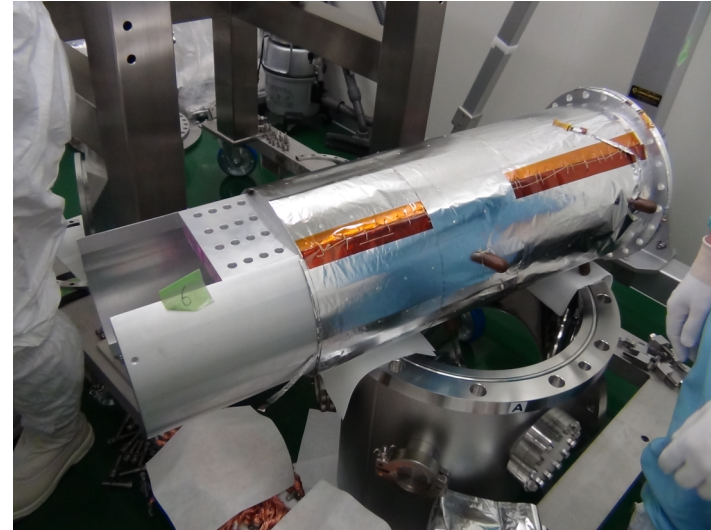
ユニット外観(振動測定用治具付き)

- 市販の4Kパルスチューブ冷凍機をベースにコールドステージの防振を施す。
- コールドヘッドとバルブユニットを分離。
- コールドヘッドを床面に固定
- 冷却路側はコールドヘッドと別の支持構造体で床面に固定。
- コールドヘッドと冷却路を柔軟なヒートリンクで結ぶ。
- 真空気密を保つため、コールドヘッド固定構造と冷却路固定構造はベローズで結ぶ。
- ガス配管(コールドヘッドーバルブユニット、バルブユニットー圧縮機)は出来るだけ固定配管を用いる。
- この方式による防振は設置した地盤の振動レベルによって限界が決まる。

4K Cryocooler Unit



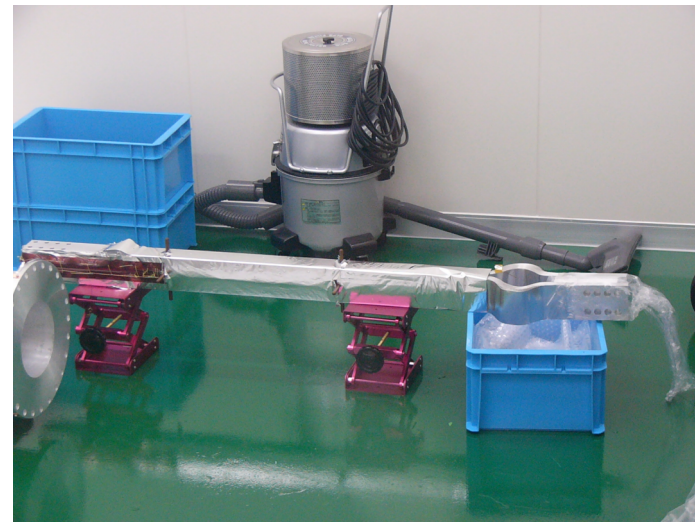
減振ステージとヒートリンク



80K冷却路 A1050

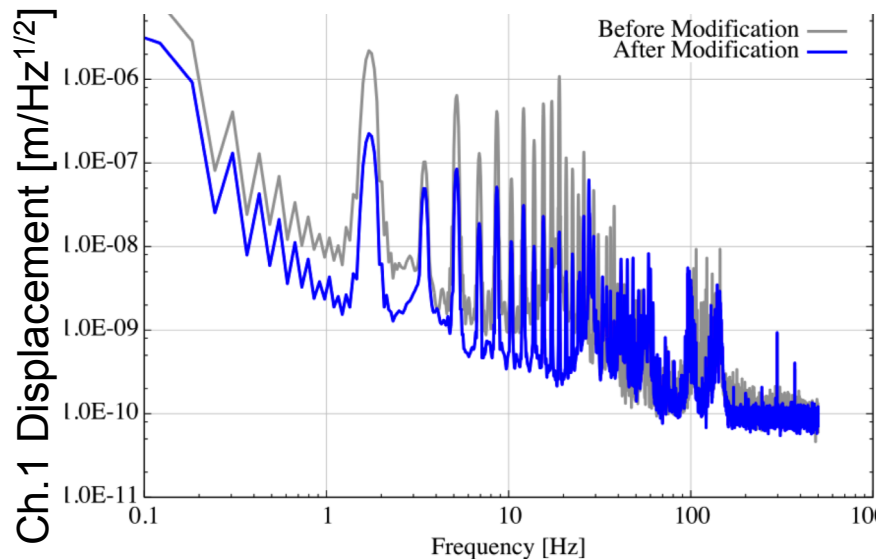
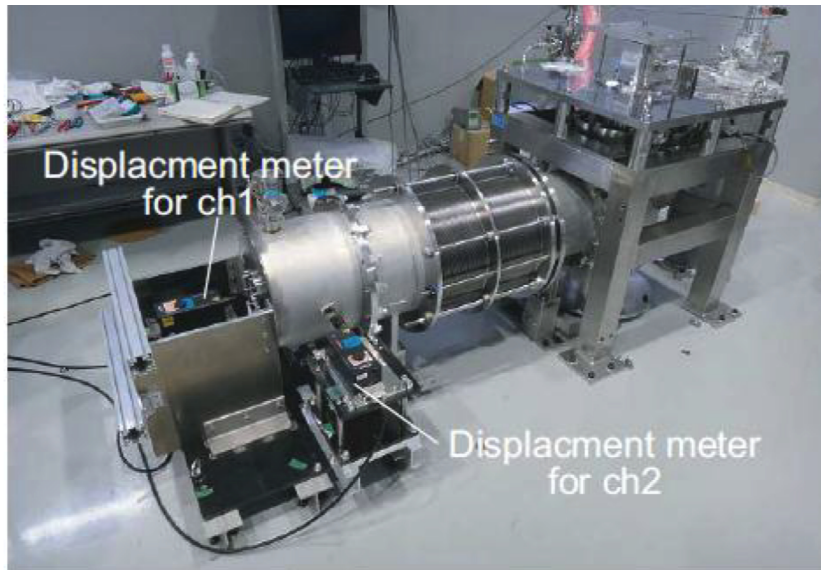


減振ステージ支柱 baked CFRP



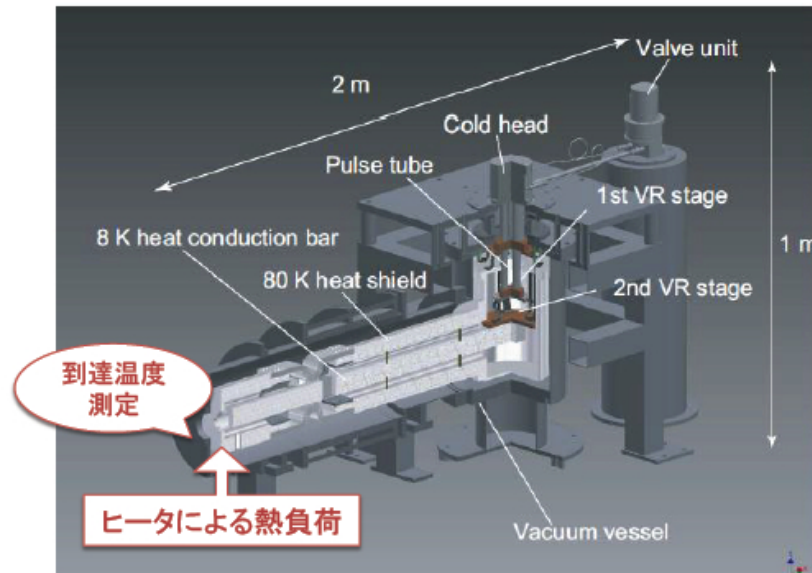
8K冷却路 AI 5N8

4K Cryocooler Unit 振動試験

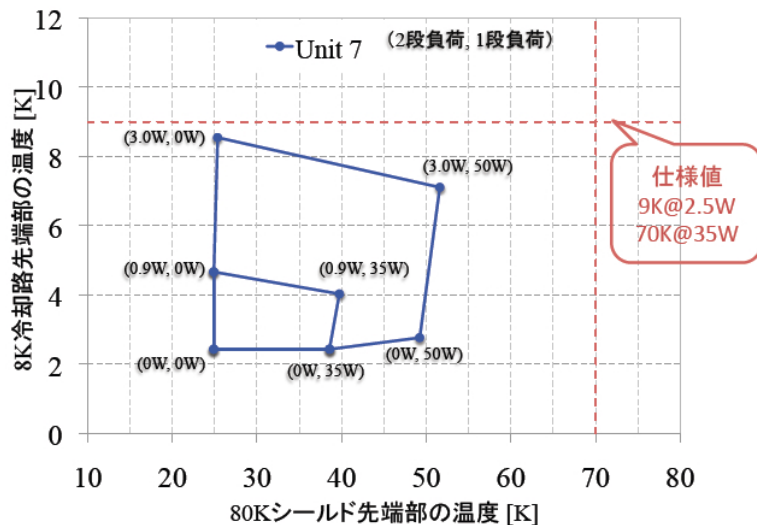


- クライオスタットへの接続端の3方向の振動をレーザー変位計で測定。
- レーザー変位計は床にアンカー固定した台に設置。
- 各レーザー変位計の台に加速度計を置いて、台の動きをモニターする。
- パルス管冷凍機のコールドステージ振動は、1.7Hzのガス圧の変化によって起こるパルス管の伸縮から生じる成分(とその倍波成分)が大きい。
- 減振ステージ支柱の剛性を上げ、80Kラインと8Kラインの間の支持補強を行って防振効果が改善された。(左図の灰色線が改造前、青線が改造後)

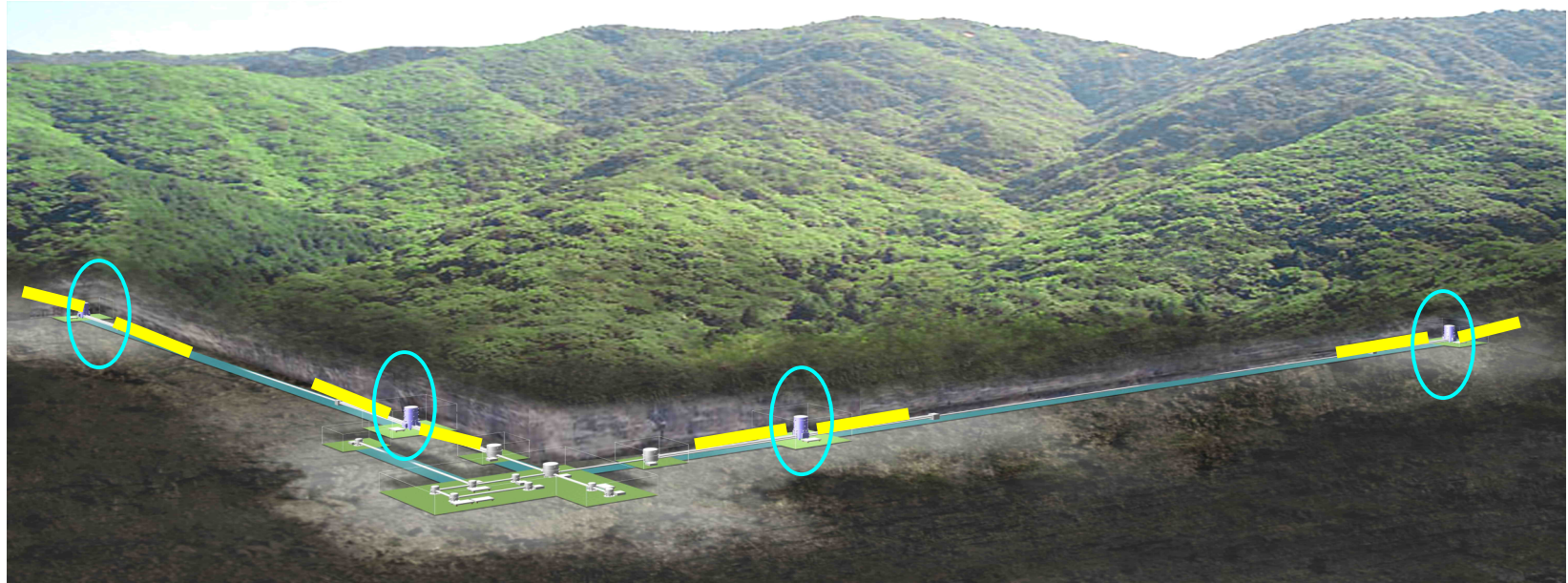
4K Cryocooler Unit 冷却能力試験



- クライオスタットとの連結部である冷却路の先端にヒータによる熱負荷を与えた時の到達温度を測定する。
- 仕様値は、
 - 1st stage 熱負荷35Wで70K
 - 2nd stage 熱負荷2.5Wで9K
- Unit No.7 の冷却能力は仕様を満足した

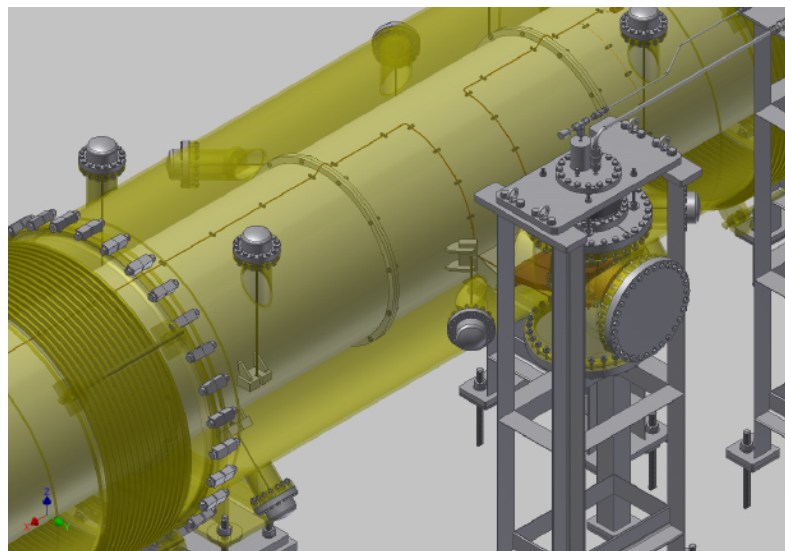
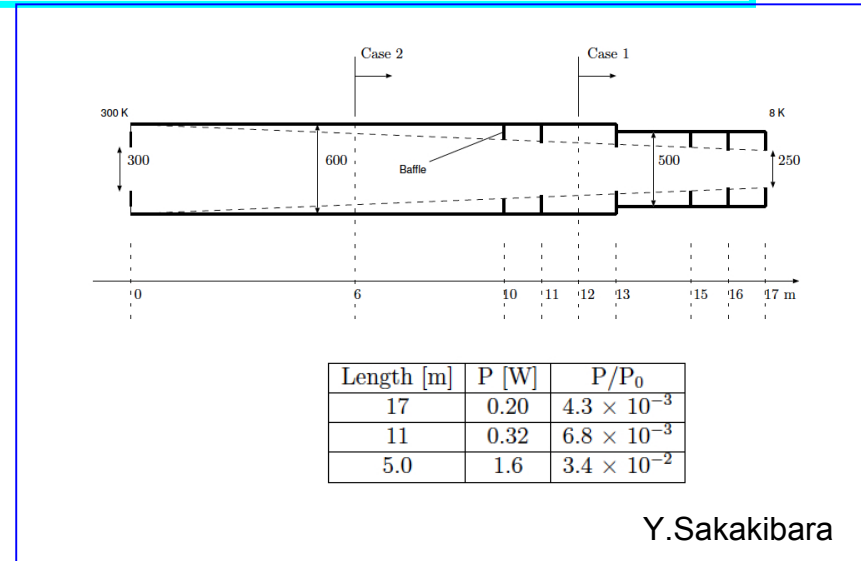
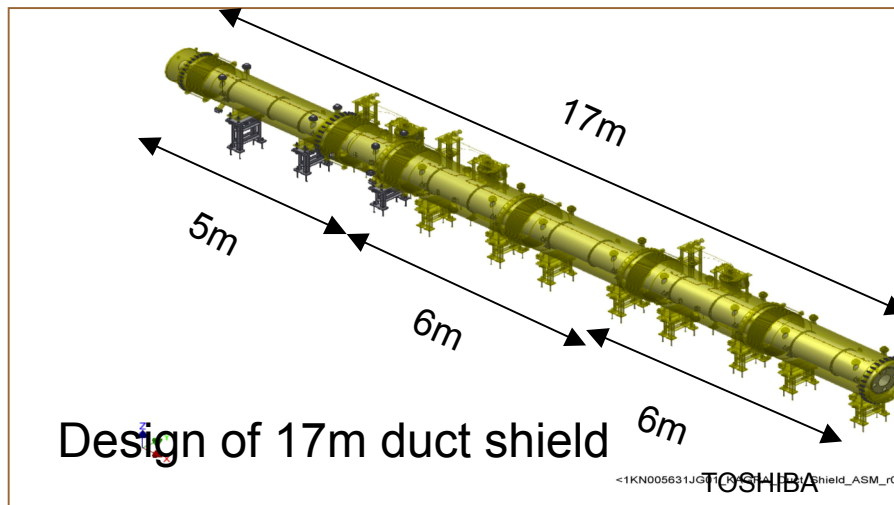


Duct Shield



- 冷却鏡を収めるクライオスタットと300Kの真空ダクトをつなぐ部分にパイプ状の冷却したシールドを設ける(8ヶ所)
- 300Kダクト部から冷却部への熱輻射侵入を阻止
- 300Kの真空部からのガス分子を阻止
- 鏡表面の散乱光の一部を吸収
- 初期デザインでの長さ: 17m

Cryogenics : Duct shield (17m vacuum duct + cryo-pipe)



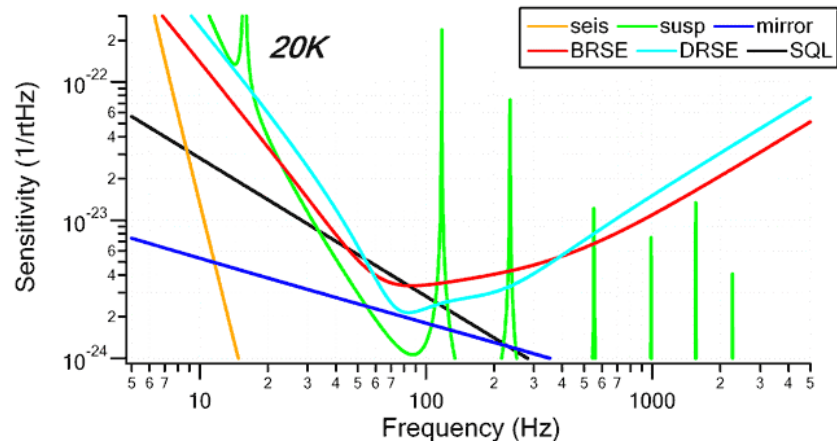
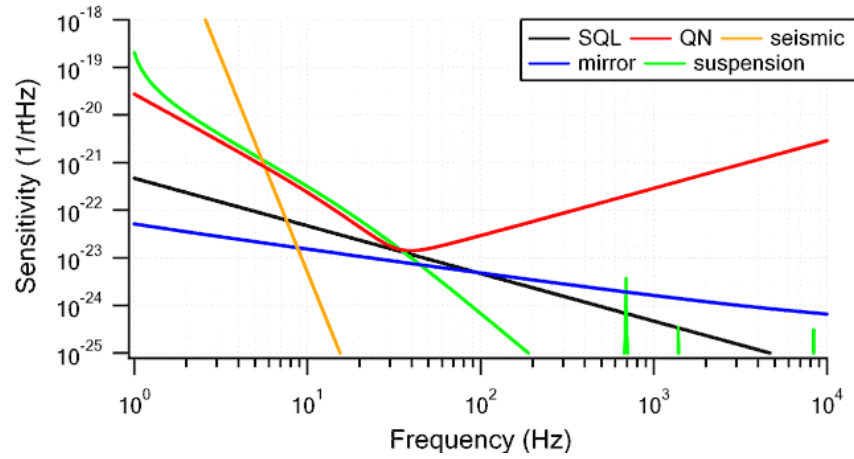
Cryocooler 取付部

- Duct shield has been designed with 17m vacuum duct and 17m cryo-pipe.
- One set of 17m duct shield is manufactured by TOSHIBA in 2012FY. Vacuum duct and cryo-pipe are separated by 3 sections. Each section is cooled by a single stage pulse tube cryocooler.
- An investigation for shorter cryo-pipe is started by the requirement of cost reduction.

まとめ

- クライオスタットは2系統冷却で散乱光による余剰入熱に備える。
- 防振機構付きの冷凍機ユニットによる冷却
 - 高真空中での低振動冷却: クライオスタットとの連結端に於いて、冷凍機の駆動周波数での振幅が $\sim 100\text{nm}$ に抑えられる。
 - 冷凍能力: 80K冷却路において70Kで35W以上、8K冷却路において9Kで2.5W以上が得られている。
- クライオスタット4台、冷凍機ユニット合計16台を製作中。
- ダクトシールドは2013年度以降に実機製作。

iKAGRA bKAGRA



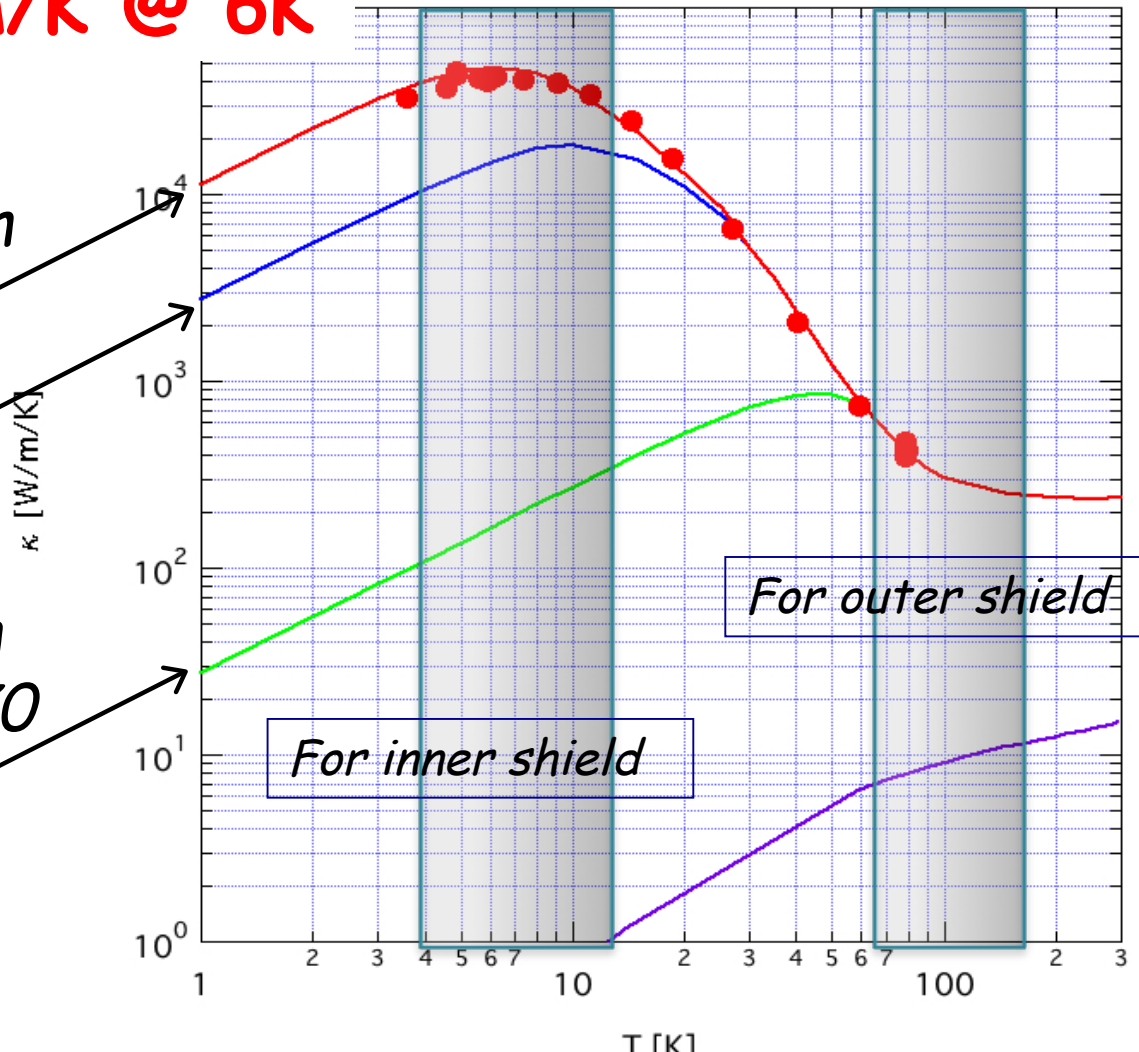
Example of Thermal Conductivity of 6N-class Very High Pure Aluminum*

40,000 W/m/K @ 6K

6N Aluminum

5N up Al
RRR=3000

2N Aluminum
~Type A-1070

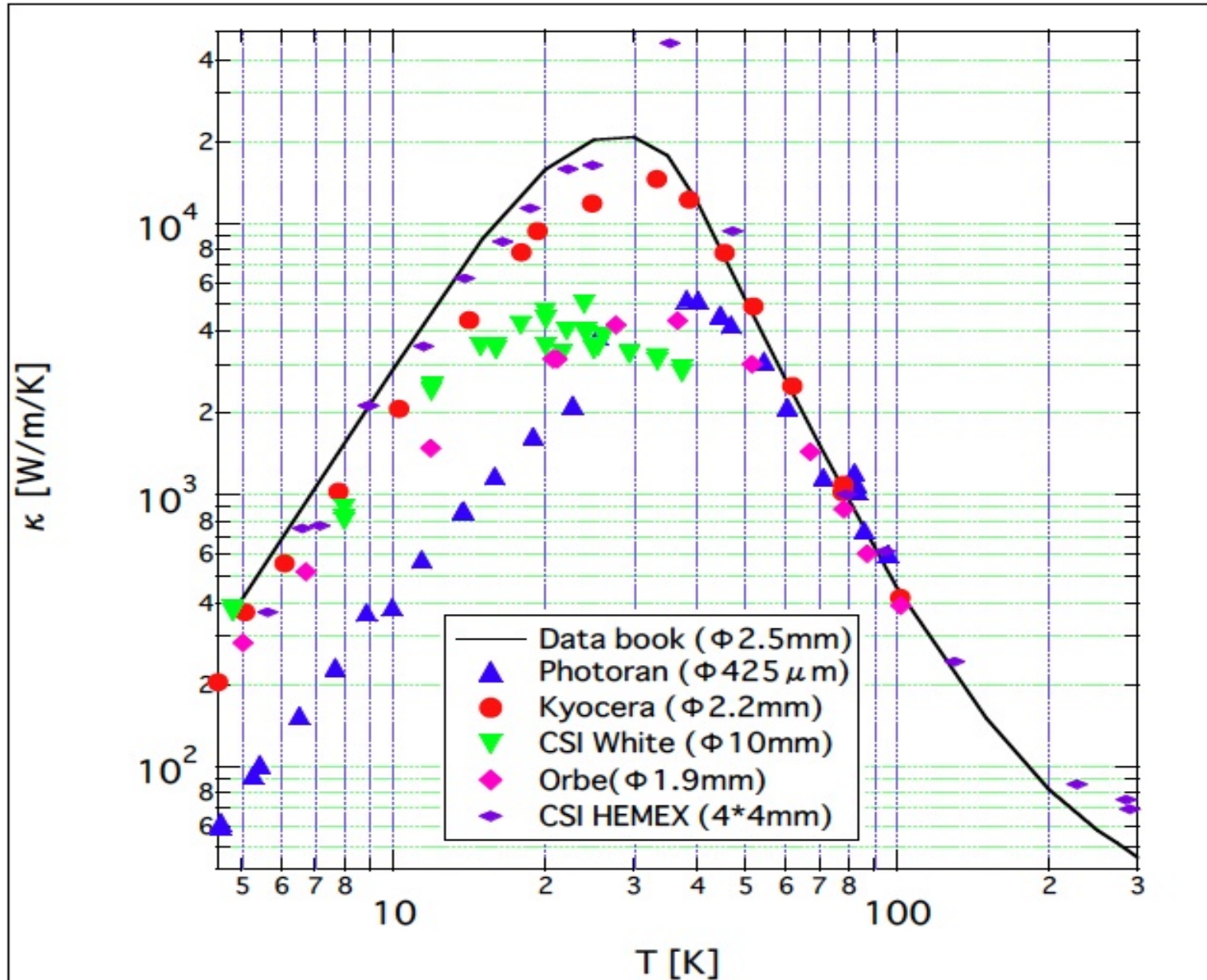


Cost:

5N8 > 2N Aluminum

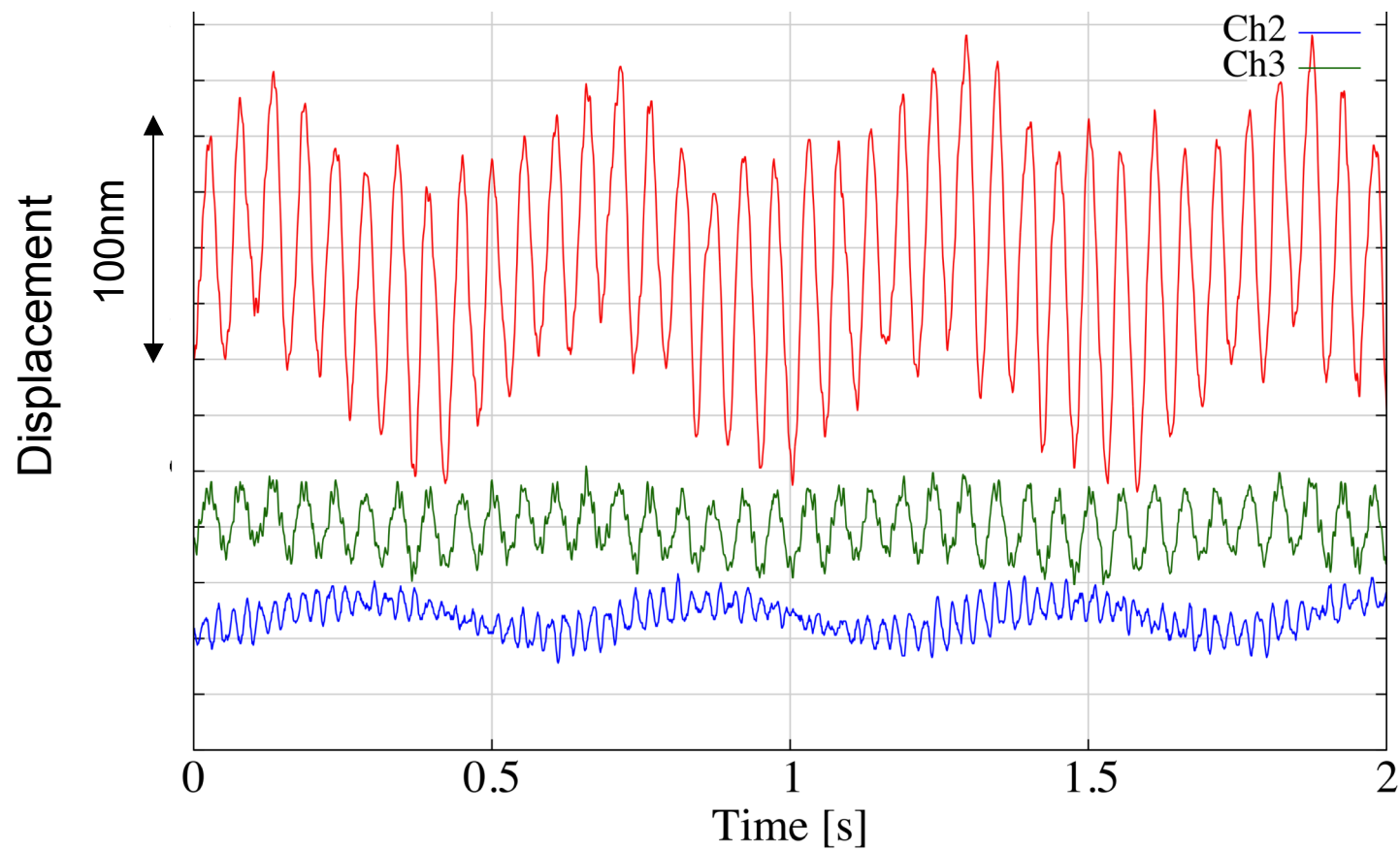
We must put the right material in the right position.

Sapphire(単結晶アルミナ)熱伝導率比較

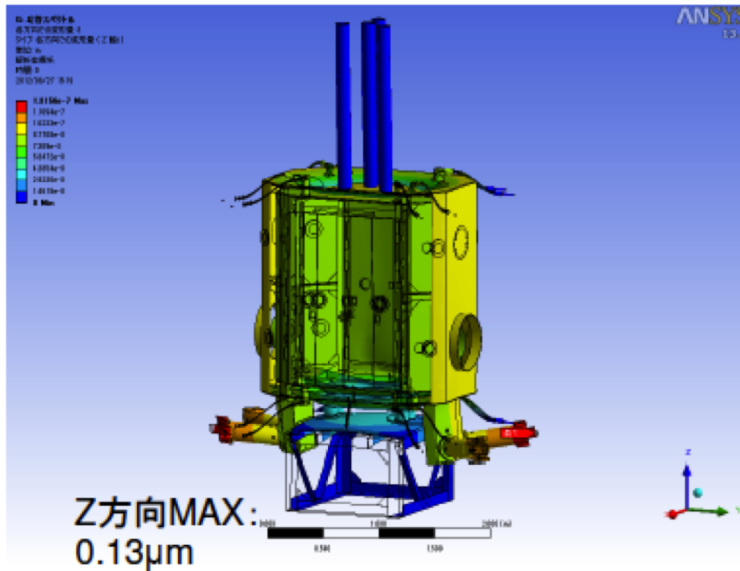
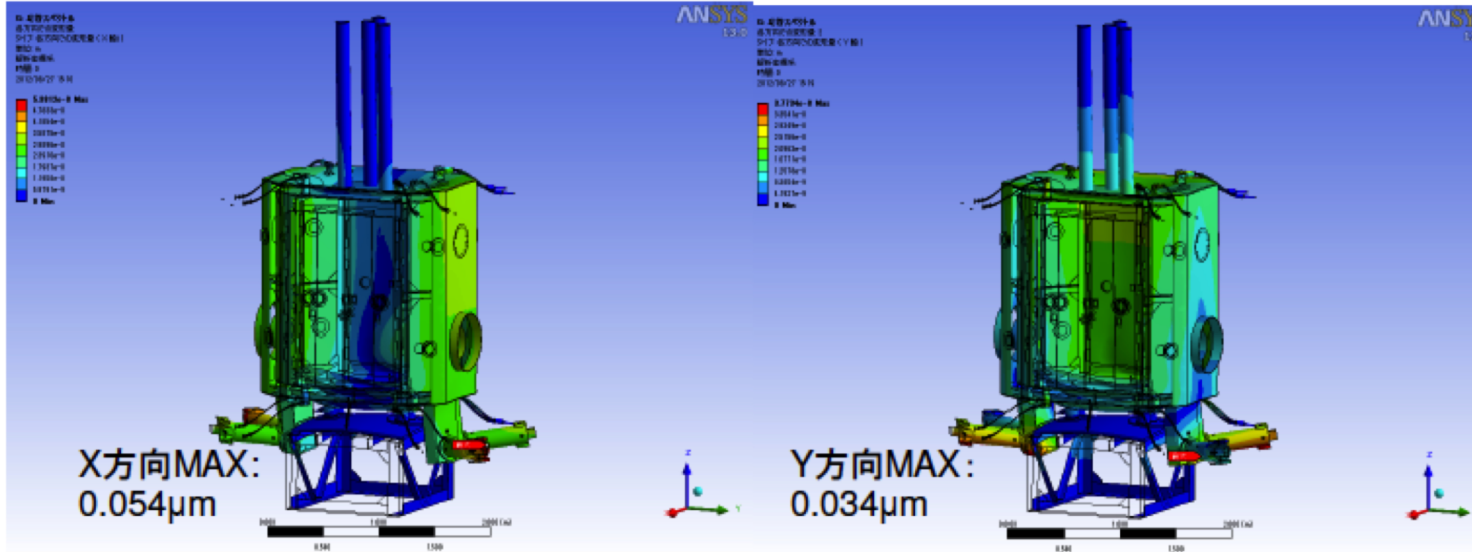


Vibration on the 8K cooling path

4K Cooler Unit No.7



クライオスタットシールドの周波数応答 冷却路

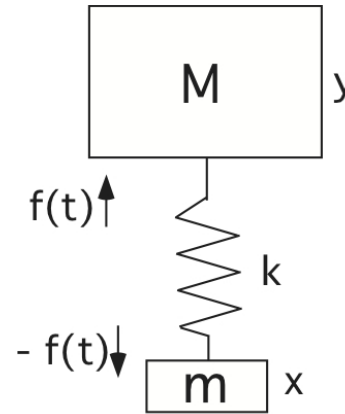
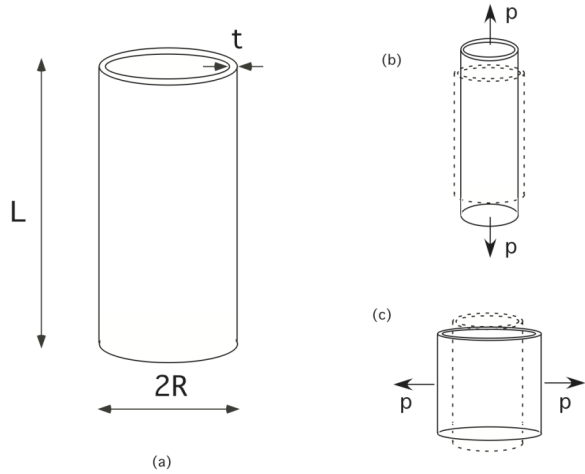


OCLIOの地盤振動の変位スペクトルデータを
8K伝熱バーに入力したときの
応答スペクトル結果
計算方法として自乗和平方根法 (SRSS)
を用い減衰率を0.05として
応答の最大値を求めた

X方向MAX:0.054 μ m ← 1.5 μ m
Y方向MAX:0.034 μ m ← 0.48 μ m
Z方向MAX:0.13 μ m ← 0.43 μ m

2312の場合と比べて変位はX1/30, Y1/15, Z1/3程度
になっている

内圧によるパイプの変形とPTCの振動モデル



$$M \ddot{y} + k(y - x) = f(t)$$

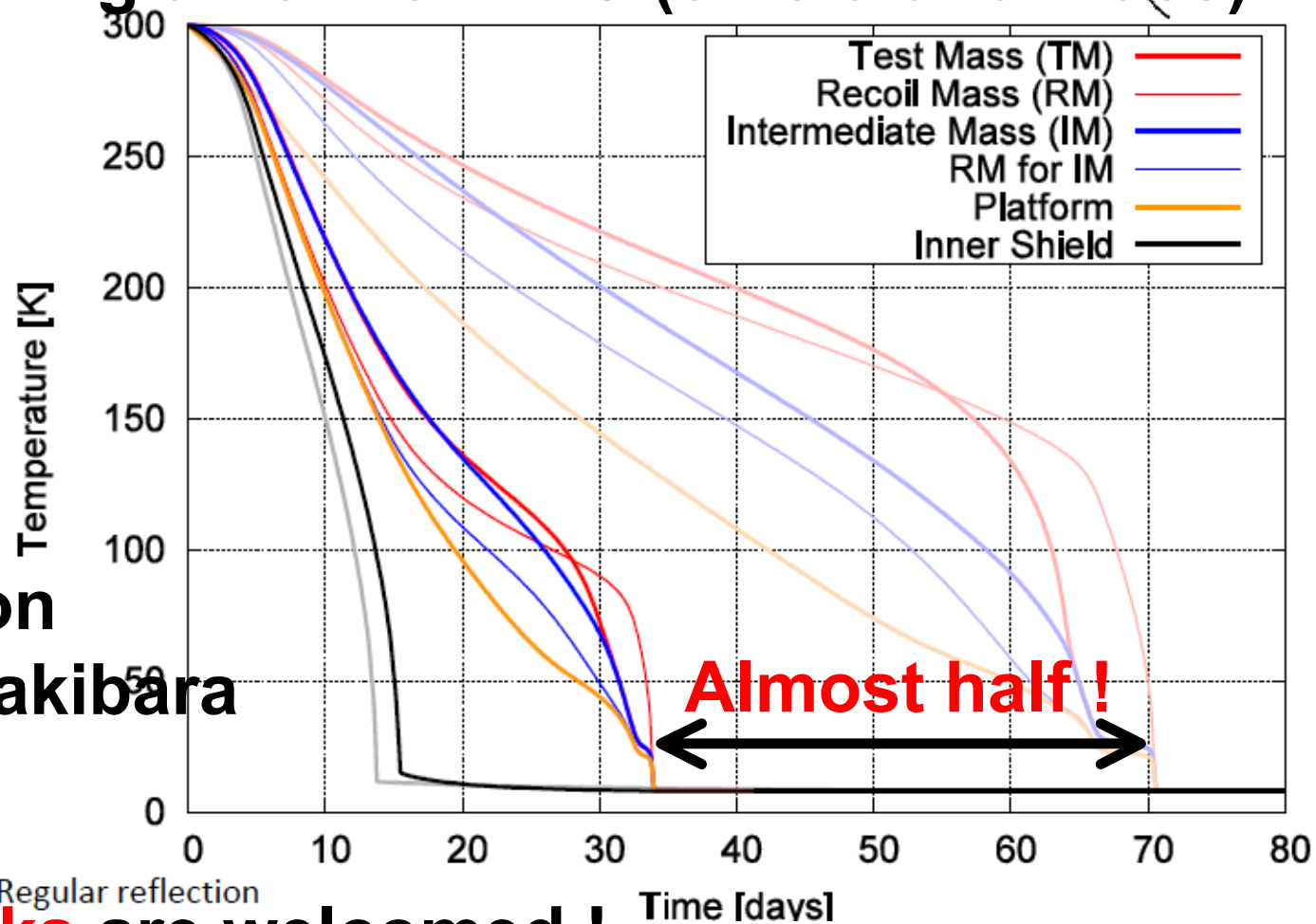
$$m \ddot{x} + k(x - y) = -f(t)$$

$$\Delta L = \left(\frac{1}{2} - \nu \right) \frac{pRL}{tE}$$

Cryogenic payload

Initial cooling time

Initial cooling time with DLC (shield and mass)



Calculation
by Y. Sakakibara

Other tricks are welcomed !